

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

FELIPE SANTOS DE CASTRO

ANÁLISE ESTRUTURAL EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CHAPAS DE AÇO  
ENRIJECIDAS POR REFORÇADORES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

Joinville

2016

FELIPE SANTOS DE CASTRO

ANÁLISE ESTRUTURAL EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CHAPAS DE AÇO  
ENRIJECIDAS POR REFORÇADORES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel Engenharia Naval da Universidade  
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de  
Joinville

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2016

ANÁLISE ESTRUTURAL EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CHAPAS DE AÇO  
ENRIJECIDAS POR REFORÇADORES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

FELIPE SANTOS DE CASTRO

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 02 de dezembro de 2016.

Banca Examinadora:

---

Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi  
Presidente/Orientador

---

Dr. Eng. André Mitsuo Kogishi  
Coorientador

---

Dr. Eng. Marcos Alves Rabelo  
Membro

## AGRADECIMENTOS

À meus pais Antenor Paes de Castro e Maristela Ruiz dos Santos pelo amor incondicional e todo o suporte em todas as etapas da minha vida.

À meus irmãos Fernando e Fabiana pelo companheirismo ao longo de toda a minha vida.

À toda minha família pelo carinho e apoio direto indireto para que este trabalho pudesse ser concretizado, em especial minha avó Maria Joaquina.

À minha namorada Jackeline Araújo pela compreensão, carinho, incentivo e contribuição para este trabalho. Mesmo longe não deixou faltar incentivo e teve paciência para me fazer não desistir nunca, tendo grande contribuição neste trabalho.

Aos amigos que a graduação me proporcionou conhecer, em especial Gabriel Pires, Ramon Fernandes, Rodrigo Michels, Thiago Labes, Evandro Machado, Marco Coppini, Caio Galhardi, William Schulze, Leonardo Melo, Fernando Roesner, Lucas Coelho, Guilherme Moraes, Thomaz Lascale, Hector Lisboa, Juan Matos, Marcelo Hermann por todo apoio ao longo dessa jornada e as histórias que dividimos juntos.

Aos amigos que o intercâmbio me proporcionou conhecer fora do Brasil.

Ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, por sua dedicação, paciência e sabedoria em todos os momentos, pelas ajudas mesmo que longe na confecção deste trabalho e por acreditar em todos os momentos que este trabalho se concretizaria, e por toda sua contribuição para com o Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao meu coorientador e supervisor de estágio André Mitsuo Kogishi por todo o suporte fornecido para a realização dos experimentos dentro do IPT e por compartilhar seus conhecimentos e experiências e que foram de suma importância para a concretização deste trabalho.

Aos amigos Evandro Machado, pela aquisição dos materiais utilizados na confecção dos modelos, e Hector Lisboa por todo o suporte prestado para o andamento da construção do experimento.

À todos os funcionários do IPT, em especial o David, que me auxiliou em muitos momentos na montagem do experimento e compartilhou toda sua experiência, o Luiz Agostini

por ter sido de fundamental importância na realização e acompanhamento dos ensaios realizados, e ao José Carlos Zanutto pela experiência compartilhada ao longo desse processo.

Aos meus colegas de estágio do IPT, em especial a Geovana Folle que a todo momento acreditou e me incentivou a não desistir nunca.

## RESUMO

Painéis reforçados de aço são estruturas comumente utilizadas na composição de navios e sistemas oceânicos em geral. É de grande importância que a disposição desses elementos seja feita de uma maneira eficiente, uma vez que a composição das tensões nestes tendem a apresentar um comportamento não trivial dependendo da configuração topológica de reforços, e o uso de ferramentas que busquem avaliar esse comportamento é essencial. Este estudo busca realizar uma análise pelo método dos elementos finitos e experimentos físicos com corpos de provas submetidos a carregamentos uniformes laterais com duas condições de contorno diferentes. A ferramenta numérica teve seus parâmetros de entrada ajustados visando a melhoria na performance dos resultados. Os corpos de prova foram projetados, construídos, instrumentados, montados na estrutura de apoio e ensaiados experimentalmente de maneira isonômica para todas as configurações de reforços. Os resultados obtidos em ambas as abordagens de análise foram comparados e mostraram similaridade para as duas condições de contorno, e os modelos numéricos foram ranqueados de acordo com a relação tensão/massa.

**Palavras-chave:** Painéis reforçados. Configuração topológica. Método dos elementos finitos. Ensaios experimentais.

## ABSTRACT

Steel stiffened plates are structures commonly used on ship and ocean systems structural composition. It is of great importance that these elements arrangement be made efficiently, once the stress composition presents a non-trivial behavior depending on the topologic stiffeners configuration, and the use of tools that seek to evaluate this behavior is essential. This paper seeks to perform an analysis using the finite element method and real experiments models submitted to lateral uniform loads having two boundary conditions for their edges. The numerical tool had its inputs adjusted in order to improve the results performance. The physical models were designed, built, instrumented, assembled on support structure and experimentally tested in an isonomic way for all the stiffener arrangement. The obtained results on both analysis approaches were compared and showed similarity for the two boundary conditions, and the numerical models were ranked according their stress/mass relation.

**Keywords:** Stiffened plates. Topologic arrangement. Finite elements method. Experimental tests.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Componentes de carregamento estático em um casco .....  | 17 |
| Figura 2 – Estrutura primária, secundária e terciária .....  | 18 |
| Figura 3 – Valores para deflexão e momento fletor máximo com a variação da razão de aspecto para chapa engastada.....  | 20 |
| Figura 4 – Valores para deflexão e momento fletor máximo com a variação da razão de aspecto para chapa simplesmente apoiada.....                             | 21 |
| Figura 5 – Variação do coeficiente de tensão máxima para chapas retangulares sobre pressão uniforme lateral.....   | 21 |
| Figura 6 – Variação do coeficiente de deflexão máxima para chapas retangulares sobre pressão uniforme lateral.....   | 22 |
| Figura 7 – Painel reforçado como parte estrutural de um navio .....  | 23 |
| Figura 8 – Efeito <i>shear lag</i> em vigas com flanges e largura efetiva de chapeamento.....  | 24 |
| Figura 9 - Extensômetro elétrico de resistência.....   | 27 |
| Figura 10 – Configuração da ponte de Wheatstone .....  | 28 |
| Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados .....   | 29 |
| Figura 12 – Configuração dos reforçadores nos corpos de prova.....   | 31 |
| Figura 13 – SOLID187 .....   | 33 |
| Figura 14 – Corpo de prova 1x1 após a geração de malha .....   | 34 |
| Figura 15 – Vista perspectiva dos corpos de prova .....  | 36 |
| Figura 16 – Aparência final dos corpos de prova construídos.....   | 37 |
| Figura 17 – Área de seção do perfil selecionado para compor a estrutura do experimento em mm .....   | 38 |
| Figura 18 – Vista em perspectiva da estrutura de apoio do experimento .....  | 38 |
| Figura 19 – Vista de corte para a montagem de apoio simples (esquerda) e engaste (direita).....  | 39 |
| Figura 20 – Configuração de um dos extensômetros colados nos corpos de prova .....   | 41 |
| Figura 21 – Posição dos extensômetros em mm.....   | 41 |
| Figura 22 – Prensa hidráulica SHIMADZU-UH-500kNI.....  | 42 |
| Figura 23 – Variação da tensão com o aumento da pressão aplicada nos corpos de prova na direção longitudinal e transversal na situação de apoio simples..... | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24 – Variação da tensão com o aumento da pressão aplicada nos corpos de prova na direção longitudinal e transversal na situação de engaste..... | 46 |
| Figura 25 – Esquemático da posição das cantoneiras utilizadas para engastar os corpos de prova .....   | 47 |
| Figura 26 – Comportamento dos deslocamentos na direção ortogonal a chapa engastada sob uma pressão de 7,5 mca .....                                    | 51 |
| Figura 27 - Comportamento dos tensões na direção y para chapa engastada sob uma pressão de 7,5 mca.....  | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dimensões dos modelos simulados e testados .....  | 32 |
| Tabela 2 – <i>Inputs</i> da simulação numérica com software CAE .....                                  | 34 |
| Tabela 3 – Valores de carga e tensão para simulação CAE da estrutura de suporte .....                  | 40 |
| Tabela 4 – Valores analíticos e numéricos de deflexão e tensão máxima para chapa sem reforçadores..... | 43 |
| Tabela 5 – Coeficientes de eficiência estrutural obtidos dos experimentos .....                        | 48 |
| Tabela 6 – Coeficientes de eficiência estrutural para todas as simulações com reforços .....           | 50 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| $a$             | Maior dimensão de uma unidade de chapeamento  |
| $b$             | Menor dimensão de uma unidade de chapeamento  |
| $b_1$           | Largura efetiva de chapeamento  |
| $w$             | Deflexão da chapa na direção normal   |
| $w_{\max}$      | Deflexão máxima da chapa na direção normal  |
| $p$             | Pressão na chapa  |
| $D$             | Módulo de rigidez a flexão  |
| $t$             | Espessura da unidade de chapeamento   |
| $E$             | Módulo de elasticidade  |
| $\nu$           | Coefficiente de Poisson   |
| $\sigma_{\max}$ | Tensão máxima   |
| $\sigma_x$      | Tensão na direção $x$   |
| $\sigma_y$      | Tensão na direção $y$   |
| $\sigma_e$      | Tensão de escoamento  |
| $k_\sigma$      | Coefficiente de tensão máxima   |
| $k_w$           | Coefficiente de deflexão máxima   |
| $X$             | Constante para cálculo de deflexão máxima ( $X=1/384$ para condição engastada e $X=5/384$ para condição simplesmente apoiada) |
| $t_r$           | Espessura do reforçador   |
| $h_r$           | Altura do reforçador  |
| $R$             | Resistência elétrica  |
| $E_{i/o}$       | Tensão elétrica de entrada/saída  |
| $K$             | <i>Gage factor</i>  |
| $\varepsilon$   | Deformação  |

## SUMÁRIO

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....   | 14 |
| 1.1.   | OBJETIVO GERAL .....   | 15 |
| 1.2.   | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 15 |
| 2.     | REVISÃO TEÓRICA.....   | 16 |
| 2.1.   | CARGAS QUE ATUAM NO NAVIO .....                                    | 16 |
| 2.1.1. | Cargas estáticas.....  | 17 |
| 2.2.   | ESTRUTURA DO NAVIO.....  | 17 |
| 2.2.1. | Estruturas terciárias .....  | 19 |
| 2.2.2. | Painéis reforçados.....  | 22 |
| 2.3.   | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....                                  | 25 |
| 2.4.   | EXTENSOMETRIA .....  | 26 |
| 2.5.   | AQUISIÇÃO DE DADOS.....  | 28 |
| 3.     | METODOLOGIA.....   | 31 |
| 3.1.   | SIMULAÇÃO CAE .....  | 32 |
| 3.2.   | EXPERIMENTO FÍSICO.....  | 35 |
| 3.2.1. | Confecção dos corpos de prova.....                                 | 35 |
| 3.2.2. | Confecção da estrutura de apoio.....                               | 37 |
| 3.2.3. | Instrumentação e montagem.....                                     | 40 |
| 4.     | RESULTADOS.....  | 43 |
| 4.1.   | ANÁLISE DE RESULTADOS ENTRE ABORDAGEM ANALÍTICA E<br>NUMÉRICA..... | 43 |
| 4.2.   | ANÁLISE ENTRE MODELOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS.....               | 44 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.3. | COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS FÍSICOS .....   | 48 |
| 4.4. | ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS DESLOCAMENTOS E<br>TENSÕES DOS MODELOS NÚMERICOS IDEAIS ..... | 49 |
| 5.   | CONCLUSÃO .....  | 53 |
|      | REFERÊNCIAS.....   | 55 |
|      | APÊNDICE A – Considerações para simulação da estrutura de apoio .....                      | 58 |
|      | APÊNDICE B – Informações técnicas dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais    | 60 |
|      | APÊNDICE C – Comportamento das tensões e deformações para os modelos numéricos ideais      | 61 |

## 1. INTRODUÇÃO

Estruturas navais e oceânicas são submetidas a carregamentos externos quando estão ou não em operação (HUGHES, 2010). As placas metálicas são os elementos estruturais presentes em diversos locais de uma embarcação, tais como decks, costados e fundos. Entre os diversos arranjos estruturais possíveis, a utilização de chapas finas reforçadas por grelhas ortogonais, tradicionalmente se mostram disposições com grande eficiência estrutural. É essencial que tais elementos sejam projetados e posicionados da maneira mais eficiente possível, seja para prover maior coeficiente de segurança ou conseqüente redução com custos de projeto, fabricação e operação (LAMB, 2003). Entre as etapas de projeto de uma embarcação está a concepção de seu layout estrutural e seus possíveis métodos de falha, como por exemplo, o comprometimento estrutural de painéis navais quando sujeitos a condições de operação. (HUGHES, 2010)

Esse estudo tem a motivação baseada na configuração de painéis navais presentes em embarcações feitas de aço . Quando enrijecidas transversal e longitudinalmente, placas navais apresentam comportamento estrutural complexo em termos de rigidez, e têm sua resposta estrutural fortemente afetada pelo posicionamento e dimensionamento de seus reforçadores (KERFOOT; OSTAPENKO, 1967).

Com o uso das metodologias mais empregadas para painéis reforçados, sendo elas o método da teoria simples de viga, método da chapa ortotrópica e o método de grelhas, é possível a obtenção dos valores analíticos para deflexão e tensão máximas. Espera-se obter esses valores a partir de simulações numéricas e o uso de *Finite Element Analysis* (FEA) em softwares especializados de forma a balizar as decisões relacionadas com a configuração estrutural dos corpos de prova utilizados no experimento físico.

O experimento físico tem o propósito de validar os valores obtidos com a simulação por elementos finitos e as hipóteses assumidas para o mesmo. Diferentes combinações de reforços ortogonais foram construídas, além de uma configuração com reforços posicionados na diagonal, de forma a avaliar seu desempenho sob as mesmas condições que os corpos de prova restantes.

A experimentação laboratorial consiste em placas de aço 1020 com reforçadores retangulares soldados longitudinalmente e transversalmente. As chapas tem os quatro lados ou

simplesmente apoiados ou engastados. O carregamento é uniforme sobre o lado sem reforçadores. A construção do experimento foi efetuada no Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, e os testes foram executados na Seção de Geotecnia do Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura, todos pertencentes ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), localizado na cidade de São Paulo.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

Conduzir uma análise numérica e experimental com diferentes configurações de painéis navais enrijecidos, submetidos a carregamentos uniformes laterais. O estudo visa à construção do experimento físico que simule de forma mais fiel possível uma condição real de carregamento, e também a elaboração de coeficientes que possam mensurar a performance das configurações adotadas para os corpos de prova.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Definir conjunto de corpos de prova a serem ensaiados;
- ✓ Realizar análise numérica das diferentes configurações de painéis navais enrijecidos;
- ✓ Construir corpos de prova;
- ✓ Construir o experimento físico que permita testar todas as com as condições de carga e contorno estabelecidas;
- ✓ Ensaiar os corpos de prova com carregamentos uniformes;
- ✓ Comparar resultados das simulações com experimentos reais
- ✓ Elaborar coeficientes a fim de mensurar a eficiência estrutural dos corpos de prova.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta o referencial teórico relativo as cargas que atuam no navio, estrutura do navio, estudo de painéis reforçados e métodos de elementos finitos, extensometria e aquisição de dados de experimentos físicos.

### 2.1. CARGAS QUE ATUAM NO NAVIO

Segundo Mansour e Liu (2008) é conveniente dividir os carregamentos que agem em um navio em quatro categorias, que são baseadas parte pela natureza do carregamento e parte pela natureza de resposta da embarcação; são elas: cargas estáticas; cargas dinâmicas de baixa frequência; cargas dinâmicas de alta frequência; cargas de impacto. Hughes (2010) afirma que, sempre que possível, para minimizar tempo de computação de valores, análises estáticas e dinâmicas devem ser executadas separadamente.

Cargas estáticas são aquelas que variam lentamente com o tempo e apresentam mudança quando o peso total da embarcação muda, seja ele resultado por exemplo de carregamento e descarregamento de cargas, consumo de combustível ou até mesmo modificações no navio.

Cargas dinâmicas de baixa frequência são carregamentos que variam no tempo com períodos compreendidos de segundos até alguns minutos, apresentando baixas frequências quando comparados com a resposta vibratória do casco de um navio e seus componentes. Variações de pressão induzidos por ondas e causadas pelo movimento oscilatório do navio são alguns exemplos de cargas de baixa frequência.

Cargas dinâmicas de alta frequência são aquelas que, além de variar com o tempo, possuem uma alta frequência capaz de induzir uma resposta vibratória a estrutura de um navio, podendo resultar em fenômenos de ressonância. Exemplos desse tipo de cargas são: carregamentos provenientes de maquinário rotativo com folga e carregamentos hidrodinâmicos provocados por propulsores ou apêndices.

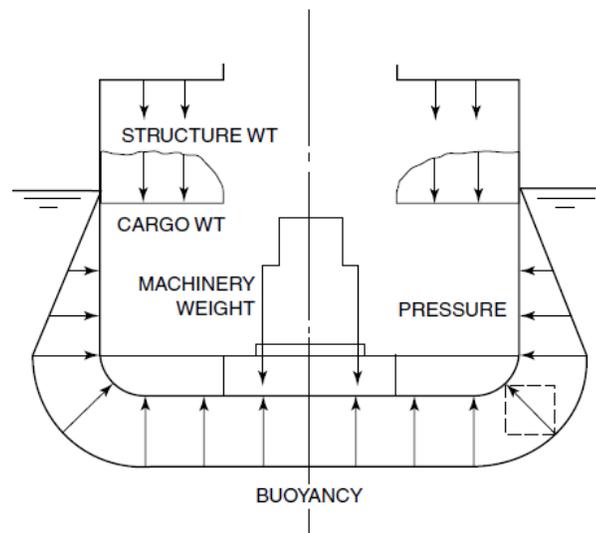
Já as cargas de impacto são carregamentos dinâmicos resultantes dos fenômenos de *slamming*, que é a colisão do fundo da embarcação com a água e impacto de ondas nas regiões do

bulbo e sobre partes da estrutura do casco, incluindo o efeito de *green water*, por exemplo, que Faltinsen (2005) descreve como a água que atinge a região do convés principal que é submersa por conta do encontro da embarcação com ondas grandes.

### 2.1.1. Cargas estáticas

Mansour e Liu (2008) afirmam que para análise de carregamento estáticos é necessário considerar a embarcação em águas calmas. Esta análise é composta por forças de empuxo e forças gravitacionais, ou pesos. A força de empuxo é resultante da distribuição de pressão hidrostática ao longo de toda a área externa imersa do navio, perpendicular a superfície da água e direcionada para cima. As forças de peso são correspondentes as massas distribuídas em todo o navio multiplicadas pela aceleração da gravidade, e são sempre direcionadas para baixo. Esses sistemas de forças são ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Componentes de carregamento estático em um casco



Fonte: Mansour e Liu (2008, p. 5).

## 2.2. ESTRUTURA DO NAVIO

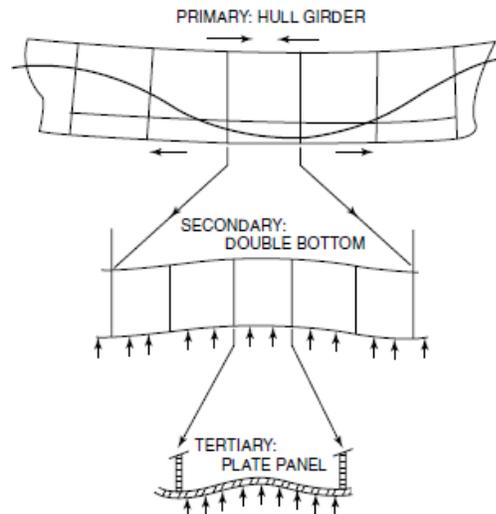
Cascos de embarcações são estruturas complexas, e sua análise exata está além do escopo atual disponível em métodos e técnicas computacionais. Algumas formas de análise de estruturas navais devem ser realizadas como parte de um procedimento racional de projeto. Uma

aproximação da análise e projeto dessas estruturas complexas é dividi-las em unidades menores, tornando-as mais simples de analisar (KERFOOT E OSTAPENKO, 1967).

De acordo com Mansour e Liu (2008), carregamentos individuais podem ter efeitos estruturais locais e globais. A partir do arranjo geométrico dos componentes estruturais de um navio, suas respostas de tensão e deflexão assumem determinados padrões, e por conta disso é conveniente dividi-las em estruturas primárias, secundárias e terciárias.

Para Cardoso (1994), a abordagem global para o cálculo de deformação em uma embarcação como um todo é semelhante ao de uma viga, e é denominada deformação primária. A partir desta, outras duas parcelas são originadas: deformação dos painéis entre as anteparas e a deformação dos longitudinais leves entre dois elementos transversais adjacentes, que é chamada de deformação secundária. Por fim, as unidades de chapeamento (chapas normalmente retangulares limitadas por enrijecedores adjacentes) deformadas pela pressão lateral são assumidas como deformações terciárias. Conclusivamente, a estrutura terciária faz parte da secundária e esta por sua vez tem elementos em comum com a estrutura primária. A Figura 2 descreve a composição dessas estruturas.

Figura 2 – Estrutura primária, secundária e terciária



Fonte: Mansour e Liu (2008, p. 6).

Uma porção de chapa do fundo do navio, por exemplo, pode sofrer deformações primárias em uma análise de viga-navio, secundárias quando se estuda o comportamento entre anteparas, e terciárias quando se verifica as unidades de chapeamento.

### 2.2.1. Estruturas terciárias

A estrutura terciária é formada pelas unidades de chapeamento e são projetadas levando-se em consideração as tensões admissíveis e também problemas de instabilidade (CARDOSO, 1994).

A resposta terciária refere-se a tensões de flexão e deflexões nos painéis individuais do chapeamento que são limitados pelos reforços de estruturas secundárias. Em muitos casos, o carregamento que induz esta resposta é proveniente da pressão do fluido, seja ela da água a qual o navio está imerso ou até mesmo de alguma carga seca na parte interna. Este carregamento é normal e distribuído ao longo da superfície do painel. Em alguns casos, as proporções, orientação, e localização do painel são tais que a pressão pode ser assumida como constante ao longo de sua área (MANSOUR; LIU, 2008).

Segundo Mansour e Liu (2008), a resposta deflectiva de uma chapa isotrópica é obtida a partir da solução de um caso especial das equações da teoria da chapa ortotrópica, e é dado pela relação

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x, y)}{D}$$

Condições de contorno apropriadas devem ser selecionadas a fim de representar o grau de fixidez das bordas da chapa.

Hughes (2010) sugere que para o cálculo de tensões terciárias e deflexões no chapeamento, deve-se assumir simetria de carregamento e que os fenômenos ocorrem de acordo com a teoria das pequenas deflexões. Esta teoria assume que as chapas são isotrópicas, homogêneas, apresentam razões  $a/t$  e  $b/t$  suficientemente altas, e que a deflexão máxima não deve ser alta comparada com a espessura da chapa ( $w_{\max} > 0,7t$ ). Para a última hipótese, caso a deflexão gerada seja muito maior que a espessura do painel, tensões terciárias no plano médio do mesmo podem aparecer e a teoria pode acabar não produzindo resultados precisos. Através dessa teoria, os valores para tensão máxima e deflexão máxima podem ser calculados pelas seguintes relações

$$\sigma_{\max} = k_{\sigma} \cdot p \left(\frac{b}{t}\right)^2$$

$$w_{\max} = k_w \cdot X \cdot p \cdot \frac{b^4}{D}$$

A partir do estudo de Timoshenko (1959) é possível obter uma relação gráfica da variação de  $k_w$  e  $k_{\sigma}$  com o aumento do valor da razão de aspecto. Este estudo sugere a resolução de equações diferenciais que foram suprimidas neste trabalho, mas podem ser conferidas na íntegra no estudo original. A Figura 3 e Figura 4 apresentam valores para deflexão e momentos máximos para as condições de engaste e apoio simples respectivamente, para a variação da razão de aspecto. É importante notar que Timoshenko (1959) assume que  $b$  é a maior dimensão da chapa e está direcionada ao longo do eixo  $y$ , enquanto  $a$  corresponde a aresta de menor lado da chapa e está direcionada ao longo de  $x$ , o qual ocorre o valor de maior magnitude para o momento fletor em ambas as condições de contorno. A variável  $q$  corresponde à pressão uniforme aplicada na chapa

Figura 3 – Valores para deflexão e momento fletor máximo com a variação da razão de aspecto para chapa engastada

| $b/a$    | $(w)_{x=0, y=0}$ | $(M_x)_{x=a/2, y=0}$ |
|----------|------------------|----------------------|
| 1.0      | $0.00126qa^4/D$  | $-0.0513qa^2$        |
| 1.1      | $0.00150qa^4/D$  | $-0.0581qa^2$        |
| 1.2      | $0.00172qa^4/D$  | $-0.0639qa^2$        |
| 1.3      | $0.00191qa^4/D$  | $-0.0687qa^2$        |
| 1.4      | $0.00207qa^4/D$  | $-0.0726qa^2$        |
| 1.5      | $0.00220qa^4/D$  | $-0.0757qa^2$        |
| 1.6      | $0.00230qa^4/D$  | $-0.0780qa^2$        |
| 1.7      | $0.00238qa^4/D$  | $-0.0799qa^2$        |
| 1.8      | $0.00245qa^4/D$  | $-0.0812qa^2$        |
| 1.9      | $0.00249qa^4/D$  | $-0.0822qa^2$        |
| 2.0      | $0.00254qa^4/D$  | $-0.0829qa^2$        |
| $\infty$ | $0.00260qa^4/D$  | $-0.0833qa^2$        |

Fonte: Modificado de Timoshenko (1959, p. 202)

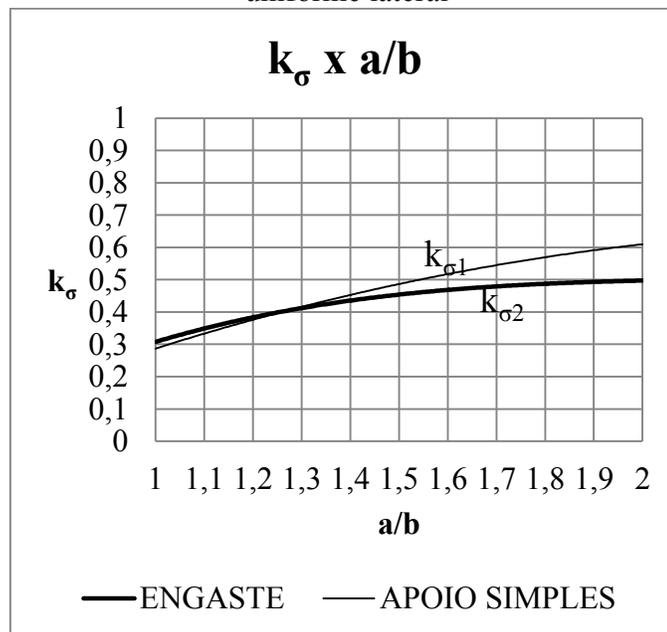
Figura 4 – Valores para deflexão e momento fletor máximo com a variação da razão de aspecto para chapa simplesmente apoiada

| $b/a$    | $w_{max}$<br>$= \alpha \frac{qa^4}{D}$ | $(M_x)_{max}$<br>$= \beta qa^2$ |
|----------|--|---------------------------------|
|          | $\alpha$                               | $\beta$                         |
| 1.0      | 0.00406                                | 0.0479                          |
| 1.1      | 0.00485                                | 0.0554                          |
| 1.2      | 0.00564                                | 0.0627                          |
| 1.3      | 0.00638                                | 0.0694                          |
| 1.4      | 0.00705                                | 0.0755                          |
| 1.5      | 0.00772                                | 0.0812                          |
| 1.6      | 0.00830                                | 0.0862                          |
| 1.7      | 0.00883                                | 0.0908                          |
| 1.8      | 0.00931                                | 0.0948                          |
| 1.9      | 0.00974                                | 0.0985                          |
| 2.0      | 0.01013                                | 0.1017                          |
| 3.0      | 0.01223                                | 0.1189                          |
| 4.0      | 0.01282                                | 0.1235                          |
| 5.0      | 0.01297                                | 0.1246                          |
| $\infty$ | 0.01302                                | 0.1250                          |

Fonte: Modificado de Timoshenko (1959, p. 120)

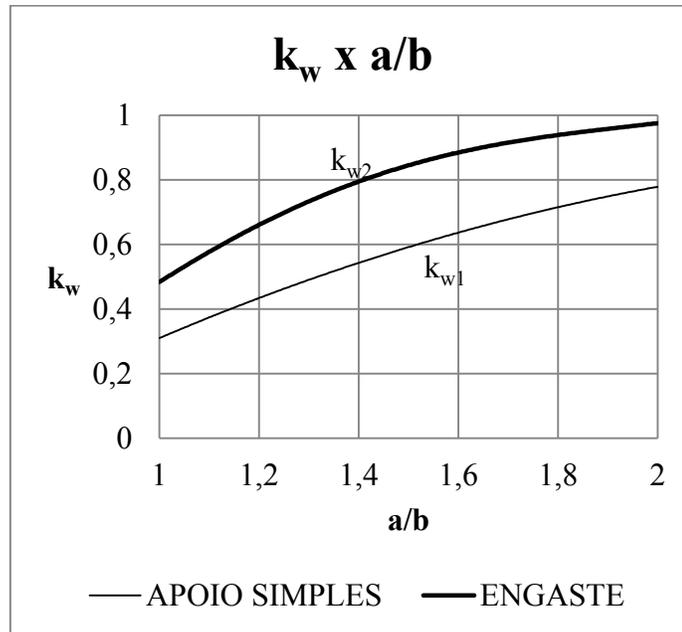
A partir da manipulação matemática dos valores encontrados na Figura 3 e Figura 4, obtêm-se as relações gráficas para tensão e deflexão máximas nas chapas, ou seja,  $k_\sigma$  e  $k_w$  para as duas condições de contorno. Elas são apresentadas na Figura 5 e Figura 6.

Figura 5 – Variação do coeficiente de tensão máxima para chapas retangulares sobre pressão uniforme lateral



Fonte: Autor.

Figura 6 – Variação do coeficiente de deflexão máxima para chapas retangulares sobre pressão uniforme lateral



Fonte: Autor.

É importante ressaltar que para a Figura 5 é assumido que o material em questão apresenta coeficiente de Poisson  $\nu=0,3$ , que segundo Callister (2007), é válido para corpos de aço em geral. A deflexão máxima acontece no centro da chapa, enquanto a maior magnitude para a tensão ocorre na borda da chapa do lado de maior dimensão.

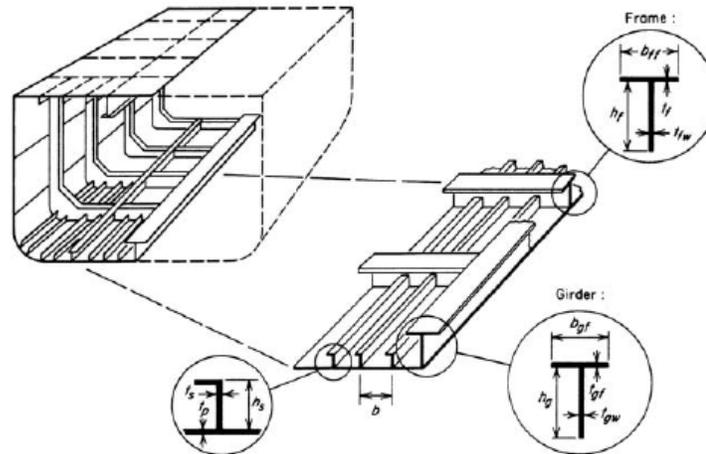
### 2.2.2. Painéis reforçados

Chapas enrijecidas são elementos eficientes que apresentam um alto acréscimo de força estrutural a partir de uma pequena adição de peso na forma de reforçadores. Entretanto, o mecanismo de colapso dessas chapas sob carregamento compressivo apresenta um problema complexo de engenharia devido a sua alta gama de combinações possíveis de geometria, materiais, condições de contorno e carregamentos entre chapas e reforçadores (GHAVAMI E KHEIMATI, 2006).

Painéis reforçados representam o elemento estrutural mais utilizado na estrutura de navios. Eles são unidos por elementos mais rígidos como anteparas longitudinais e transversais, cavernas, quilhas, etc. formando a estrutura do navio. Os painéis reforçados são formados por

uma chapa e vigas que atuam como reforçadores, geralmente em direções ortogonais, como podem ser visto na Figura 7. O objetivo das vigas é suportar o carregamento transversal que atua sobre o chapeamento, mantendo-o em sua posição e geometria de forma que suporte as cargas existentes no plano de estrutura, e transmitir estas cargas à estrutura do navio (OROZCO, 2009).

Figura 7 – Painel reforçado como parte estrutural de um navio



Fonte: Orozco (2009,p. 33).

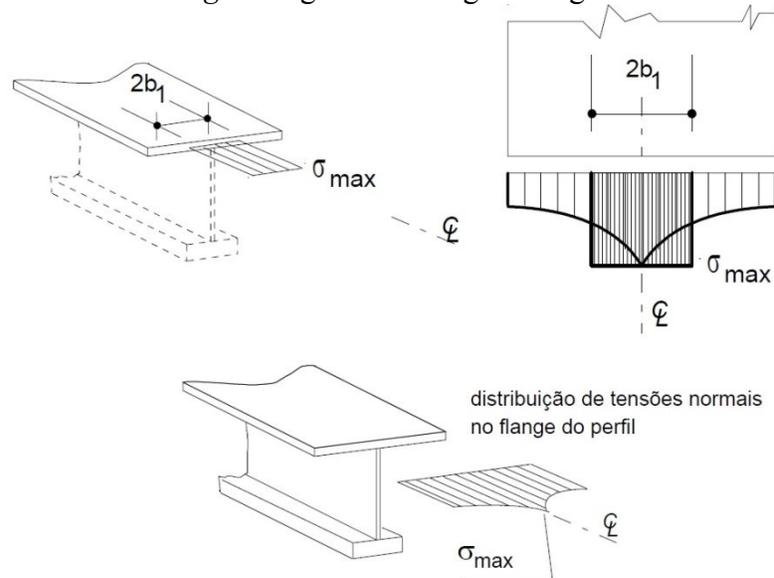
Os painéis reforçados, além de estanqueidade, conferem alta rigidez no sentido longitudinal e transversal à viga-navio. Eles devem ser projetados para suportar as tensões primárias, secundárias e terciárias, as quais são produto da flexão da viga-navio, cargas locais e carga lateral na chapa respectivamente (OROZCO, 2009).

Quando este tipo de painel é submetido à flexão, a chapa trabalha como flange dos reforços e, portanto, aumenta a rigidez do módulo de seção destas (HUGHES, 1998). O conceito da chapa trabalhando como flange dos reforçadores longitudinais e transversais, usualmente denominado como chapa colaborante, é amplamente utilizado no estudo de deflexão e tensão em painéis reforçados. Isto reduz a análise de painéis reforçados à aplicação da teoria de vigas de Euler-Bernoulli com um grande número de redundâncias (CLARKSON, 1965). Devido ao efeito de *shear lag*, a chapa ao trabalhar como flange do reforçador tem uma largura efetiva menor que a distância entre reforçadores (OROZCO, 2009).

A teoria de vigas estabelece que as tensões de flexão são diretamente proporcionais à distância do ponto considerado até o eixo neutro. Portanto, nas vigas formadas por alma e flanges, as tensões devem ser constantes ao longo dos flanges. Entretanto, em muitos modelos

físicos, a flexão não é causada por flexão pura (aplicação de momentos fletores nos extremos da viga) e sim por cargas transversais que são absorvidas pela alma da viga. Sob o efeito destas cargas, a alma da viga é curvada induzindo deformações máximas nos flanges. Essas deformações se originam na alma e somente atingem o flange por causa do cisalhamento. Estas tensões de cisalhamento e de flexão distorcem o flange em seu plano. Esta distorção é tal que, ao analisar um elemento retangular discreto no extremo do flange, o lado do elemento mais próximo da alma da viga apresenta um maior alongamento, ou seja, a deformação e tensão no sentido longitudinal são menores no lado interno deste (OROZCO, 2009). O aspecto significativo da distorção pelo cisalhamento é que as regiões mais afastadas do flange apresentam menores tensões de flexão e são portanto menos efetivas do que as regiões mais próximas, caracterizando o efeito de *shear lag*. Este efeito ocorre em qualquer viga com flanges largos sob cargas laterais. A Figura 8 apresenta uma representação desse efeito, bem como a largura efetiva do chapeamento (AUGUSTO, 2004).

Figura 8 – Efeito *shear lag* em vigas com flanges e largura efetiva de chapeamento



Fonte: Augusto (2004, p. 15).

Para determinar o efeito de *shear lag* sobre o estado de tensões das vigas, o valor máximo de tensão na junta alma-flange é considerado mais representativo que o valor nominal da tensão. Desta abordagem nasce o conceito de largura efetiva, que é definido como “a largura da chapa da qual, quando utilizada no cálculo do momento de inércia da seção transversal do

*perfil, resultará o valor “correto” da tensão máxima de flexão na junção alma-flange, utilizando-se a teoria simples de viga” (OROZCO, 2009 apud HUGHES, 1988).*

### **2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Um modelo de simulação é uma representação matemática de um processo real para “simular” o seu comportamento. Na área de engenharia é muito comum o uso de modelos de simulação de processos para avaliação de desempenho, otimização de condições de operação ou dimensionamento de equipamentos. Estas tarefas somente terão sucesso se o modelo conseguir representar com fidelidade (e de uma forma simples) o comportamento do processo (GUT, 2016)

O método dos elementos finitos (MEF) é utilizado para na resolução de problemas físicos em análises e projetos de engenharia. É o método com a maior escala de aplicação em engenharia de simulação e pode ser integrado com modernas ferramentas de CAD/CAM como parte de um conceito CAE. (PEDATZUR, 2004)

Os problemas estruturais em análises de engenharia usualmente compreendem um componente com propriedades materiais conhecidas e submetido a diversas condições de carga e de contorno. A idealização de um modelo físico em um modelo matemático requer certas suposições que conduzem à formulação de equações diferenciais que governam seu equilíbrio. O método dos elementos finitos resolve este modelo matemático. Ele é um procedimento numérico para determinação de quantidades de campo em sistemas contínuos tais como velocidades, temperaturas, deslocamentos, etc. No caso particular de sistemas estruturais (mecânicos), as quantidades de campo descrevem as forças e deslocamentos os quais por intermédio das equações constitutivas (relações tensão-deformação) permitem obter os campos de tensões e deformações agentes sobre a estrutura. O corpo contínuo (estrutura ou componente mecânico) é subdividido (discretizado) em um número finito de partes (elementos) conectadas entre si por intermédio de pontos discretos que são designados nós. Da montagem dos elementos e a imposição de condições de equilíbrio e continuidade nos nós resulta um sistema de equações algébricas simultâneas cuja solução fornece as quantidades nos campos nodais. Considerando que a solução de elementos finitos é uma solução aproximada, ela tem uma margem de erro que pode ser reduzida refinando-se a malha do modelo. Com o modelo matemático adequado, refinado e com

uma boa discretização, é possível obter resultados com suficiente precisão para as aplicações de engenharia. (OROZCO, 2008)

Três estágios estão envolvidos na utilização do MEF: pré-processamento, processamento e pós processamento. Inserção de dados tais como geometria do corpo de análise, condições de contorno, carregamentos e geração de malha no software CAE são exemplos que pertencem a etapa de pré-processamento. O estágio de processamento envolve geração de rigidez, modificação de rigidez e solução de equações, resultando na avaliação de variáveis nodais. Outras derivadas quantitativas tais como gradientes e tensões, podem ser avaliadas nesse estágio da modelagem. O pós-processamento trata da apresentação dos resultados processados, que podem incluir configurações de deformação, modos de vibrar, distribuição de tensão, e outros. (DONGQI, 2004)

## **2.4. EXTENSOMETRIA**

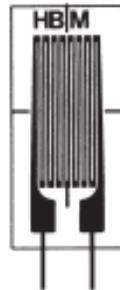
A forma usual de avaliar partes estruturais de máquinas, construções, veículos, aeronaves, etc., é baseada no cálculo da resistência dos materiais. Este método é satisfatoriamente previsível quando as cargas atuantes são conhecidas qualitativa e quantitativamente. Problemas podem surgir quando as cargas são desconhecidas ou quando podem apenas ser grosseiramente aproximadas. Antigamente o risco devido ao sobrecarregamento de estruturas era minimizado pela prática do superdimensionamento. Entretanto, estratégias modernas de projeto demandam economia em matérias, em parte por razões de custo ou até mesmo redução de peso. A fim de satisfazer requerimentos de segurança e prover um adequado tempo de vida para um componente, as tensões no material devem ser conhecidas. Portanto, medições sob condições operacionais são necessárias. (HOFFMANN, 2012)

A quantidade empregada na estimativa de partes estruturais é o estresse mecânico o qual o material está sujeito. Tensões mecânicas são praticamente impossíveis de se determinar durante condições operacionais. Um método prático para determinação experimental da tensão em materiais é baseado na Lei de Hooke, que expressa o relacionamento entre a tensão no material e sua deformação resultante. Essa deformação ocorre na superfície dos objetos e é, portanto, acessível para medição. (HOFFMANN, 2012)

Os dispositivos utilizados para medição de deformação são chamados de extensômetros. A medição utilizando extensômetros assume que a deformação no objeto investigado é transferida sem perda para o extensômetro, e requer uma união muito forte entre ele e o objeto em estudo. Um tipo desses dispositivos, que tem ampla escala de utilização, é chamado de extensômetro elétrico de resistência. Ele é um elemento sensível que transforma variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico depositado sobre uma fina lâmina feita de uma liga resistiva, que pode ser colada na superfície em análise. A Figura 9 apresenta um modelo de extensômetro elétrico de resistência. Ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando assim a deformação da superfície (HOFFMANN, 2012).

As principais características do extensômetro elétrico são sua alta precisão na medida; ótima relação custo/benefício; linearidade; resposta dinâmica; flexíveis, portanto, fáceis de usar e ampla variedade de geometrias. Pode ser utilizado imerso em água e em ambiente corrosivo, desde que se faça o tratamento adequado. (IPT, 2011)

Figura 9 - Extensômetro elétrico de resistência



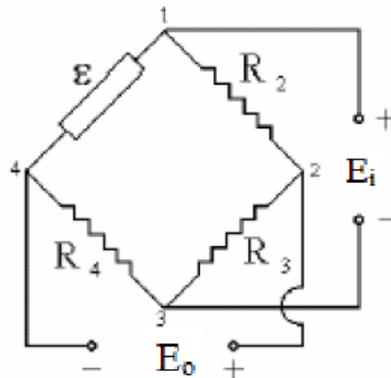
Fonte: Hoffman (2012, p.38).

Como o extensômetro elétrico varia a resistência quando uma deformação é aplicada, é muito comum a utilização de um circuito elétrico denominado ponte de Wheatstone. A ponte de Wheatstone é um excelente circuito para a instrumentação devido principalmente ao desempenho desse tipo de circuito para detectar pequenas mudanças de resistência produzidas pelo extensômetro, que geralmente estão na ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-2} \Omega/\Omega$ . (IPT, 2011)

O circuito da ponte de Wheatstone consiste em quatro resistências elétricas, conectadas no bornes 1, 2, 3 e 4 como na

Figura 10. Esse arranjo forma dois divisores de tensão em paralelo. Esse circuito é excitado por uma voltagem  $E_i$ . O sinal de saída  $E_o$  é medido nos bornes opostos ao da excitação. (IPT, 2011)

Figura 10 – Configuração da ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de IPT (2011, p.27)

Conhecendo a Primeira e Segunda Lei de Ohm é possível obter a relação

$$E_o = E \left[ \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_3 + R_2)(R_1 + R_4)} \right]$$

Sendo  $R_2 = R_3 = R_4 = R$ , e  $R_1$  representado como  $\varepsilon$  na

Figura 10 e assumindo-se como a resistência variável do extensômetro  $R_1 = R + \Delta R$ , tem-se

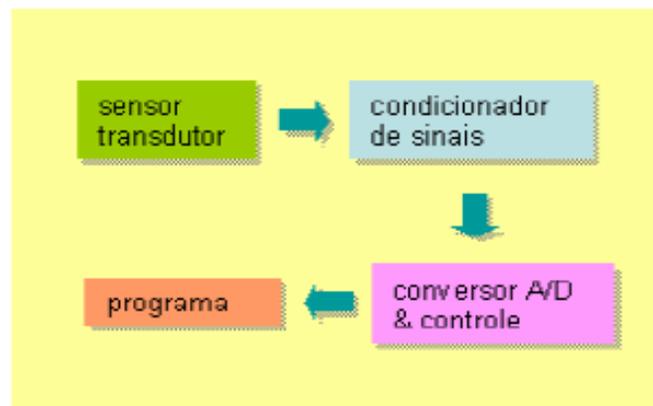
$$E_o = \frac{E \Delta R}{4 R} = \frac{E}{4} \cdot K \cdot \varepsilon$$

O termo  $K$  representa a variação da resistência do material com a deformação e é comumente denominado *gage factor*.

## 2.5. AQUISIÇÃO DE DADOS

Aquisição de dados é a amostragem do mundo real para gerar os dados que podem ser manipulados por um computador. Significa obter informação de algum processo físico por intermédio da medição de suas grandezas, que serão digitalizadas de forma a permitir a aplicação de algum tipo de processamento matemático que irá torná-lo compatível, para fim de comparação, com grandezas padronizadas. Após isso será analisado e armazenado. Em muitas aplicações existentes, a aquisição de dados não se restringe apenas na aquisição, mas também compreende ações de controle sobre os sistemas em causa. O controle corresponde ao processo pelo qual os sinais digitais provenientes dos computadores são convertidos em sinais apropriados para atuar em diversos equipamentos. Um sistema de aquisição de dados básico é composto por quatro partes: sensores/transdutores; condicionador de sinais; conversor analógico/digital; programa de aquisição de dados (IPT, 2011). A Figura 11 apresenta um esquemático de um sistema de aquisição de dados.

Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados



Fonte: IPT (2011, p. 2).

Os sensores e transdutores são os elementos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos. Transdutor é um termo usado para designar alguns tipos de sensores. Em um sistema de aquisição de dados a escolha dos sensores é um passo importante para a obtenção dos resultados com a precisão adequada. Extensômetros, células de carga e termopares são alguns exemplos de sensores/transdutores. (IPT, 2011)

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que adequam os sinais analógicos para a conversão digital. Os principais subcomponentes dos condicionadores são os

amplificadores, filtros e isoladores. Através dos amplificadores, o sinal analógico é amplificado para ajustar-se à faixa de entrada do conversor analógico/digital; e quando necessário, o amplificador responsabiliza-se também pela alimentação dos sensores. Os filtros reduzem os ruídos do sinal analógico, ou seja, diminuem eventuais interferências que podem ser originadas por diversas fontes: radiofrequência, rede elétrica, aterramento, etc. Os isoladores, quando presentes, têm a função de proteger os outros módulos contra eventuais sobrecargas de tensão e corrente, as quais podem causar danos irreversíveis aos circuitos eletrônicos digitais. (IPT, 2011)

O conversor A/D (analógico para digital) é o elemento responsável por traduzir uma grandeza elétrica numa representação numérica adequada ao tratamento digital do sinal adquirido. O conversor A/D possui uma característica básica denominada de tempo de conversão. O tempo de conversão do A/D determina a máxima taxa de amostragem de um sinal. Por exemplo, se o tempo de conversão for de  $20 \mu\text{s}$  ( $0,000020 \text{ s}$ ), a taxa máxima de conversão para um sinal será de 50 KHz (50 mil amostras por segundo =  $1/0,000020$ ). Assim, com o uso do conversor do exemplo dado, a taxa de amostragem do sistema de aquisição estaria limitado a 50 KHz. Na prática, as taxas de amostragens máximas são menores que o permitido pelo tempo de conversão do A/D, devido principalmente à falta de velocidade de comunicação entre a placa conversora A/D e o sistema operacional do microcomputador. (IPT, 2011)

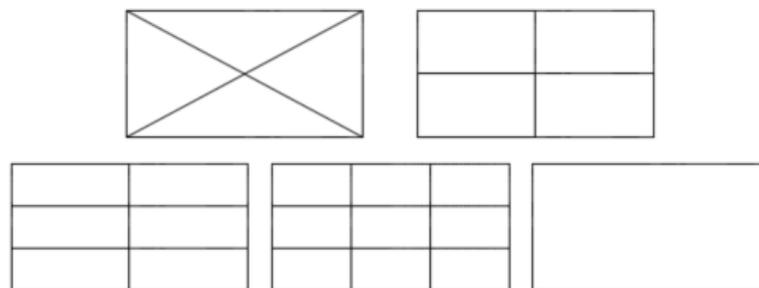
O programa de aquisição de dados é o responsável pelo controle do sistema, permitindo ao usuário parametrizar, comandar e monitorar o processo de aquisição de dados. Os programas de aquisição de dados armazenam os sinais captados na forma de arquivos que podem ser consultados posteriormente. Estes programas possibilitam a visualização e edição dos dados adquiridos, bem como a geração de relatórios e outras documentações impressas. (IPT, 2011)

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho se propôs a realizar análises experimentais e numéricas de chapas enrijecidas longitudinal e transversalmente, sujeitas a carregamentos laterais.

A análise numérica se concentrou em construir modelos CAD dos corpos de prova do experimento físico de modo a simular seu comportamento quando sujeito a diferentes magnitudes de carregamento. A simulação CAE do modelo buscou ao máximo contemplar aquilo que de fato ocorreria no experimento físico, buscando a convergência de resultados de modo a validar tanto a própria abordagem de simulação numérica, quanto o experimento físico. O experimento físico consistiu na construção de chapas de aço 1020, com reforçadores longitudinais e/ou transversais soldados em um dos lados dos mesmos em cinco configurações diferentes, como mostrados na Figura 12. Os corpos de prova foram apoiados em uma estrutura de suporte e posicionados em uma máquina de ensaio de compressão, tendo suas extremidades ora engastadas, ora simplesmente apoiadas. A partir disso, os mesmos foram submetidos a carregamentos laterais nas faces que não apresentavam reforçadores, e foi realizada a leitura de deformação em um ponto de cada corpo de prova, com a utilização de extensômetros, que fez parte de um sistema de aquisição de dados. Os dados serão armazenados e tratados para unidades utilizáveis em análises de engenharia.

Figura 12 – Configuração dos reforçadores nos corpos de prova



Fonte: Autor.

De forma a buscar uma convergência de resultados, as análises numéricas e experimentais tiveram seus valores comparados de forma a validá-los e, a partir desses

resultados, elaborar coeficientes que mensurassem a performance do experimento físico e também da topologia dessas estruturas.

### 3.1. SIMULAÇÃO CAE

As simulações com elementos finitos foram executadas no software ANSYS Mechanical APDL. De forma a tornar os corpos de simulação mais próximos topologicamente se comparados com as estruturas de chapeamento utilizadas na indústria naval, optou-se por modelar as chapas com espessura menor que os reforçadores. A escolha das dimensões finais dos corpos de prova para o experimento físico foram tomadas com base na quantidade de material disponível para o experimento e no quão fácil seria o manuseio das peças. A Tabela 1 apresenta as dimensões finais para ambos os casos, simulação computacional e experimento físico.

Tabela 1 – Dimensões dos modelos simulados e testados

| Modelo | Chapa |     |    | Reforçador Longitudinal e Transversal |                |
|--------|-------|-----|----|---------------------------------------|----------------|
|        | a     | b   | t  | t <sub>r</sub>                        | h <sub>r</sub> |
|        | mm    | mm  | mm | mm                                    | mm             |
| 0x0    | 375   | 200 | 3  | 6,35                                  | 90             |
| 1x1    | 375   | 200 | 3  | 6,35                                  | 90             |
| 2x1    | 375   | 200 | 3  | 6,35                                  | 90             |
| 2x2    | 375   | 200 | 3  | 6,35                                  | 90             |
| X      | 375   | 200 | 3  | 6,35                                  | 90             |

Fonte: Autor.

Os números presentes na coluna dos modelos representam a quantidade de reforçadores longitudinais e transversais respectivamente. Note que a o modelo denominado “X” apresenta dois reforçadores, cada um ligando as diagonais opostas em uma das faces e ambos apresentam o comprimento de aproximadamente 425 mm.

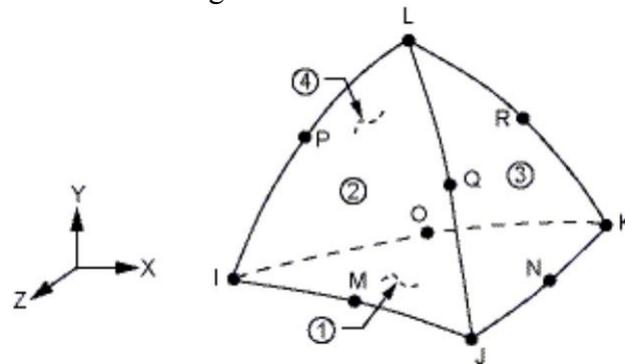
A primeira parte da simulação em CAE concentrou-se na etapa de pré-processamento, mais especificamente no tipo de modelagem (casca ou sólido), o tipo de elementos utilizados e o refino da malha.

Mesmo com incontáveis simulações na área serem executadas como casca, uma vez que o problema pode ser aproximado e tratado como tal, para este trabalho as mesmas foram tratadas

na perspectiva de sólidos. À primeira vista, a diferença entre as duas abordagens seria com relação ao tempo de simulação, uma vez que se modelados como casca, seria mais rápido computacionalmente. Outro fator que poderia afetar o tempo de simulação é a velocidade de processamento do computador responsável pela simulação numérica, mas o trabalho em questão não se concentrou em realizar as simulações em múltiplas máquinas ou até mesmo múltiplas simulações, visto que fugiria do objetivo do estudo.

O tipo de elemento adotado foi o SOLID187. Este consiste em um elemento tridimensional de alta ordem, com 10 nós, e cada um dos nós apresenta três graus de liberdade: translação nodal em x, y e z. Possui deslocamento quadrático e é bem adequado para modelagem de malhas irregulares, geralmente provenientes de importação de *softwares* de CAD/CAM. A Figura 13 descreve o formato do elemento SOLID187. É a melhor opção fornecida pelo software, dado a topologia dos corpos em simulação não apresentarem partes curvas, e que segundo o próprio, apresenta resultados confiáveis.

Figura 13 – SOLID187



Fonte: ANSYS Mechanical APDL Element Reference (2013, p.991).

Uma sintetização dos *inputs* necessários às simulações é apresentado na Tabela 2. A geração da malha foi estipulada para ter três unidades de comprimento como valor inicial e, caso fosse necessário, um refino de malha a fim de observar uma convergência de resultados seria executado. Esse valor foi levado em consideração a capacidade de processamento do computador utilizado nas simulações.

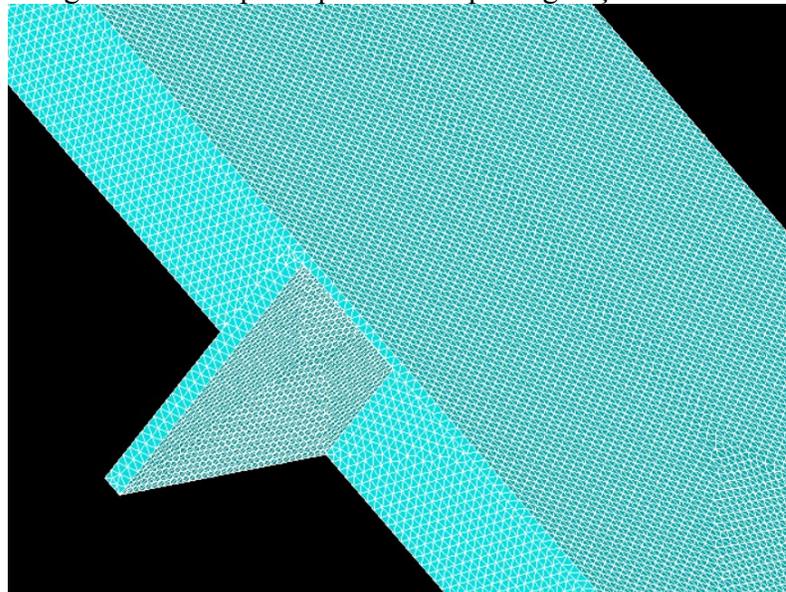
Tabela 2 – *Inputs* da simulação numérica com software CAE

|                          |                        |   |
|--------------------------|------------------------|---|
| Tipo de análise          | Estrutural             |   |
| Graus de Liberdade       | DOF                    | Translação em x, y e z<br>Rotação em x, y e z |
| Elemento                 | SOLID187               |   |
| Tamanho do Elemento      | 3                      |   |
| Propriedades do Material | Homogêneo e Isotrópico |   |
|                          | $\nu$                  | 0,3   |
|                          | E [GPa]                | 200   |

Fonte: Autor.

O formato final da malha de um dos corpos de prova em estudo pode ser melhor visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova 1x1 após a geração de malha



Fonte:Autor.

As simulações possuíam duas condições de contorno: as chapas simplesmente apoiadas, onde as bordas da chapa são livres para rotacionar e mover no plano da chapa, e engastadas, onde as bordas da chapa não são livres para rotacionar ou mover em nenhuma direção.

Como primeira abordagem para o caso do corpo de prova estar simplesmente apoiado e visto que o valor da espessura da chapa é muito menor que suas outras dimensões, procurou-se engastar as quatro bordas do plano base da chapa (aquele que está em contato com os

reforçadores), de modo a simplificar a simulação. Isso significa que cada um dos quatro cantos que definem esse plano tiveram seus seis graus de liberdade (translação em x, y e z, e rotação em torno de x, y e z) iguais a zero. Como poderá ser visto na seção de resultados, essa aproximação acabou por convergir menos com a solução analítica do que quando as bordas do plano médio eram engastadas. A partir disso, a simulação foi trabalhada de modo a ter um plano médio, e o mesmo foi engastado.

Para o caso onde os corpos de prova devem ser engastados, todas as faces das chapas, com exceção da parte superior e inferior, foram engastadas, impedindo sua rotação e translação com relação aos três eixos.

O passo final do pré-processamento ficou por conta da aplicação de um carregamento uniforme sobre a chapa, isto é, um valor constante de pressão sobre o lado não reforçado. Além de servir para fins comparativos, a própria simulação CAE acabou por balizar o processo de confecção dos corpos de prova, uma vez que seria necessário fazer os testes nas duas condições de contorno, e os corpos de prova não poderiam exceder seus limites de escoamento. Para isso, o valor limite para a pressão aplicada, que ocasionaria uma tensão máxima no corpo de prova, para cada caso seria estabelecido por conta de um fator de segurança, a fim de não deformar plasticamente o material. Basicamente, para fins de critério de falha adotou-se o método de von Mises com um fator de segurança de 1,4. Em outras palavras, a tensão equivalente máxima de von Mises não poderia exceder 72% do limite de escoamento do aço 1020. Como não havia informação referente ao tipo de laminação do mesmo, foi considerado o pior caso, onde o metal havia sido laminado a quente, tendo assim uma tensão de escoamento limite de  $\sigma_e = 210$  MPa.

## **3.2. EXPERIMENTO FÍSICO**

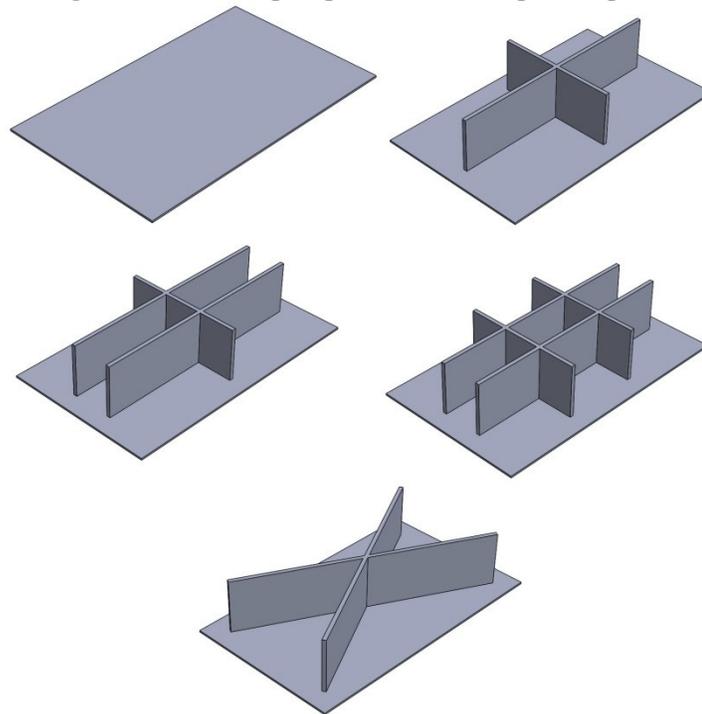
Essa parte do estudo buscou focar na elaboração do experimento físico, o que envolve as etapas de confecção dos corpos de prova, montagem da estrutura onde os experimentos foram realizados e instrumentação do mesmo.

### **3.2.1. Confecção dos corpos de prova**

A ideia inicial para os corpos de prova se manteve em fazer quatro chapas reforçadas e uma sem reforços para efeitos de comparação estrutural. Em sequência, buscou-se definir as razão de aspecto da chapa e as dimensões dos reforços. A princípio os reforços teriam a mesma espessura da chapa, mas as simulações numéricas apontavam para um problema não característico em estruturas navais: o fato dos reforços defletirem mais que a chapa. A saída foi tornar os reforços mais rígidos que a própria placa, aumentando seu momento de inércia de forma que a chapa defletisse muito mais que os reforços.

A configuração simples adotada para os reforços é a mostrada na Figura 12 e podem ser visualizadas em perspectiva na Figura 15.

Figura 15 – Vista perspectiva dos corpos de prova



Fonte: Autor.

Por conta da condição de apoio simples, notou-se que os corpos de prova necessitariam apresentar uma aba livre de reforços para que pudesse ser apoiado para os testes. Com a adição das abas, o apoio acabou não sendo em volta da exata área onde estavam os reforços, gerando uma pequena diferença de área quando comparada a uma configuração sem abas, e que deve ser levada em consideração na comparação dos resultados. Por conta dessa condição, foi necessária outra série de simulações com as dimensões iguais ao corpos de prova construídos.

Os reforços longitudinais e transversais foram soldados nas placas e, ao fim desse processo, adquiriram o formato exibido na Figura 16. O próprio processo de soldagem acabou gerando pequenas deformações nas chapas de 3 mm, que acabariam por trazer imperfeições na instrumentação e medições previstas para o experimento. De forma a corrigir ao máximo possível esse efeito, sem alterar a espessura da chapa, foram necessários alguns ajustes com uma prensa para tornar a superfície o mais plana possível.

Figura 16 – Aparência final dos corpos de prova construídos



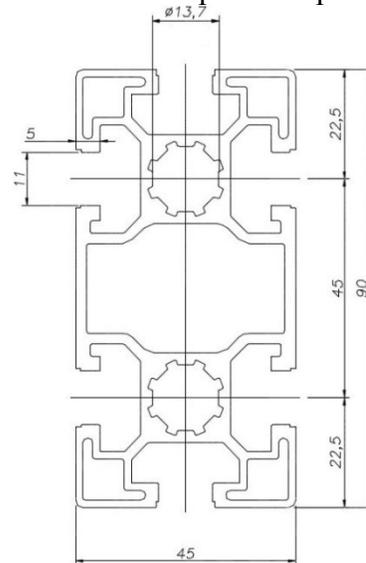
Fonte: Autor.

### 3.2.2. Confeção da estrutura de apoio

O suporte utilizado para executar os experimentos deveria prover os dois tipos de condições de contorno estipuladas previamente e, ao mesmo tempo, garantir rigidez de forma que

não houvesse nenhuma ruptura que comprometeria os testes. Para tal foram utilizados perfis de alumínio 6063 45x90 mm, que garantem alta rigidez e fácil manuseio por conta de sua alta relação módulo de seção/peso. A Figura 17 apresenta uma vista da área de seção do perfil escolhido.

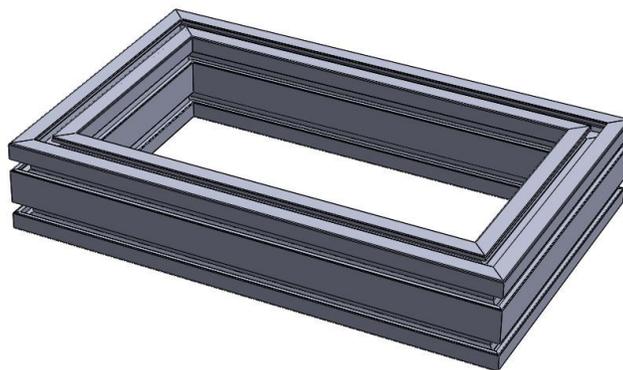
Figura 17 – Área de seção do perfil selecionado para compor a estrutura do experimento em mm



Fonte: Autor.

As barras foram cortadas na direção de 45° em suas extremidades, possibilitando que as mesmas fossem unidas por cantoneiras de forma que quando juntas, assumissem um formato retangular. Uma representação esquemática apresentada na Figura 18 mostra como ficaram dispostas as barras quando unidas.

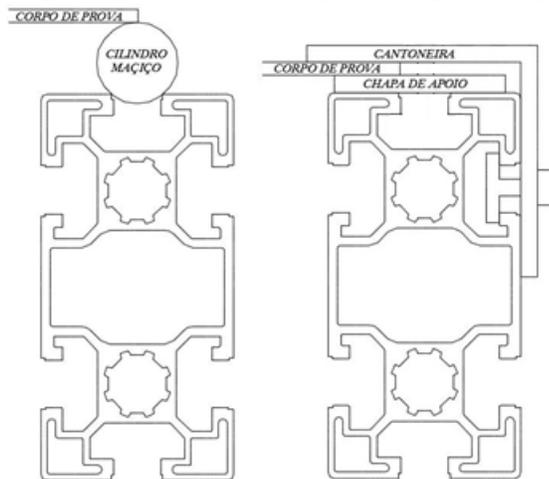
Figura 18 – Vista em perspectiva da estrutura de apoio do experimento



Fonte: Autor.

Além da estrutura retangular que suportaria os corpos de prova, foram montadas as peças necessárias para as condições de contorno exigidas para o experimento. Os corpos de prova simplesmente apoiados tiveram suas bordas sustentadas por cilindros maciços de ferro com diâmetro de 19,1 mm. Uma vez que fenda no topo da barra possui um pouco mais de 1 mm, essa dimensão para o apoio garantiria que o mesmo não escorregasse. Para a condição de engaste, foram utilizadas cantoneiras aparafusadas na estrutura, impedindo as bordas dos corpos de prova de transladar ou rotacionar em qualquer direção. A Figura 19 ilustra as duas condições de contorno montadas.

Figura 19 – Vista de corte para a montagem de apoio simples (esquerda) e engaste (direita)



Fonte: Autor.

A chapa de apoio presente na condição de engaste da Figura 19 se faz necessária para que quando o corpo de prova for fixado na estrutura, não produza nenhuma concentração de carga e conseqüentemente o flexione, e também o fato de os reforçadores apresentarem a mesma altura da barra e, com a presença da chapa, haver um vão livre entre os corpos de prova e a base a qual a estrutura está apoiada.

Para garantir a segurança do experimento, e a estrutura se tratando de um material com maior capacidade de ruptura que os corpos de prova em si, os esforços presentes nos testes foram simulados numericamente como forma de validação para possíveis falhas que pudessem existir e, se presentes, que fossem corrigidas na etapa de construção da estrutura. Analisando a Figura 19, é possível notar que para cada condição de contorno, há determinadas regiões da estrutura que são

sujeitas aos esforços presentes nos testes. A análise da integridade da estrutura foi executada assumindo-se o maior valor de carga para cada condição de contorno, e que essa atendesse ao critério de falha de von Mises. Para isso, a tensão de von Mises calculada para a simulação não poderia exceder o limite de escoamento do alumínio 6063 que é de  $\sigma_e = 110\text{MPa}$ . A Tabela 3 apresenta os valores encontrados para essa simulação e observa-se que a estrutura não é comprometida. As considerações feitas na simulação podem ser conferidas no Apêndice A.

Tabela 3 – Valores de carga e tensão para simulação CAE da estrutura de suporte

| Modelo | Condição de Contorno | Carga Máxima [kN] | Tensão de von Mises Máxima [MPa] |
|--------|----------------------|-------------------|----------------------------------|
| 0x0    | Apoio Simples        | 2,63              | 25,05                            |
| 2x2    | Engaste              | 5,65              | 80,07                            |

Fonte: Autor.

### 3.2.3. Instrumentação e montagem

A etapa de instrumentação consistiu em fazer a colagem dos extensômetros e conexão dos mesmos com o aquisitor de dados. O modelo de extensômetro utilizado foi KYOWA-KFD-2-D16-11 biaxial, onde cada um dos extensômetros dessa configuração foi conectado separadamente, em duas pontes de Wheatstone. Um exemplo da configuração do extensômetro é mostrado na Figura 20.

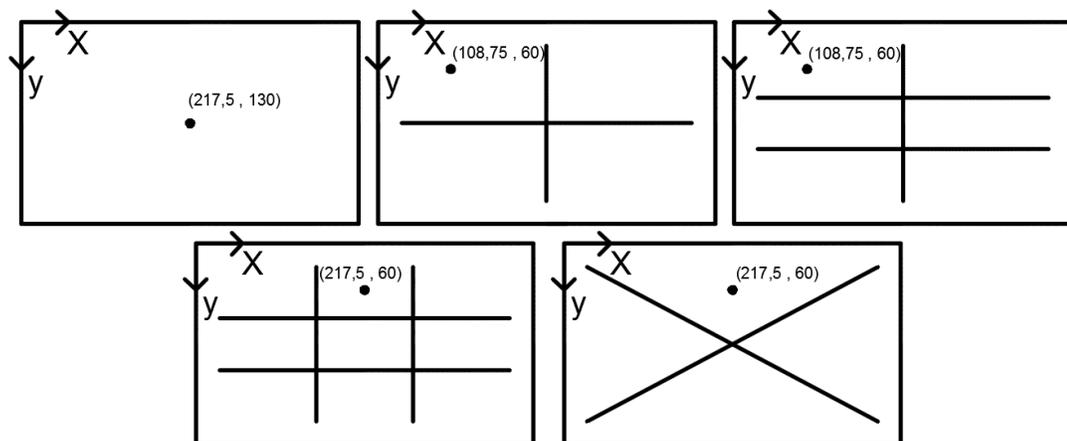
Figura 20 – Configuração de um dos extensômetros colados nos corpos de prova



Fonte: Autor.

Os extensômetros foram alocados na face onde estavam soldados os reforçadores como pode ser visto na Figura 21. Buscou-se evitar que os mesmos ficassem próximos regiões de concentração de tensão, como próximo dos cordões de solda, ou regiões termicamente afetadas pelo processo de soldagem, o que poderia ocasionar algum erro de leitura. Por conta baixa disponibilidade de materiais, apenas um extensômetro biaxial foi colocado em cada um dos corpos de prova.

Figura 21 – Posição dos extensômetros em mm



Fonte: Autor.

O aquisitor de dados utilizado foi o modelo HBM-QuantumX, onde foi configurado para que 4 de seus canais realizassem as leituras dos testes (tempo [s], força [kN],  $\epsilon_x$  [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] e  $\epsilon_y$  [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]). O Apêndice B apresenta todas as informações técnicas dos equipamentos utilizados nos experimentos.

A montagem final do experimento consistiu no posicionamento dos corpos de prova, apoiados na estrutura, na máquina a qual eles seriam testados. Foi utilizada uma prensa hidráulica, modelo SHIMADZU-UH-500kNI. A configuração final do experimento antes dos testes é mostrada na Figura 22.

Figura 22 – Prensa hidráulica SHIMADZU-UH-500kNI



Fonte: Autor.

A carga que seria aplicada nos modelos deveria ser uniforme em toda a região de compressão. Para tal, foi necessária a utilização de uma chapa com área igual àquela em que os reforçadores foram soldados (375x200 mm), de forma que apenas a área com reforços no lado oposto tivesse contato com a placa. Além disso, a chapa deveria ser espessa o suficiente (35mm) para reduzir os efeitos do princípio de Saint-Venant e tentar distribuir todo o carregamento nos corpos de prova uniformemente, uma vez que a parte superior da prensa, responsável pela carga resistiva dos ensaios, possui uma área circular muito menor que a chapa.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos da comparação de um dos modelos analiticamente e numericamente, o comportamento das tensões com o aumento da pressão aplicada para cada um dos modelos testados em cada uma das condições de contorno, uma comparação entre modelos físicos que tiveram extensômetros alocados na mesma posição, análise do comportamento dos deslocamentos e tensões simulados para os modelos ditos ideais e por fim o ranqueamento destas simulações ideais.

### 4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS ENTRE ABORDAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA

A primeira etapa dos resultados deste estudo concentrou-se em avaliar a qualidade dos parâmetros de entrada adotados para a simulação CAE. Para tal, procurou-se observar a existência de uma convergência dos resultados numéricos quando comparados com a solução analítica, de forma a tornar a simulação CAE em um parâmetro confiável de comparação. Os casos em estudo foram um painel sem reforçadores apoiado e engastado. A Tabela 4 apresenta os dados encontrados.

Tabela 4 – Valores analíticos e numéricos de deflexão e tensão máxima para chapa sem reforçadores

| p=0,1 MPa, t=3 mm, a=375 mm, b=200 mm, E=200GPa, v=0,3 |        |                                   |        |
|--|--------|-----------------------------------|--------|
| Apoio Simples  |        | Engaste                           |        |
| $k_{w1}$   | 0,74   | $k_{w2}$                          | 0,95   |
| $k_{\sigma 1}$   | 0,58   | $k_{\sigma 2}$                    | 0,49   |
| $w_{\max}$ analítico [mm]                              | 3,12   | $w_{\max}$ analítico [mm]         | 0,80   |
| $w_{\max}$ (simulação 1) [mm]                          | 3,13   | $w_{\max}$ (simulação) [mm]       | 0,80   |
| $w_{\max}$ (simulação 2) [mm]                          | 1,46   | $\sigma_{\max}$ (analítico) [MPa] | 218,63 |
| $\sigma_{\max}$ (analítico) [MPa]                      | 260,45 | $\sigma_{\max}$ (simulação) [MPa] | 226,28 |
| $\sigma_{\max}$ (simulação 1) [MPa]                    | 261,53 |                                   |        |
| $\sigma_{\max}$ (simulação 2) [MPa]                    | 254,59 |                                   |        |

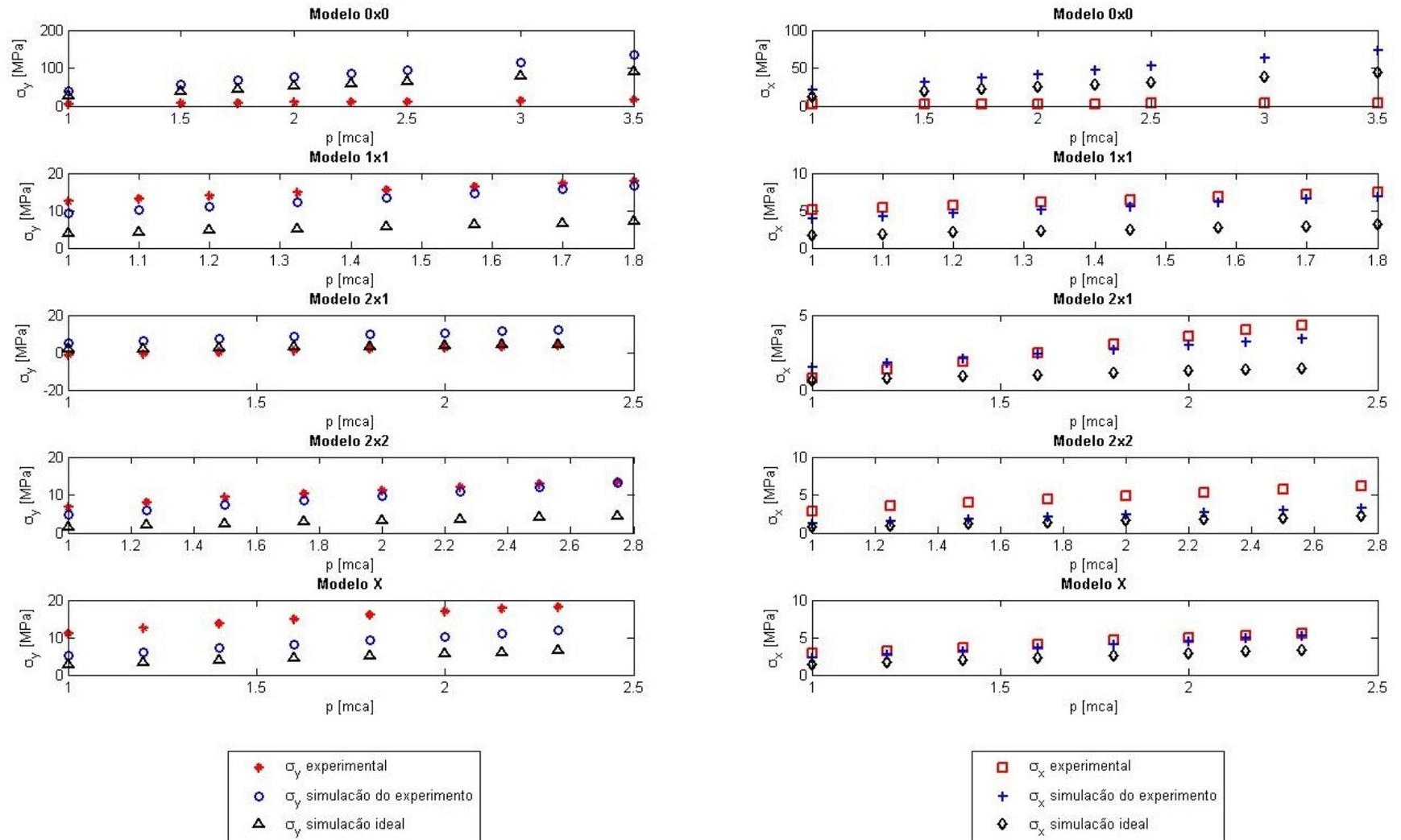
Fonte: Autor.

Note que para o caso de apoio simples foram realizadas duas simulações diferentes, que tiveram o propósito de avaliar qual abordagem convergiria para a solução analítica. A simulação 1 representa o engaste das quatro arestas do plano médio do painel, enquanto a simulação 2 representa o engaste das quatro arestas do plano base do painel. Existe uma pequena diferença entre os valores finais encontrados para tensão e deflexão, que são justificáveis por causa da espessura da chapa ser muito pequena quando comparada com as suas outras dimensões e por causa disto, o problema pode ser abordado no âmbito bidimensional. Para o caso de apoio simples, a deformação máxima encontrada computacionalmente e analiticamente foram maiores que a própria espessura da chapa, o que teoricamente as invalidariam de acordo com a teoria das pequenas deflexões. De maneira geral, os parâmetros de entrada para as simulações apresentaram resultados satisfatórios, tornando o método um bom padrão de comparação para os testes.

#### **4.2. ANÁLISE ENTRE MODELOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS**

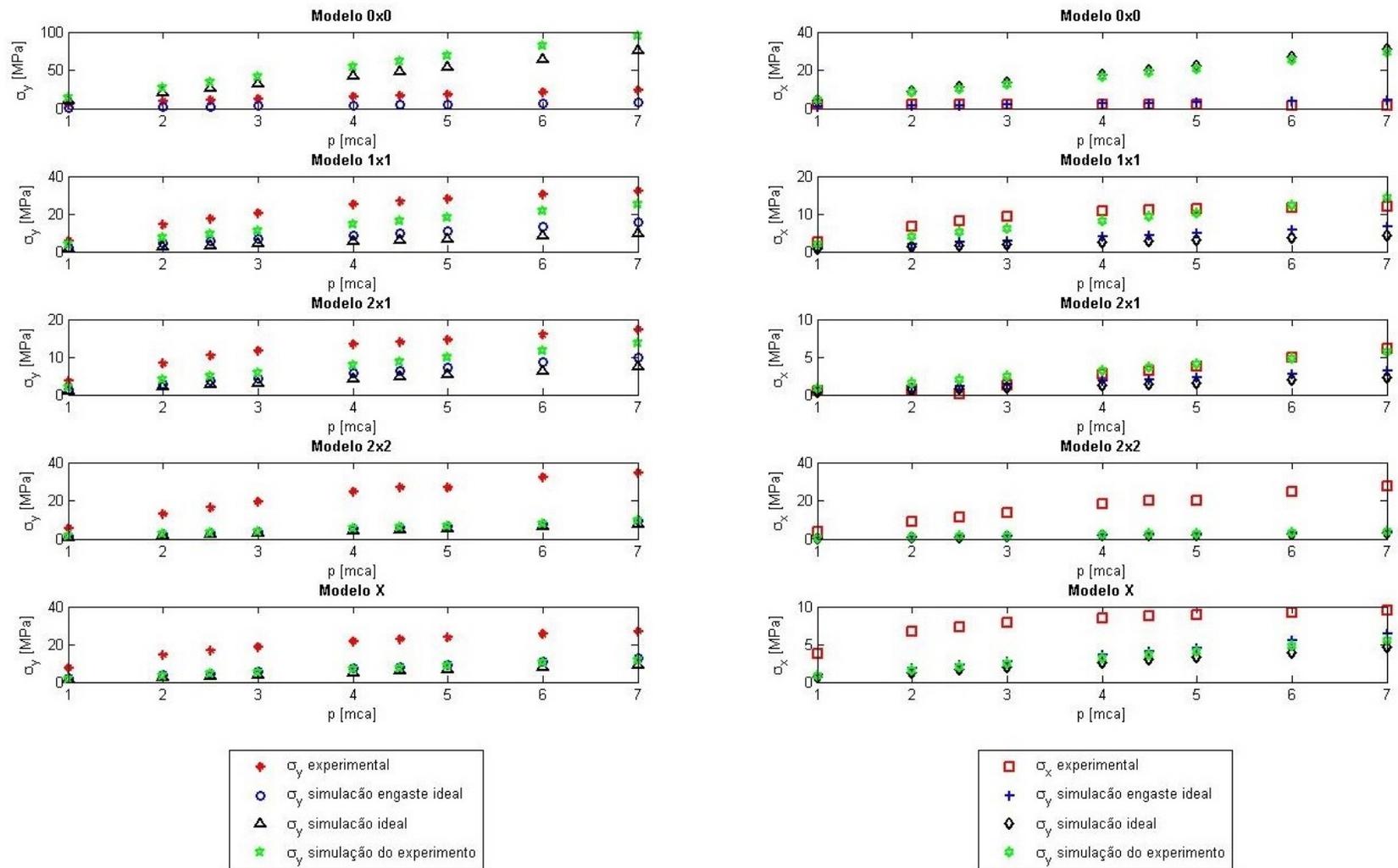
Para o caso de apoio simples, três situações foram levadas em consideração: a tensão proveniente da relação direta da medida de deformação dos extensômetros (experimental), a tensão resultante da simulação mais próxima das condições ao experimento (simulação do experimento) e a tensão resultante da simulação de chapas ideais (simulação ideal), ou seja, as mesmas não apresentando a aba extra necessária apenas para o experimento. A Figura 23 apresenta os resultados encontrados para as três situações na direção transversal e longitudinal de cada modelo. Para esta condição de contorno, a tensão nas duas direções no local onde foram colocados os extensômetros do modelo 0x0 deveria ser máxima, mas não é o que observamos analisando a Figura 23. O comportamento anômalo dos extensômetros também é observado na Figura 24, levando-se a crer que prováveis deformidades deste modelo e conseqüentemente não uniformidade de carga aplicada, em ambas as condições de contorno, acabaram gerando leituras errôneas. Notou-se ainda que para todos os teste, a simulação ideal é aquela que gerou menores valores de tensão pela presença de reforçadores de maneira uniforme por toda a área da chapa. Por outro lado, com exceção do modelo 0x0, as tensões experimentais em ambas as direções são

Figura 23 – Variação da tensão com o aumento da pressão aplicada nos corpos de prova na direção longitudinal e transversal na situação de apoio simples



Fonte: Autor.

Figura 24 – Variação da tensão com o aumento da pressão aplicada nos corpos de prova na direção longitudinal e transversal na situação de engaste

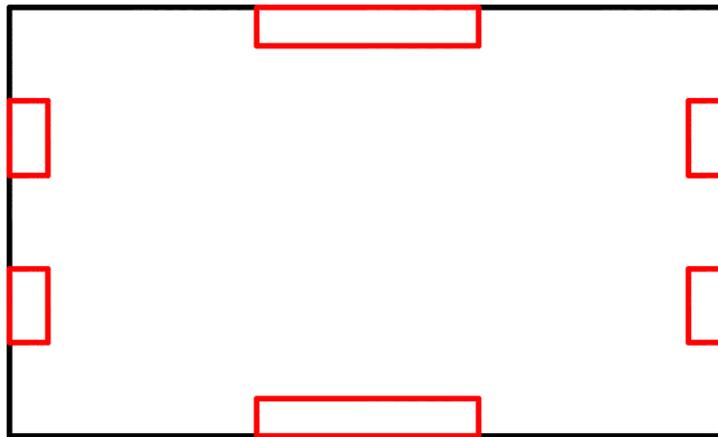


Fonte: Autor.

aquelas que apresentam os maiores valores, provavelmente devido à não homogeneidade e os efeitos térmicos que o processo de soldagem pode ter ocasionado aos corpos de prova.

No caso dos modelos engastados, a análise se concentrou em quatro situações: novamente a tensão proveniente da relação direta da medida de deformação dos extensômetros (experimental), a tensão resultante da simulação próxima das condições do experimento (simulação do experimento), uma terceira tensão resultado do engaste ideal (simulação engaste ideal) e a tensão resultante da simulação de chapas ideais (simulação ideal). Diferentemente do experimento passado, os testes com corpos de prova engastados não tiveram suas bordas totalmente engastadas, com o intuito de avaliar a relevância dessa condição para os resultados finais. A Figura 25 mostra as regiões engastadas nos testes, destacadas em vermelho, com o uso de seis cantoneiras de 27 mm de largura direcionadas para o centro dos modelos.

Figura 25 – Esquemático da posição das cantoneiras utilizadas para engastar os corpos de prova



Fonte: Autor.

Diferentemente dos resultados para o caso de simples apoio, o modelo 0x0 apresentou resultados experimentais próximos aos da simulação do engaste ideal para ambas as tensões ao longo de toda. Para todos os outros casos, o valor das tensões mensuradas experimentalmente esteve sempre maior, o que caracterizou uma influência muito alta da própria condição de engaste. O resultado mais questionável, dentre todos, foi o obtido no modelo 2x1 para as tensões na direção x. Esse modelo foi o que apresentou mais imperfeições quanto a planitude da face a qual foi aplicada a carga compressiva, o que pode ter ocasionado não uniformidade no carregamento e indução ao aferimento da deformação. O que foi importante de ser notado é que a

condição de engaste experimental foi satisfatória, uma vez que a magnitude dos valores de tensão encontrados, para um mesmo valor de pressão, é menor quando comparada com os testes simplesmente apoiados.

### 4.3. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS FÍSICOS

Essa parte do estudo se dedicou em realizar uma comparação direta entre os modelos submetidos as mesmas condições, tanto a nível experimental quanto a nível de simulação. Para tal, foram elaborados coeficientes de eficiência estrutural (COE), que consistiram em uma relação numérica entre tensão e a massa dos modelos de teste. Com o intuito de tornar a comparação o mais justa possível, os modelos foram comparados em pares, pois cada par apresentava os extensômetros posicionados no mesmo local. A Tabela 5 apresenta um compilado dos valores obtidos.

Tabela 5 – Coeficientes de eficiência estrutural obtidos dos experimentos

| Modelo | Massa medida [kg] | ENGASTE                                 |   | APOIO SIMPLES                             |   |
|--------|-------------------|---|---|---|---|
|        |                   | $\sigma_y$                              | $\sigma_x$                              | $\sigma_y$                                | $\sigma_x$                                |
|        |                   | COE experimental<br>p=7 mca<br>[MPa/kg] | COE experimental<br>p=7 mca<br>[MPa/kg] | COE experimental<br>p=1,8 mca<br>[MPa/kg] | COE experimental<br>p=1,8 mca<br>[MPa/kg] |
| 1x1    | 5,38              | 5,99                                    | 2,23                                    | 3,32                                      | 1,39                                      |
| 2x1    | 7,20              | 2,39                                    | 0,85                                    | 0,51                                      | 0,60                                      |
| 2x2    | 8,05              | 4,32                                    | 3,39                                    | 1,68                                      | 0,77                                      |
| X      | 6,54              | 4,13                                    | 1,45                                    | 2,78                                      | 0,84                                      |

Fonte: Autor.

Os modelos a serem comparados são 1x1 com relação a 2x1 e 2x2 com relação a X. Foi possível notar que para todas as situações, o modelo 1x1 apresentou melhor performance quando comparado com 2x1 para aquele ponto em análise. Quanto a outra comparação, o modelo em X obteve valores mais altos do que 2x2 para o caso de apoio simples, mas o inverso foi observado para condição de engaste. É importante frisar que uma configuração de chapa tendo um valor maior de coeficiente de eficiência não significa que a mesma seja a melhor escolha adotada para

uma análise de critério de falha, a partir da escolha daquela que apresente a melhor relação força estrutural/massa.

#### 4.4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS DESLOCAMENTOS E TENSÕES DOS MODELOS NÚMERICOS IDEAIS

Os modelos numéricos ditos ideais foram aqueles que não apresentaram a aba externa necessária para a acomodação do experimento físico, e representam mais fielmente a condição de um painel reforçado sob ação de um carregamento uniforme presente em estruturas navais. A Figura 26 e Figura 27 apresentam o comportamento da tensão na direção  $y$  e os deslocamentos na direção ortogonal a chapa para o caso de engaste. O padrão de tensão em  $x$  para o caso engastado, bem como as tensões em  $x$  e  $y$ , e o deslocamento na direção ortogonal para o caso de simples apoio podem ser visualizados no Apêndice C.

Observando-se a Figura 26 foi possível afirmar que ela apresentou resultados que simulam o carregamento lateral presente em estruturas navais de uma maneira fiel, uma vez que os reforçadores são muito mais rígidos que a própria placa e a deflexão acaba ocorrendo entre reforçadores. Na Figura 27, as máximas tensões na direção  $y$  estavam nas arestas do lado de maior dimensão da chapa da chapa devido ao engaste produzir uma maior momento fletor naquela região, mais especificamente no centro dos reforçadores, comprovando a presença do fenômeno de *shear lag*. Para o caso do modelo X, os maiores valores de tensão na direção  $y$  ocorreu na região que delimitada pelo encontro do vértice do reforçador com a borda lateral da chapa, onde uma pequena região da placa atuou como flange para o reforço.

O ranqueamento dos modelos ideais simulados consistiu na determinação da configuração que apresentasse a melhor relação  $\sigma_{\max}/\text{massa}$  para cada condição de contorno estipulada e uma mesma pressão aplicada. A tensão máxima levou em consideração o maior valor da tensão equivalente de von Mises para cada simulação. A Tabela 6 apresenta um compilado com os valores do coeficiente de eficiência estrutural.

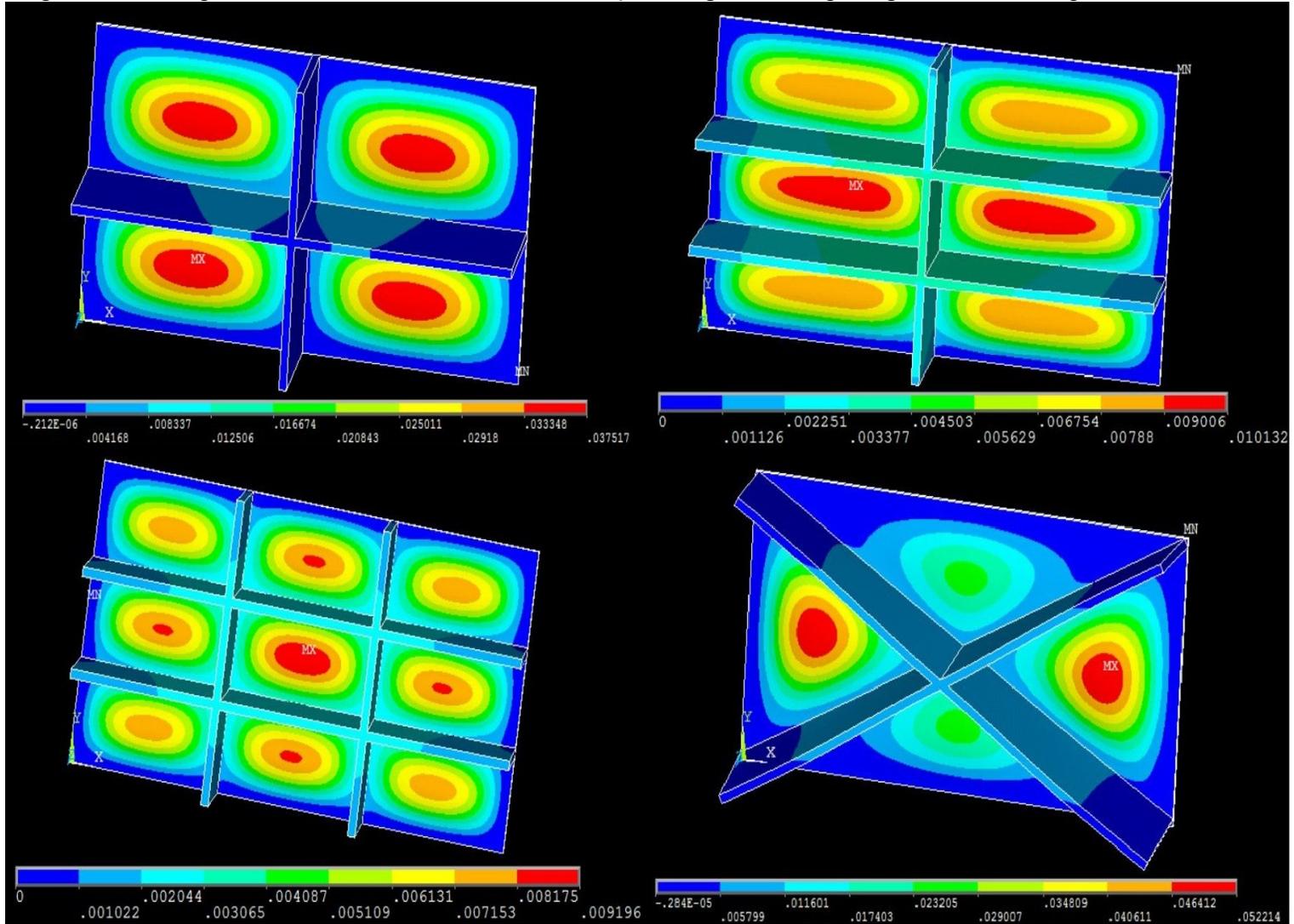
Tabela 6 – Coeficientes de eficiência estrutural para todas as simulações com reforços

| <b>Apoiado p=2,5 mca</b>   |            |                        |              |
|----------------------------|------------|------------------------|--------------|
| Modelo                     | Massa [kg] | Tensão von Mises [MPa] | COE [MPa/kg] |
| 1x1                        | 4,32       | 35,07                  | 8,12         |
| 2x1                        | 5,99       | 28,27                  | 4,72         |
| 2x2                        | 6,88       | 20,05                  | 2,91         |
| X                          | 5,54       | 52,76                  | 9,52         |
| <b>Engastado p=7,5 mca</b> |            |                        |              |
| Modelo                     | Massa [kg] | Tensão von Mises [MPa] | COE [MPa/kg] |
| 1x1                        | 4,32       | 46,73                  | 10,82        |
| 2x1                        | 5,99       | 46,58                  | 7,78         |
| 2x2                        | 6,88       | 39,96                  | 5,81         |
| X                          | 5,54       | 122,49                 | 22,09        |

Fonte: Autor.

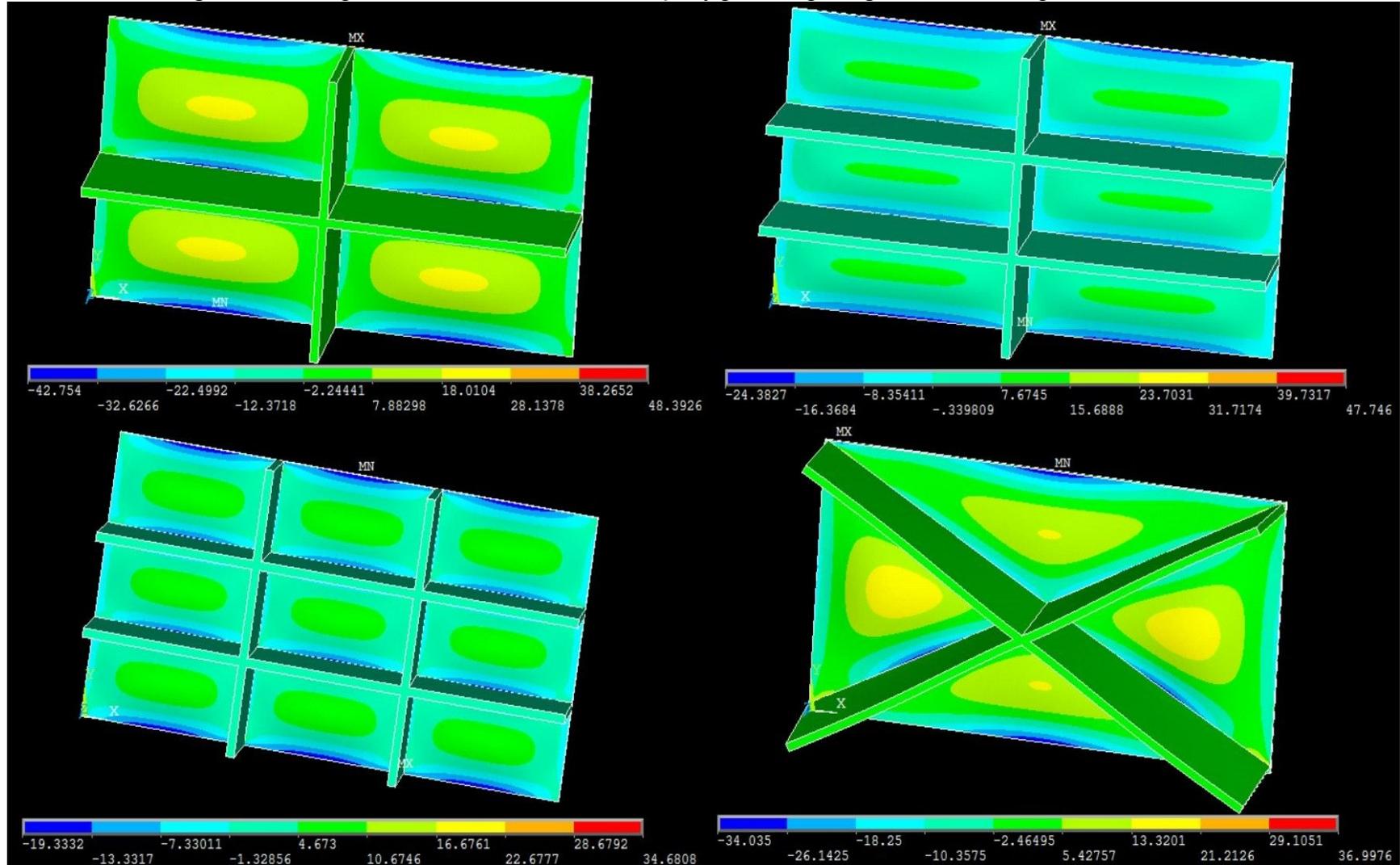
A Tabela 6 mostra que o modelo 2x2 apresenta o melhor coeficiente de eficiência estrutural, ou seja, suporta pressões maiores com a mesma massa de material devido ao arranjo dos seus reforçadores.

Figura 26 – Comportamento dos deslocamentos na direção ortogonal a chapa engastada sob uma pressão de 7,5 mca



Fonte: Autor.

Figura 27 - Comportamento dos tensões na direção y para chapa engastada sob uma pressão de 7,5 mca



Fonte: Autor.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados procedimentos para montagem e testes físicos de chapas reforçadas longitudinal e transversalmente em condição de engaste e apoio simples, sob ação de uma pressão lateral, bem como um comparativo destes experimentos com simulações computacionais que buscassem respeitar sempre que possível as condições impostas nos ensaios.

Além disso, os resultados obtidos com ensaios dos modelos físicos e simulação foram comparados de forma a elencar quais entre os mesmos apresentavam maior valor tensão/massa nos pontos em estudo

Por conta da posição dos extensômetros utilizados nos testes, as comparações entre os experimentos físicos e as simulações não puderam ser realizadas em seus máximos valores de tensão para um valor de pressão. É preciso frisar que mesmo que as simulações apresentassem uma similaridade com os experimentos, a extrapolação dos resultados não seria a melhor alternativa para captar os valores máximos de tensão. Parâmetros como tratamento da chapa por conta da soldagem, largura de cordão de solda, deformidades na chapa e reforços podem contribuir para o surgimento de pontos de concentração de tensão.

A instrumentação e aferição de grandezas físicas nos corpos de prova com extensômetros se mostrou prática e confiável para a maioria dos casos, porém apresenta deficiências para medição nas regiões de transição entre o reforçador e a chapa em si, que são localidades onde as maiores magnitudes de tensão são encontradas, mas por conta de seu aquecimento podem produzir resultados confusos e não confiáveis. Com relação a melhor posição dos extensômetros para conferência de campos de tensão, recomenda-se a existência de mais regiões em análise do que as efetuadas neste estudo, mas por conta da baixa disponibilidade de materiais e recursos para o estudo, não puderam ser realizadas.

Foi possível concluir que o modelo computacional com dois reforçadores na longitudinal e transversal apresentou melhores valores de coeficiente estrutural, o que se era esperado pois o mesmo é o que mais se aparenta com a estrutura de uma grelha.

Outro fator que merece destaque é com relação a construção dos corpos de prova. Aconselha-se a escolha de processos mais acurados na obtenção das peças que formarão os

corpos de prova. Sem dúvida que, com o aprimoramento de etapas iniciais de projeto dos modelos haja mais facilidade na instrumentação e montagem que for utilizada para ensaio.

Como sugestão para trabalhos futuros, um arranjo experimental com novas posições para os extensômetros; a realização de ensaios metalográficos e ensaios de tração de forma a obter valores de propriedades dos materiais em uso mais precisas e um rastreamento de possíveis descontinuidades nas estruturas; planejamento na aquisição das chapas planas iniciais, visando à planificação da superfície de ação de carga após o processo de soldagem de forma a obter uma espessura esperada para a mesma; ensaios com cargas ortogonais ao plano e no próprio plano da chapa ao mesmo tempo buscando observar fenômenos de flambagem.

## REFERÊNCIAS

MANSOUR, Alaa; LIU, Donald. **The principles of naval architecture series: strength of ships and ocean structures**. Jersey City: SNAME, 2008. 250 p.

FALTINSEN, Odd M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. New York: Cambridge University Press, 2005. 476 p.

HUGHES, Owen F.; PAIK, Jeom Kee. **Ship structural analysis and design**. Jersey City: SNAME, 2010. 575 p.

CARDOSO, Ademar de Azevedo. **Síntese racional automatizada de cavernas de embarcações**. 1994. 168 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

GHAVAMI, Khosrow; KHEDMATI, Mohammad Reza. Numerical and experimental investigations on the compression behaviour of stiffened plates. **Journal of constructional steel research**. v. 62, n. 11, p.1087-1100, nov. 2006. Elsevier BV.

OROZCO, Juan Carlos Galindo. **Contribuição ao estudo de painéis reforçados: comparação entre método da chapa ortotrópica e o método dos elementos finitos**. 2009. 194 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PEDATZUR, Omri. **An evaluation of finite element models of stiffened plates subjected to impulsive loading**. 2004. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering and Master of Science in Mechanical Engineering, Department Of Ocean Engineering And Department Of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute Of

Technology, Cambridge, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1721.1/33436>>. Acesso em: 29 jun. 2016

DONGQI, Zhu. **Stiffened plates subjected to in-plane load and lateral pressure**. 2004. 188 p. Dissertação (Mestrado) – Master of Engineering, Department Of Civil Engineering, National University Of Singapore, Singapore, 2004.

LAMB, Thomas. **Ship design and construction**. Jersey City: SNAME, 2003. 883 p.

KERFOOT, Robert P.; OSTAPENKO, Alexis. **Grillages under normal and axil loads – present status**. Bethlehem: Fritz Engineering Laboratory, 1967. 174 p.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959. 580 p.

ANSYS. **ANSYS mechanical APDL element reference**, 2013.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 705 p.

HOFFMANN, Karl. **An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges**. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik Gmbh, 2012. Disponível em: <[http://www.kk-group.ru/help/Strain\\_Gauge\\_Measurements\\_Book\\_2012\\_01.pdf](http://www.kk-group.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2016.

IPT. **Apostila de extensimetria**. São Paulo: Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2011

IPT. **Apostila de aquisição de dados**. São Paulo: Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2011

HUGHES, Owen F. **Ship structural design, a rationally-based, computer – aided optimization approach**. New Jersey: SNAME, 1988.

CLARKSON, J. **The elastic analysis of flat grillages, with particular reference to ship structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 1965

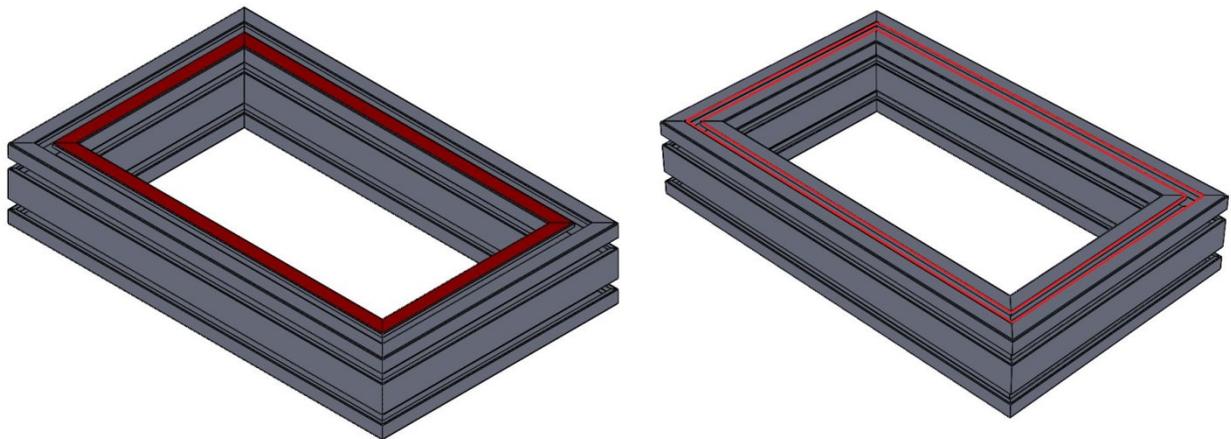
AUGUSTO, O.B. **A estrutura secundária do navio**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São paulo, 2004.

GUT, Jorge A. W. **Confrontando resultados experimentais e de simulação** . Disponível em: <<http://www.hottopos.com/regeq14/gut.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

## APÊNDICE A – Considerações para simulação da estrutura de apoio

O cálculo da resistência estrutural da estrutura de apoio para os experimentos assumiu que a carga, gerada pela força de reação da prensa hidráulica com os corpos de prova fora distribuída igualmente nos quatro cantos da mesma, e para os dois casos age nas zonas em vermelho mostradas nas Figura A 1.

Figura A 1 – Regiões da estrutura de apoio solicitada nos ensaios



Fonte: Autor.

Para o caso de engaste, há uma maior área solicitada, porém as forças aplicadas aos ensaios engastados foram maiores. A estabilidade e funcionalidade da estrutura foi o fator que balizou o maior valor de carga para os ensaios. A pressão devida a carga principal pode ser calculada da seguinte maneira

$$F_{lado} = \frac{F_{total}}{4}$$

$$p_{lado} = \frac{F_{lado}}{A_{lado}}$$

Se tratando da condição de apoio simples, as regiões que estão sob ação de forças são menores, porém devida a configuração do apoio, a maior força de ensaio foi delimitada pelas tensões que foram geradas nos corpos de prova. As duas faces do rasgo de cada lado da estrutura

na qual a força é transmitida não está orientada verticalmente, sendo necessária uma ajuste de direções para o cálculo da pressão da seguinte maneira

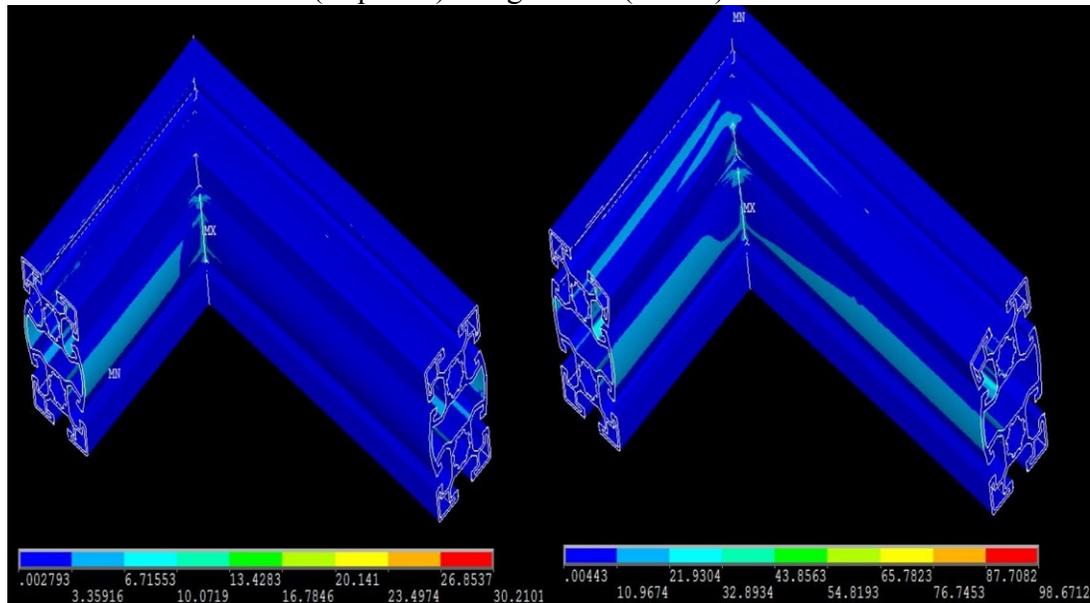
$$F_{y,rasgo} = \frac{F_{total}}{8}$$

$$F_{rasgo} = F_{y,rasgo} \cdot \text{sen}(67,2^\circ)$$

$$p_{rasgo} = \frac{F_{rasgo}}{A_{rasgo}}$$

O comportamento das tensões de von Mises na estrutura para os dois casos pode ser visualizada na Figura A 2. Notou-se que mesmo a interface gráfica da parte direita da Figura A 2 apresentando um deformação visível, a mesma não deve ser levada em consideração, uma vez que os resultados para deslocamento estão na casa dos centésimos de milímetros

Figura A 2 – Tensões de von Mises da estrutura de apoio para os testes de chapas apoiadas (esquerda) e engastadas (direita)



Fonte: Autor.

Nota-se que apenas um quarto da estrutura foi simulada com o objetivo de simplificar a simulação, que acabou gerando muitos elementos e nós quando modelada de forma integral. Isso somente foi possível pois a estrutura apresenta simetria nas direções x e y.

**APÊNDICE B – Informações técnicas dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais**

Tabela B 1 – Informações técnicas dos extensômetros

| Extensômetro |              |
|--------------|--------------|
| Tipo         | KFD-2-D16-11 |
| Comprimento  | 2 mm         |
| Resistência  | 119.8±0.4 Ω  |
| Gage factor  | 2.14         |

Fonte: KYOWA

Tabela B 2 – Informações técnicas do aquisitor de dados

| Aquisitor de Dados |                       |
|--------------------|-----------------------|
| Modelo             | Quantum X             |
| Canais             | 8                     |
| Taxa de amostragem | até 19200Hz           |
| Montagem           | 1/2 ou 1/4 de ponte   |
| Tensão             | ±100 mV, ±10 V, ±60 V |
| Corrente           | ±30 mA                |

Fonte: HBM

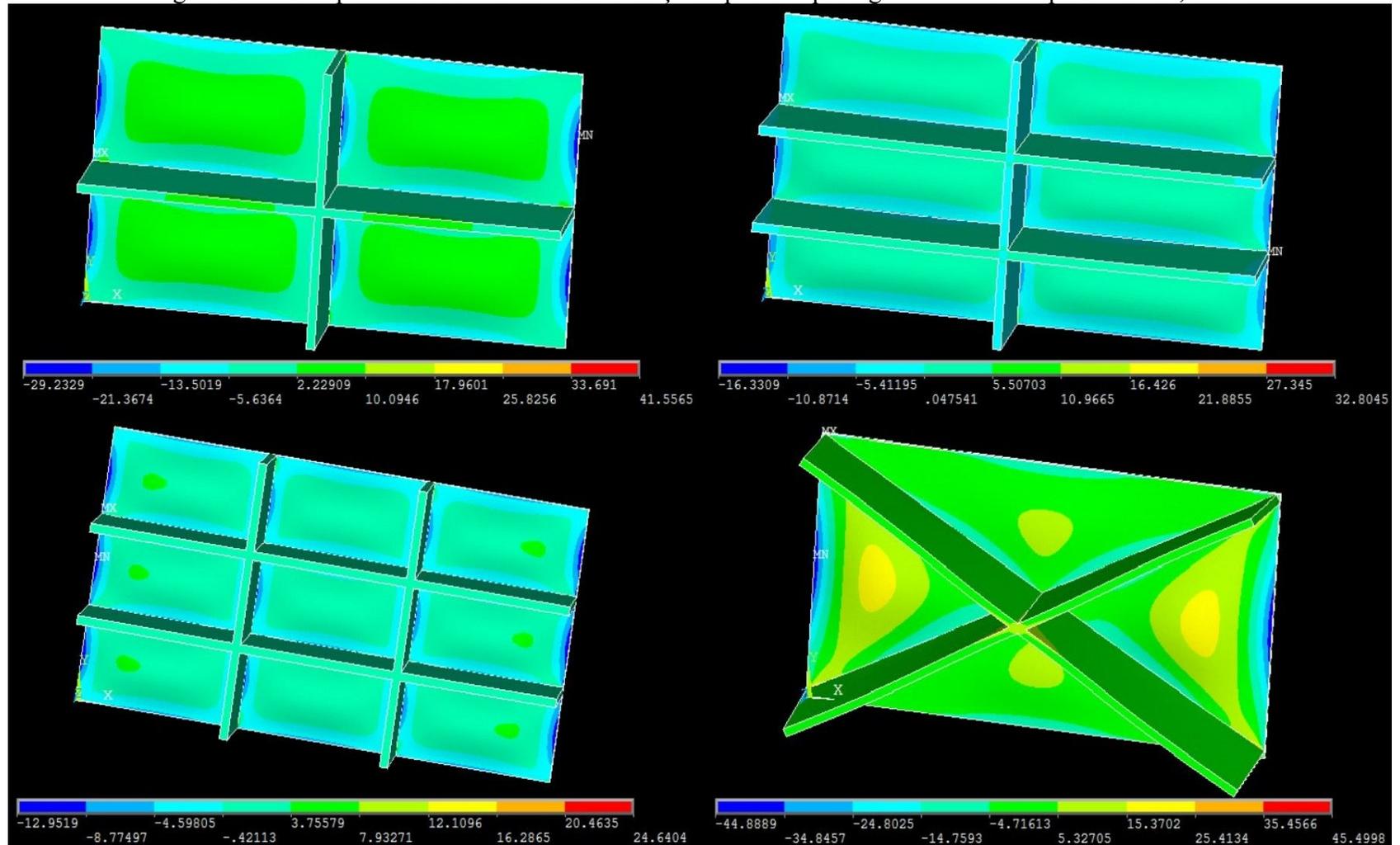
Tabela B 3 – Informações técnicas da prensa hidráulica

|  |   |
|--|---|
| Capacidade                                 | 500kN, 50T  |
| Indicação                                  | Analogica e digital   |
| Método de carga                            | Pressão interna do cilindro com célula de alta precisão   |
| Velocidade de carga                        | Ajuste de velocidade: 0,1 – 2,0 fundo de escala/min<br>Faixa de controle: 5 – 100% do fundo de escala |
| Métodos de ajuste dos parâmetro do ensaio  | Dialogo via teclado   |
| Máx. Dist. entre placas de compressão [mm] | 800   |
| Diâmetro de placas de compressão [mm]      | 120   |
| Máx. velocidade carregamento [mm/min]      | 80 (60Hz)   |
| Deslocamento pistão [mm]                   | 250   |
| Velocidade cabeçote [mm/min]               | 400 (60Hz)  |
| Área efetiva para testes (L x P) [mm]      | 650 x 650   |
| Dimensões: [mm]                            | 960 x 650 x 2.400   |

Fonte: SHIMADZU

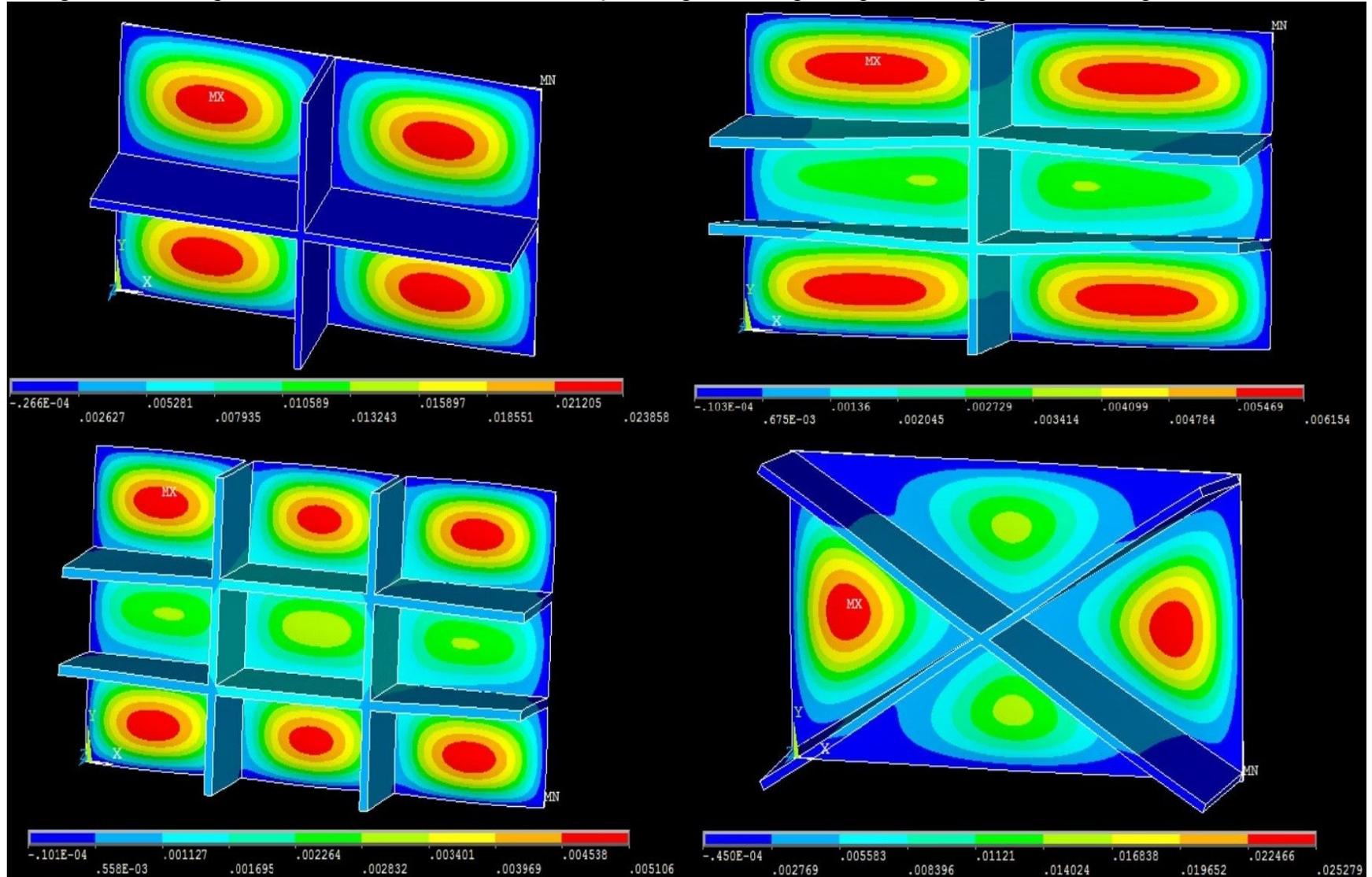
**APÊNDICE C – Comportamento das tensões e deformações para os modelos numéricos ideias**

Figura C 1 - Comportamento dos tensões na direção x para chapa engastada sob uma pressão de 7,5 mca



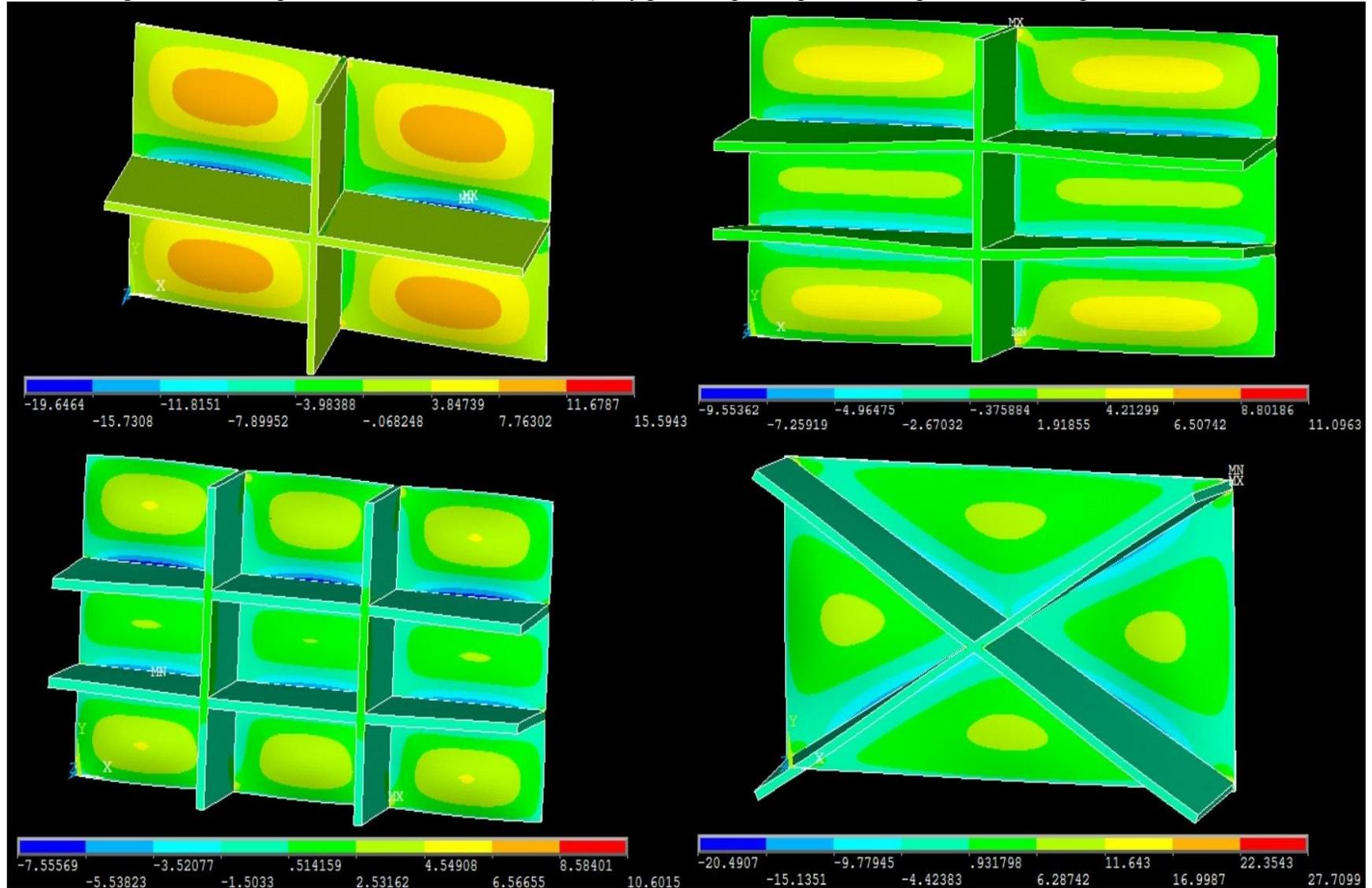
Fonte: Autor.

Figura C 2 - Comportamento dos deslocamentos na direção ortogonal a chapa simplesmente apoiada sob uma pressão de 2,5 mca



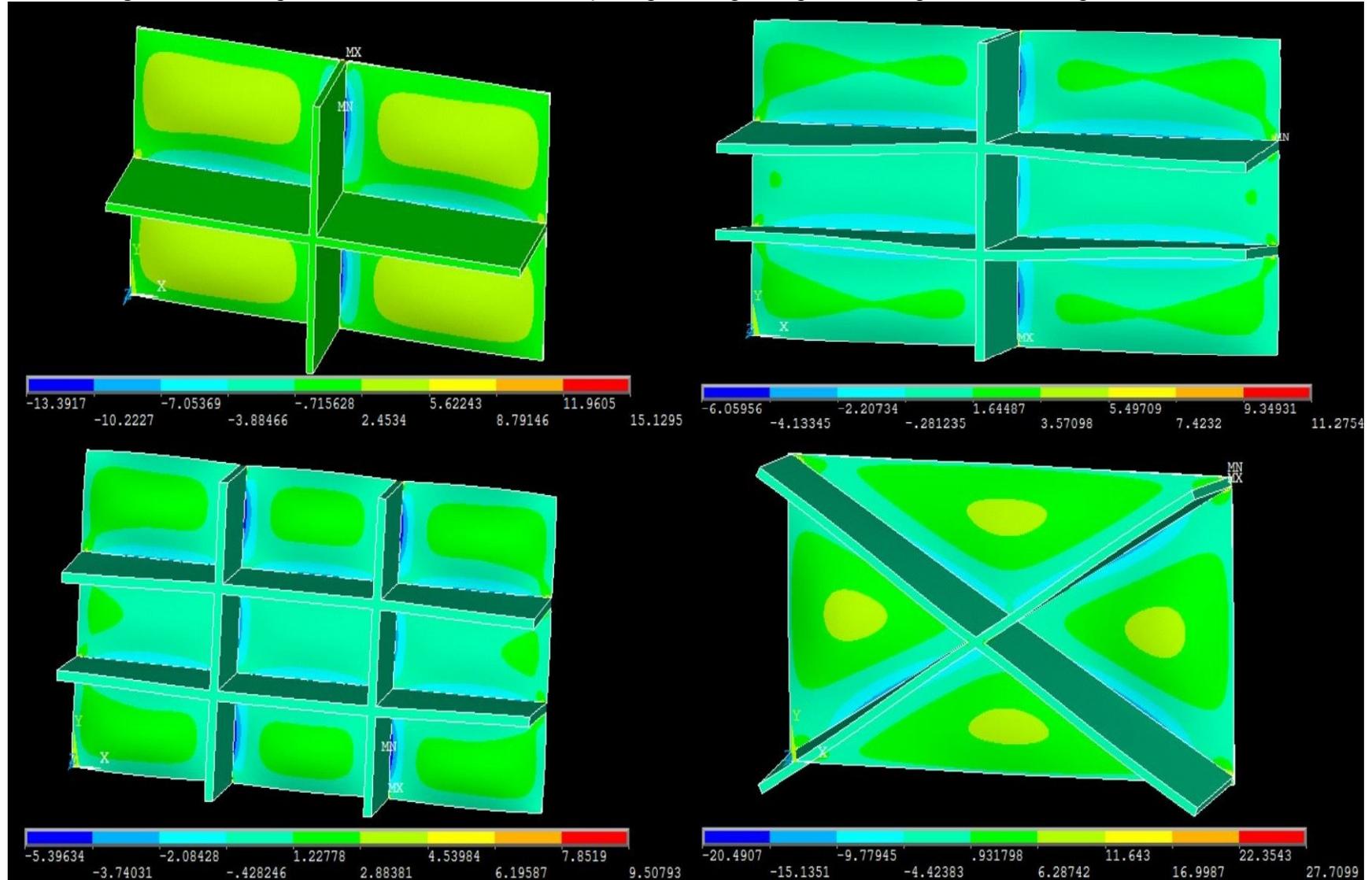
Fonte: Autor.

Figura C 3 - Comportamento dos tensões na direção y para chapa simplesmente apoiada sob uma pressão de 2,5 mca



Fonte: Autor.

Figura C 4 - Comportamento dos tensões na direção x para chapa simplesmente apoiada sob uma pressão de 2,5 mca



Fonte: Autor.