Leonardo Monteiro Mazzariol

Escalonamento de paineis reforçados sujeitos à cargas de impacto

São Paulo

Setembro de 2012

Leonardo Monteiro Mazzariol

Escalonamento de paineis reforçados sujeitos à cargas de impacto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

Curso e área de concentração:
Engenharia Mecânica, Projeto e Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Marcílio Alves

São Paulo

Setembro de 2012

Leonardo Monteiro Mazzariol

Escalonamento de paineis reforçados sujeitos à cargas de impacto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

Curso e área de concentração:
Engenharia Mecânica, Projeto e Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Marcílio Alves

São Paulo

Setembro de 2012

Ao grande avô Newton Roque Monteiro (*In memoriam*), que ensinou a importância do conhecimento, inspirou-me e continuará inspirando por longo tempo

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pela concessão de bolsa-auxílio para realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Marcílio por ter aberto tão prontamente as portas do laboratório de impacto e do mundo acadêmico, alimentando continuamente o espírito e a imaginação fértil que por pouco permaneceria suprimida por hierarquias. Sem sua orientação, esse trabalho não teria sido concluído.

Aos meus pais, Alfredino e Aline, por terem ensinado os valores de meus avós e me apoiado na decisão de voltar para a universidade, certamente a mais difícil até hoje e, com certeza, a mais gratificante também.

À Nadia, por fazer com que todos os dias dos últimos três anos tivessem cor e alegria sem igual. Por ter sido paciente, estando sempre ao meu lado, em todos os momentos difíceis e, principalmente, nos felizes também. Pois sem amor, sonhar não faz sentido.

Ao Érico, amizade para vida inteira, capaz de compreender com profundidade inigualável as nuances dos acontecimentos. Sempre com os chacoalhões e choques necessários para endireitar as ideias.

Ao grande amigo Vinícius, por propiciar momentos tranquilos e culturais tão importantes.

Aos amigos GMSIE, que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho. Rafael C. Santiago, Caio F. Brasilino, Miguel A. G. Calle, Renato T. Yamassaki, ao paciente Roberto E. Oshiro e Rafael T. Moura, que soube como ninguém auxiliar em muitas partes deste trabalho e, principalmente em muitas questões filosóficas pessoais.

Às tantas pessoas que contribuíram de alguma forma nesse período.
Por fim, agradeço às forças invisíveis que me guiaram e auxiliaram na execução deste trabalho.

“Let your light shine”

Resumo

Esta dissertação avalia a aplicação de leis de similaridade distorcidas no contexto de impacto estrutural. A análise se apoia em um estudo teórico, numérico e experimental do impacto de um indentador contra um painel duplo. O modelo analítico descreve de forma simplificada o comportamento de partes desta estrutura e as simulações numéricas reproduzem os ensaios experimentais que utilizam um protótipo (tamanho real) e modelo (escala reduzida). A diferença nas propriedades mecânicas do material de construção do modelo e protótipo é considerada no procedimento de escalonamento, bem como os efeitos de escala por causa da taxa de deformação. Ainda, diante das limitações do aparato experimental, é desenvolvida uma formulação para as leis de similaridade que permite variações da massa impacto e da velocidade inicial do elemento impactante no ensaio. Dessa forma, apresenta-se um procedimento que permite inferir o comportamento de estruturas em tamanho real sob carregamento de impacto através do uso de estruturas em escala, mesmo com as limitações de aparato ou diferenças das propriedades mecânicas do material.

Palavras-chaves: Impacto, Similaridade, Escala, Escalonamento, Estrutura, Naval.

Abstract

This work evaluates the distorted similarity laws applied in structural impact. The analysis is based in a theoretical, numerical and experimental studies of the impact of an indenter to a reinforced panel. The theoretical approach describes, in a simplified manner, the behaviour of the structure components while the numerical analysis reproduces the experiments performed in two scales: prototype (large scale) and model (small scale). Although the panels are made of different materials, this mismatch in mechanical behaviour is taken into account in the scaling procedure, as well as the scale effects due to strain rate. A formulation that allows flexibility in experiment variables such as initial velocity and impact mass is developed due to experimental apparatus limitations. In general lines, is developed a procedure allowing to infer the behaviour of a large scale structure under impact load using scaled structures, while using different materials for prototype and model and respecting the experimental apparatus limits.

Palavras-chaves: Impact, Similarity, Scaling, Structure, Naval.

Lista de Figuras

1.1 Eventos de colisão de navios com danos severos nas estruturas. 3

1.2 Experimento em escala real vs. Simulação. 4

1.3 Diversos cenário de encalhamento avaliados por Simulação Numérica (ALSOS; AMDAHL, 2007). 5

1.4 Escalabilidade de diversos experimentos de impacto (BOOTH; COLLIER; MILES, 1983). 6

1.5 Estudos realizados em estruturas em escala reduzida sem a aplicação de leis de similaridade. 7

1.6 Experimento em escala reduzida para avaliar as forças envolvidas e a dinâmica de corpo rígido e sua interação com o fluido do entorno (TABRI; MATUSIAK; VARSTA, 2009). 7

1.7 Curvas de ensaios numéricos e experimentais de uma viga "T", em duas escalas, engastadas e impactadas ao centro, utilizando a distorção das leis de similaridade proposta por Oshiro (2010). 7

2.1 Artefatos de escavação, civilização egípcia. 9

2.3 Experimentos em túnel de vento utilizando modelos em escala. 14

2.4 Análise de modelos em escala na construção civil. 15

2.5 Ensaios com modelos em escala para estudos de navios. 15

3.1 Close-up na solda à laser efetuada na viga-T de 1,0mm. 27

3.2 Foto da vigas soldadas e funcionais. 27

3.3 Experimentos de protótipo, modelo em escala utilizando similaridade imperfeita por Oshiro et al. (2011). 28

3.4 Aparato experimental para o ensaio das vigas de Oshiro et al. (2011). 28

3.5 Dimensões gerais e experimentos realizados em paineis duplos por Wang, Arita e Liu (2000). 29

3.6 Sequência de montagem do painel de 3,00mm de espessura, da esquerda para a direita, de cima para baixo. Ao fim, o painel aparece de ponta-à-cabeça. Os paineis modelo, de 0,25mm de espessura possuem montagem similar, diferindo apenas no desenho da chapa inferior. 31

3.7 Dimensões gerais do painel duplo. 32

3.8 Painel duplo de 0,25mm em teste do processo de soldagem. 33

3.9 Painel duplo modelo, construído a partir de chapas de 0,25mm. 33

3.10 Construção do painel de 3,0mm. 33

3.11 Geometrias dos suportes utilizados para os ensaios dos paineis. 34

3.12 Espécime de tração conforme norma ASTM E8. 34

3.13 Espécime de tração com extensômetro tipo Clip-Gauge. 35

3.14 Dados obtidos da máquina de tração para os aços de 0,25 e 3,00mm de espessura. 35

3.15 Curvas obtidas após tratamento dos dados de ensaios de tração para diferentes velocidades. 36

3.16 Ensaio de tração para Correlação Digital de Imagem. 38

3.17 Fluxo do código escrito em MATLAB para tratamento dos dados obtidos a partir do programa de análise de imagens DIC. 40

3.18 Sequência de imagens após tratamento do programa de DIC, "7-D". O espécime está em padrão randômico branco-e-preto, enquanto a malha deformada mostra o gradiente de deformações na direção longitudinal até instantes antes da falha. Fotos a cada intervalo de 5s. 40

3.19 Curvas obtidas após tratamento dos dados obtidos por DIC. As porções elásticas contemplam menor intervalo de tempo entre fotos. As franjas indicam o descarregamento de uma seção transversal. 41

3.20 Corpos de Prova para SHPB. 41

3.21 Barra de Hopkinson de Compressão. 42

3.22 Curvas obtidas após tratamento dos dados de ensaios de compressão realizados na SHPB. 45

3.23 Interpolação da curva do material a partir de resultados obtidas por DIC (e=3,00mm). 46

3.24 Interpolação da curva do material a partir de resultados obtidas por DIC (e=0,25mm). 47

3.25 Regressão linear para obtenção dos parâmetros da equação de Cowper-Symonds. 48

3.26 Regressão linear para obtenção dos parâmetros da equação de Norton. 48

3.27 Fator β_{σ_0} para casos diferentes de curvas tensão vs. deformação. 50

3.28 Diversas curvas avaliando diferentes critérios para o cálculo de σ_0 e β_{σ_0}. 51

3.29 Critério de tensão média até a ruptura do material menos dúctil ($\varepsilon = 0.55$). 53

3.30 Critério de β_{σ_0} como função da tensão de escoamento σ_Y. 53

4.1 Preparação para o ensaio do protótipo. 57

4.2 Sinal de teste de filtros passabaixa com diferentes valores de corte. 58

4.3 Aparato experimental do MIBE para ensaio dos modelos. Montagem de câmera de alta velocidade, iluminação LED, vibrômetro a Laser, acelerômetro e sistema de filtragem e aquisição. 60

4.4 Detalhes do aparato experimental montado para ensaio no MIBE. 61

4.5 Detalhes do conjunto fixado à guias lineares para impacto nos paineis em escala reduzida. 62

4.6 Captura de quadros do vídeo de alta velocidade dos ensaios dos paineis protótipo 1 (à esquerda) e 2 (à direita). Instantes de tempo em milissegundo. 63

4.7 Chapa superior do painel protótipo 1 após ser impactado pelo indentador. 64

4.8 Interseção cruciforme do painel protótipo 1 após ensaio. 64

4.9 Chapa superior do painel protótipo 2 após ser impactado pelo indentador. 65

4.10 Interseção cruciforme do painel protótipo 2 após ensaio. 65

4.11 Posicionamento do conjunto indentador-massa e dos protótipos ao término dos experimentos. 65

4.12 Dados adquiridos (sem tratamento) dos experimentos com paineis protótipos. 66

4.13 Captura de quadros do vídeo de alta velocidade do ensaio do painel modelo VSG. Instantes de tempo em milissegundo. 67

4.14 Experimento em escala reduzida. 68

4.15 Dados adquiridos (sem tratamento) dos experimentos com paineis em escala. 68

4.16 Detalhe da solda cruciforme do painel VSG. 68

4.17 Paineis modelos e seus mecanismos de deformação após ensaio em escala. 69

4.18 Correlação experimental do deslocamento e força vs. deslocamento entre modelos e protótipos com uso das leis de similaridade. 70

4.19 Correlação experimental da energia no tempo e energia vs. deslocamento com uso das leis de similaridade. 71

5.1 Placa retangular engastada impactada ao centro (ZHANG, 1999). 74

5.2 Placa retangular impactada por objeto retangular (ZHANG, 1999). 75

5.3 Mecanismo de flambagem de elemento em L. 75

5.4 Mecanismo de flambagem para a interseção cruciforme. Coluna à direita adaptado de Yang e Caldwell (1988) e à esquerda, interpretação tridimensional. 77

5.5 Esquema de mecanismos de flambagem. 77

5.6 Desenho esquemático do painel em estudo. 78

5.7 Condições de Contorno da Chapa Superior. 79

5.8 Esquema de deflexão da chapa superior 80

5.9 Carregamento para colapso total de uma seção de viga de largura B e altura H. 83

5.10 Modelo simplificado da interseção cruciforme. 85

5.11 Mecanismo de flambagem. As rótulas plásticas são indicadas pelos círculos nas extremidades dos segmentos. 86

5.12 Mecanismo Flambagem chapa sujeita a compressão. 88

5.13 Processo iterativo para estabelecer a curva de força por deslocamento e energia do painel reforçado. 91

5.14 Resultados do método analítico para o protótipo utilizando duas leis de viscoplasticidade diferentes. 92

5.15 Resultados do método analítico para o modelo sem correção utilizando duas leis de viscoplasticidade diferentes. 92

5.16 Resultados do método analítico para o modelo corrigido utilizando duas leis de viscoplasticidade diferentes. 92

5.17 Comparativo entre experimentos de protótipo e modelos e as curvas obtidas analiticamente utilizando a lei viscoplástica de Norton. 94

5.18 Comparativo entre experimentos de protótipo e modelos e as curvas obtidas analiticamente utilizando a lei viscoplástica de Cowper-Symonds. 95

5.19 Correlação analítica entre modelo e protótipo utilizando lei viscoplástica de Norton. 96

5.20 Correlação analítica entre modelo e protótipo utilizando lei viscoplástica de Cowper-Symonds. 96

6.1 Número de elementos por dobra de flambagem. 102

6.2 Modelo numérico do painel duplo. Chapas foram modeladas com 4 elementos ao longo da espessura. 104

6.3 Transição do tamanho do elemento das chapas cruciformes. 105

6.4 Detalhes da malha em elementos finitos para interseção em cruz. 105

6.5 Geometria e malha em elementos finitos do suporte. 106

6.6 Malha em elementos finitos da bigorna, representada com 0,5m de altura e 1,0x1,0m. Tamanho médio de 40 mm. 106

6.7 Malha em elementos finitos do Indentador. 106

6.8 Curva tensão verdadeira vs. tensão verdadeira utilizadas no programa de elementos finitos. 108

6.9 Correlação entre resultados experimentais, analíticos e numéricos para o painel protótipo. 109

6.10 Comparativo entre resultados experimentais, analíticos e numéricos para o ensaio do modelo MLT. 109

6.11 Comparativo entre resultados experimentais, analíticos e numéricos para o ensaio do modelo VSG. 110

6.12 Correlação de resultados numéricos para os paineis Protótipo, MLT e VSG. 111

6.13 Aspecto geral de deformação dos paineis simulados. 112

6.14 Vista superior do painel MLT simulado. Visualização sem a chapa superior. O mecanismo de flambagem da cruciforme ocorre em pétalas rotacionadas como um catavento ou moinho. 113

6.15 Captura de quadros do vídeo da simulação numérica dos paineis Protótipo (à esquerda) e MLT (à direita). Instantes de tempo em milissegundo. Os tempos do modelo MLT foram corrigidos usando a fórmula $\beta_t = \beta$. 114

6.16 Captura de quadros do vídeo da simulação numérica dos paineis Protótipo (à esquerda) e VSG (à direita). Instantes de tempo em milissegundo. Os tempos do modelo VSG foram corrigidos usando a fórmula $\beta_t = \beta/\beta_V$. 115

7.1 Correlação numérica entre protótipo, modelo MLT e duas abordagens VSG com diferentes fatores β_{σ_0}. 120

7.2 Curvas corrigidas para protótipo 2 e modelos MLT e VSG para as abordagens analítica, numérica e experintal. 121

A.1 Desenho de corte das chapas dos paineis modelo. 132

A.2 Desenho de corte das chapas dos paineis protótipos. 133

Lista de Tabelas

1.1 Afretamentos de navios por segmento (em US$ milhões) (SINAVAL, 2008) 2

2.1 Variáveis de Impacto escritas na base MLT. 12

2.2 Fatores de escala entre modelo e protótipo escritas na base MLT 16

2.3 Variáveis de Impacto escritas na base VSG. 18

2.4 Fatores de escala para a base VSG, em função de β_V, β, e β_{σ_0}. 22

2.5 Fatores de escala para a base VSG, em função de β_G, β, e β_{σ_0}. 22

2.6 Fatores de escalonamento usando a base VSG para diversos casos apresentados nas referências. 22

3.1 Informações gerais das geometrias a serem utilizadas nos ensaios para o protótipo e modelos. Dimensões em mm. 31

3.2 Velocidades de ensaio e taxa de deformação média para os espécimes de tração de diferentes espessuras. 36

3.3 Valores das constantes do material para os modelos de Norton e Cowper-Symonds 49

3.4 Valores de β_{σ_0} 50

4.1 Informações do Martelo de Impacto 56

4.2 Informações do Martelo de Impacto de Baixa Energia (MIBE) 60

4.3 Deslocamentos máximos obtidos experimentalmente. 71

5.1 Entradas do programa. 90

5.2 Comparação dos deslocamentos máximos obtidos experimental e analiticamente. 94

6.1 Comparativo entre elementos de casca e sólido para quesitos de interesse 103

6.2 Modelos de materiais utilizados na simulação. 107

6.3 Condições do ensaio experimental e as entradas do programa em elementos finitos. 108

B.1 Dados do material 3,0mm. Curva na Fig. 6.8. 135

B.2 Dados do material 0,25mm. Curva na Fig. 6.8. 136

Lista de Símbolos

α	Ângulo de uma dobra por flambagem
β	Fator de escala de comprimento
β_X	Fator de escala da variável X
Δt	Incremento de tempo, *timestep*
δ	Deslocamento
$\dot{\delta}$	Velocidade do indentador
ε	Deformação
ε_{eng}	Deformação de engenharia ou de Cauchy
ε_{eqv}	Deformação equivalente de Von Mises
ε_{green}	Deformação de Green
ε_{ln}	Deformação logarítmica ou verdadeira
ε_{xx}	Deformação da direção xx
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
$\dot{\varepsilon}_{xx}$	Taxa de deformação na direção xx
$\dot{\varepsilon}_0$	Parâmetro de material de Norton
λ	Alongamento de uma fibra
Π_i	Conjunto de adimensionais i.
ρ_b	Densidade do material das barras da barra de Hopkinson (SHPB)
σ	Tensão (utilizada para dedução dos adimensionais)
σ_0	Tensão de escoamento de um material rígido-perfeitamente-plástico

σ_d	Tensão dinâmica
σ_{eng}	Tensão de engenharia ou de Cauchy
σ_{ln}	Tensão logarítmica ou verdadeira
σ_U	Tensão verdadeira de ruptura
σ_Y	Tensão de transição elastoplástica
$[X]_m$	Variável X do modelo
$[X]_p$	Variável X do protótipo
A	Aceleração
A_0	Área inicial de um espécime de tração ou compressão
A_i	Área instantânea de um espécime de tração ou compressão
$\mathbf{C}$	Matriz de amortecimento
C_b	Velocidade de propagação de uma onda elástica na barra de entrada da SHPB
D	Parâmetro de material de Cowper-Symonds
E_b	Módulo de elasticidade das barras da SHPB
e_p	Espessura da chapa
e_i	Espessura instantânea de um espécime de tração ou compressão
$\dot{E}_{int}$	Fluxo de energia interna
F	Força
G	Massa de impacto.
H	Comprimento de meia dobra de flambagem
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez
L	Variável de Comprimento.
L_0	Comprimento inicial de um espécime de tração ou compressão
L_i	Comprimento instantâneo de um espécime de tração ou compressão
l_0	Largura inicial de um espécime de tração
l_i	Largura instantânea de um espécime de tração
$\mathbf{M}$	Matriz de massa
M_0	Momento de colapso de uma seção
p	Parâmetro de material de Cowper-Symonds
q	Parâmetro de material de Norton
t	Tempo
$\ddot{\mathbf{U}}$	Vetor de aceleração nodal

$\dot{\mathbf{U}}$	Vetor de velocidade nodal
u_i	Deslocamento na interface i da SHPB
V	Velocidade
V_0	Velocidade inicial
v_i	Velocidade da interface da Barra de Hopkinson (SHPB)

Sumário

CAPÍTULO 1 **Introdução** 1

1.1 Objetivos Gerais e Específicos 8

CAPÍTULO 2 **Similaridade** 9

2.1 Similaridade na Engenharia 10

2.1.1 Similaridade no Impacto 16

2.2 Generalização da Distorção 17

2.3 Comentários Adicionais 22

CAPÍTULO 3 **Projeto do Painel Duplo e Caracterização de Materiais** 25

3.1 Delimitação do Estudo 25

3.2 Descrição da Geometria e Fabricação 30

3.3 Ensaios de Tração Quase-estáticos 34

3.4 Ensaios de Compressão Dinâmicos 40

3.5 Calibração do Modelo de Material 45

3.6 Fator de Tensão β_{σ_0} 49

CAPÍTULO 4 **Testes de Impacto nos Componentes** 55

4.1 Parâmetros de Ensaio 55

4.2 Painel Duplo – Protótipo 56

4.3 Paineis Duplos – Modelo 59

4.4 Resultados 62

4.5 Tratamento de dados e Resultados 70

CAPÍTULO 5 **Modelagem Teórica** 73

5.1 Revisão Bibliográfica 73

5.2 Desenvolvimento das Equações 78

5.2.1 Modelo 78

5.2.1.1 Chapa Superior 79

5.2.1.2 Interseção cruciforme 85

5.2.2 Implementação Numérica 90

5.3 Resultados 90

CAPÍTULO 6 **Modelagem Numérica** 99

6.1 Método dos Elementos Finitos 99

6.2 Escolha do Elemento 101

6.3 Modelo Numérico 104

6.4 Resultados 108

CAPÍTULO 7 **Comentários Finais** 117

CAPÍTULO 8 **Conclusões** 123

REFERÊNCIAS 125

APÊNDICE A **Desenhos de Manufatura do Painel Duplo** 131

Apêndice B **Dados do Material para Elementos Finitos** 135

Capítulo 1

Introdução

Durante a década de 50, a indústria naval brasileira registrou grande desenvolvimento, impulsionada pelo Plano de Metas de Juscelino Kubitschek, que previa o cumprimento de metas em cinco setores da economia: energia, transporte, indústrias de base, alimentação e educação. Ao final dos anos 70, o Brasil chegou a ser o segundo maior construtor de navios por Tonelagem de Porte Bruto (TPB) (SINAVAL, 2008).

Em meados dos anos 90, a produção quase se extinguiu. Porém, o ano de 1998 marca o início de uma grande movimentação para incentivar o projeto e construção de navios de bandeira nacional (SINAVAL, 2008), impulsionado por encomendas da PETROBRAS de navios de apoio às plataformas de exploração e produção de petróleo.

Em 2001 teve início o Programa de Modernização e Expansão da Frota (Promef) — parte do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do governo federal — de forma a atender as necessidades da Transpetro[1] (SINAVAL, 2008; TRANSPETRO, 2012). A primeira fase, Promef I, compreende a construção de 26 navios, sendo que 23 deles já foram licitados, perfazendo um total de US$2,638 bilhões. Para a segunda fase, Promef II, estão previstos mais 23 novos navios. É importante ressaltar que todos são navios de grande porte, devendo ser construídos no Brasil, com índices de nacionalização de 65% (Promef I) e 70% (Promef II) por estaleiros competitivos internacionalmente (TRANSPETRO, 2012).

Do ponto de vista da marinha mercante, é de crucial importância que navios de bandeira brasileira tenham maior participação no transporte marítimo de longo curso, visto que essa parcela representa mais de dois terços do custo dos afretamentos realizados

[1] Petrobrás Transporte S.A.

em 2008, conforme Tabela 1.1. São quatro aspectos importantes do fortalecimento da frota marítima brasileira (SINAVAL, 2008):

- 95% do comércio mundial é realizado por via marítima. Assim, a navegação é um elemento essencial para a economia brasileira;
- A navegação própria inibe a prática abusiva de preços;
- A construção dessa frota cria empregos e renda no país, impulsionando a indústria de Construção Naval e de outros segmentos;
- A existência de frota própria assegura a soberania nacional no caso de crises externas e reduz o pagamento de fretes e afretamentos ao Exterior.

Tabela 1.1 Afretamentos de navios por segmento (em US$ milhões) (SINAVAL, 2008)

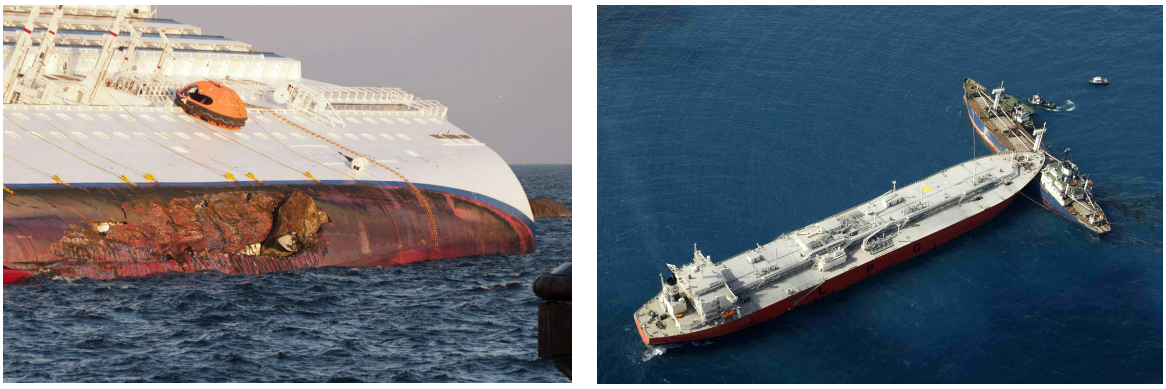
Tipo de Navegação	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Cabotagem	40,6	77,8	262,0	79,3	98,2	135,8
Longo curso	452,6	800,1	1237,2	1787,1	1565,3	2120,1
Apoio marítimo	129,6	238,7	306,2	399,6	543,0	765,2
Apoio portuário	0,8	2,0	9,1	37,0	74,7	18,6
Dragagem	–	–	–	33,7	–	–

Os dados apresentados mostram a importância estratégica do setor e justificam os investimentos realizados e previstos. Devido à ordem de grandeza desses aportes financeiros e, por conseguinte, do valor agregado dos navios (bem como das plataformas e infraestrutura), é importante estudar formas de atender, com assertividade, aos mais variados requisitos. Dentre esses requisitos, estão os operacionais diversos e os relacionados à segurança do navio, do meio ambiente e da infraestrutura de apoio construída. A avaliação da segurança nesses moldes exige novos métodos para determinar os cenários críticos e, assim, assegurar a integridade das estruturas envolvidas quando da possível ocorrência de acidentes (SERVIS; SAMUELIDES, 1999; WANG et al., 2006; SOARES et al., 2009).

São exemplos desses cenários críticos as colisões de:

- Navio contra navio, Fig.1.1b;
- Navio contra plataforma;
- Navio contra construções (pilares de pontes, eclusas e ancoradouros);

- Encalhamentos, Fig. 1.1a;



(a) Navio Costa Concordia após colisão com rochedo na costa da Itália em 13 de janeiro de 2012.

(b) Colisão em 90° de navio gaseiro M/V Roman contra o navio de lenha M/V Springbok (CARGOLAW, 2003)

Figura 1.1 Eventos de colisão de navios com danos severos nas estruturas.

São consequências dessas colisões (WANG et al., 2006):

- Vazamento de carga;
- Alagamento de compartimentos;
- Perda total do navio e carga (afundamento);
- Fatalidades;
- Danos permanentes à estrutura do navio;
- Incêndio e explosões;
- Bloqueio de tráfego (por exemplo, canais e pontes)

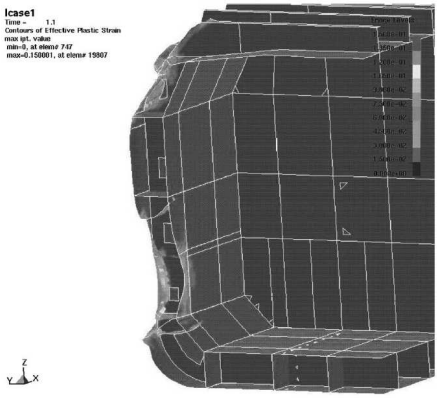
Formas de mitigar as consequências de colisões de navios têm sido estudadas por diversos autores, tanto no emprego de diferentes materiais e novos conceitos de geometria para absorver de forma segura a energia da colisão, como pelo uso de sistemas de gerenciamento e controle de rotas auxiliados por GPS[2] para diminuir a probabilidade de uma colisão propriamente dita (PAIK et al., 2003; WANG et al., 2006; SOARES et al., 2009).

Embora colisões de navios ocorram com certa frequência, não são abundantes as informações que relatem esses eventos. Contornando isso, Minorsky (1959) avaliou de forma pioneira a escassa documentação sobre colisões daquela época, criando empiricamente um modelo analítico capaz de estimar o volume da região danificada em função da energia cinética; sendo esses modelos globais aprimorados por Petersen (1982), Hutchinson (1986), Zhang (1999) e outros autores.

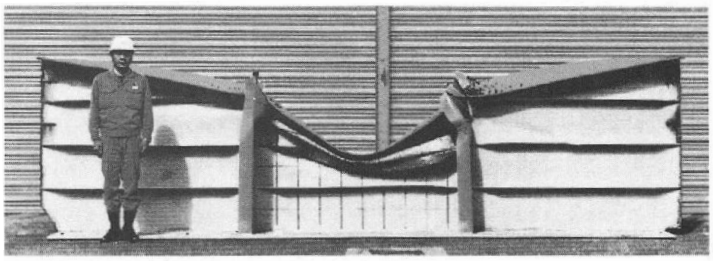
[2] *Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global.

Mesmo com custos elevados, a necessidade de adquirir mais informações sobre eventos de colisão levou à realização de experimentos em estruturas instrumentadas em escala real, conforme Fig. 1.2a. Tais ensaios foram e são importantes para avaliar não só as deformações das regiões afetadas próximas ao impacto, mas também o comportamento geral do navio[3].

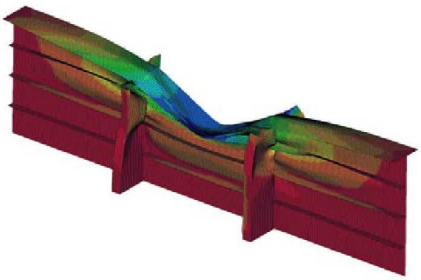
(a) Experimentos em escala real de proa contra costado realizados por aliança nipo-alemã-holandesa (ZHANG, 1999).



(b) Simulação numérica em elementos finitos do ensaio à esquerda(LEHMANN; PESCHMANN, 2002).



(c) Ensaio de impacto com indentador em queda livre (OHTSUBO; KAWAMOTO; KUROIWA, 1994).



(d) Simulação do experimento à esquerda(OZGUC; DAS; BARLTROP, 2005).

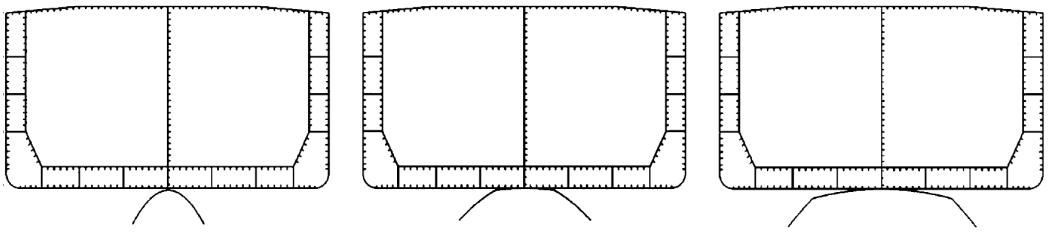
Figura 1.2 Aprimoramento das ferramentas computacionais utilizando ensaios reais para comparação.

Para investigar mais a fundo o comportamento local sob os esforços, pesquisadores elaboraram equações para descrever a resposta de estruturas tubulares, chapas e junções obtidas experimentalmente. Estruturas mais complexas, como a da Fig. 1.2c, foram sendo estudadas com solicitações estáticas e dinâmicas. De maneira similar, os resultados obtidos por modelagem numérica — principalmente o Método dos Elementos Finitos — foram comparados a de experimentos de forma a desenvolver as técnicas e obter aproximações cada vez mais aprimoradas; como em Carlebur (1995), Lehmann e Peschmann (2002), Fig. 1.2b e Ozguc, Das e Barltrop (2005), Fig. 1.2d. Em alguns casos, a influência dos parâmetros das simulações foram variados e avaliados na resposta final (KITAMURA,

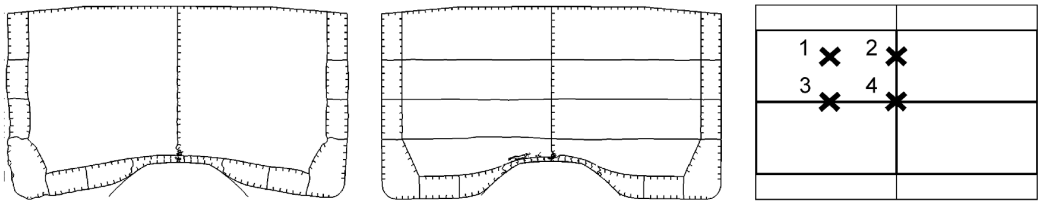
[3] ou *External Mechanics*, Mecânica de Corpo Rígido.

2002; WIŚNIEWSKI; KOŁAKOWSKI, 2003).

O desenvolvimento das ferramentas computacionais permitiu que se avaliasse a integridade dos navios em variados cenários de colisão, sem que fosse necessário realizar esses ensaios em escala real. Exemplos são encontrados em Alsos e Amdahl (2007), Fig. 1.3, no qual testaram numericamente diversos casos de encalhamento e avaliaram a representação e os pontos críticos da estrutura do duplo fundo do navio; Yagi et al. (2009), em impactos entre proas anguladas contra costados duplos; Ozguc, Das e Barltrop (2005), no qual a integridade estrutural de costados simples e duplo em eventos de colisão e em Servis e Samuelides (1999) ao avaliarem a integridade do costado de um navio em fase de projeto.



(a) Condições do leito marítimo. Rochedo, recife e banco de areia.



(b) Posição de impacto: (1) Meio do tanque, (2)Antepara transversal afastada da linha central, (3) Encalhamento na linha central e (4) Na linha central no encontro com uma antepara transversal.

Figura 1.3 Diversos cenário de encalhamento avaliados por Simulação Numérica (ALSOS; AMDAHL, 2007).

As linhas de estudo citadas anteriormente investigam a forma de observar, equacionar e compreender os fenômenos para ser capaz de representá-los adequadamente; variando parâmetros e descobrindo a influência deles na resposta estudada. Uma outra forma de se avaliar essas respostas é com o uso de modelos, principalmente em escala. Dentre os benefícios de usar modelos reduzidos estão a menor quantidade de material[4], maior controle de variáveis de ensaio, contornar limitações do aparato experimental etc. Porém, nos casos de impacto, o uso de modelos em escala frequentemente fornece resultados impróprios, como pode ser visto na Fig. 1.4.

Por essa razão, alguns ensaios utilizam estruturas de dimensões reduzidas cujas repostas não são utilizadas diretamente para representar a estrutura em escala maior, como na proa em tamanho reduzido ensaiado por Amdahl (1983), Endo et al. (2002) e Yamada et al. (2003), Fig. 1.5a e nos paineis reforcados de Alsos e Amdahl (2009), Cho e Lee

[4]Muitas vezes, menor custo.

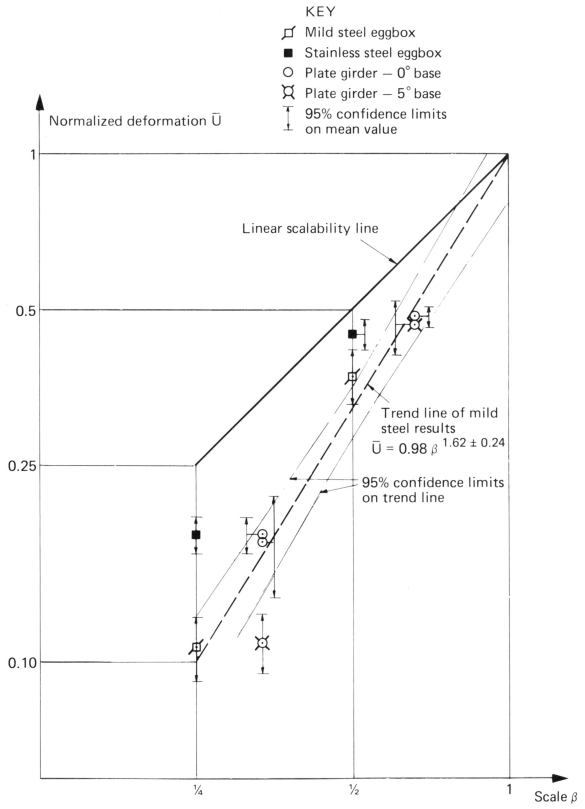


Figura 1.4 Escalabilidade dos deslocamentos normalizados para diversos experimentos de impacto (BOOTH; COLLIER; MILES, 1983). Os resultados experimentais se distanciam da linearidade.

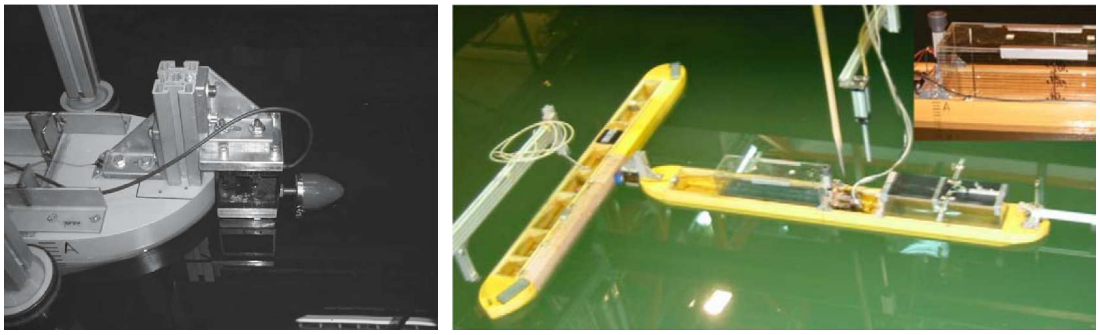
(2009) e Wang, Arita e Liu (2000), Fig 1.5b. Em outros, algumas correções são feitas de forma a obter os resultados desejados para diferentes escalas, como realizado por Tabri, Määttänen e Ranta (2008), ao avaliar o comportamento global do navio perante colisão lateral, utilizando modelos de navio em escala, Fig. 1.6.

Em outros casos, a representação de um evento de impacto utilizando modelos se torna possível com a mudança de alguns parâmetros de ensaio, como realizado numericamente por Mazzariol et al. (2010) e experimentalmente por Oshiro et al. (2011), Figs. 1.7a e 1.7b, respectivamente. Por ter sido usada experimentalmente apenas em uma ocasião, a técnica desenvolvida por Oshiro (2010) para representar eventos de impacto com o uso de modelos em escala, exige ainda testes adicionais.

(a) Proa em ensaio quase estático, diâmetro de 3,0m e altura de 2,5m (YAMADA et al., 2003).

(b) Painel duplo de dimensões gerais 1,3 x 1,3m (WANG; ARITA; LIU, 2000).

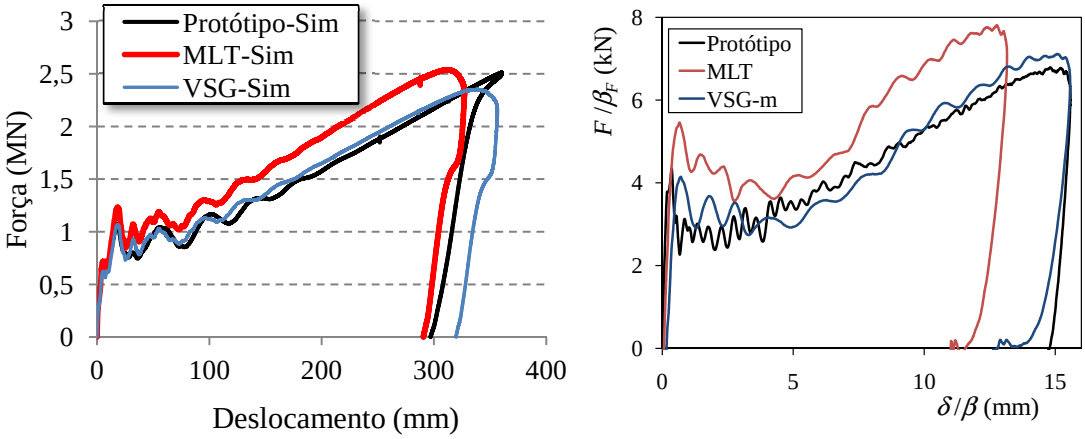
Figura 1.5 Estudos realizados em estruturas em escala reduzida sem a aplicação de leis de similaridade.



(a) Arranjo para medição de força durante o evento de colisão.

(b) Experimento de colisão de proa contra costado.

Figura 1.6 Experimento em escala reduzida para avaliar as forças envolvidas e a dinâmica de corpo rígido e sua interação com o fluido do entorno (TABRI; MATUSIAK; VARSTA, 2009).



(a) Resultados numéricos obtidos por Mazzariol et al. (2010) com escala 1:20.

(b) Resultados experimentais obtidos por Oshiro et al. (2011) com escala 1:4 e diferentes materiais.

Figura 1.7 Curvas de ensaios numéricos e experimentais de uma viga "T" engastada e impactada ao centro, utilizando a distorção das leis de similaridade proposta por Oshiro (2010).

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

A necessidade de realizar experimentos para aprofundar o conhecimento acerca de uma determinada estrutura, juntamente com a complexidade intrínseca e elevados custos de ensaios envolvendo grandes dimensões, motiva a realização de ensaios em escala reduzida. Em modelos numéricos e analíticos é possível representar geometrias arbitrárias em diferentes escalas, assumindo as condições de contorno como perfeitas; materiais rígidos e rígido-plásticos; materiais idênticos, mesmo para diferentes espessuras. Na prática, a construção de um modelo real exige que várias limitações sejam contornadas, como a rigidez dos suportes, restrições do aparato experimental como velocidade, massa, dimensões gerais etc.

Neste trabalho será estudado o escalonamento do impacto de um indentador contra um painel duplo. Para tal, serão utilizados modelos analíticos que descrevem de forma simplificada o comportamento de partes da estrutura, além de simulações numéricas e ensaios experimentais. Diversas etapas são necessárias para se atingir o objetivo. Primeiramente, são avaliadas leis de similaridade imperfeita e suas aplicações, Capítulo 2. Em seguida, no Capítulo 3, são descritos os projetos e construções dos modelos e protótipo, juntamente com os respectivos suportes e indentadores e a caracterização dos materiais. De posse dos parâmetros necessários para calcular as condições iniciais do ensaio — obtidos na etapa de caracterização do material, os experimentos de impacto em paineis duplos puderam ser realizados, Capítulo 4. Posteriormente, os resultados do ensaio são comparados com as curvas estimadas por métodos analíticos, Capítulo 5 e, pelas simulações numéricas via elementos finitos, no Capítulo 6. As discussões são realizadas em cada seção dos capítulos que contém resultados. Comentários finais e conclusões, Caps. 7 e 8 finalizam este trabalho.