

Hugo Manuel Farinha Rodrigues

**Análise de Falhas nas Superfícies de Alto Desempenho para a Estabilidade
Transversal de Navios (Robaletes)**

Lisboa

2009

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

**Análise de Falhas nas Superfícies de Alto Desempenho para a Estabilidade
Transversal de Navios (Robaletes)**

Hugo Manuel Farinha Rodrigues

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins
(FCT/UNL, DEMI)

Co-Orientador: Engenheiro Luís Manuel da Silva Leal das Neves
(Marinha Portuguesa, Direcção de Navios)

Lisboa

2009

Ao leitor, pela curiosidade.

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expressa a minha gratidão, especialmente:

Ao meu Orientador Científico, Professor Doutor Rui Fernando Martins, do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, pelo apoio incondicional, pela sua constante e permanente disponibilidade, e pela sua combinação perfeita de críticas, sugestões e incentivos.

Ao co-Orientador Eng. Luís Leal das Neves, da Direcção de Navios da Marinha Portuguesa, agradeço a sua disponibilidade e a oportunidade dada de participar num projecto aliciante.

À minha família, pelo seu incentivo, confiança e paciência em todos os meus trabalhos.

À Joana, pelo seu carinho, e por me lembrar constantemente para aproveitar a vida.

Finalmente, mas não menos importante, aos meus amigos e colegas de curso e de Faculdade, em particular ao Pedro Catarino, João Pedro e João Teixeira pela sua amizade e companheirismo.

Resumo

Durante a manutenção periódica feita a um navio, foram detectadas várias fissuras ao longo da ligação soldada do robalete ao casco, assim como na estrutura interna do robalete. As fissuras encontradas comprometiam a capacidade de resposta das superfícies de alto desempenho às solicitações de carga actuantes e, a longo prazo, poderiam colocar em risco a estanqueidade do casco.

Esta tese apresenta uma análise realizada às falhas estruturais encontradas, recorrendo a métodos numéricos e analíticos, de modo a identificar as causas destas e a propor melhorias que as evitassem. Foram identificadas várias zonas de concentração de tensões, que coincidiam com as zonas críticas onde se registaram as falhas estruturais, tendo sido confirmada a influência dos reforços transversais, quer do casco como do robalete, para um aumento dos níveis de tensão na região soldada do robalete ao casco.

Várias geometrias alternativas à estrutura interna actual do robalete são apresentadas, de modo a evitar o aparecimento de fendas no seu interior, tendo igualmente sido verificado que o aparecimento de fendas por fadiga, na ligação soldada do robalete ao casco, decorrente do elevado nível de tensões a que a estrutura está sujeita, pode ser reduzido por aplicação de esquadros ou de um ferro bolbo à ligação estudada.

A análise à fadiga imposta pela sociedade classificadora *Germanischer Lloyd* foi aplicada à nova solução estrutural e é apresentada na dissertação.

Palavras-Chave: Robaletes, Falhas Estruturais, Análise de Falhas, Desenvolvimento de Novas Soluções Estruturais, Análise à Fadiga

Abstract

During a periodical maintenance of a ship, several cracks were detected in the internal structure of the bilge keels, as well as on the connection of these to the hull. The cracks found compromised the watertight integrity of the hull, and in the long run, could jeopardize the integrity of the hull.

This thesis presents an analysis of the structural failures found, using both numerical and analytical methods, in order to identify the causes of failure and propose improvements that could avoid them. Several areas of stress concentration were identified, which coincided with the critical areas where there have been found the structural failures. It has been confirmed the influence of reinforcements, of both the hull and bilge keels, in the increased levels of stress, in the welded region of the bilge keels to the hull.

Alternative design geometries for the internal structure of the bilge keel are presented, in order to avoid the appearance of cracks in his interior. It was also found that the occurrence of fatigue cracks, in the welded region of the bilge keels to the hull, due to the high level of tension that the structure is subjected to, can be reduced by application of brackets or a steel bulb on the connection studied.

The fatigue analysis imposed by the classification society Germanischer Lloyd has been applied to the new structural solution and is presented on this thesis.

Keywords: Bilge Keel, Structural Failures, Failure Analysis, Improved Design Arrangement, Fatigue Analysis

SIMBOLOGIA

- P_{BK_y} – carga dinâmica de projecto [kN/m^2]
- P_{BK} – carga de projecto [kN/m^2]
- γ_{fdyn} – factor parcial de segurança [adimensional]
- d – densidade [adimensional]
- L – comprimento de proa a popa [m]
- M_x – momento flector em torno de x [N. m]
- M_y – momento flector em torno de y [N. m]
- a – comprimento [m]
- b – largura [m]
- t – espessura [m]
- P_0 – pressão aplicada [Pa]
- σ – tensão [Pa]
- $\sigma_{máx}$ – tensão máxima [Pa]
- $\sigma_{mín}$ – tensão mínima [Pa]
- σ_c – tensão de cedência [Pa]
- ε – extensão [adimensional]
- I – momento de inércia [m^4]
- $\Delta\sigma_{Rc}$ – gama de tensão de referência [Pa]
- f_n – factor de correcção [adimensional]
- $\Delta\sigma(f_a, F_{dyn})$ – gama de tensão de referência corrigida [Pa]
- Kt – factor de concentração de tensões [adimensional]

ACRÓNIMOS

- *C – carbono*
- *Si – silício*
- *Mn – manganês*
- *P – fósforo*
- *Al – alumínio*
- *IMO – Organização Marítima Internacional*
- *MEF – Método por Elementos Finitos*

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO e OBJECTIVOS	14
1.1	Introdução	14
1.2	Objectivos	14
1.3	Robaletes	15
1.4	Robaleta Sob Análise	16
CAPÍTULO 2	REGISTO DE FALHAS	18
2.1	Fissuras na Ligação dos Robaletes ao Casco	18
2.2	Fracturas na Estrutura Interna do Robaleta	19
2.3	Fracturas na extremidade das chapas dos robaletes	19
2.4	Localização de falhas estruturais	19
CAPÍTULO 3	CARREGAMENTO APLICADO.....	21
3.1	Factores Parciais de Segurança	21
3.2	Cálculo da Carga de Projecto, P_{BK}	22
3.3	Domínio de Validade da Carga Aplicada nos Robaletes	23
CAPÍTULO 4	CÁLCULO ANALÍTICO	24
CAPÍTULO 5	ANÁLISE TRIDIMENSIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	26
5.1	Modelação	27
5.2	Análise pelo MEF de uma Secção do Robaleta	27
5.3	Análise Não Linear da Secção do Robaleta pelo MEF	29
5.4	Sobre a Influência do Alinhamento dos Reforços do Casco e do Robaleta	30
CAPÍTULO 6	ANÁLISE BIDIMENSIONAL (2D)	35
6.1	Modelo MEF Bidimensional	35
6.2	Análise pelo MEF do Modelo Bidimensional	36
CAPÍTULO 7	SOLUÇÕES ALTERNATIVAS.....	39
7.1	Novas Geometrias Internas do Robaleta.....	39
7.2	Novas soluções para a Zona Crítica 1	46
CAPÍTULO 8	ANÁLISE À FADIGA	49
8.1	Valor de Tensão de Referência $\Delta\sigma_{Rc,fn}$	50
8.2	Variação de Tensão Presente na Estrutura $\Delta\sigma_{fa, Fdyn}$	53
8.3	Previsão de Vida à Fadiga	55
CAPÍTULO 9	CONCLUSÕES	56

CAPÍTULO 10 TRABALHOS FUTUROS.....	58
BIBLIOGRAFIA	59
ANEXO A CATÁLOGO DO AÇO NAVAL D36	60
ANEXO B INSTRUÇÕES DE USO PARA A APLICAÇÃO DE LÍQUIDOS PENETRANTES	61
ANEXO C REGISTO COMPLETO DE FISSURAS	63
ANEXO D ANÁLISE NÃO LINEAR COMPLETA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES AO LONGO DA LIGAÇÃO DO ROBALETE AO CASCO (ZONA CRÍTICA 1)	66
ANEXO E ANÁLISE BIDIMENSIONAL COMPLETA	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Instalação dos robaletes num navio.	15
Figura 1.2 Tipos de robaletes: de uma placa, ou de duas placas.	16
Figura 1.3 Vista da secção transversal do robalete.	16
Figura 1.4 Vista Lateral do robalete, com o arranjo interno dos reforços.	16
Figura 1.5 Detalhe da conexão do robalete ao casco.	17
Figura 2.1 Fissura a) No cordão de soldadura entre o casco e a chapa sobreposta. b) Entre a chapa sobreposta e o robalete.	18
Figura 2.2 Inspeção à estrutura interna dos robaletes, fracturas na ligação entre os reforços longitudinais e transversais.	19
Figura 2.3 Fracturas na extremidade do robalete, na soldadura de ligação entre a placa superior e inferior.	19
Figura 2.4 Vista geral, exterior, do robalete. Localização das fissuras registadas (pontos a vermelho).	20
Figura 3.1 Carga uniformemente distribuída, aplicada nos robaletes.	22
Figura 3.2 Zona válida para a aplicação da carga de projecto.	23
Figura 4.1 Estrutura de placas.	24
Figura 4.2 Secção considerada para o cálculo analítico segundo a Teoria de Placas. Dimensões em mm.	25
Figura 5.1 Representação esquemática da convergência da solução exacta (10).	27
Figura 5.2 Modelação tridimensional da secção do robalete que inclui o arranjo interno deste.	27
Figura 5.3 Modelo com elementos finitos de tipo a) Sólido. b) Casca.	28
Figura 5.4 Exemplo de um refinamento local.	28
Figura 5.5 Resultado da análise MEF, realçando e numerando as Zonas Críticas “hot spots”. ...	28
Figura 5.6 Curva Tensão-Extensão do aço naval D36. (13)	30
Figura 5.7 Linha imaginária, na ligação robalete-casco, onde vários valores de tensão foram calculados.	31
Figura 5.8 Influência dos reforços transversais do robalete na zona crítica 1.	31
Figura 5.9 Influência do alinhamento dos reforços transversais do robalete e do casco na zona crítica 1.	32
Figura 5.10 Variação do nível máximo de tensões provocado pela existência de alinhamento dos reforços transversais do robalete e do casco. Análise não linear feita pelo MEF.	32
Figura 5.11 Verificação da influência dos reforços transversais, do robalete e do casco, ao longo da ligação do robalete ao casco. Análise não linear feita pelo MEF.	33
Figura 5.12 Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com alinhamento e não-alinhamento entre os reforços transversais do robalete e do casco. Análise não linear feita pelo MEF.	34
Figura 6.1 Esquema dos detalhes incluídos no Modelo MEF bidimensional da ligação do robalete ao casco.	35
Figura 6.2 Modelo MEF bidimensional da ligação do robalete ao casco a) Superior. b) Inferior.	36

Figura 6.3 Condições fronteiras e carga aplicada ao modelo bidimensional da ligação do robalete ao casco a) Superior. b) Inferior.	36
Figura 6.4 a) Vista de pormenor da zona com refinamento no pé do cordão de soldadura.	37
Figura 6.5 Níveis de tensão de uma secção na análise tridimensional e bidimensional.	37
Figura 7.1 Esquema das localizações das zonas críticas.....	39
Figura 7.2 Esquema dos componentes que constituem o robalete.	40
Figura 7.3 Representação da ligação da extremidade do robalete mediante um bolbo.	42
Figura 7.4 Detalhes aliviadores de concentração de tensões.	42
Figura 7.5 Distribuição de tensões dos novos arranjos interno na ligação do robalete ao casco.	45
Figura 7.6 Ligação do robalete ao casco com brackets (esquadros). a) Secção transversal. b) Representação de montagem.	46
Figura 7.7 Ligação do robalete ao casco com bulb plate (ferro bolbo). a) Secção transversal. b) Representação de montagem.	46
Figura 7.8 Condições fronteiras nas soluções propostas na ligação ao casco.....	47
Figura 7.9 Distribuição de tensões no modelo bidimensional da ligação superior do robalete com a aplicação de esquadros.....	47
Figura 7.10 Distribuição de tensões no modelo bidimensional da ligação superior do robalete com a aplicação de um ferro bolbo.	47
Figura 8.1 Exemplo de curvas S-N (aço).	50
Figura 8.2 Simplificação feita da ligação do robalete ao casco.	51
Figura 8.3 Classes de espectros de carga normalizados, A, B e C.....	52
Figura 8.4 Curvas S-N de projecto para cada classe de espectro de classe normalizada, A B e C.	53
Figura 8.5 Representação de um possível ciclo de tensão presente do robalete.	53
Figura 8.6 Factor de concentrações (7).....	54
Figura 8.7 Obtenção da vida útil á fadiga nos 3 espectros de classes.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição química do aço naval D36 (4).....	17
Tabela 2 Propriedades Mecânicas do aço naval D36 usado na construção dos robaletes (4)....	17
Tabela 3 Factores Parciais de Segurança (8).	21
Tabela 4 Valores máximos de tensão de Von Mises nas zonas críticas. Malha com e sem refinamento.....	29
Tabela 5 Valores máximos de tensão de Von Mises nas zonas críticas: análise linear vs. não linear.	30
Tabela 6 Valores de tensão nas zonas críticas, em modelos do robalete com vários reforços internos.	34
Tabela 7 Tensões na ligação superior do robalete ao casco, sem e com a descontinuidade estrutural.....	38
Tabela 8 Tensões na ligação superior e inferior, do robalete ao casco, com a descontinuidade estrutural.....	38
Tabela 9 Geometrias internas alternativas.	40
Tabela 10 Resultados nas análises MEF às novas geometrias (excepto Zona Crítica 1-fig.7.1). .	43
Tabela 11 Resultados da análise MEF às novas geometrias.....	44
Tabela 12 Tensões na ligação superior do robalete ao casco, com a implementação de esquadros e ferro bolbo.	48
Tabela 13 Tensões na ligação inferior do robalete ao casco, com a implementação de esquadros e ferro bolbo.	48

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO e OBJECTIVOS

1.1 Introdução

Durante a manutenção periódica feita a um navio, foram detectadas várias fissuras ao longo da ligação soldada do robalete ao casco, assim como na estrutura interna do robalete. As fissuras encontradas comprometiam a capacidade de resposta das superfícies de alto desempenho às solicitações de carga actuantes e, a longo prazo, poderiam colocar em risco a estanqueidade do casco.

Porém é importante sublinhar que para estruturas de grande responsabilidade, como navios, é adoptada uma filosofia de projecto *fail safe*, em que na hipótese da estrutura conter algum “defeito” esta será capaz de manter a sua capacidade de carga (1). Por outras palavras, na possibilidade de fractura de um componente a integridade estrutural tem de ser assegurada por uma estrutura redundante.

Existem diversos factores que levam um componente a falhar em serviço, nomeadamente (2):

- i) erro de projecto;
- ii) erro de montagem;
- iii) uso inadequado;
- iv) incompatibilidade com o meio;
- v) processo de fabricação inadequado;
- vi) manutenção incorrecta.

Uma vez detectadas fissuras na ligação soldada dos robaletes ao casco, assim como diversas fracturas na estrutura interna dos robaletes, uma análise estrutural detalhada à estrutura danificada foi realizada no sentido de identificar e eliminar as causas da disfunção, procurando-se simultaneamente o desenvolvimento de novas soluções estruturais para a resolução das mesmas.

1.2 Objectivos

Um dos objectivos desta tese é identificar as causas das falhas ocorridas e estudar a influência do alinhamento, ou do não-alinhamento, entre os reforços internos do casco e a estrutura interna dos robaletes, através da análise dos resultados obtidos pela análise estrutural.

A análise estrutural foi realizada através do Método dos Elementos Finitos, tendo sido utilizados elementos finitos de tipo *sólido* e *placa*, de modo a identificar as zonas críticas de concentração de tensões.

Outro objectivo deste trabalho é apresentar novas soluções estruturais para a estrutura analisada, seguindo a metodologia apresentada *ON THE STRUCTURAL DESIGN OF BILGE KEELS* (3), onde uma revisão e sistematização das normas de projecto são apresentadas para o desenvolvimento de robaletes, fornecendo um guia simples e eficaz para a concepção global e detalhada da sua estrutura.

Por último, uma previsão de vida à fadiga foi realizada à nova solução estrutural proposta, de modo a ter-se uma ideia aproximada do tempo de vida útil da nova geometria interna do robalete.

1.3 Robaletes

A resistência hidrodinâmica de um navio face ao movimento de balanço transversal pode ser aumentada através de sistemas de estabilidade passiva e/ou de sistemas de estabilidade activa. Enquadrados nos sistemas de estabilidade passiva, encontram-se os robaletes sob estudo, que, para além de permitirem a redução do movimento de balanço, apresentam um baixo custo de fabrico, em comparação com o custo associado ao fabrico dos sistemas de estabilidade activa.

Essencialmente, os robaletes (Fig.1.1) são apêndices do casco, aplicados aproximadamente a meio do comprimento longitudinal do navio, em ambos os lados do casco, que dissipam a energia cinética resultante da oscilação transversal de um navio através do deslocamento de um fluido, geralmente sob a forma de vórtices (3).

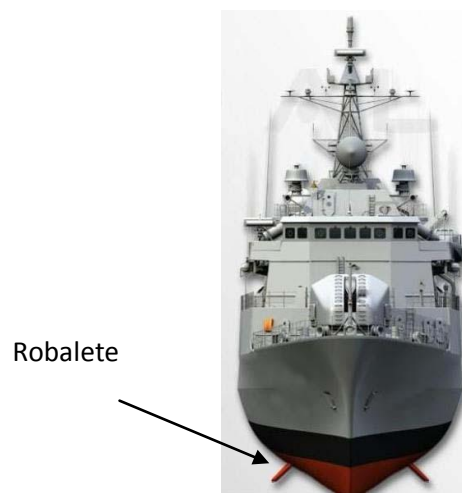


Figura 1.1 Instalação dos robaletes num navio.

A sua eficiência depende da sua localização, dimensão e geometria (3), e, de acordo com vários autores, estes podem ser tipicamente divididos em dois tipos principais: robaletes de uma, ou de duas placas, como ilustrado na figura 1.2.

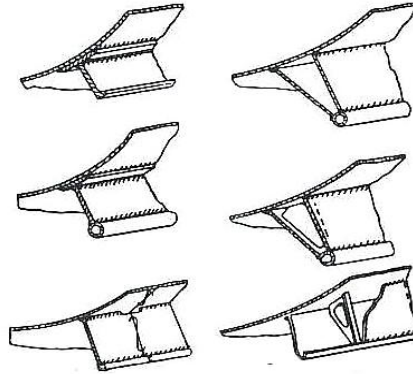


Figura 1.2 Tipos de robaletes: de uma placa, ou de duas placas.

1.4 Robalete Sob Análise

Embora existam várias geometrias baseadas em dados empíricos e normas de desenho, este trabalho fixou-se apenas num robalete com um arranjo triangular, ou em “V” (figura 1.3), tendo uma envergadura de 1m, 14.4m de comprimento e 0.3m de altura, reforçado transversalmente e longitudinalmente, como indicado na figura 1.4.

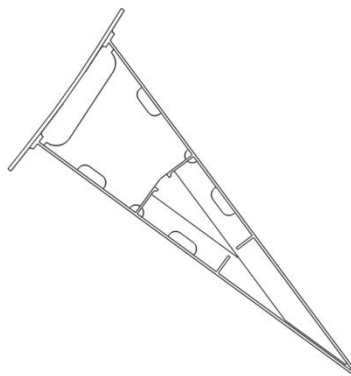


Figura 1.3 Vista da secção transversal do robalete.

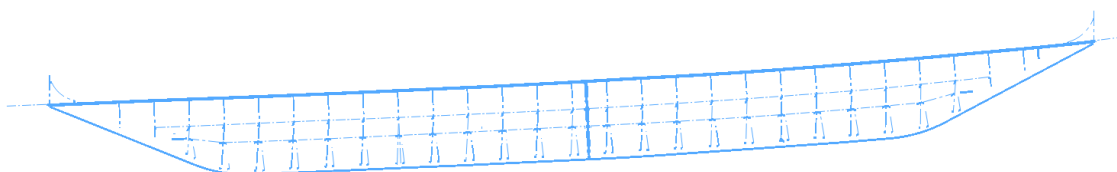


Figura 1.4 Vista Lateral do robalete, com o arranjo interno dos reforços.

O robalete em estudo é construído em aço naval D36, caracterizado pela composição química e propriedades mecânicas indicadas na tabela 1 e 2, respectivamente, (4) (Anexo A). O aço em consideração, em condições normais, possui uma boa soldabilidade e uma baixa probabilidade de transformação martensítica durante o arrefecimento posterior à operação de soldadura.

Tabela 1 Composição química do aço naval D36 (4).

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
0.21	0.35	0.60	0.04	0.04	0.02

Tabela 2 Propriedades Mecânicas do aço naval D36 usado na construção dos robaletes (4).

Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Elasticidade [%]
355	400-490	21

A ligação dos robaletes ao casco é feita mediante uma chapa sobreposta (figura 1.5), redistribuidora de tensões, onde uma penetração completa de soldadura, sem interrupções, no cordão de soldadura, é imposta na ligação chapa sobreposta-robalete.

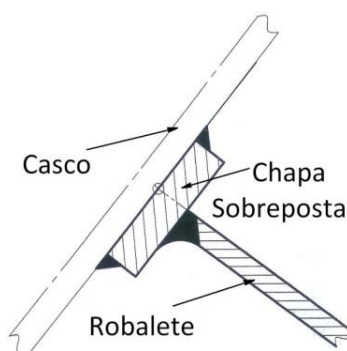


Figura 1.5 Detalhe da conexão do robalete ao casco.

Este tipo de ligação soldada é frequentemente encontrado em estruturas de construção naval, não só devido à sua facilidade de produção, uma vez que fornece um rápido e fácil alinhamento do robalete ao casco, mas também por representar uma boa configuração para evitar estados de tensões multiaxiais na conexão ao casco (3). Onde na ocorrência de falhas catastróficas ou de um acidente, o robalete ir-se-á desacoplar parcialmente, ou na sua totalidade, do casco do navio sem infligir danos estruturais que comprometam a estanqueidade no navio.

CAPÍTULO 2

REGISTO DE FALHAS

Embora alguns robaletes sejam projectados para não terem nenhuma manutenção durante a sua vida útil em serviço, o mesmo não sucede com os robaletes em estudo, onde uma manutenção periódica é prevista, de modo a detectarem-se, antecipadamente, possíveis falhas que possam ocorrer.

As várias falhas estruturais, que foram identificadas durante uma inspecção periódica de manutenção à estrutura em estudo, são descritas nos subcapítulos seguintes.

2.1 Fissuras na Ligação dos Robaletes ao Casco

Foram detectadas, por intermédio de inspecção visual e por meio da aplicação de líquidos penetrantes⁽¹⁾, várias fissuras com comprimentos de até 150mm, principalmente na zona da ligação soldada do robalete à chapa sobreposta (Fig.2.1a,b), mas também, em muito menor número e dimensão, na ligação entre a chapa sobreposta e a chapa do casco.



a) b)
Figura 2.1 Fissura a) No cordão de soldadura entre o casco e a chapa sobreposta. b) Entre a chapa sobreposta e o robalete.

¹ No Anexo B, indicam-se os principais passos para a aplicação de líquidos penetrantes em métodos de avaliação não destrutivos (5).

2.2 Fracturas na Estrutura Interna do Robalete

Para além do referido no subcapítulo anterior, a figura 2.2 mostra que, após inspeccionada a estrutura interna dos robaletes, várias fracturas, com origem em fissuração por fadiga, foram registadas. Estas ocorreram na intersecção entre os reforços longitudinais e os reforços transversais dos robaletes, levando à separação completa da ligação entre eles.



Figura 2.2 Inspeção à estrutura interna dos robaletes, fracturas na ligação entre os reforços longitudinais e transversais.

2.3 Fracturas na extremidade das chapas dos robaletes

Na extremidade dos robaletes (fig.2.3), várias fracturas foram também registadas resultando na perda da estanqueidade do robalete e na separação da ligação entre as extremidades das duas placas que definem o perfil externo das superfícies de alto desempenho utilizadas para a estabilização do balanço transversal.



Figura 2.3 Fracturas na extremidade do robalete, na soldadura de ligação entre a placa superior e inferior.

2.4 Localização de falhas estruturais

Tanto a localização das fracturas registadas nos reforços internos do robalete, como as registadas nas extremidades deste foram detectadas ao longo de toda a extensão do robalete.

Porém, o mesmo não se verificou na localização das fissuras na ligação do robalete ao casco. Sobrepondo a localização das fissuras detectadas (fig.2.4, pontos a vermelho) com o desenho técnico do robalete, que incluía os reforços internos do casco, observou-se que todas as fissuras detectadas estavam localizadas no plano médio dos reforços internos do casco (balizas/anteparas) e, em alguns casos, também no alinhamento das anteparas/balizas com o plano médio dos reforços internos do robalete (fig.2.4).

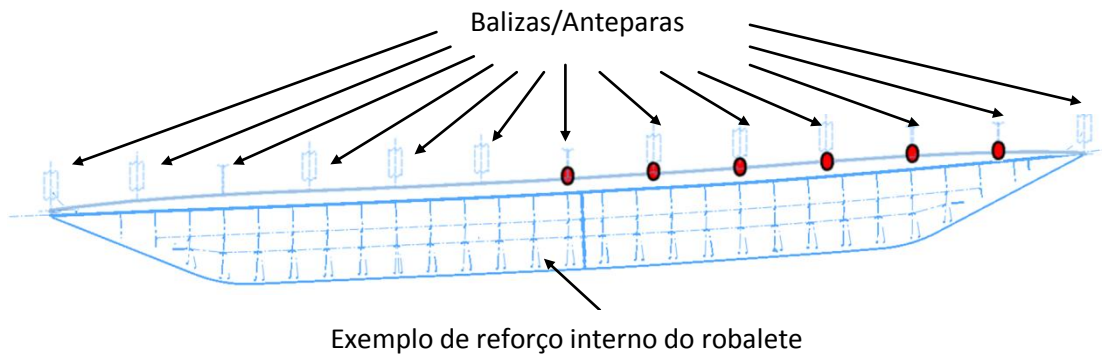


Figura 2.4 Vista geral, exterior, do robalete. Localização das fissuras registadas (pontos a vermelho).

Da observação da figura 2 é visível que a totalidade das fissuras detectadas estão localizadas na metade frontal do robalete (localizada mais à proa) e foram registadas quer no robalete de estibordo, quer no de bombordo.

No Anexo C encontram-se mais fotografias relativas ao registo das falhas detectadas em serviço.

CAPÍTULO 3

CARREGAMENTO APLICADO

Actualmente, embora seja possível prever com alguma confiança os movimentos de cabeceio (balanço longitudinal), o movimento de rotação de balanço transversal ainda é consideravelmente difícil de prever, uma vez que este é bastante dependente dos efeitos de viscosidade do fluido (6). Realçam-se alguns estudos realizados (6) (7), no sentido de melhor quantificar as solicitações a que os robaletes estão sujeitos. No entanto, de modo a caracterizar a carga máxima aplicada nos robaletes, recorreu-se à norma de projecto da sociedade classificadora *Germanischer Lloyd*, (8). Tal decisão prende-se pela necessidade, conforme a Organização Marítima Internacional (IMO), de que qualquer veículo marítimo que navegue em rotas internacionais tem de ser certificado por uma sociedade, estando incluído para a obtenção do certificado a aprovação do projecto realizado, que inclui a carga de projecto considerada.

3.1 Factores Parciais de Segurança

Os factores parciais de segurança permitem compensar a variabilidade que possa ocorrer ao nível e tipo das cargas aplicadas e dos parâmetros de resistência estrutural utilizados (Tabela 3).

Na análise realizada foi assumido um factor de segurança parcial de 2, uma vez que, de acordo com a norma de projecto, é o factor que mais se assemelha ao tipo de carregamento e condições presentes no robalete em estudo (LCA, Tabela 3). Consideram-se incluídos, desta forma, ambos os movimentos de balanço do navio (balanço transversal e cabeceio), assim como qualquer interferência que majore o carregamento aplicado no robalete, permitindo, deste modo, uma abordagem directa ao estudo do carregamento aplicado e evitar a realização de uma análise CFD (*Computer Fluid Dynamic Simulation*) para obter a estimativa de uma pressão aplicada à estrutura em estudo.

Tabela 3 Factores Parciais de Segurança (8).

Load case	LCA	LCB	LCC	LCD
Factor for structural resistance γ_m	1,1	1,1	1,0	1,1
Load factor γ_{stat}	1,5	1,05	1,0	1,0
Load factor γ_{dyn}	2,0	1,4	1,0	1,0
Combination factor Ψ_i				
Ψ_{imin}	0,75	0,7	0,75	0,7
Ψ_{imax}	1,0	1,0	1,0	1,0

sendo que:

LCA: Cargas permanentes cíclicas que actuam na estrutura não danificada em condições normais de serviço.

LCB: Cargas estáticas cíclicas que actuam na estrutura não danificada em condições extremas de serviço.

LCC: Cargas permanentes cíclicas em condições normais de serviço; referente a análises de fadiga.

LCD: Cargas estáticas cíclicas que actuam na estrutura danificada.

e:

γ_m = Factor parcial de segurança para a resistência estrutural.

γ_{fstat} = Factor parcial de segurança para componentes de cargas estáticas.

γ_{fdyn} = Factor parcial de segurança para componentes de cargas dinâmicas.

Ψ_i = Factor para cargas dinâmicas combinadas, simultâneas, calculadas estatisticamente.

3.2 Cálculo da Carga de Projecto, P_{BK}

Aplicando um factor de segurança, γ_{fdyn} , de 2, representativo de um carregamento cíclico em estruturas não danificadas, e assumindo um valor de densidade, d , do fluido, que envolve os robaletes (água salgada a 15°C), igual a 1.026, o valor da pressão de projecto a que estão sujeitos os robaletes, P_{BK} (fig. 3.1), de acordo com a norma (8), vem igual a:

$$P_{BK} = P_{BKdyn} \times \gamma_{fdyn} \text{ [KN/m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.1})$$

$$P_{BKdyn} = \frac{52000 \times d}{(L+240)^{1,1}} \text{ [KN/m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.2})$$

(Combinando as equações 3.1 e 3.2,

$$P_{BK} = \frac{52000 \times d}{(L+240)^{1,1}} \times \gamma_{fdyn} \text{ [KN/m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.3})$$

Sendo, L a distância medida de proa a popa, na linha de água, de 109m (fig. 3.2). Substituindo os restantes valores:

$$P_{BK} = 170,244 \text{ [KN/m}^2\text{]} = \mathbf{170\ 244\ Pa}$$

Obteve-se uma carga de projecto (P_{BK}) uniformemente distribuída na superfície do robalete (fig.3.1) de aproximadamente 170kPa.

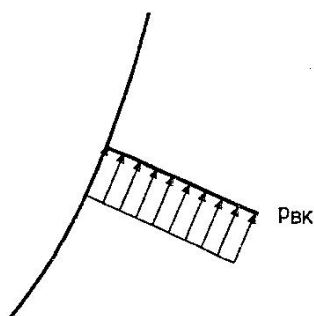


Figura 3.1 Carga uniformemente distribuída, aplicada nos robaletes.

3.3 Domínio de Validade da Carga Aplicada nos Robaletes

A equação 3.1, usada no cálculo da pressão que actua sobre o robalete, impõe que esse valor só é válido para navios com um comprimento, L , de 50m a 200m, medidos na linha de água, e no intervalo correspondente a $0,4L$ e $0,6L$.

Uma vez que o comprimento do navio onde os robaletes em estudo estão instalados é igual a 109m, o primeiro parâmetro necessário para a validade da carga de projecto calculada é satisfeito; no que se refere ao segundo parâmetro, relativo ao domínio espacial de validade da equação, compreendido entre $0,4L$ e $0,6L$, verifica-se que a carga de projecto calculada é válida para aproximadamente 70% do comprimento dos robaletes sob estudo, como demonstrado na fig.3.2. Embora a região onde é válida a aplicação da carga de projecto não inclua todo o comprimento do robalete, esta abrange algumas das falhas estruturais registadas (fig.3.3), não invalidando o valor de pressão calculado e a sua aplicação nos estudos subsequentes.

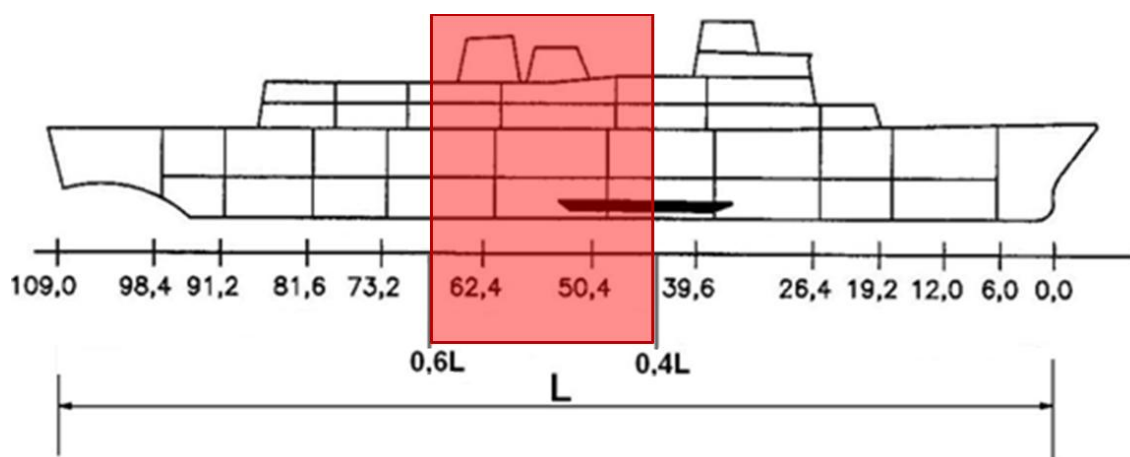


Figura 3.2 Zona válida para a aplicação da carga de projecto.



Figura 3.3 Zona válida de aplicação da carga de projecto, sobreposta com a localização das fissuras registadas.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO ANALÍTICO

Embora o processo de cálculo apresentado neste capítulo constitua uma aproximação à realidade, como qualquer outro em engenharia, este assenta em fórmulas matemáticas bem fundamentadas, neste caso a Teoria de Placas.

As aproximações feitas referem-se à escolha das condições de fronteira aplicadas à placa analisada, assim como ao número de termos da Série de Fourier utilizados para obtenção dos valores da deformada e da tensão induzidos na estrutura em estudo pelo carregamento considerado.

Um dos pressupostos na análise de placas é a de que a espessura da placa é pequena quando comparada com as restantes dimensões da estrutura analisada, que está inicialmente plana, que o material da placa considera-se homogéneo, isotrópico e elástico e que a deformada da placa é pequena relativamente ao valor da espessura. Por consequência, são válidas as seguintes conclusões:

- i) A tensão normal à superfície média é aproximadamente zero (estado tensão plana).
- ii) O efeito de membrana é aproximadamente zero, sendo o deslocamento na superfície média aproximadamente igual a zero segundo os eixos x e y (fig.4.1)
- iii) Os planos que estão originalmente perpendiculares à superfície média da placa/casca antes da deformação permanecem perpendiculares após a deformação.

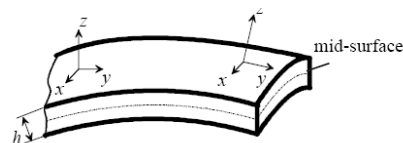


Figura 4.1 Estrutura de placas.

Considerou-se, para a determinação das tensões presentes no robalete, que uma secção do robalete, entre dois reforços transversais internos, pode ser aproximada a uma placa encastrada numa aresta e simplesmente apoiada nas restantes (fig. 4.2). As arestas segundo a direcção transversal têm um comprimento, a , de 310mm, correspondente à distância da extremidade do robalete ligada ao casco até ao primeiro reforço longitudinal e as arestas longitudinais um comprimento, b , de 480mm, correspondendo à distância entre as secções transversais. A carga aplicada considerou-se constante e igual a $P_0=P_{BK}=170\text{kPa}$ (eq.3.3).

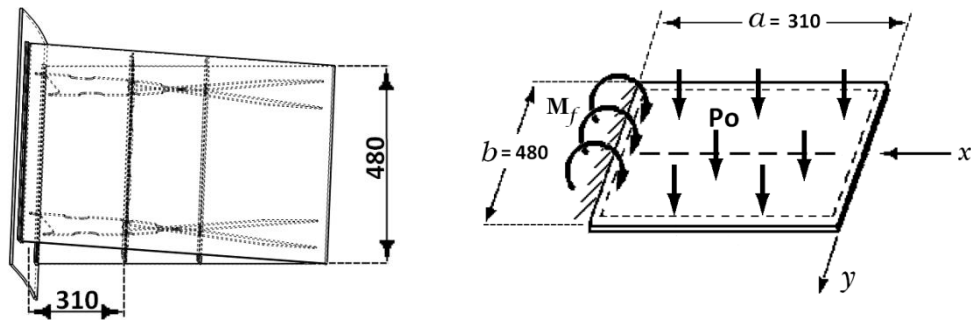


Figura 4.2 Secção considerada para o cálculo analítico segundo a Teoria de Placas. Dimensões em mm.

Para as condições de fronteira e carregamento indicados, foi utilizada a seguinte equação para o cálculo do momento flector presente no encastramento (9):

$$M_f = \frac{5}{8} \times \left(\frac{P_0 \times a^2 \times b^4}{2a^4 + 5b^4} \right) \quad x = a \quad (\text{eq. 4.1})$$

Onde a tensão pode ser encontrada, através de (9):

$$\sigma_x = \left(\frac{12M_f}{t^3} \times z \right) \quad (\text{eq. 4.2})$$

A tensão é máxima nas fibras externas da placa, isto é, quando $z = \pm t/2$ (3mm), pelo que se obtém:

$$\sigma_x = \left(\frac{6M_f}{t^2} \right) \quad (\text{eq. 4.3})$$

Combinou-se as equações 4.1 e 4.3:

$$\sigma_x = \frac{15}{4} \times \left(\frac{1}{t^2} \times \left(\frac{P_0 \times a^2 \times b^4}{2a^4 + 5b^4} \right) \right) \quad (\text{eq. 4.4})$$

Sendo, t a espessura da placa superior do robalete (6mm), P_0 a carga de projecto, e a e b dimensões geométricas da placa, obteve-se:

$$\sigma = 318.2 \text{ MPa}$$

O valor da tensão induzida no encastramento, correspondendo a 318.2 MPa, é apenas uma estimativa do valor de tensão esperado, sendo que para o cálculo rigoroso requer a realização de análises pelo método de elementos finitos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE TRIDIMENSIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF), é um método numérico que permite resolver problemas concretos de engenharia envolvendo geometrias, comportamentos físicos ou condições de fronteira complexas. No MEF, o domínio do problema é decomposto em vários subdomínios e em cada um desses subdomínios as equações que regem o fenómeno são aproximadas usando um método variacional (10).

A razão principal para se procurar aproximar uma solução num conjunto de subdomínios reside no facto de ser mais fácil representar uma função complicada como uma composição de funções polinomiais simples, com um erro que pode ser tão pequeno quanto se pretenda, bastando aumentar o número de subdomínios.

Independente do problema envolvido, uma análise pelo MEF consiste nas seguintes fases, (11):

1. A fase de *Pré-Processamento* contém a geometria em estudo, onde uma representação 3D ou 2D do problema é desenhada. São definidas as propriedades do material e o tipo de elementos finitos adequados ao problema. O último passo desta fase consiste na divisão da geometria (meio contínuo) em estudo num conjunto de sub-regiões discretas (Criação da Malha).
2. Na fase da *Análise*, as condições de fronteira, assim como as cargas aplicadas, têm de ser definidas, envolvendo, ou não, simplificações no modelo numérico quando comparado com o modelo físico real. Seguidamente, o sistema de equações algébricas lineares, ou não lineares, definido pela malha e pelas condições fronteira é resolvido.
3. Finalmente, encontrada a solução do problema em análise, os resultados são visualizados através do *Pós-Processamento*. Estes podem ser apresentados através de listas de deslocamentos e tensões dentro do modelo, ou através de gráficos de cores, de modo a termos uma percepção imediata dos locais de concentração de tensões e de deslocamento máximo.

Como descrito, na primeira fase faz-se a discretização do domínio contínuo em elementos finitos. Isto é equivalente a substituir o domínio que tem um número infinito dos graus de liberdade por um sistema que tem um número finito de graus de liberdade (10). A forma, o tamanho, o número e a configuração dos elementos têm que ser escolhidos com cuidado, de modo a que o corpo, ou o domínio original, sejam simulados tão proximamente como possível sem aumentar o esforço computacional necessário para encontrar a solução. Pode-se dizer que a criação da malha influencia directamente a exactidão, a convergência e a velocidade da solução. Ou seja, um aumento do número de elementos usados traduz-se geralmente num

resultado mais exacto (fig.5.1), envolvendo no entanto um aumento significativo do número de graus de liberdade, podendo, em determinadas situações, não ser possível armazenar as matrizes resultantes no computador, por falta de memória disponível.

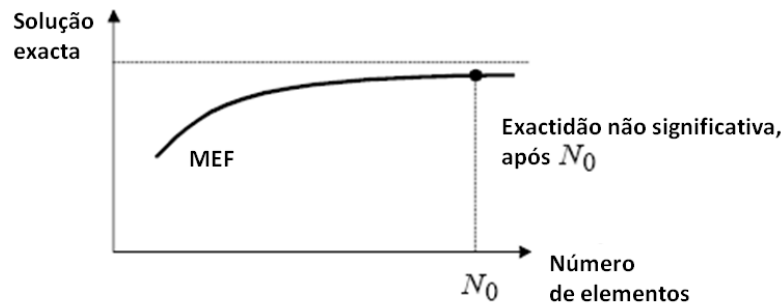


Figura 5.1 Representação esquemática da convergência da solução exacta (10).

5.1 Modelação

Uma representação tridimensional de uma secção do robalete foi modelada (fig. 5.2), de modo a efectuar-se a análise da estrutura pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo apresentado corresponde a um corte transversal de 200mm de comprimento, de modo a incluir o arranjo estrutural interno do robalete, (fig. 5.2). Associado ao modelo, incluiu-se uma secção do casco, com curvatura e dimensões de 400x500mm, de modo a determinarem-se as tensões presentes na ligação soldada do robalete à chapa sobreposta e desta ao casco. Devido à simetria existente, apenas foi modelado o robalete de estibordo.

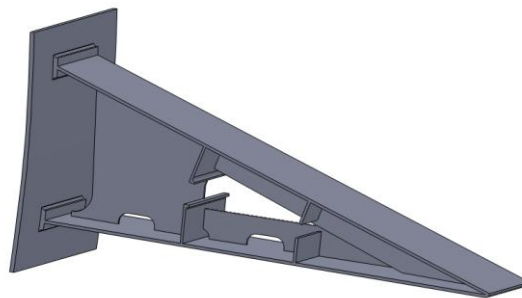


Figura 5.2 Modelação tridimensional da secção do robalete que inclui o arranjo interno deste.

5.2 Análise pelo MEF de uma Secção do Robalete

O modelo tridimensional foi uniformemente carregado numa face, com 170kPa, correspondendo à carga de projecto (P_{BK}), e encastrado nas arestas do casco, de modo a simular as condições fronteira presentes na estrutura real (fig. 5.3).

De modo a compararem-se resultados, a análise pelo MEF foi feita através de elementos finitos de tipo sólido e elementos do tipo casca, como ilustrado na fig.5.3a,b. A análise inicial, feita no programa *CosmosWorks*®, permitiu identificar áreas críticas - “hot spots” - na estrutura do robalete.

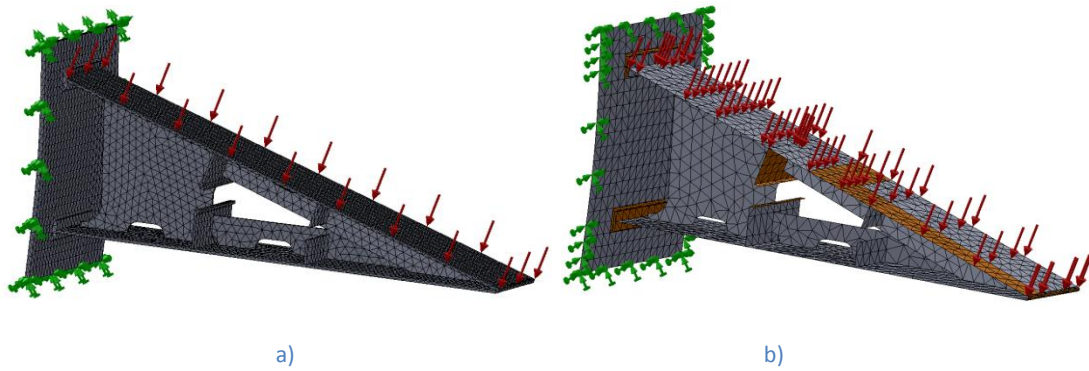


Figura 5.3 Modelo com elementos finitos de tipo a) Sólido. b) Casca.

Vários refinamentos locais foram efectuados, nas áreas onde uma inspecção mais cuidada era necessária, figura 5.4, correspondendo às áreas onde existiam detalhes originadores de concentração de tensões.

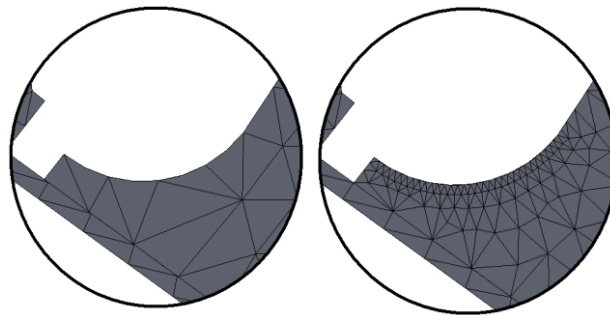


Figura 5.4 Exemplo de um refinamento local.

Os resultados da análise pelo MEF são indicados na figura 5.5, sendo de realçar as várias áreas onde existem concentrações de tensões, designadas por zonas críticas.

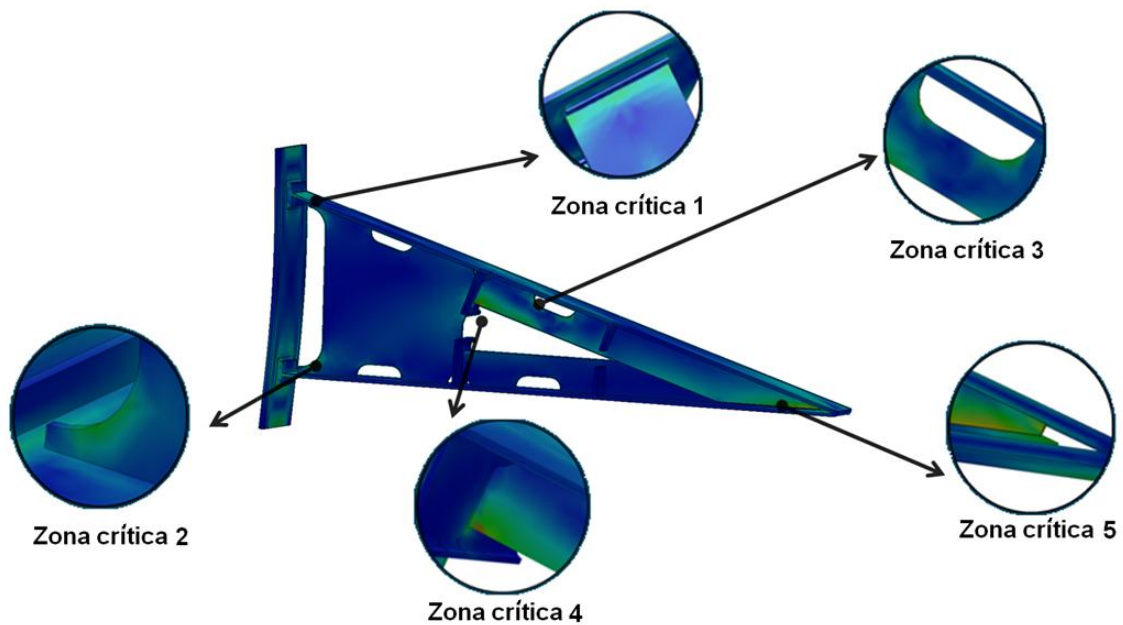


Figura 5.5 Resultado da análise MEF, realçando e numerando as Zonas Críticas "hot spots".

As áreas identificadas como zonas críticas foram numeradas, tendo sido registados os valores máximos da tensão de Von Mises correspondentes na tabela 4, quer para a malha inicialmente utilizada, quer para a malha refinada nas zonas de concentração de tensões. Observou-se, tendo como referência a tensão de cedência do aço estrutural que constitui o robalete ($\sigma_c=355\text{MPa}$), que as zonas críticas 4 e 5 entraram em regime plástico e coincidem com a localização das falhas estruturais encontradas.

Tabela 4 Valores máximos de tensão de Von Mises nas zonas críticas. Malha com e sem refinamento.

	Nº de Nós	Nº de elementos	Zona Crítica 1	Zona Crítica 2	Zona Crítica 3	Zona Crítica 4	Zona Crítica 5
Malha inicial	37948	17796	200 MPa	286 MPa	305 MPa	572 MPa	620 MPa
Malha Refinada	51332	25116	230 MPa	315 MPa	319 MPa	703 MPa	632 MPa

Da observação da tabela 4 também é i que, o aumento em cerca de 40% do número de elementos finitos utilizados na malha refinada se traduziu em aumentos relativamente pequenos nos valores de tensão obtidos nas várias zonas críticas, com excepção da zona crítica 4 (aumentou cerca de 23%). O aumento, muito elevado, do nível de tensões na zona crítica 4 indicia o facto de nesta região, na análise inicial, o número de elementos finitos utilizado não permitir uma exactidão aceitável (fig. 5.1).

Uma vez que se realizaram duas análises pelo MEF distintas, usando diferentes elementos, mas obtendo-se resultados semelhantes, apenas foi descrita neste capítulo a análise MEF tridimensional de elementos sólidos.

Pelo facto de a estrutura entrar, em alguns pontos, no regime plástico, optou-se pela realização de uma análise não linear pelo MEF.

5.3 Análise Não Linear da Secção do Robalete pelo MEF

Tendo sido registados valores de tensão na ordem dos 300 a 700MPa na análise preliminar por MEF, ou seja, verificando-se que algumas zonas são solicitadas para além do domínio elástico, ficando com deformações permanentes ou residuais que não desaparecem após a remoção da carga, foi realizada uma análise não linear, com a malha refinada, de modo a obterem-se valores de tensões mais aproximados dos reais nas “zonas críticas”.

Sendo o comportamento mecânico de um material descrito pela sua curva de tensão-deformação, que relaciona as tensões com as extensões (12), utilizou-se a curva tensão-extensão verdadeira característica do aço do robalete, D36, a qual está apresentada na figura 5.6 (13).

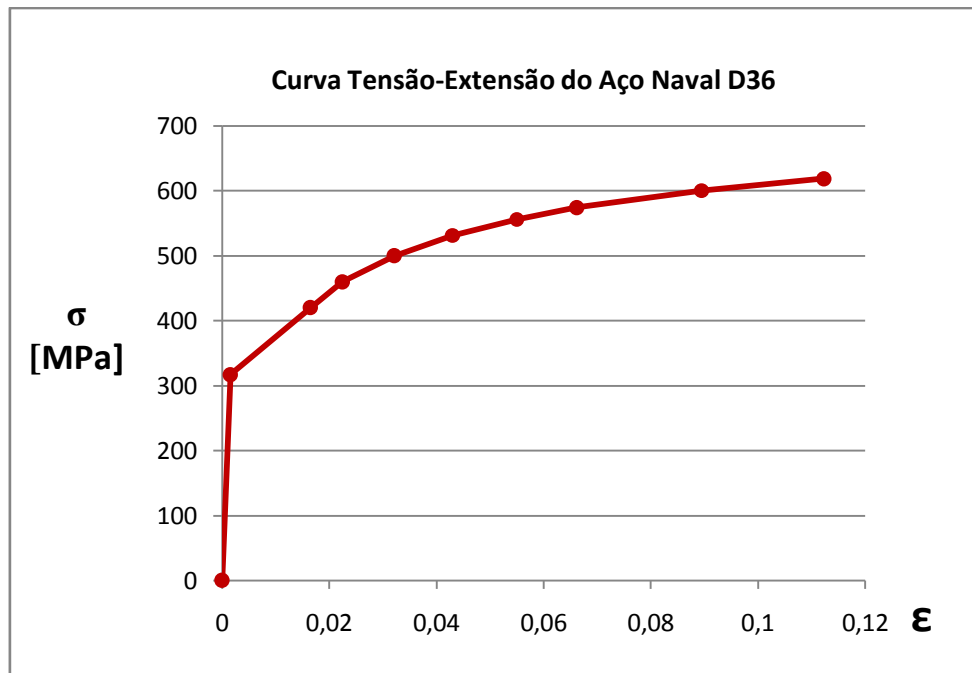


Figura 5.6 Curva Tensão-Extensão do aço naval D36. (13)

Os valores máximos de tensão obtidos nas zonas de concentração de tensões encontram-se registados na tabela 5. Da sua observação conclui-se que o nível de tensões nas zonas críticas 1, 2 e 3 se manteve praticamente inalterado, como seria expectável, uma vez que as zonas referidas estão sujeitas a tensões de Von Mises inferiores ao da Tensão de Cedência do material utilizado na construção do robalete. Nas zonas onde ocorria claramente plastificação (zonas críticas nºs 4 e 5, tabela 4), verificou-se uma redução acentuada dos valores de tensões actuantes para valores muito inferiores ao da Tensão de Rotura do material, mas superiores, ou da mesma grandeza da Tensão de Cedência do material de fabrico da estrutura.

Os valores de tensão calculados nas zonas críticas são elevados, traduzindo-se em valores de factor de segurança à cedência muito próximos da unidade e, conseqüentemente, propiciadores de plastificação local, mas também de possível nucleação e propagação de fendas por fadiga.

Tabela 5 Valores máximos de tensão de Von Mises nas zonas críticas: análise linear vs. não linear.

	Nº de Nós	Nº de elementos	Zona Crítica 1	Zona Crítica 2	Zona Crítica 3	Zona Crítica 4	Zona Crítica 5
Análise Linear	51332	25116	230 MPa	315 MPa	319 MPa	703 MPa	632 MPa
Análise não Linear	50680	24702	229 MPa	317 MPa	336 MPa	364 MPa	359 MPa

5.4 Sobre a Influência do Alinhamento dos Reforços do Casco e do Robalete

Tendo sido identificada como “Zona Crítica 1” a área de concentração de tensões na ligação Robalete-Casco e tendo sido detectado um padrão na localização de falhas estruturais,

nomeadamente, o registo da existência de fissuras no alinhamento dos reforços internos do casco (sub-capítulo 2.4), foi efectuada uma análise da influência do posicionamento das anteparas e balizas nos valores de tensões induzidos na ligação robalete-casco.

Para a geometria analisada (fig.5.2), determinaram-se vários valores de tensão, equidistantemente espaçados, ao longo de uma linha imaginária na superfície do robalete, de modo a conter o valor máximo de tensão obtido na zona crítica 1 (Tabela 5) e, concomitantemente, representar a variação de tensões ao longo do robalete, na ligação deste ao casco (figura 5.7 e 5.8).

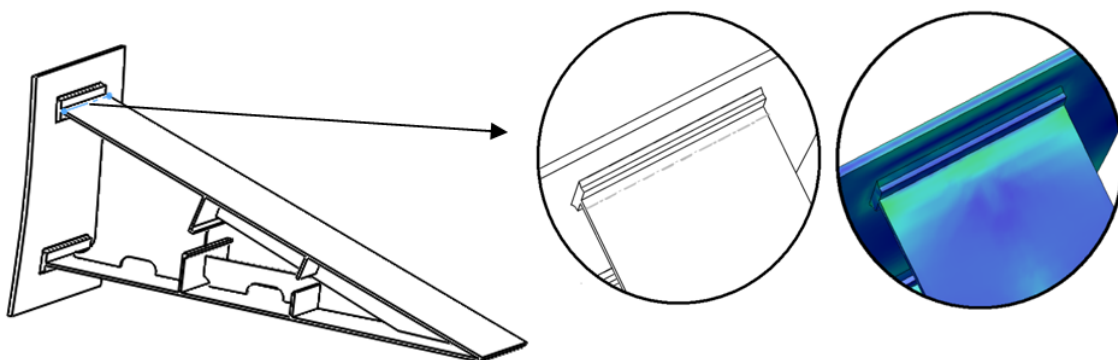


Figura 5.7 Linha imaginária, na ligação robalete-casco, onde vários valores de tensão foram calculados.

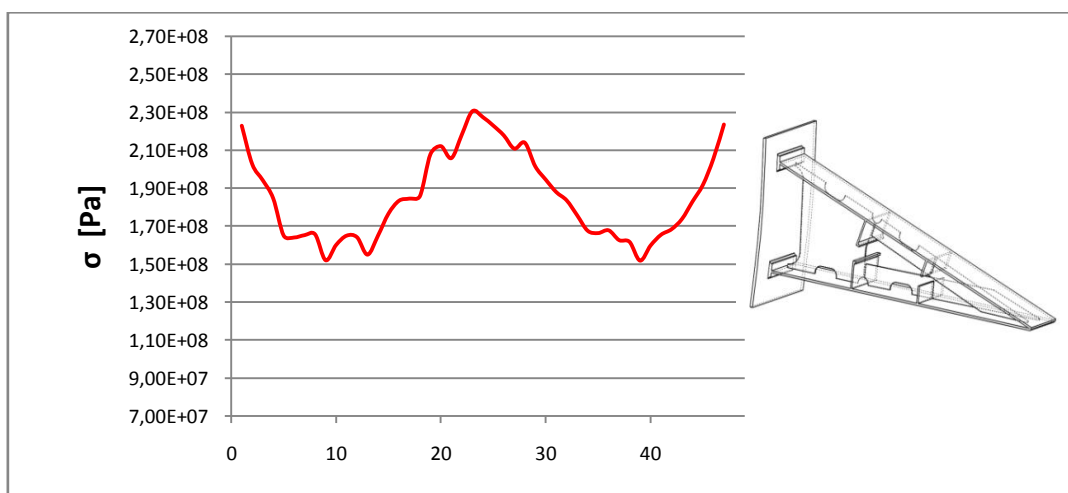


Figura 5.8 Influência dos reforços transversais do robalete na zona crítica 1.

Idêntico procedimento foi repetido quando a geometria modelada passou a incluir, não apenas uma secção interna de reforço do robalete (fig. 5.8), mas várias secções transversais de reforço, assim como anteparas e/ou balizas. É conveniente referir que, os “picos” de tensão localizados nos extremos esquerdo e direito do gráfico da Fig. 5.8 são apenas representativos das condições fronteira utilizadas (aresta livre), que não as realmente existentes no robalete. Foram então considerados desprezáveis, nesta e nas subsequentes análises realizadas, as tensões induzidas nas extremidades dos gráficos.

A influência da variação de rigidez imposta pela colocação de reforços transversais ao casco e pela existência de reforços transversais do robalete foi verificada. Inicialmente analisou-se a influência da existência de uma anteparada alinhada com a secção de reforço de um robalete

(fig. 5.9). Constatou-se que a presença dos reforços internos do casco (anteperas ou balizas) traduziu-se num aumento da tensão máxima presente na ligação do robalete ao casco, uma vez que a tensão máxima passou de 230 MPa para aproximadamente 260 MPa (+13%). Para além do referido, verificou-se a concentração dos valores máximos de tensão na zona mais próxima do alinhamento dos reforços, enquanto que a restante estrutura permanecia com valores de tensão inferiores aos obtidos anteriormente (fig. 5.8).

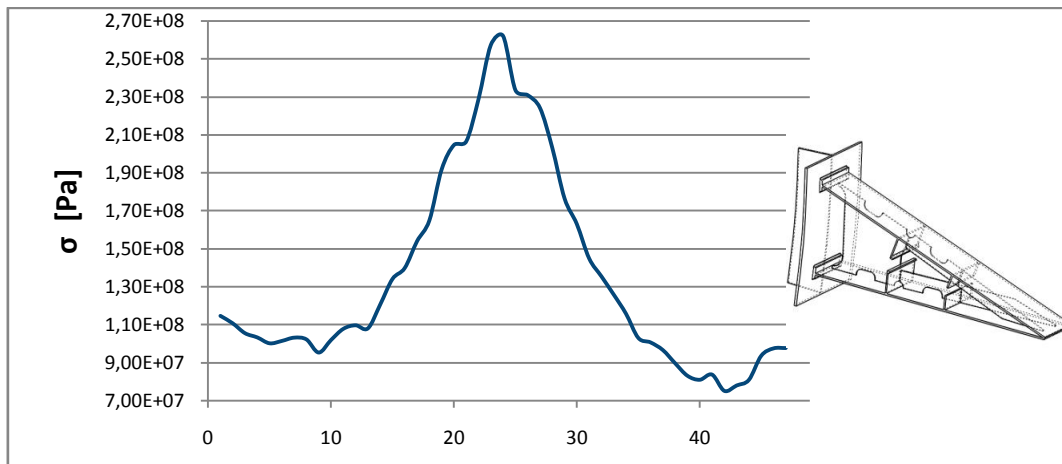


Figura 5.9 Influência do alinhamento dos reforços transversais do robalete e do casco na zona crítica 1.

Com o intuito de se investigarem os valores de tensão obtidos, várias secções do robalete foram modeladas, analisando-se simultaneamente a influência da existência das anteperas, assim como o efeito do alinhamento, ou do não-alinhamento, dos reforços internos do casco com os reforços transversais do robalete (figs. 5.10 – 5.12).

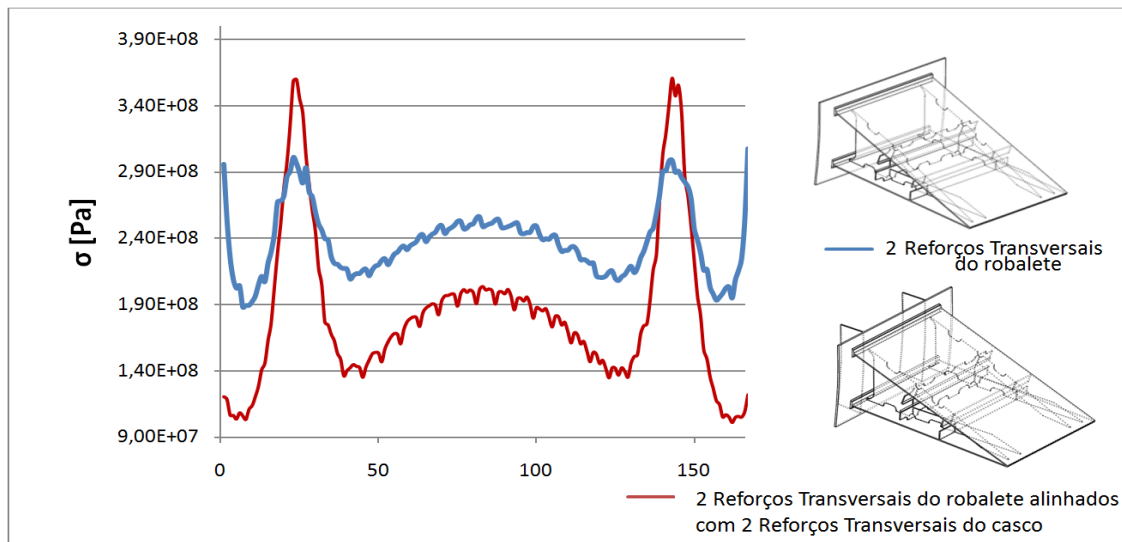


Figura 5.10 Variação do nível máximo de tensões provocado pela existência de alinhamento dos reforços transversais do robalete e do casco. Análise não linear feita pelo MEF.

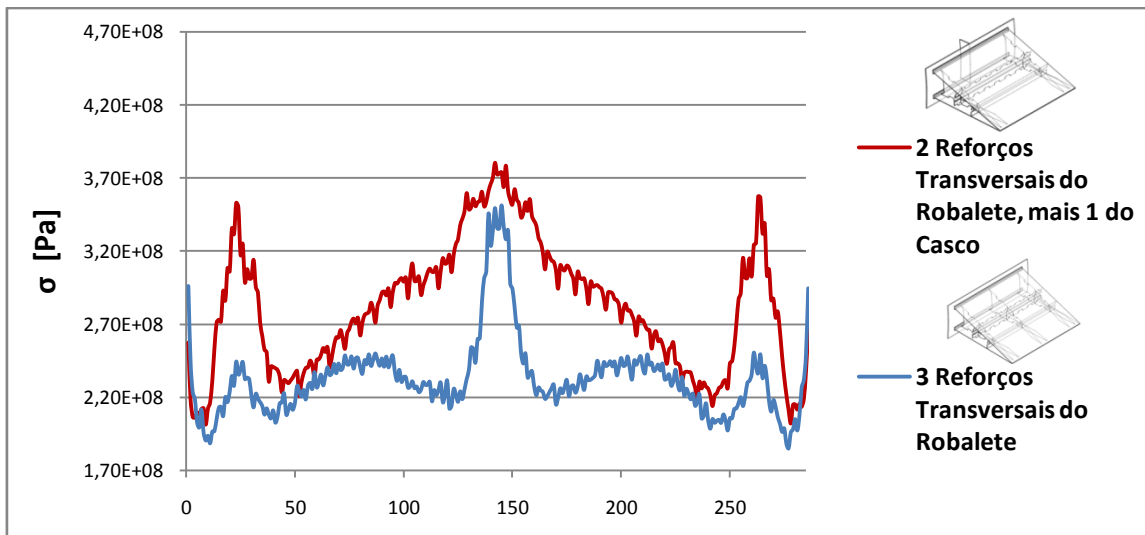


Figura 5.11 Verificação da influência dos reforços transversais, do robalete e do casco, ao longo da ligação do robalete ao casco. Análise não linear feita pelo MEF.

Da observação das figuras 5.8 a 5.11, pode concluir-se que:

- (i) Verificou-se um elevado aumento de tensões na ligação do robalete ao casco, devido a um aumento de rigidez estrutural provocado quer pelos reforços transversais do robalete, como pelos do casco, sendo mais concentrado e intenso quando está presente o reforço relativo ao casco (antepera ou baliza);
- (ii) Confirmou-se, que o alinhamento dos reforços transversais, traduz-se num agravamento do aumento do nível de tensões junto à ligação do robalete ao casco;
- (iii) A modelação de áreas do robalete cada vez maiores traduz-se num aumento da tensão máxima presente na estrutura, sendo esse aumento mais intenso na ligação da estrutura do robalete ao casco, a meio vão do comprimento longitudinal do robalete.

Estabelecendo-se anteriormente que os reforços transversais internos, quer do casco quer do robalete, são elementos que influenciam os níveis de tensão na ligação do robalete ao casco, foi efectuada uma tentativa de se definir o melhor arranjo dos reforços transversais.

Uma vez que, devido a factores óbvios, não se pode alterar a disposição dos reforços internos do casco, estes foram definidos como sendo inalteráveis, restando os reforços internos dos robaletes, para se tentar “descobrir” uma combinação em que se obtivesse o menor nível possível de tensões na ligação soldada ao casco.

A metodologia adoptada para esse efeito foi a de analisar a distribuição de tensões numa secção do robalete contendo três reforços transversais do casco e variando o número de reforços transversais do robalete (Anexo D).

Observou-se, através das análises efectuadas, que a colocação de três reforços transversais do robalete, entre os reforços internos do casco, conduz a uma distribuição com níveis de tensão ligeiramente menores do que os verificados no arranjo actual. Contudo, nas zonas externas não se verifica qualquer vantagem na aplicação do arranjo desenvolvido (figura 5.12).

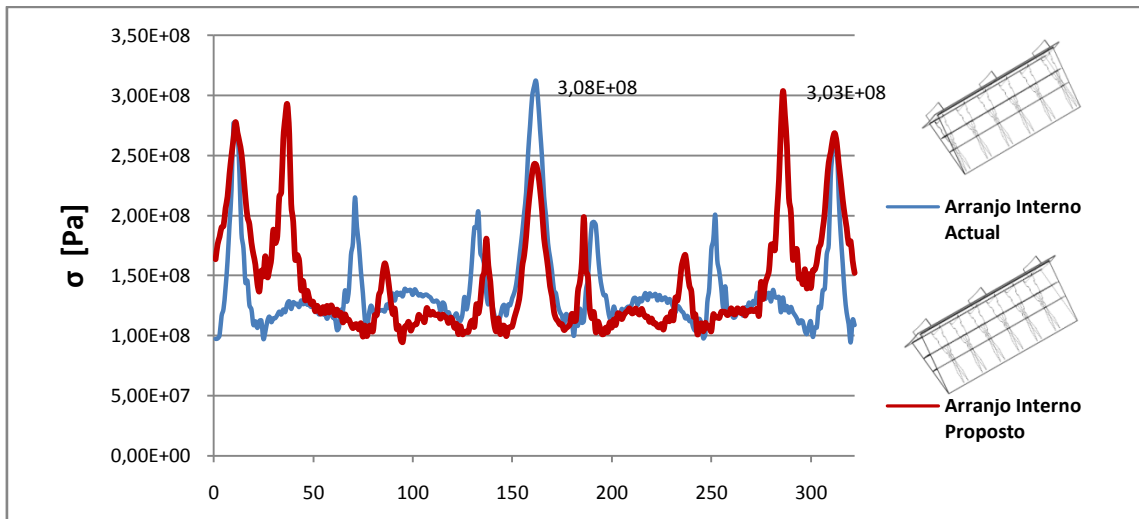


Figura 5.12 Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com alinhamento e não-alinhamento entre os reforços transversais do robalete e do casco. Análise não linear feita pelo MEF.

No decorrer da análise descrita, verificou-se que o aumento do número de reforços transversais do robalete influenciava o nível de tensões na zona crítica 1. Através da observação da tabela 6 percebe-se que os níveis de tensão nas outras zonas críticas (2, 3, 4 e 5) se mantiveram aproximadamente constantes e independentes das várias situações analisadas.

Tabela 6 Valores de tensão nas zonas críticas, em modelos do robalete com vários reforços internos.

		Zona Crítica 2 (MPa)	Zona crítica 3 (MPa)	Zona crítica 4 (MPa)	Zona crítica 5 (MPa)
Secção com um reforço transversal do robalete,	1º Reforço	317	336	358	350
	1º Reforço	345	351	341	358
Secção com dois reforços transversais do robalete	1º Reforço	327	337	346	352
	2º Reforço	325	348	353	380
Secção com três Reforços transversais do robalete,	1º Reforço	338	330	321	367
	2º Reforço	345	354	370	380
	3º Reforço	336	353	337	353

No Anexo D encontram-se os resultados obtidos por meio do MEF (Análise não-linear) para os vários arranjos estudados (alinhamento ou desalinhamento da estrutura interna do robalete com antepas ou balizas).

CAPÍTULO 6

ANÁLISE BIDIMENSIONAL (2D)

A análise tridimensional efectuada providenciou uma boa representação das condições presentes nos robaletes em estudo, tendo permitido uma boa detecção das áreas onde existem concentração de tensões, como descrito no capítulo 5. Porém, no modelo tridimensional assumiu-se que os vários componentes que constituem a estrutura do robalete tinham uma ligação perfeita entre si, correspondendo a uma única peça, não se tendo considerado a existência de cordões de soldadura, a descontinuidade da chapa sobreposta, etc. Sabendo que pequenas tensões localizadas, derivadas da existência de entalhes geométricos, podem originar fendas quando sujeitas a carga cíclicas, optou-se por se fazer uma análise mais detalhada, tendo em consideração alguns dos entalhes associados à ligação soldada do casco com o robalete através da chapa sobreposta.

6.1 Modelo MEF Bidimensional

Uma representação bidimensional da ligação do robalete ao casco foi modelada, de modo a verificar-se a influência da descontinuidade geométrica do cordão de soldadura. Idealmente, o modelo tridimensional teria o espaçamento entre os componentes soldados devido à chapa sobreposta. Porém tal não era viável, uma vez que devido ao próprio programa, raramente modelos MEF com grandes dimensões permitem analisar com detalhe pequenas tensões localizadas.

Pelo motivo indicado, o modelo bidimensional de elementos finitos semelhante à ligação existente entre o robalete e o casco, mais simples e menos exigente do ponto de vista computacional, incluiu a chapa sobreposta, um cordão de soldadura com 5mm de garganta de cordão e 1mm de raio do pé de cordão, e um espaçamento entre o casco e a chapa sobreposta de 0,5mm (figura 6.1).

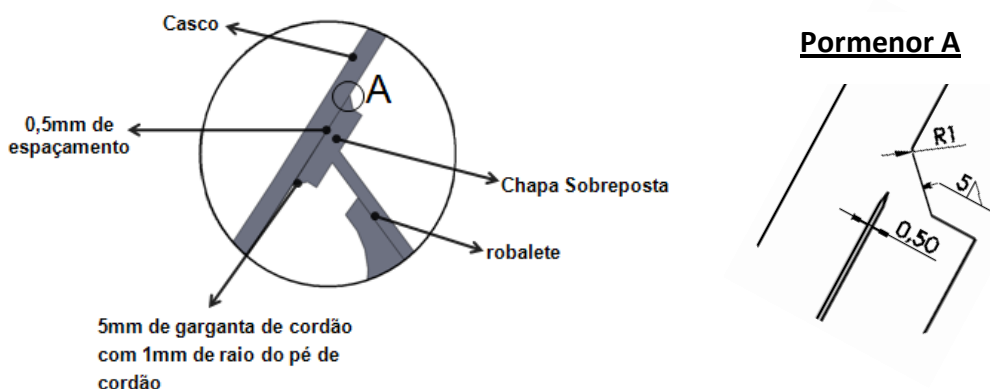


Figura 6.1 Esquema dos detalhes incluídos no Modelo MEF bidimensional da ligação do robalete ao casco.

O modelo bidimensional apresentado, representativo da ligação entre o robalete e o casco, contém uma secção transversal do casco com dimensões de 110x9mm, e um corte da placa superior e inferior do robalete de 50mm de comprimento. Em que, um espaçamento de 0.5mm entre o casco e a chapa sobreposta foi modelado, de modo a representar-se a descontinuidade geométrica do cordão de soldadura. Destaca-se, na ligação superior, a existência de um ângulo de 70º entre a chapa sobreposta e a placa superior do robalete, como demonstrado na figura 6.2.

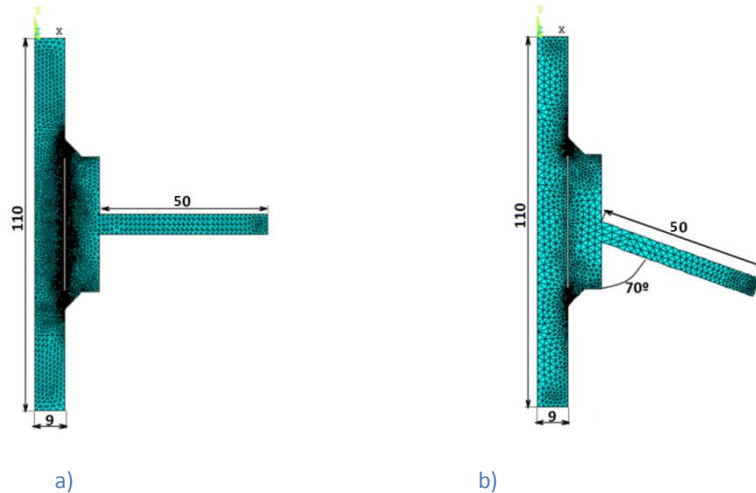


Figura 6.2 Modelo MEF bidimensional da ligação do robalete ao casco a) Superior. b) Inferior.

6.2 Análise pelo MEF do Modelo Bidimensional

Recorreu-se a elementos do tipo Plane 183, contendo 6 ou 8 nós, na divisão da geometria em sub-regiões discretas. De modo a garantir-se que o modelo bidimensional fosse uma representação adequada da ligação em estudo, as extremidades correspondentes ao corte do casco foram consideradas encastradas, o que foi conseguido impondo restrições totais aos deslocamentos tanto verticais como horizontais dos nós das linhas horizontais, das extremidades superior e inferior (fig. 6.3). Aplicou-se uniformemente a carga P_{Bk} à viga em consola, correspondente à carga de projecto de 170kPa, como demonstrado na figura 6.3.

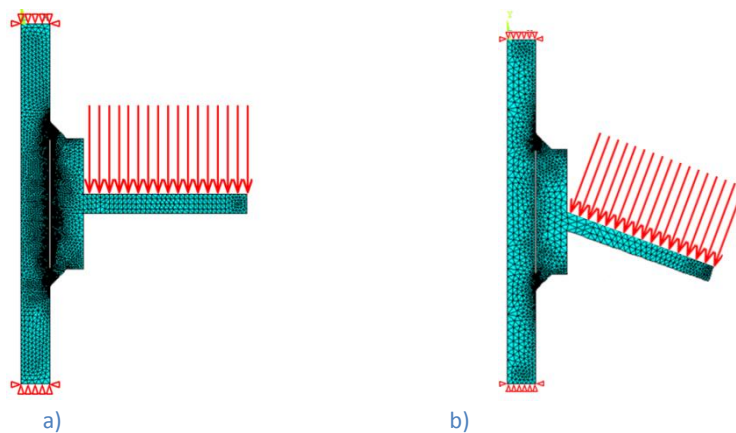


Figura 6.3 Condições fronteiras e carga aplicada ao modelo bidimensional da ligação do robalete ao casco a) Superior. b) Inferior.

Os resultados obtidos através da análise tridimensional pelo MEF, mostrou que o nível de tensões induzido dependia do grau de discretização da rede de elementos finitos utilizada. Foi definida uma malha fina de elementos finitos triangulares na vizinhança do pé do cordão de soldadura, representado na figura 6.4a). A mesma discretização da malha foi utilizada para as várias análises bidimensionais realizadas. Os resultados obtidos encontram-se na figura 6.4b).

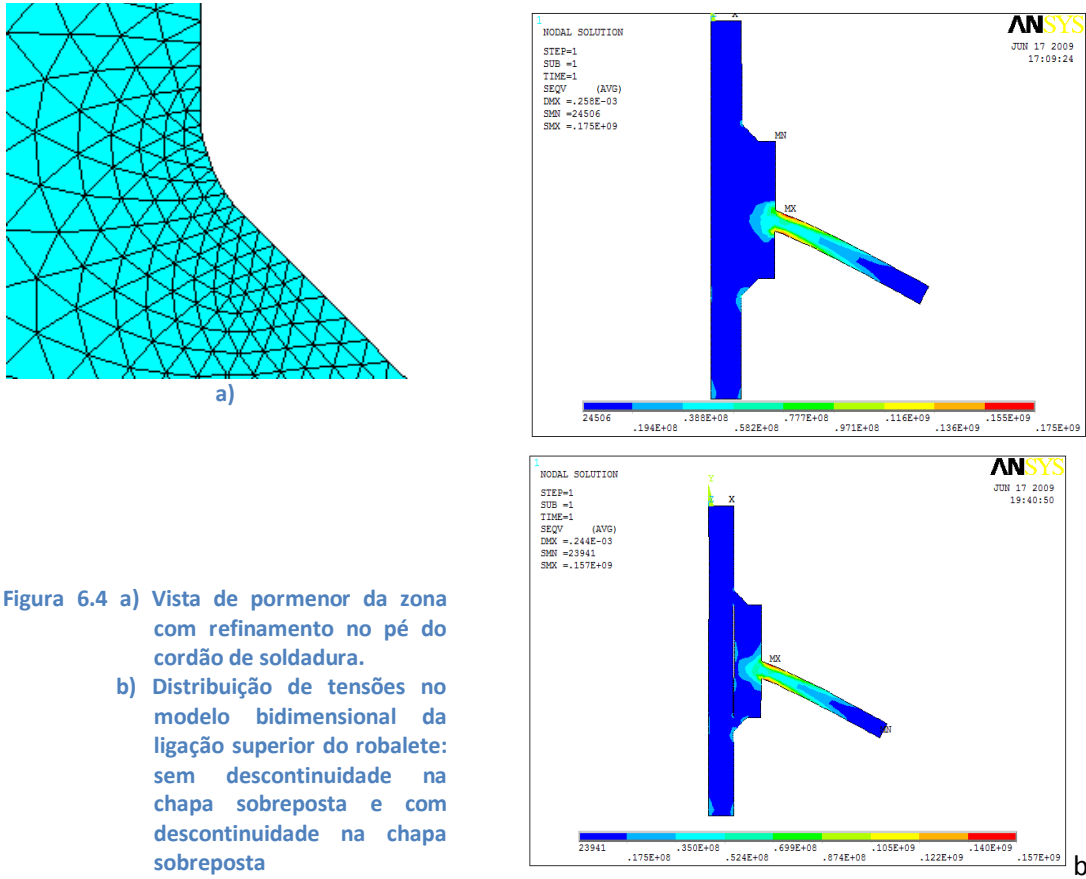


Figura 6.4 a) Vista de pormenor da zona com refinamento no pé do cordão de soldadura.
b) Distribuição de tensões no modelo bidimensional da ligação superior do robalete: sem descontinuidade na chapa sobreposta e com descontinuidade na chapa sobreposta

A comparação entre os valores de tensão máximos de Von Mises obtidos pelo modelo bidimensional e tridimensional está feita, para a zona crítica 1, na figura 6.5.

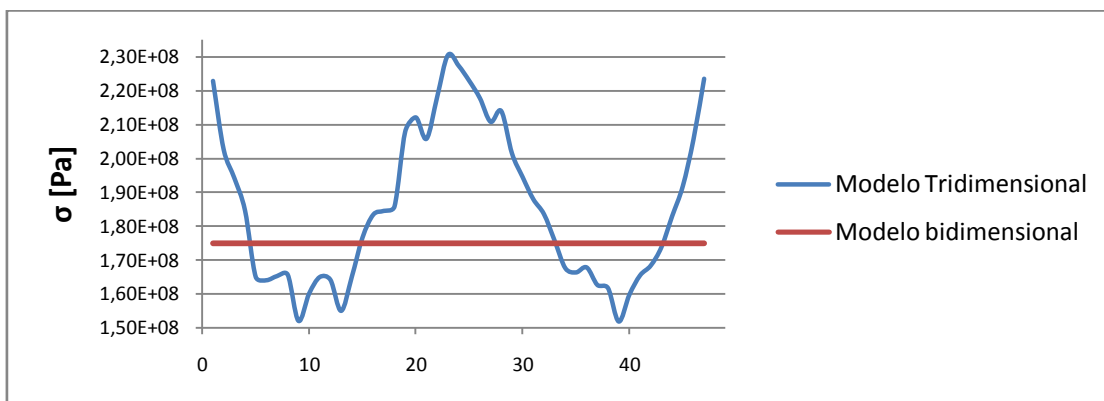
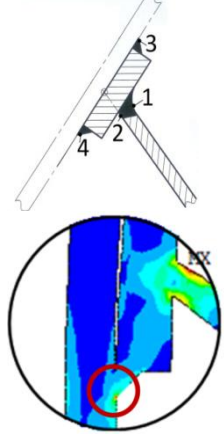


Figura 6.5 Níveis de tensão de uma secção na análise tridimensional e bidimensional.

À semelhança do que aconteceu no modelo tridimensional, os modelos bidimensionais mostraram que a tensão máxima ocorria na ligação entre a chapa sobreposta e o robalete, (Tabela 7 e 8, Ponto 1 e 2). Em paralelo, verificou-se que existia concentração de tensões na ligação entre o casco e a chapa sobreposta, (Tabela 7 e 8, Ponto 3 e 4), na zona do pé do

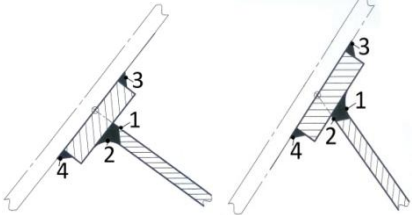
cordão de soldadura, sendo, neste caso, os valores de tensão muito inferiores aos primeiros. Verificou-se ainda que a ligação superior do robalete ao casco, apresenta um maior nível de tensões, face à ligação inferior, na ligação entre a chapa sobreposta e o robalete e na zona do pé do cordão inferior de soldadura, (Tabela 8, Ponto 1,2 e 4).

Tabela 7 Tensões na ligação superior do robalete ao casco, sem e com a descontinuidade estrutural.



	Tensão no Ponto 1	Tensão no Ponto 2	Tensão no Ponto 3	Tensão no Ponto 4
Modelo sem descontinuidade geométrica interna na chapa sobreposta	175 MPa	168 MPa	40 MPa	65 MPa
Modelo com descontinuidade geométrica interna na chapa sobreposta	157 MPa	149 MPa	29 MPa	50,6 MPa

Tabela 8 Tensões na ligação superior e inferior, do robalete ao casco, com a descontinuidade estrutural.



	Tensão no Ponto 1	Tensão no Ponto 2	Tensão no Ponto 3	Tensão no Ponto 4
Modelo Bidimensional da Ligação Inferior do robalete ao casco	126 MPa	137 MPa	37 MPa	37 MPa
Modelo Bidimensional da Ligação Superior do robalete ao casco	157 MPa	149 MPa	29 MPa	50,6 MPa

Estando a ligação em estudo sujeita a cargas repetidas, pode-se afirmar que é muito provável a iniciação e posterior propagação de fendas de fadiga nos pontos de concentração de tensão.

No Anexo E encontram-se a totalidade dos resultados obtidos na modelação bidimensional da ligação do robalete ao casco.

CAPÍTULO 7

SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

Tendo em consideração os resultados obtidos nas análises feitas pelo MEF, descritas nos capítulos anteriores, novas soluções estruturais foram concebidas e analisadas, no sentido de propor uma estrutura renovada quer para o robalete, quer para a ligação do robalete ao casco.

Iniciou-se o estudo de soluções alternativas pela concepção de novos arranjos internos para o robalete, nada alterando em relação às suas dimensões e geometria externas, de modo a que as características hidrodinâmicas que se encontram no robalete actual não fossem alteradas.

Todas as geometrias e arranjos foram analisados pelo MEF, de modo a verificar-se a possibilidade de existência de uma redução significativa dos níveis de tensão induzidos nas novas estruturas estudadas.

Para além do referido, é conveniente lembrar que, também o estudo feito sobre o melhor espaçamento entre os reforços transversais dos robaletes, apresentado anteriormente (fig. 5.12) em detalhe no Anexo D, tinha como objectivo diminuir o valor das tensões de Von Mises aplicadas na Zona Crítica 1 (ligação do robalete ao casco através da chapa sobreposta).

7.1 Novas Geometrias Internas do Robalete

Na análise tridimensional, feita pelo método dos elementos finitos, quatro áreas na estrutura interna do robalete, excluindo a zona crítica 1, foram identificadas como zonas onde ocorre concentração de tensões (figura 7.1), plastificação localizada do material e, em alguns casos, a fractura estrutural.

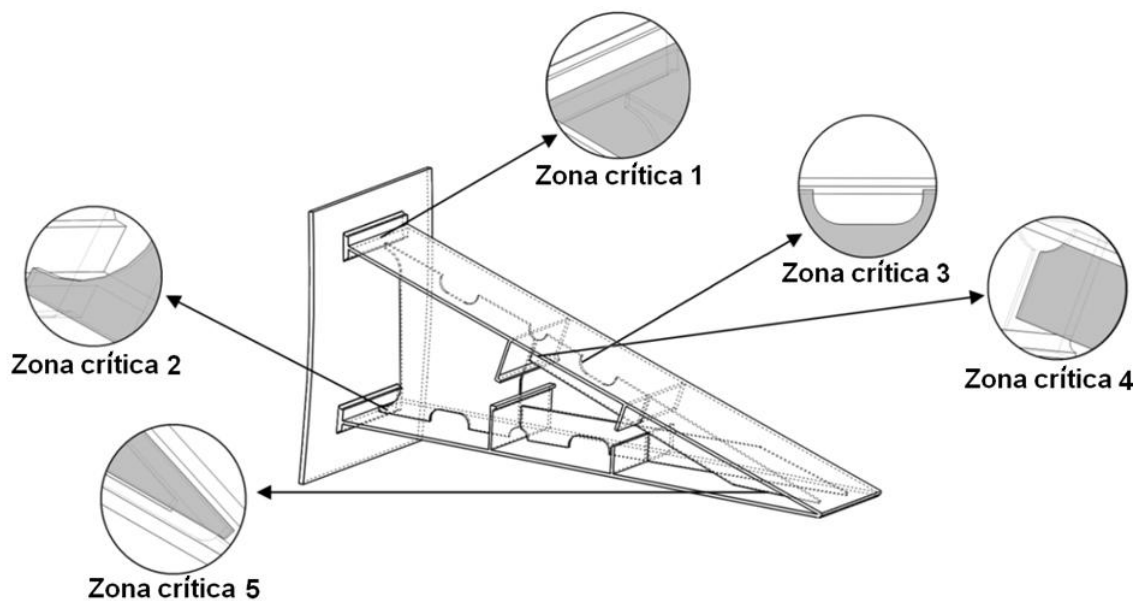


Figura 7.1 Esquema das localizações das zonas críticas.

Com o objectivo de manter, o mais possível, as características hidrodinâmicas do robaete inalteradas, nomeadamente as relacionadas com a sua capacidade de dissipação de energia e de coeficiente de arrasto, reestruturou-se apenas a geometria interna do robaete, procurando-se, em paralelo, manter as espessuras dos componentes que o constituíam, tentando não alterar a rigidez da estrutura.

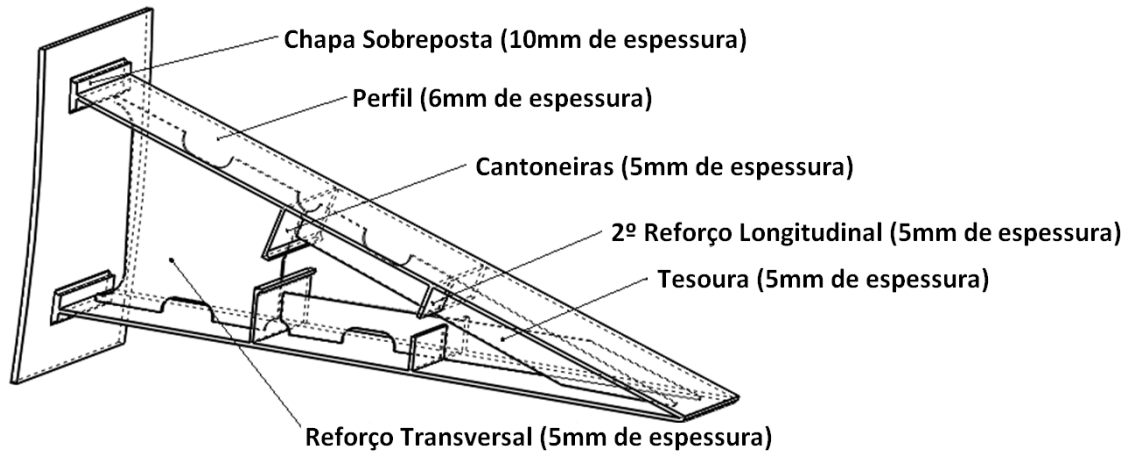
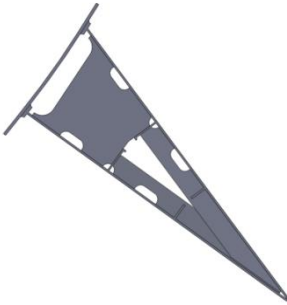
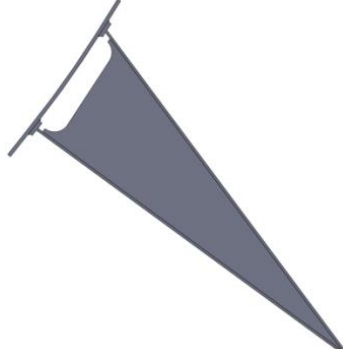
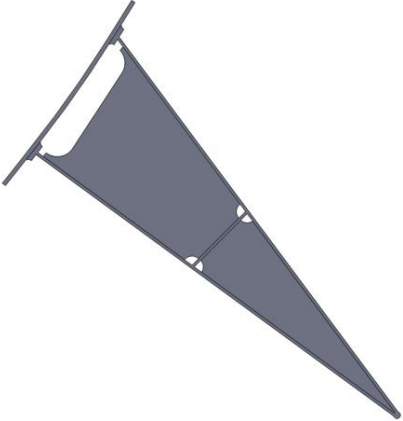
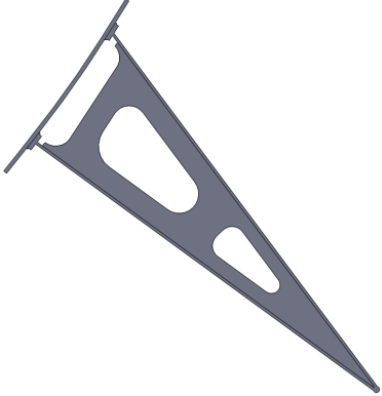

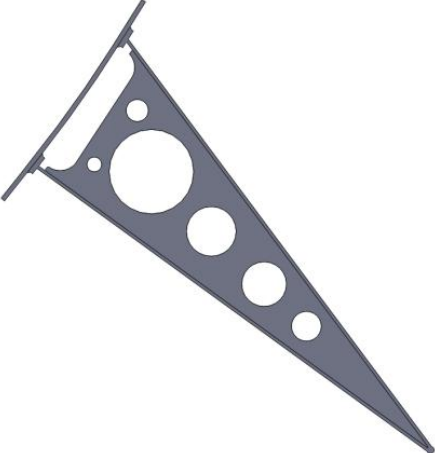


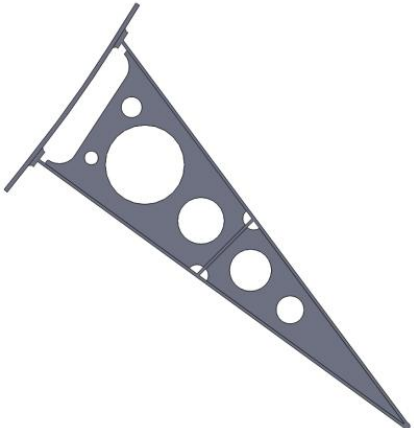
Figura 7.2 Esquema dos componentes que constituem o robaete.

As novas geometrias internas desenvolvidas, encontram-se na tabela 9.

Tabela 9 Geometrias internas alternativas.

Referência	Descrição	Ilustração da geometria
Geometria nr: 0	Estrutura actual do robaete. Composta por um reforço transversal principal e dois secundários, quatro reforços longitudinais; contendo vários cortes de modo a evitar concentrações de tensões.	
Geometria nr: 1	Modelo contendo apenas um reforço transversal sólido e contínuo.	

<p>Geometria nr: 2</p>	<p>Modelo contendo um reforço transversal e um reforço longitudinal, com cortes suaves na intersecção entre estes.</p>	
<p>Geometria nr: 3</p>	<p>Modelo contendo apenas um reforço transversal, com duas secções, com contornos suaves, cortadas.</p>	
<p>Geometria nr: 4</p>	<p>Modelo contendo um reforço transversal e um reforço longitudinal, com cortes suaves na intersecção entre estes, e com duas secções com contornos suaves cortadas.</p>	
<p>Geometria nr: 5</p>	<p>Modelo contendo apenas um reforço transversal, com várias secções circulares cortadas e furos aliviadores de concentração de tensões.</p>	

Geometria nr: 6	Modelo contendo um reforço transversal e um reforço longitudinal, com cortes suaves na intersecção entre estes, e com várias secções circulares cortadas e furos aliviadores de concentração de tensões.	
-----------------	--	--

Destaca-se, face ao arranjo actual, que vários detalhes foram incluídos nos novos arranjos internos para minimizar o efeito de concentração de tensões e facilitar a produção dos robaletes. Representativo destes pormenores, é a ligação da extremidade do robalete, que é feita mediante um ferro bolbo com 15mm de diâmetro (figura 7.3). Outros pormenores introduzidos no intuito de evitar a concentração de tensões estão exemplificados na figura 7.4.

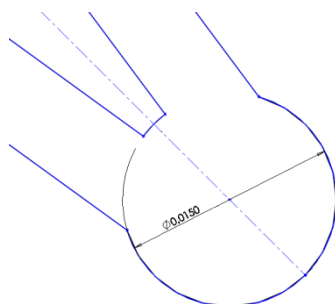


Figura 7.3 Representação da ligação da extremidade do robalete mediante um bolbo.

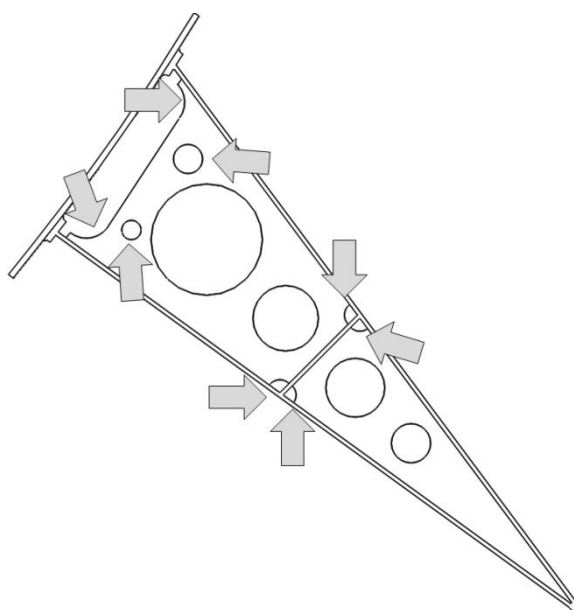


Figura 7.4 Detalhes aliviadores de concentração de tensões.

Os modelos tridimensionais dos novos arranjos internos do robalete foram analisados conforme a metodologia descrita no capítulo 5. Ou seja, os modelos com malha de elementos

finitos foram carregados uniformemente com 170kPa, correspondendo à carga de projecto, e aplicaram-se as mesmas condições fronteira, de modo a ser possível uma comparação com o modelo actual.

A tabela 10 apresenta um quadro resumo dos resultados provenientes da análise pelo método de elementos finitos, apontando as principais características das novas geometrias, no que diz respeito à tensão máxima de *Von Mises* induzida na estrutura, o número de zonas existentes com concentração de tensões, a deformação máxima e a massa para os novos modelos propostos.

A partir dos dados da tabela 10, é possível observar-se que a flecha estrutural das novas geometrias é aproximadamente constante e tem um valor médio de 3.3mm, com baixa dispersão, e representa uma redução de aproximadamente 57% em relação à flecha existente na geometria actual. Como não é conhecida a relação da flecha estrutural com as propriedades hidrodinâmicas do robaete, não se pode afirmar se o aumento de rigidez estrutural verificado nas geometrias alternativas representa uma melhoria face ao modelo actual.

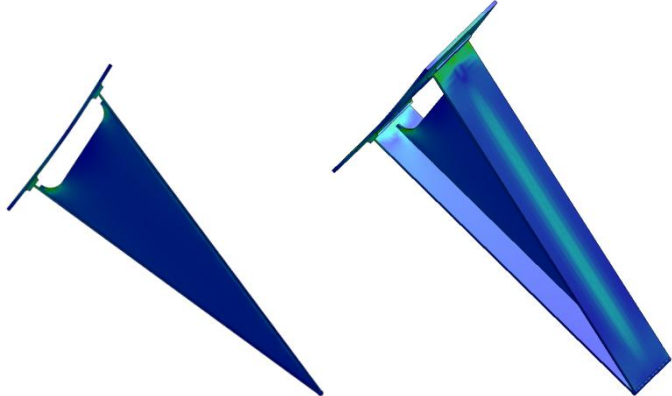
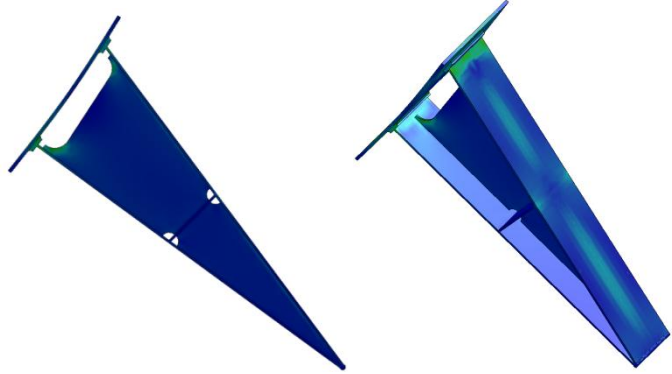
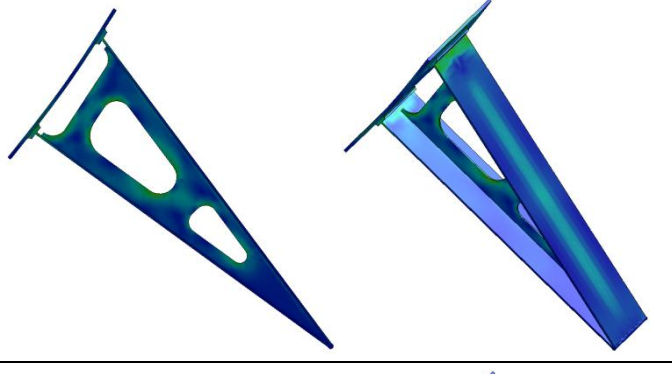
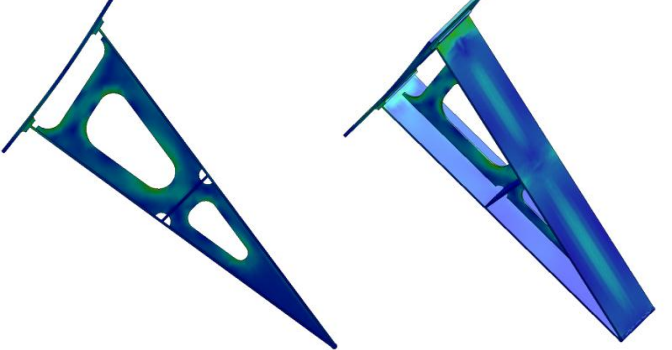
A análise feita também mostrou existir uma redução significativa do nível de tensões nas áreas de concentração de tensões (uma redução mínima de pelo menos 28% e uma redução máxima de 36%). De entre todos os casos analisados, destaca-se a geometria 5 como a melhor alternativa ao modelo existente, sendo esta a que efectivamente apresenta um nível menor da tensão máxima induzida, 230MPa, por comparação com a tensão máxima presente na geometria actual (364MPa). Concomitantemente, é também a solução 5 uma das que apresenta um menor número de localizações de concentração de tensão.

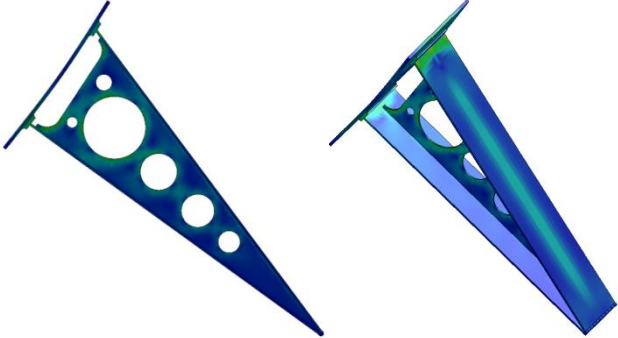
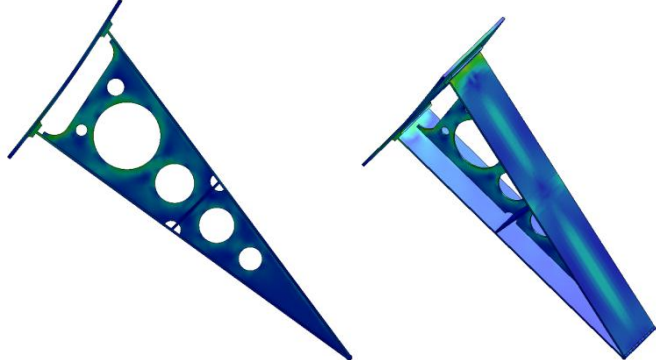
Tabela 10 Resultados nas análises MEF às novas geometrias (excepto Zona Crítica 1-fig.7.1).

	Massa (Kg)	Nr de zonas com concentração de tensões	Flecha Máxima (mm)	Tensão Máxima de Von Mises (MPa)
Geometria Actual (0)	41,34	5	7,6	364 MPa
Nova Geometria 1	39,44	3	3,3	249 MPa
Nova Geometria 2	40,90	3	3,4	255 MPa
Nova Geometria 3	37,77	6	3,3	246 MPa
Nova Geometria 4	39,27	6	3,3	260 MPa
Nova Geometria 5	37,84	3	3,2	230 MPa
Nova Geometria 6	39,33	3	3,2	248 MPa

A tabela 11 apresenta imagens contendo os resultados das várias análises efectuadas pelo MEF às geometrias alternativas desenvolvidas.

Tabela 11 Resultados da análise MEF às novas geometrias.

Nº	Visualização	Resultados
nr: 1		<p>Tensão máxima (<i>Von Mises</i>): 249 MPa</p> <p>Flecha máxima: 3.3 mm</p> <p>Nº de áreas críticas: 3</p> <p>Massa: 39.44 kg</p>
nr: 2		<p>Tensão máxima (<i>Von Mises</i>): 255 MPa</p> <p>Flecha máxima: 3.4 mm</p> <p>Nº de áreas críticas: 3</p> <p>Massa: 40.90 kg</p>
nr: 3		<p>Tensão máxima (<i>Von Mises</i>): 246 MPa</p> <p>Flecha máxima: 3.3 mm</p> <p>Nº de áreas críticas: 6</p> <p>Massa: 37.77 kg</p>
nr: 4		<p>Tensão máxima (<i>Von Mises</i>): 260 MPa</p> <p>Flecha máxima: 3.3 mm</p> <p>Nº de áreas críticas: 6</p> <p>Peso: 39.27 kg</p>

nr: 5		Tensão máxima (Von Mises): 230 [MPa] Flecha máxima: 3.2 mm Nº de áreas críticas: 3 Massa: 37.84 kg
nr: 6		Tensão máxima (Von Mises): 248 [MPa] Flecha máxima: 3.2 mm Nº de áreas críticas: 3 Massa: 39.33 kg

A verificação da influência das novas geometrias na distribuição de tensões na zona de ligação ao casco, identificada como zona crítica 1, é visível na figura 7.5.

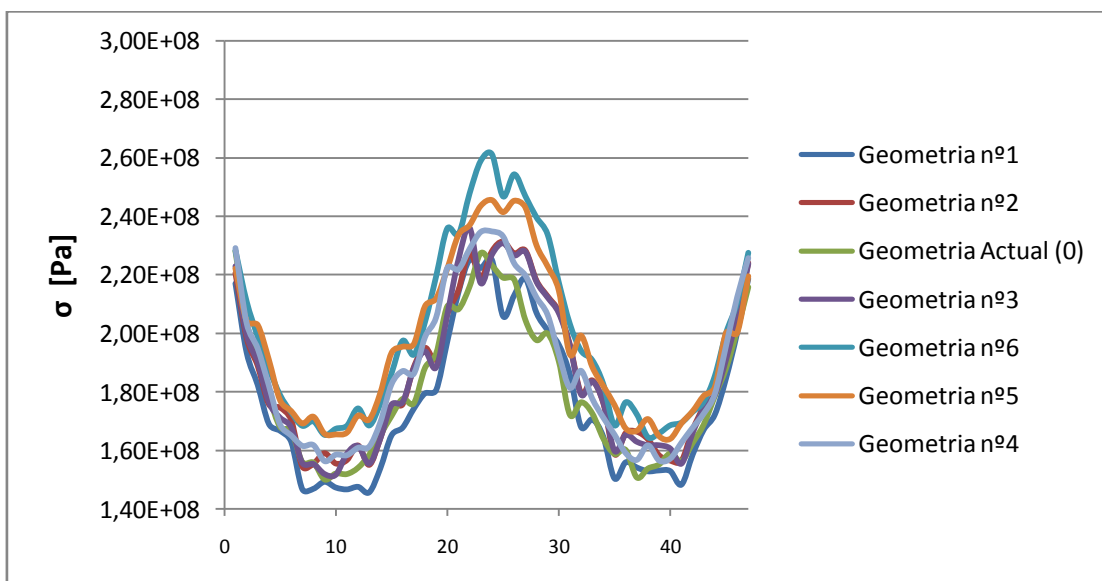


Figura 7.5 Distribuição de tensões dos novos arranjos interno na ligação do robalete ao casco.

Verificou-se que as soluções alternativas apresentadas para a estrutura interna do robalete não contribuem significativamente, na distribuição, nem na intensidade das tensões para o agravamento das tensões presentes na ligação do robalete ao casco, sendo aproximadamente iguais à distribuição de tensões existente, na mesma zona, para a geometria actual (observando-se apenas para a geometria 5 e 6 um ligeiro aumento das tensão máxima).

7.2 Novas soluções para a Zona Crítica 1

Devido ao facto de o nível das tensões presentes na Zona Crítica 1 continuar a ser alto (figura 7.5), e face à fissuração registada na ligação do robalete ao casco, nomeadamente, entre o casco e a chapa sobreposta e, na vizinhança da zona soldada, entre a chapa sobreposta e as placas, superior e inferior, do robalete, várias soluções alternativas foram concebidas, de modo a diminuir o valor máximo de tensão induzido às ligações sob estudo.

As soluções propostas consistem na aplicação de esquadros no interior do casco onde existem reforços internos deste (fig.7.6), ou na aplicação de um ferro bolbo ao longo da ligação do robalete (fig.7.7), de modo a existir uma continuidade estrutural através do casco. Ambas as soluções apresentadas têm como objectivo obter uma distribuição de tensões inferior à actualmente existente, de modo a eliminar as falhas estruturais encontradas.

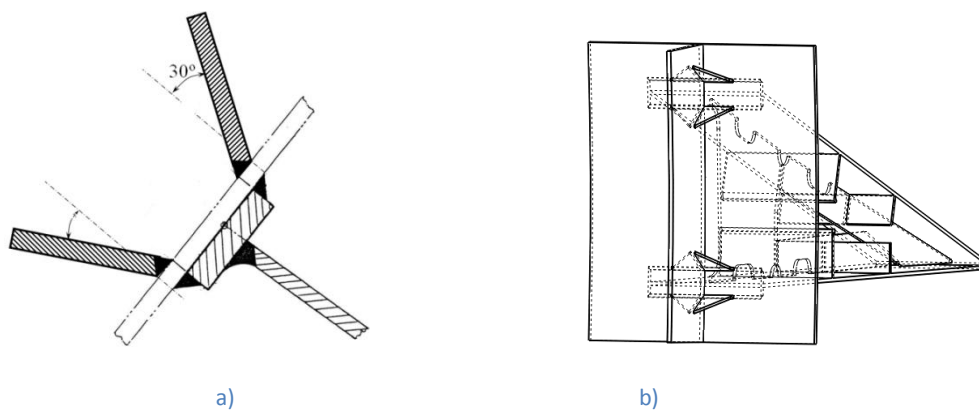


Figura 7.6 Ligação do robalete ao casco com brackets (esquadros). a) Secção transversal. b) Representação de montagem.

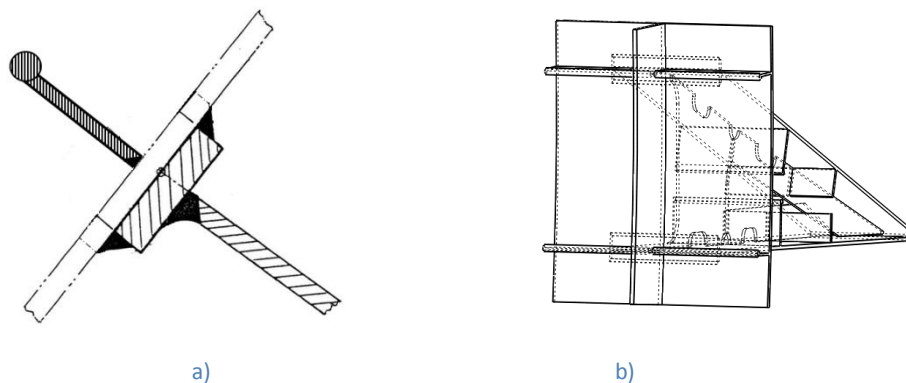


Figura 7.7 Ligação do robalete ao casco com bulb plate (ferro bolbo). a) Secção transversal. b) Representação de montagem.

À semelhança das análises bidimensionais pelo MEF, realizadas anteriormente, recorreu-se a elementos Plane 183, triangulares, de 6 nós, para a divisão da geometria em sub-regiões discretas (fig.7.8). Para obter uma boa representação das condições presentes na ligação em estudo, as extremidades correspondentes ao corte do casco e às secções das soluções propostas, esquadros e ferro bolbo, foram consideradas encastradas. Em relação ao carregamento, aplicou-se a carga P_{BK} na placa, superior e inferior, do robalete, correspondendo à pressão uniformemente distribuída de 170kPa.

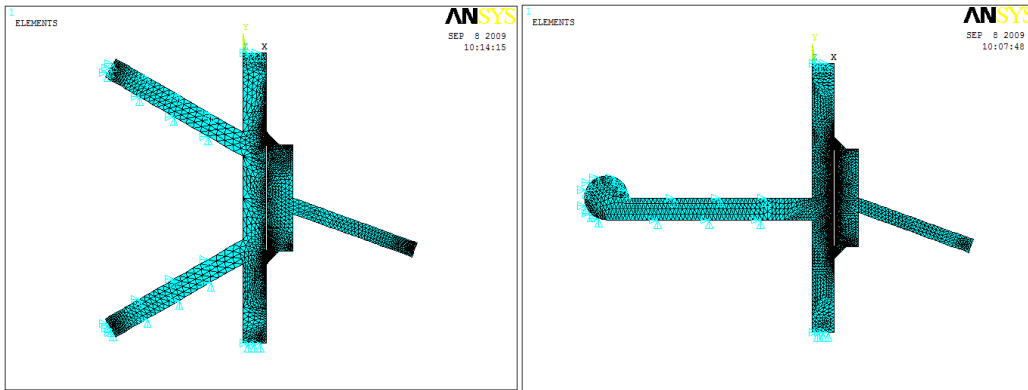


Figura 7.8 Condições fronteiras nas soluções propostas na ligação ao casco.

A análise pelo método de elementos finitos mostrou que, ambas a soluções propostas - a aplicação de esquadros ou de ferro bolbo - são opções viáveis para a redução acentuada dos valores de tensões entre o casco e a chapa sobreposta (figs. 7.9 e 7.10), assegurando-se a estanqueidade do casco.

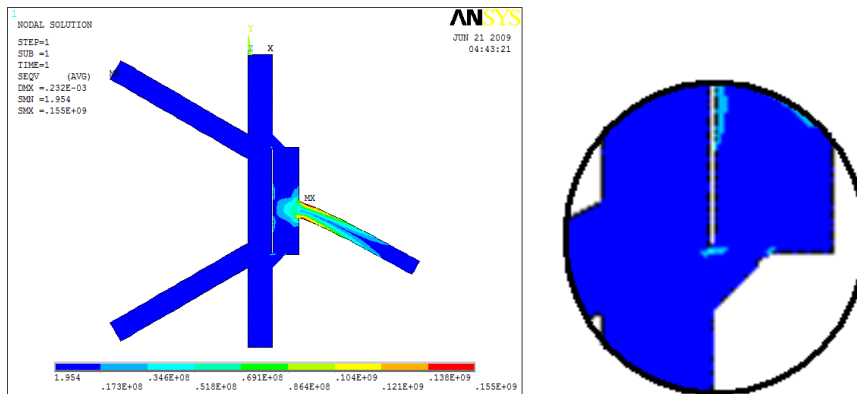


Figura 7.9 Distribuição de tensões no modelo bidimensional da ligação superior do robalete com a aplicação de esquadros.

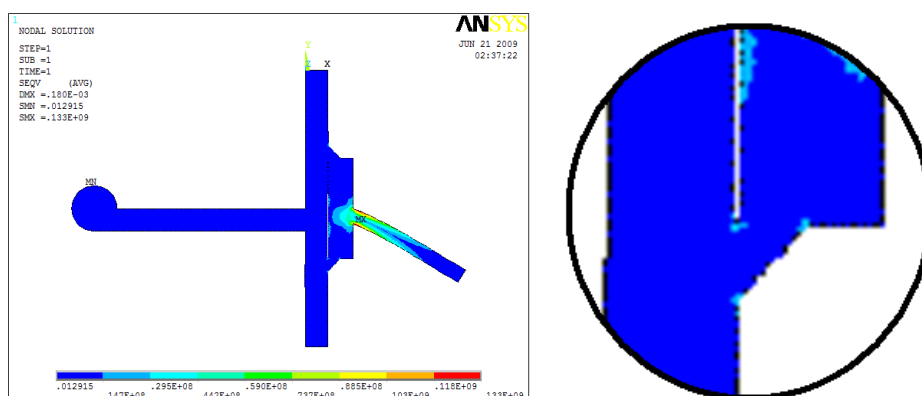
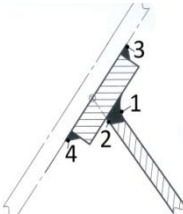


Figura 7.10 Distribuição de tensões no modelo bidimensional da ligação superior do robalete com a aplicação de um ferro bolbo.

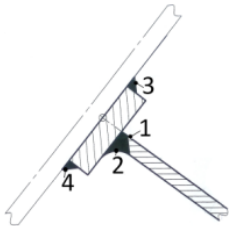
Para uma melhor avaliação da redistribuição de tensões, como resultado da aplicação de esquadros ou de um ferro bolbo, apresentam-se os valores de tensões induzidos nos vários pontos da ligação soldada considerada (tabela 12 e tabela 13).

Tabela 12 Tensões na ligação superior do robalete ao casco, com a implementação de esquadros e ferro bolbo.



	Tensão no Ponto 1	Tensão no Ponto 2	Tensão no Ponto 3	Tensão no Ponto 4
Modelo Actual	157 MPa	149 MPa	29 MPa	50,6 MPa
Aplicação de Esquadros	155 MPa	154 MPa	4,8 MPa	3,9 MPa
Aplicação de um Ferro Bolbo	121 MPa	133 MPa	27,6 MPa	25,5 MPa

Tabela 13 Tensões na ligação inferior do robalete ao casco, com a implementação de esquadros e ferro bolbo.



	Tensão no Ponto 1	Tensão no Ponto 2	Tensão no Ponto 3	Tensão no Ponto 4
Modelo Actual	126 MPa	137 MPa	37 MPa	37 MPa
Aplicação de Esquadros	122 MPa	133 MPa	5,3 MPa	5,7 MPa
Aplicação de um Ferro Bolbo	122 MPa	134 MPa	29,7 MPa	27,3 MPa

A partir dos dados das tabelas 12 e 13, é possível observar-se uma redução significativa no valor de tensões induzidas nos pontos indicados da ligação soldada, quer com a aplicação de esquadros, quer com a aplicação de um ferro bolbo. De entre as duas soluções estruturais propostas, destaca-se a aplicação de esquadros como a melhor solução estrutural, uma vez que apresenta níveis menores de tensão induzida, principalmente entre a ligação soldada entre o casco e a placa sobreposta, (pontos 3 e 4).

A aplicação de esquadros apresenta-se ainda como a melhor solução face à aplicação de um ferro bolbo, não só devido à sua facilidade de instalação, uma vez que serão aplicados exclusivamente onde existem reforços internos do casco (Figs. 7.6 e 7.7), mas também devido à sua fácil produção e consequente manutenção.

No Anexo E encontram-se a totalidade dos resultados obtidos na modelação bidimensional da ligação do robalete ao casco.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE À FADIGA

Uma vez detectadas fissuras, que se iniciaram na ligação do robalete ao casco, foi realizada uma previsão do comportamento à fadiga da ligação soldada, para as soluções alternativas desenvolvidas nos capítulos precedentes. Este tipo de análise é útil para se obter uma boa percepção da longevidade da estrutura na fase de projecto e, deste modo, se necessário, tomar as devidas medidas para aumentar a resistência à fadiga.

Como se sabe, o processo clássico de analisar o comportamento à fadiga de ligações soldadas é através das curvas S-N, que utilizam a tensão nominal em ordenadas e o número de ciclos no eixo nas abcissas (1). Verifica-se também, que o comportamento à fadiga pode ser afectado por muitos parâmetros. Os que têm mais importância e que, portanto, merecem uma atenção redobrada são:

- geometria da ligação soldada
- distribuição de tensões
- material e estado metalúrgico
- nível de tensões do ciclo
- tensão média do ciclo de tensões
- espectro de carga de tensões
- meio ambiente (fadiga com corrosão)
- tensões residuais
- defeitos de soldadura

Neste capítulo, a previsão de vida à fadiga é feita de acordo com curvas de projecto à fadiga inclusas na norma de projecto da *Germanischer Lloyd*, na qual, para estruturas submetidas a solicitações cíclicas resultantes de ondas ou motores (8), e para obtenção de vida infinita, se deverá verificar a seguinte equação:

$$\Delta \sigma_{RC} \cdot f_n \geq \Delta \sigma (f_a \cdot F_{dyn}) \quad (\text{eq. 8.1})$$

Onde $\Delta \sigma_{RC}$ é a variação de tensão de referência, f_n é o factor de correcção face ao número de ciclos de carga aplicado e classe de espectro considerado, e $\Delta \sigma (f_a \cdot F_{dyn})$ a variação de tensões presente na estrutura devido a cargas dinâmicas.

Ou seja, na prática o termo da direita da equação, correspondendo à amplitude de tensões na estrutura, tem de ser menor do que os termos da esquerda representativos de um valor de uma curva S-N de referência.

8.1 Valor de Tensão de Referência ($\Delta\sigma_{RC} \cdot f_n$)

As Curvas S-N representadas na figura 8.1, representam a resistência à fadiga de diversas Classes de Detalhes (tipos de Ligações Soldadas), para diversas gamas de tensão aplicadas (8). A metodologia adoptada para a obter o valor da Gama de Tensão da curva S-N, $\Delta\sigma_R$, consistiu em fixar uma gama de tensões aceitável, para um determinado tipo de ligação soldada, admitindo uma vida útil à fadiga de pelo menos 2×10^6 ciclos.

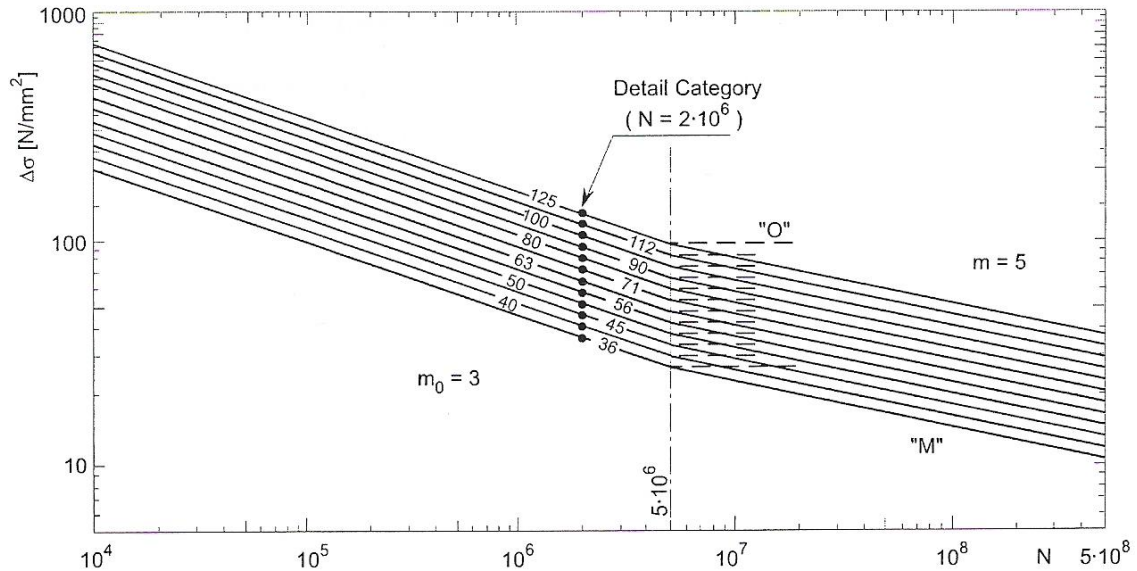


Figura 8.1 Exemplo de curvas S-N (aço).

Uma correcção do valor ordenado da curva S-N de referência, $\Delta\sigma_{RC}$, é requerido, de modo a contabilizarem-se vários factores na resistência à fadiga, ou seja:

$$\Delta\sigma_{RC} = f_m \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_i \cdot \Delta\sigma_R \quad (\text{eq. 8.2})$$

- (i) f_m , correspondendo a um factor associado ao estado metalúrgico do material, para ligações soldadas a resistência á fadiga é independente da resistência do aço, traduzindo-se por:

$$f_m = 1$$

- (ii) f_R , correspondendo a um factor de correcção relativo à tensão média do ciclo de tensões aplicado, para carregamentos cíclicos é calculado da seguinte forma:

$$f_R = 1 + c \left(1 - \frac{2 \cdot \sigma_m}{\Delta\sigma_{\max}} \right) \quad (\text{eq. 8.2.1})$$

Onde foi assumido um $c=0$, correspondendo a uma ligação soldada sujeita a ciclos de tensão constantes (Espectro de classe C); obteve-se:

$$f_R = 1$$

- (iii) f_w , correspondendo a um factor relativo à geometria da junta, para casos normais:

$$f_w = 1$$

(iv) f_i refere-se à importância estrutural do elemento, na generalidade é aplicado:

$$f_i = 1$$

Uma vez que para a ligação em estudo, demonstrou-se através dos pontos i a iv que, todos os factores de correcção têm o valor nominal de 1, a equação pode ser simplificada a:

$$\Delta \sigma_{Rc} = \Delta \sigma_R \quad (\text{eq. 8.3})$$

Assumiui-se que uma ligação cruciforme, com ocorrência de fissuras no pé do cordão de soldadura, é representativa da ligação e modo de falha existente entre o robalete e o casco, uma vez que o detalhe representado é o que mais se aproxima da ligação alinhada com o robalete e com os reforços internos do casco (anteparas/balizas), como demonstrado na figura 8.2. Assim, o valor de $\Delta \sigma_R$, para 2×10^6 ciclos de vida à fadiga, correspondente a uma ligação cruciforme soldada, de aço, como a indicada na fig. 8.2 (Classe de Detalhe 63, fig. 8.1), recorrendo ao manual de projecto *Germanischer Lloyd*, é de 63 N/mm^2 .

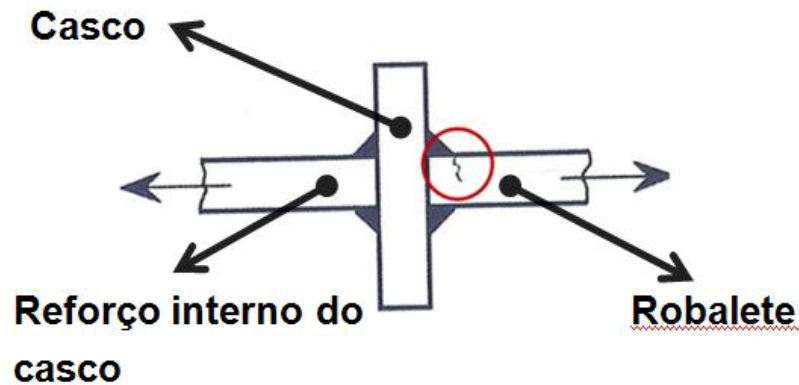


Figura 8.2 Simplificação feita da ligação do robalete ao casco.

Ao valor corrigido do valor da curva S-N de referência, ($\Delta \sigma_{Rc}$), neste caso idêntico ao valor de $\Delta \sigma_R$ (cfr. eq. 8.3), deve aplicar-se um factor de correcção, f_n , relativamente ao número e tipo de ciclos (espectro de tensões) a que a estrutura está sujeita durante a vida útil considerada no projecto. A figura 8.3 indica as três classes de espectros A, B, C normalizadas (8), sendo que:

Espectro A: é um espectro designado por Proporcional (espectro de tensões tipicamente induzido pela acção do mar).

Espectro B: Espectro Parabólico, correspondendo a uma distribuição de função densidade de probabilidade de tipo Normal da gama de tensão aplicada.

Espectro C: Espectro Constante (gama de espectro de amplitude de tensões constante, sendo típico de motores ou propulsores).

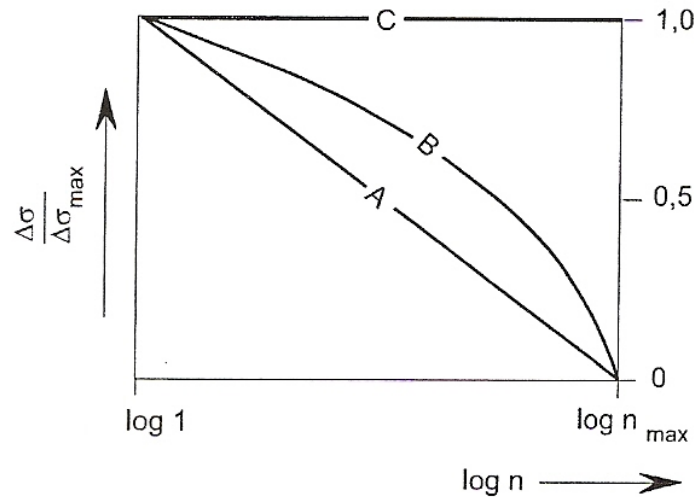


Figura 8.3 Classes de espectros de carga normalizados, A, B e C.

Utilizou-se como base o valor de $\Delta\sigma_R$ de 63 N/mm^2 , e assumindo uma relação linear entre o número de ciclos de carga e o efeito cumulativo de dano. Recorreu-se à tabela 17.2, incluída na norma de projecto da *Germanischer Lloyd* (8).

Onde, sabendo que a gama de tensão admissível, é calculada pela seguinte equação:

$$\Delta\sigma_p = f_n \cdot \Delta\sigma_{Rc} \quad (\text{eq. 8.4})$$

Várias gamas de tensão associadas à Classe de Detalhe 63 foram corrigidas através da equação 8.4, nomeadamente para 1×10^3 , 1×10^5 , 5×10^7 e 1×10^8 ciclos, aplicando valores de f_n tabelados para cada classe de espectro: A, B e C. Os valores de f_n intermédios aos valores de ciclos indicados anteriormente, para as Classes de espectros A, B e C, foram obtidos por interpolação, através da eq. 8.5 (8), para os pares de valores $(n_{\max 1}; f_{n1})$ e $(n_{\max 2}; f_{n2})$.

$$\log f_n = \log f_{n1} + \log(n_{\max}/n_{\max 1}) \frac{\log(f_{n2}/f_{n1})}{\log(n_{\max 2}/n_{\max 1})} \quad (\text{eq. 8.5})$$

As Curvas S-N corrigidas encontram-se na figura 8.4.

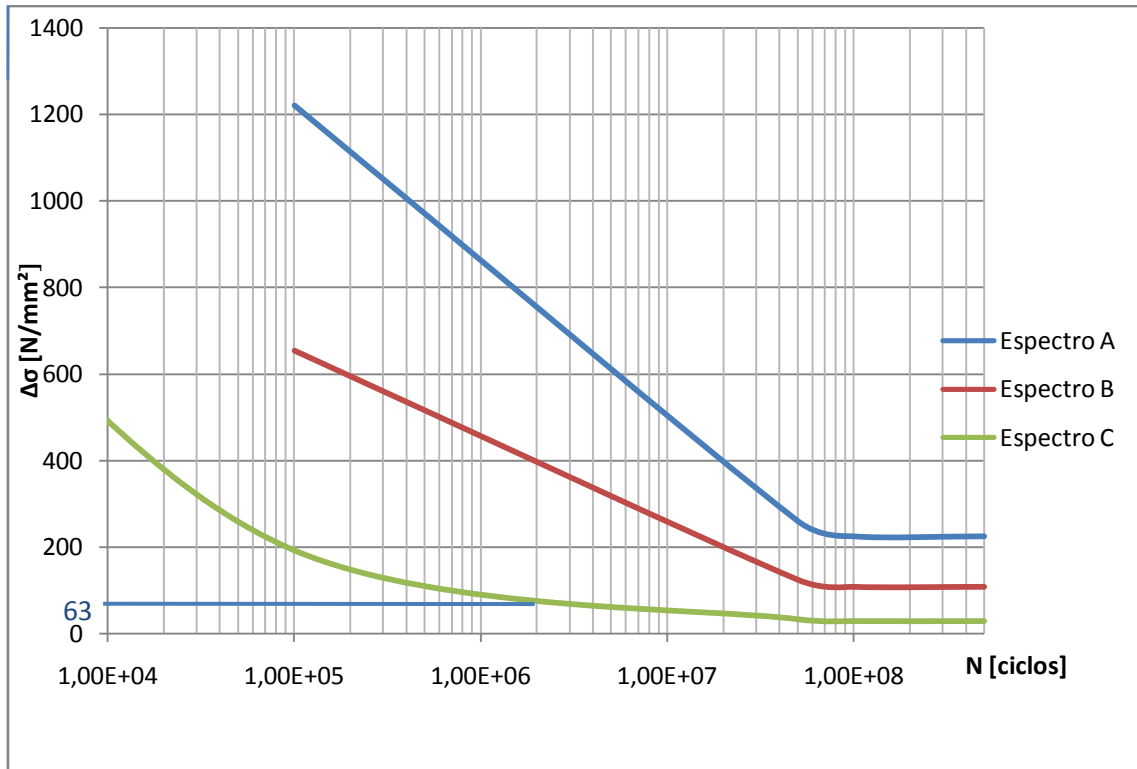


Figura 8.4 Curvas S-N de projeto para cada classe de espectro de classe normalizada, A B e C.

8.2 Variação de Tensão Presente na Estrutura $\Delta\sigma$ (fa. F_{dyn})

Uma boa representação matemática e visual da carga máxima a que o robaete poderá estar sujeito, num determinado intervalo de tempo, é recorrer a uma sinusóide (espectro C, fig. 8.3), correspondendo ao caso mais desfavorável de carregamento a que pode estar sujeito o robaete. Assume-se, neste caso, que a estrutura em estudo é submetida constantemente a uma tensão máxima e mínima, com a mesma intensidade, mas de sinal oposto, ou seja $\sigma_{min}/\sigma_{máx}=-1$ (figura 8.5).

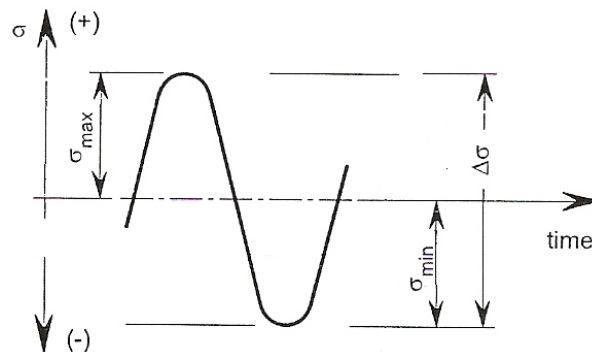


Figura 8.5 Representação de um possível ciclo de tensão presente do robaete.

Para este caso, muito improvável que aconteça no caso do robaete, devido aos motivos referidos anteriormente, a variação de tensão nominal presente na estrutura resultaria na gama, $\Delta\sigma$:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad (\text{eq. 8.3})$$

e, uma vez que a tensão máxima e tensão mínima têm a mesma intensidade, mas sinal oposto, obter-se-ia:

$$\Delta \sigma = 2 \times \sigma_{\text{máx}} \quad (\text{eq. 8.4})$$

ou, por uma questão de nomenclatura,

$$\Delta \sigma (\text{fa. } F_{dyn}) = 2 \times \sigma_0 (\text{fa. } F_{dyn}) \quad (\text{eq. 8.5})$$

sendo que σ_0 representaria o valor da tensão nominal máxima aplicada remotamente à ligação soldada sobreposta entre o casco e o robaleta. Tendo sido estimado um valor máximo local de tensão de 155 MPa (fig. 7.9), na ligação do robaleta à placa sobreposta, para a geometria que considera a aplicação de esquadros, importava conhecer a tensão nominal, remotamente aplicada, que provocaria a tensão máxima local antes referida. De referir ainda, que na determinação do valor de tensão de 155MPa foi considerado um factor parcial de segurança para componentes de cargas dinâmicas, γ_{fdyn} , igual a 2 (ver sub-capítulo 3.2).

Sabendo que o valor máximo de 155 MPa é obtido no pé do cordão da ligação soldada, e sabendo que esse valor corresponde à concentração brusca de tensão provocada por um entalhe, fez-se uma estimativa do factor de concentração de tensões geométrico, K_t , associado ao caso em estudo, assumindo-se um carregamento de flexão (figura 8.6).

Considerando as características presentes na ligação soldada existente, obteve-se:

$$r/h = 1/6 = 0,1666$$

e

$$H/h = 40/6 = 6,666$$

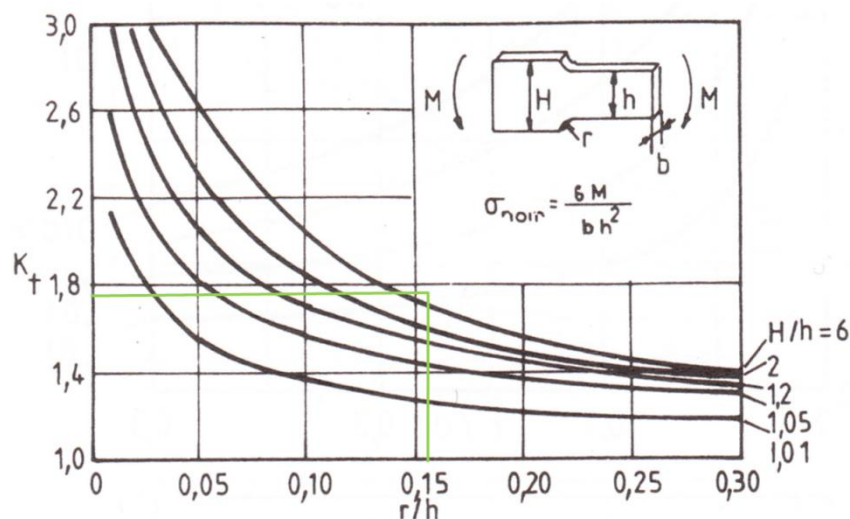


Figura 8.6 Factor de concentrações (7).

onde, “r”, representa o valor do raio do pé do cordão de soldadura e foi considerado igual a 1mm; “h”, representa a espessura de 6mm da chapa do robaleta e “H” o comprimento da chapa sobreposta de 40mm. Desta forma, obteve-se um factor de concentração de tensões geométrico máximo, K_t , aproximadamente de 1.8. Este, pode ser definido por:

$$Kt = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (\text{eq. 8.6})$$

Combinando a equação 8.5, e 8.6:

$$\Delta \sigma (fa. F_{dyn}) = \frac{2 \times \sigma_{\max}}{Kt} \quad (\text{eq. 8.7})$$

Onde, σ_{\max} e Kt têm o valor de 155 Mpa e 1.8, respectivamente, obteve-se:

$$\Delta \sigma (fa. F_{dyn}) = 172 \text{ MPa}$$

8.3 Previsão de Vida à Fadiga

A esperança média da vida útil à fadiga, para cada classe de espectro de tensão, pode ser observada na figura 8.7. A conversão de ciclos de carga a que o robaete está sujeito, N , em anos úteis de serviço, foi realizada através do limite mínimo de ciclos de carga, que um componente estrutural tem de resistir, correspondendo a 5×10^7 ciclos de vida à fadiga num espectro de classe A, ao qual é considerado uma vida útil de 25 anos com 230 dias por anos de serviço no mar.

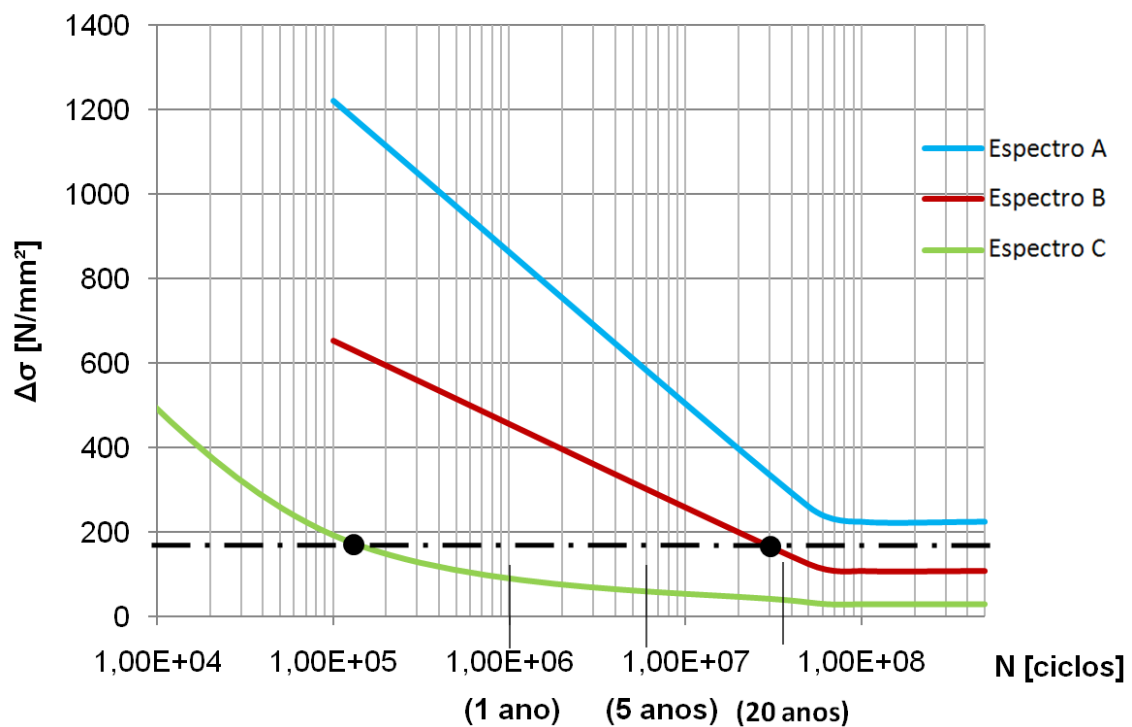


Figura 8.7 Obtenção da vida útil á fadiga nos 3 espectros de classes.

Observou-se que, para um espectro conservativo C, a estimativa de vida útil à fadiga não chega a ser 1 ano. Contudo é importante referir que é irrealista em estruturas marítimas ter uma gama de espectro C num longo espaço de tempo. Sendo as classes B e A as que, efectivamente traduzem melhor as condições presentes do navio quando em serviço, onde relativamente à classe B a estimativa de vida útil é aproximadamente de 16 anos, e à classe A é esperado uma vida infinita.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Esta tese reflecte um trabalho de análise efectuada às falhas estruturais encontradas nos robalates, com o intuito de apresentar soluções estruturais para a resolução das mesmas.

Do trabalho realizado, as principais conclusões obtidas foram:

- Confirmou-se, através das análises realizadas pelo método dos elementos finitos, que a localização das falhas internas no robaletes coincidem com as zonas onde se registaram concentrações elevadas de tensões, identificadas como zonas críticas 4 e 5. Verificou-se a presença de níveis de tensão próximos do limite de cedência do material e, conseqüentemente, foram identificadas zonas onde uma plastificação local é passível de ocorrer e, conseqüentemente a nucleação e propagação de fendas por fadiga.
- Constatou-se que a existência de reforços transversais ao casco (anteparas ou balizas) induzem o aumento localizado do nível de tensões na ligação do robaletes ao casco, identificado com zona crítica 1. Para se obter uma ideia da influência dos reforços transversais, várias secções do robaletes foram modeladas, analisando-se simultaneamente a influência da existência das anteparas, assim como o efeito do alinhamento, ou do não-alinhamento, dos reforços internos do casco com os reforços transversais do robaletes. Conclui-se que:
 - (i) Quer os reforços transversais do robaletes, como os do casco, provocam um aumento do nível de tensões junto à ligação do robaletes ao casco devido a um aumento de rigidez estrutural, sendo esse aumento mais concentrado e acentuado quando está presente o reforço relativo ao casco (antepara ou baliza);
 - (ii) O alinhamento dos reforços transversais do casco e do robaletes traduz-se num agravamento do aumento do nível de tensões junto à ligação do robaletes ao casco, quando comparado com o nível de tensão induzido pela presença apenas do reforço transversal do robaletes;
 - (iii) O aumento do número de reforços transversais do robaletes e do casco, assim como o alinhamento ou não-alinhamento entre estes, não influenciam as tensões presentes na estrutura interna do robaletes.
 - (iv) Um aumento da tensão máxima presente na estrutura é registado com o aumento do comprimento longitudinal da estrutura do robaletes estudada.
- A análise bidimensional feita pelo MEF entre a chapa sobreposta e o robaletes e entre a chapa sobreposta e o casco permitiu estimar a tensão máxima de Von Mises existente na zona do pé dos cordões de soldadura existentes. Verificou-se a existência de uma concentração de tensões mais acentuada na ligação superior do robaletes ao casco, facto que está de acordo com o registo de falhas observado.

- Foram concebidas e analisadas 6 geometrias alternativas à estrutura interna do robalete, de modo a propor-se uma nova solução capaz de evitar as falhas estruturais identificadas quer no robalete, quer na ligação do robalete ao casco, mantendo, no entanto, as características hidrodinâmicas do robalete inalteradas, nomeadamente as relacionadas com a sua capacidade de dissipação de energia e de coeficiente de arrasto. A melhor solução encontrada contém 3 zonas críticas e uma tensão máxima de *Von Mises* igual a 230MPa (correspondendo a uma redução de 36% em relação à geometria actual).
- Tendo-se confirmando que o efeito de concentração de tensões na ligação entre o casco e a chapa sobreposta é de carácter localizado e independente da estrutura interna do robalete, várias soluções estruturais foram consideradas para a sua atenuação, nomeadamente, a aplicação de esquadros e de um ferro bolbo, de modo a existir uma continuidade estrutural através do casco. A aplicação de esquadros é a solução estrutural que melhor garante que, na ocorrência de fissuras por fadiga, a integridade estrutural do casco não seja comprometida, com uma $\sigma_{\text{máx.}}$ entre o casco e a chapa sobreposta de 4.8MPa, e uma $\sigma_{\text{máx.}}$ entre a chapa sobreposta e o robalete de 155MPa.
- Da análise do comportamento à fadiga, realizada à ligação soldada do robalete ao casco com a aplicação das soluções alternativas desenvolvidas, podemos aferir que as soluções estruturais propostas satisfazem o mínimo previsto de ciclos de carga durante a sua vida de serviço (correspondendo a 5×10^7 ciclos de vida à fadiga num espectro de classe A), uma vez que para um espectro de classe A, mais de acordo com as solicitações a que o robalete está sujeito, é esperada uma vida infinita. Adoptando uma análise mais conservativa, ainda foi apresentada a esperança média de vida para o espectro da classe B, onde a estimativa de vida útil à fadiga foi de 16 anos.

CAPÍTULO 10

TRABALHOS FUTUROS

É recomendável que seja feita uma modelação tridimensional completa do robalete e a sua análise pelo método de elementos finitos. Concomitantemente, deve ser ainda realizado um ensaio mecânico estático, à escala natural, da secção alternativa proposta ao modelo actual do robalete.

Devido à complexidade estrutural da ligação do robalete ao casco e à importância que tem na estanqueidade do navio, seria recomendável fazer-se uma análise experimental de tensões da estrutura com extensómetros. Com o espectro recolhido, poder-se-ão fazer ensaios de fadiga à nova estrutura de robalete desenvolvida.

Por último, seria importante desenvolver os estudos sobre a implicação que o alinhamento ou não alinhamento dos reforços internos do casco com os do robalete tem nos valores de tensão induzidos.

BIBLIOGRAFIA

1. **C. MOURA BRANCO, A. AUGUSTO FERNANDES, PAULO M. S. TAVARES DE CASTRO.** *FADIGA DE ESTRUTURAS SOLDADAS.* s.l. : FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN, 1999.
2. **DENNIES, D.P.** *The Organization of a Failure Investigation.* s.l. : ASM internacional, 2002.
3. **ON THE STRUCTURAL DESIGN OF BILGE KEELS. Mateus, António F.** Hamburg, Germany : s.n., 2006. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. p. 1.
4. **www.whhz.cn. Wuhan Haizheng Industry & Trade Development Co. Ltd.** [Online] [Citação: 30 de Agosto de 2009.] <http://www.whhz.cn/English/ship.asp>.
5. **CORPORATION, CANTESCO.** cantesco. www.cantesco.com. [Online] [Citação: 30 de Outubro de 2009.] <http://www.cantesco.com/applications/DYE%20PENETRANT%20Q%20&%20A.03.pdf>.
6. **Grant, David James.** *Full Scale Investigation of Bilge Keel Effectiveness at Forward Speed.* April 28, 2008 : s.n., April 28, 2008.
7. **Bishop R., Atsvaprane P., Percivall S., Shan J., Engle A.** *An Investigation of the Viscous Roll Damping.* Canada. : 25th Symposium on Naval Hydrodynamics , 2004.
8. **Lloyd, Germanischer.** *Rules for Classification and Construction, III Naval Ship Tecnology.* s.l. : Germanischer Lloyd, 2004.
9. **Ugural, A.** *Stresses in Plates and Shells.* s.l. : McGraw-Hill, 1999.
10. **Barbanov, Evgeny.** *INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD.* Riga Technical University : Institute of Materials and Structures Faculty of Civil Engineering.
11. **Roylance, David.** *Finite Element Analysis.* s.l. : Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, February 28, 2001. MA 02139.
12. **BRANCO, CARLOS A. G. DE MOURA.** *MECÂNICA DOS MATERIAIS.* Porto : GULNENKIAN, 1998. 3ª edição.
13. **Zhang, Guihua.** *Development of Numerical Approaches to Predict Ductile and Cleavage Fracture of Structural Materials.* s.l. : University of Akron, December 2007.

ANEXO A

CATÁLOGO DO AÇO NAVAL D36

• Shipbuilding steel grades approved by Classification Societies Table 1

Yield strength R_{eH} N/mm ² minimum	Tensile strength R_m N/mm ²	Lloyd's Register of Shipping	Det Norske Veritas	Germanischer Lloyd	American Bureau of Shipping	Bureau Veritas	Maritime Register of Shipping	Registro Italiano Navale
Normal strength steels								
235	400 – 490	LR A	NV A	GL-A	AB A	BV A	PC A	RINA A
		LR B	NV B	GL-B	AB B	BV B	PC B	RINA B
		LR D	NV D	GL-D	AB D	BV D	PC D	RINA D
		LR E	NV E	GL-E	AB E	BV E	AB E	RINA E
High-strength steels								
265	400 – 510	LR AH 27S	NV A27S	-	-	-	-	-
		LR DH 27S	NV D27S	-	-	-	-	-
		LR EH 27S	NV E27S	-	-	-	-	-
315	440 – 590	LR AH 32	NV A32	GL-A 32	AB AH32	BV AH32	PC A32	RINA AH32
		LR DH 32	NV D32	GL-D 32	AB DH32	BV DH32	PC D32	RINA DH32
		LR EH 32	NV E32	GL-E 32	AB EH32	BV EH32	PC E32	RINA EH32
		LR FH 32	-	-	-	-	-	-
355	490 – 620	LR AH 36	NV A36	GL-A 36	AB AH36	BV AH36	PC A36	RINA AH36
		LR DH 36	NV D36	GL-D 36	AB DH36	BV DH36	PC D36	RINA DH36
		LR EH 36	NV E36	GL-E 36	AB EH36	BV EH36	PC E36	RINA EH36
		LR FH 36	-	-	-	-	-	-
390	510 – 650	LR AH 40	NV A40	GL-A 40	AB AH40	-	PC A40	-
		LR DH 40	NV D40	GL-D 40	AB DH40	-	PC D40	-
		LR EH 40	NV E40	GL-E 40	AB EH40	-	PC E40	-

For accurate comparison, the original standards should be used.

ANEXO B

INSTRUÇÕES DE USO PARA A APLICAÇÃO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Aplicações Gerais

Sistemas de inspecção por líquidos penetrantes detectam fissuras ou defeitos em superfícies metálicas não porosas, em superfícies não metálicas, e em metais cerâmicos. Podem ser usadas para inspeccionar materiais em engenharia, tais como peças forjadas, fundidas, soldagens e outras áreas de concentração de tensões.

Funcionamento

Seguindo uma metodologia de seis passos simples, a inspecção por líquidos penetrantes, através de um corante vermelho, detecta fissuras na superfície em vermelho em contraste com um fundo branco. Este procedimento não requer nenhum equipamento adicional para proporcionar a detecção visual em condições normais de iluminação. Depois da inspecção os materiais podem ser facilmente lavados.

Indicações de Uso

PASSO 1 – PRE-LIMPEZA

A superfície de ensaio é limpa para remover qualquer tipo de sujidade, tinta, óleo, graxa ou qualquer material que poderia causar indicações falsas ou irrelevantes. Métodos de limpeza podem incluir solventes, desengorduramento a vapor, ou meios de sopro. O objectivo final desta etapa é uma superfície limpa, onde todos os defeitos presentes estão abertos para a superfície, seca e livre de contaminação.

PASSO 2 – APLICAÇÃO DO PENETRANTE

O líquido penetrante é aplicado à superfície do componente a ser testado, onde é permitido tempo suficiente (geralmente de 5 a 30 minutos) para a penetração mergulhar em qualquer falha existente.

PASSO 3 – REMOÇÃO DO EXCESSO DE PENETRANTE

O excesso de líquido penetrante é depois removido da superfície em análise. Este processo deve ser realizado sob condições controladas de modo que todo o excesso de penetrante sobre a superfície seja removido (ruído de fundo), mas o penetrante preso nos defeitos continue presente.

PASSO 4 – APLICAÇÃO DO REVELADOR

Após a remoção do excesso do penetrante, um revelador branco é aplicado à amostra em análise, devendo formar uma camada uniforme, semi-transparente na superfície.

O revelador atrai o penetrante dos defeitos para a superfície, para formar uma indicação visível da sua localização. Qualquer mancha colorida indica a posição e tipo de defeito na superfície sob inspeção.

PASSO 5 – INSPECÇÃO

A inspeção da superfície de ensaio deve ter lugar após um tempo de desenvolvimento de 10 minutos, onde este intervalo de tempo permite que a acção de revelação ocorra.

È importante destacar-se, que se muito tempo passar-se após a revelação, as indicações das fissuras podem "derramar-se", tornando a interpretação difícil.

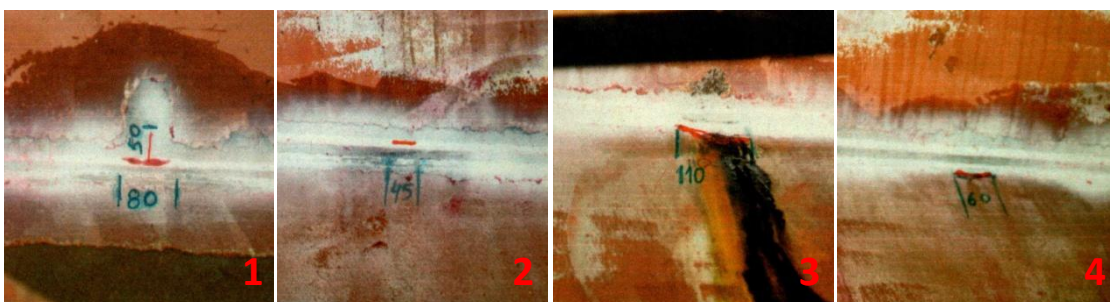
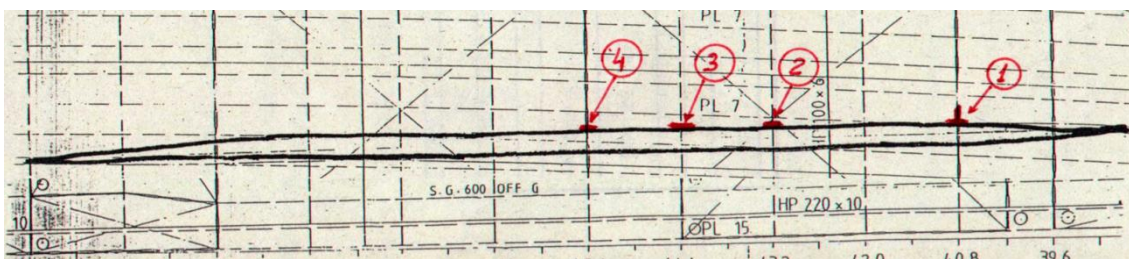
PASSO 6 – LIMPEZA FINAL

Uma vez que as áreas contendo falhas foram analisadas e registadas, o resíduo líquido penetrante na superfície é removido.

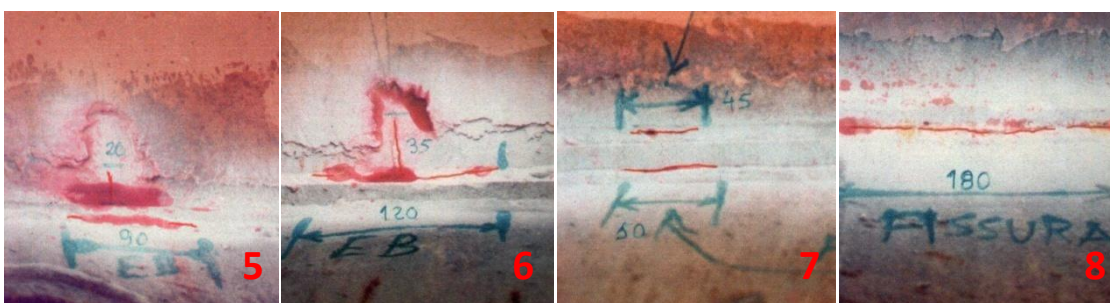
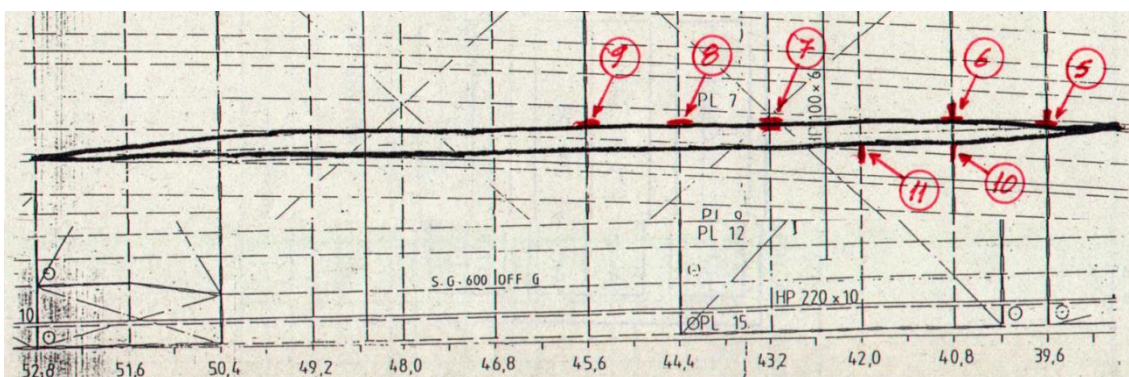
ANEXO C

REGISTO COMPLETO DE FISSURAS

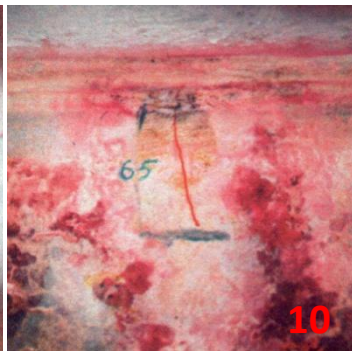
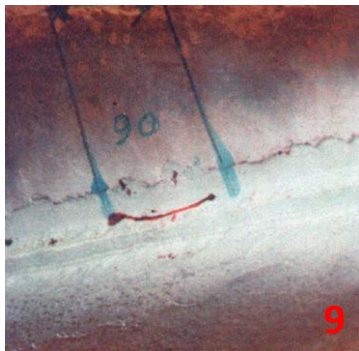
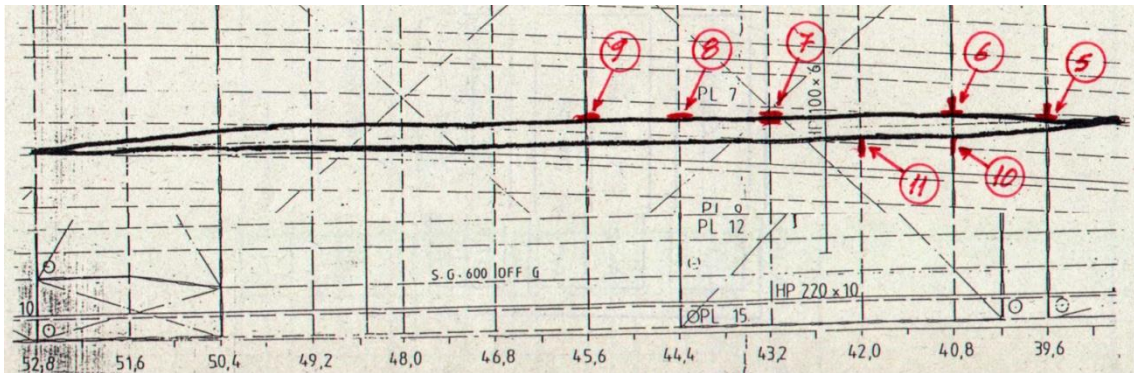
FISSURAS A BOMBORDO:



FISSURAS A ESTIBORDO:

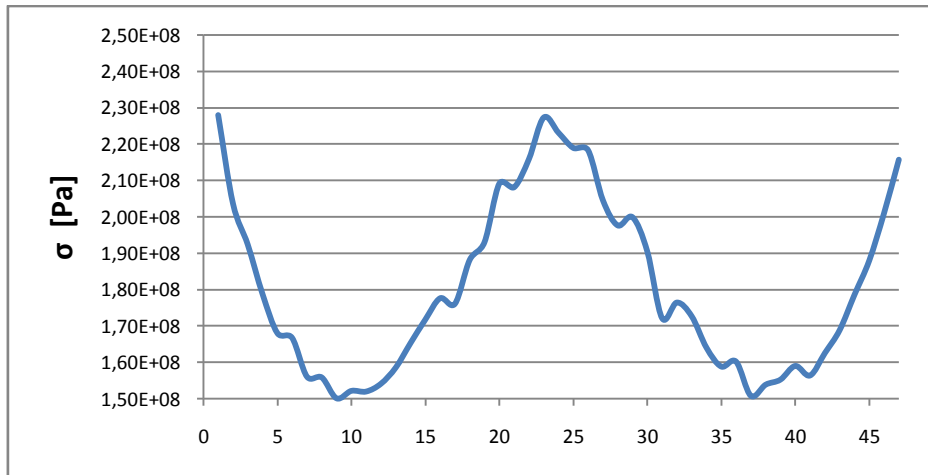


FALHAS A ESTIBORDO (continuação):

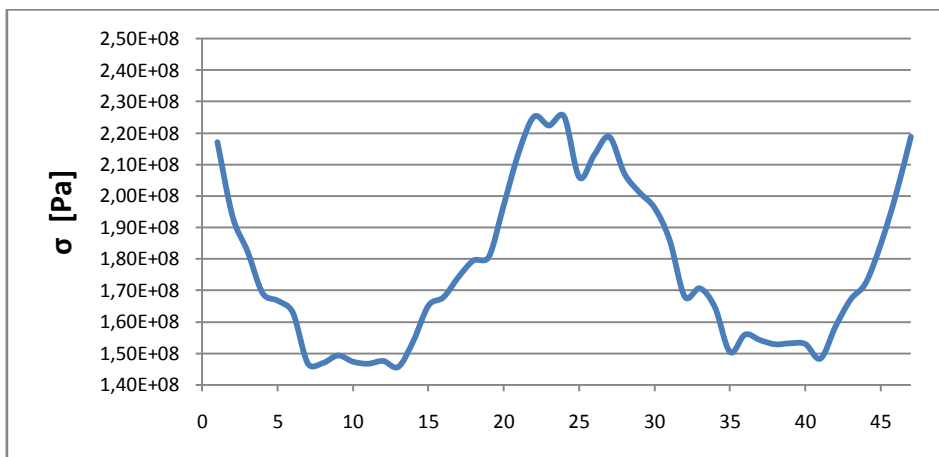


ANEXO D

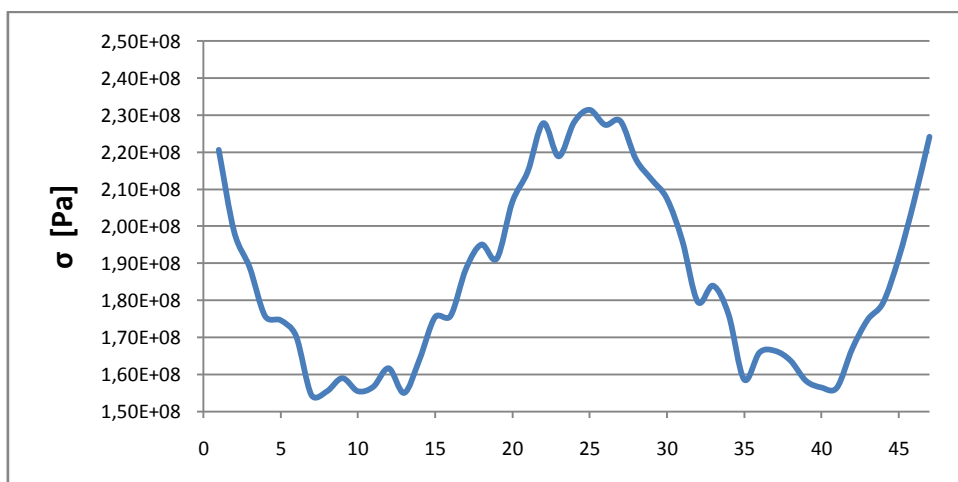
ANÁLISE NÃO LINEAR COMPLETA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES AO LONGO DA LIGAÇÃO DO ROBALETE AO CASCO (ZONA CRÍTICA 1)



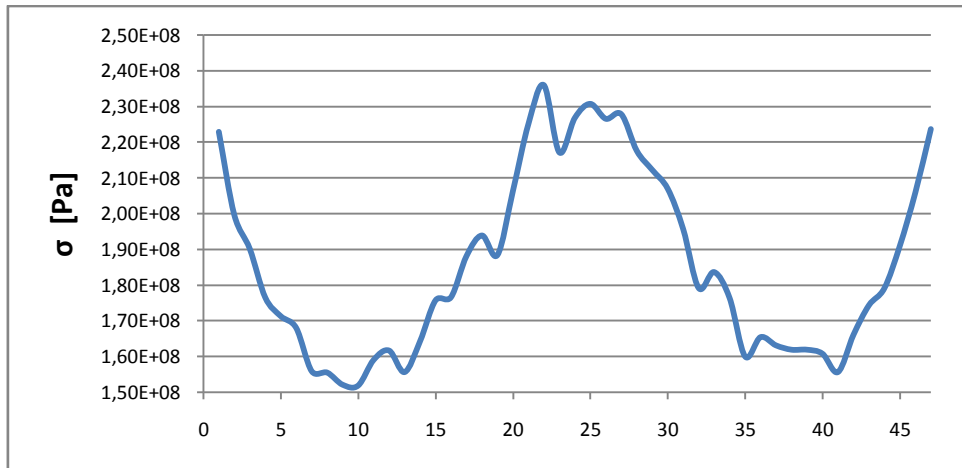
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 1.



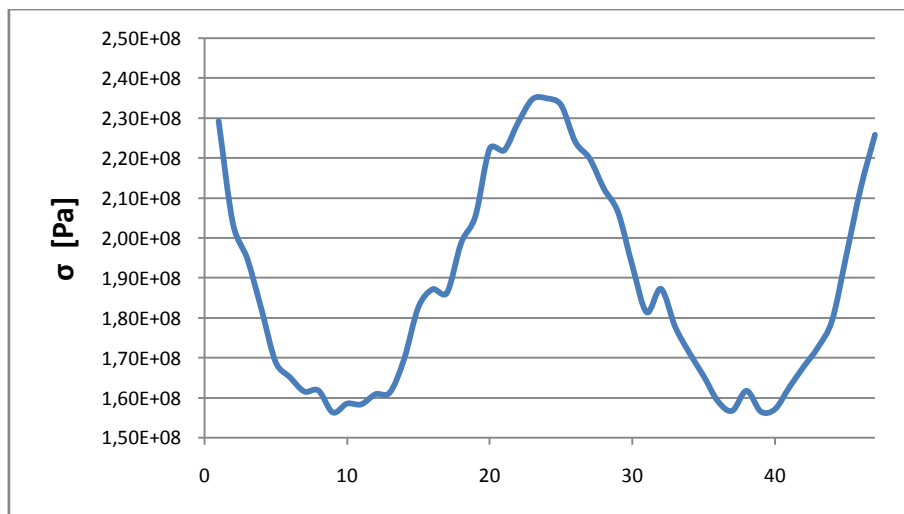
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 2.



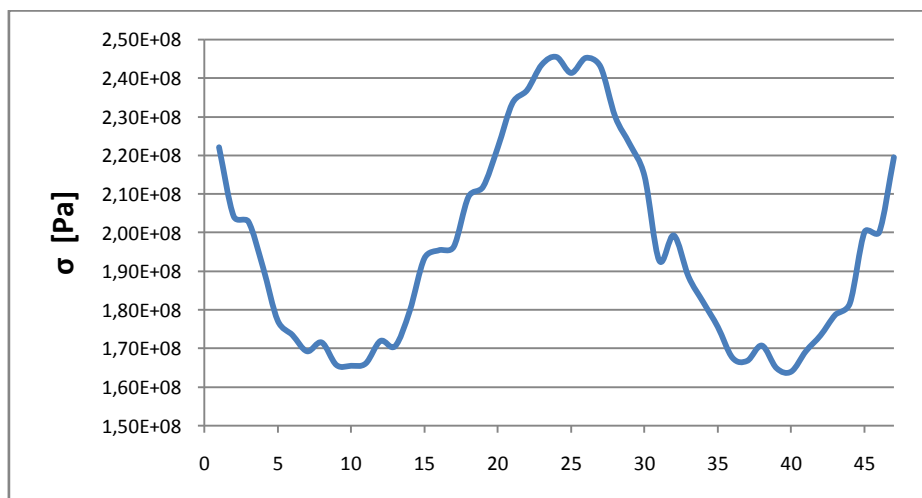
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 3.



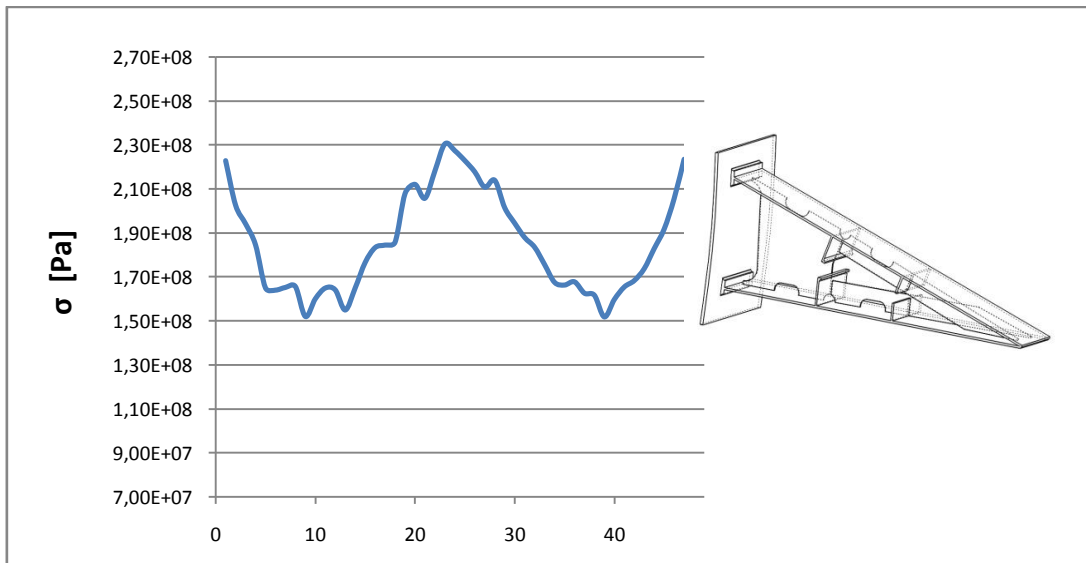
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 4.



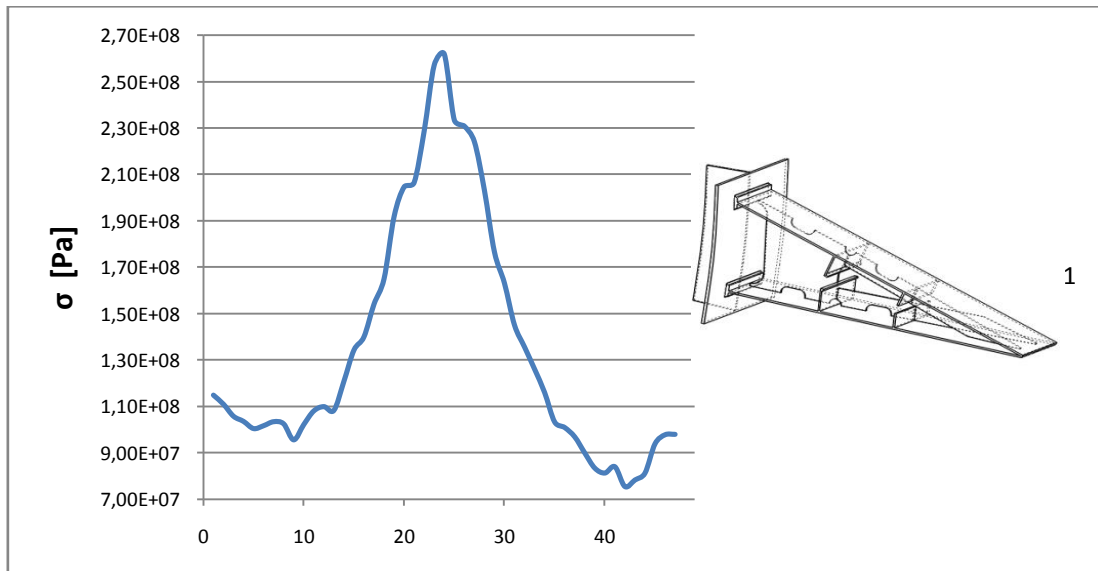
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 5.



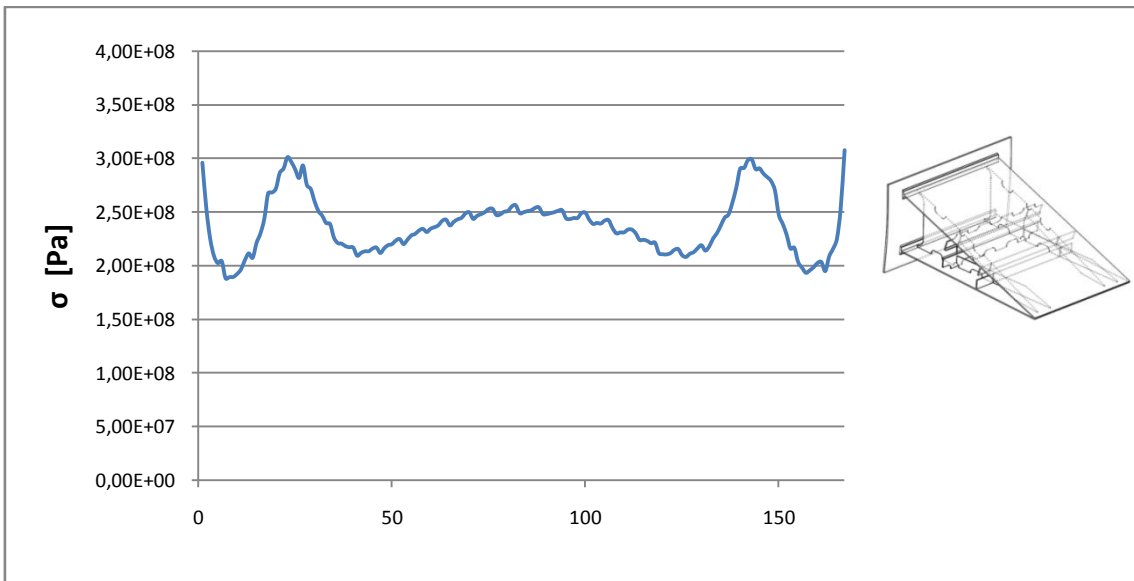
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, na geometria 6.



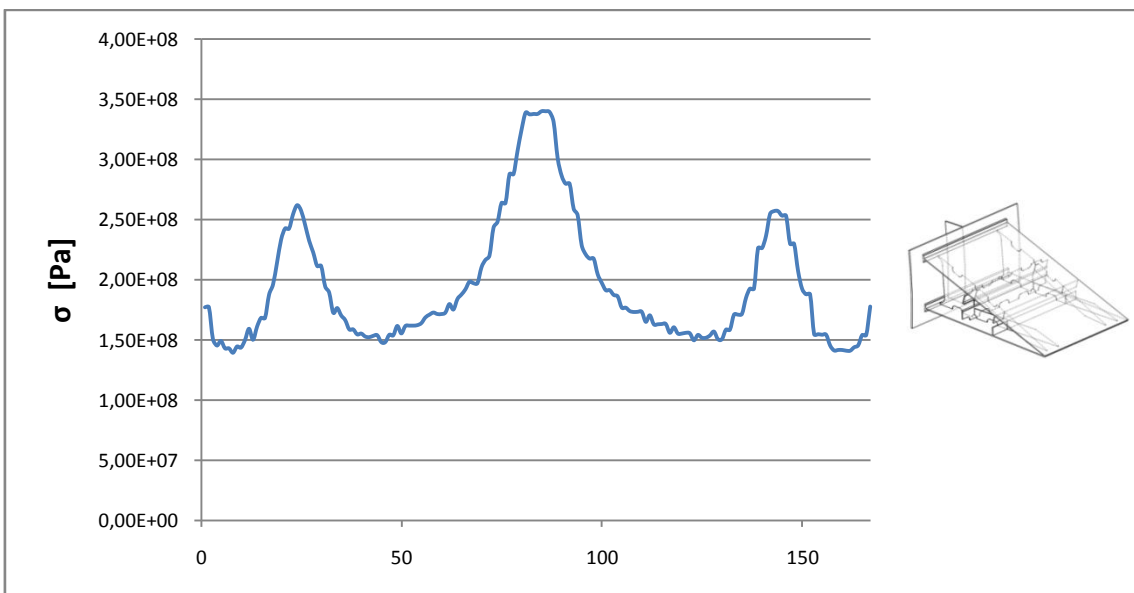
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com um reforço transversal do robalete.



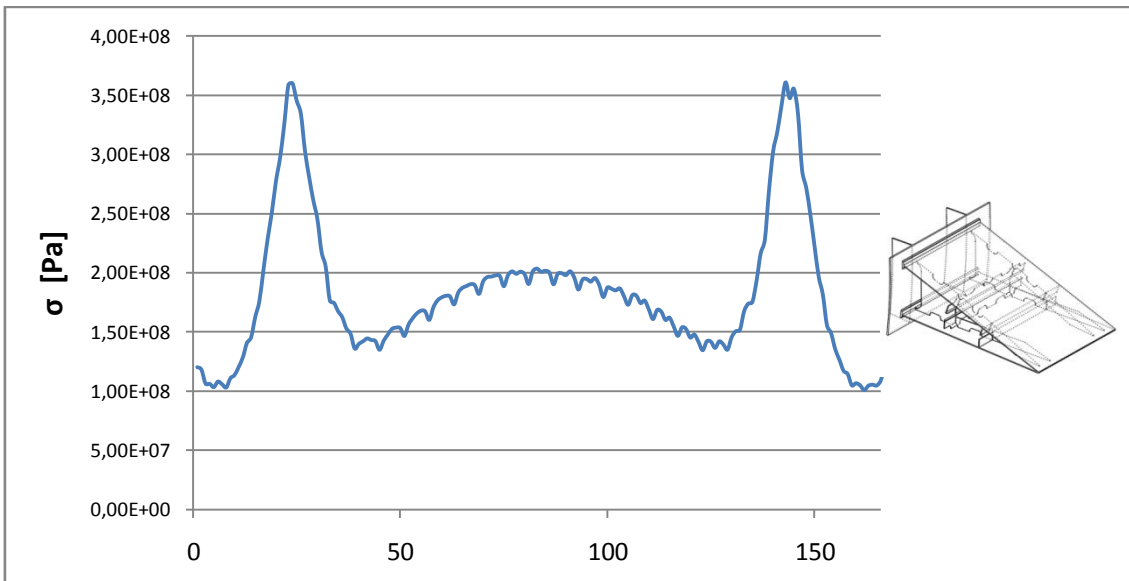
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com um reforço transversal do robalete e alinhamento entre reforços transversais.



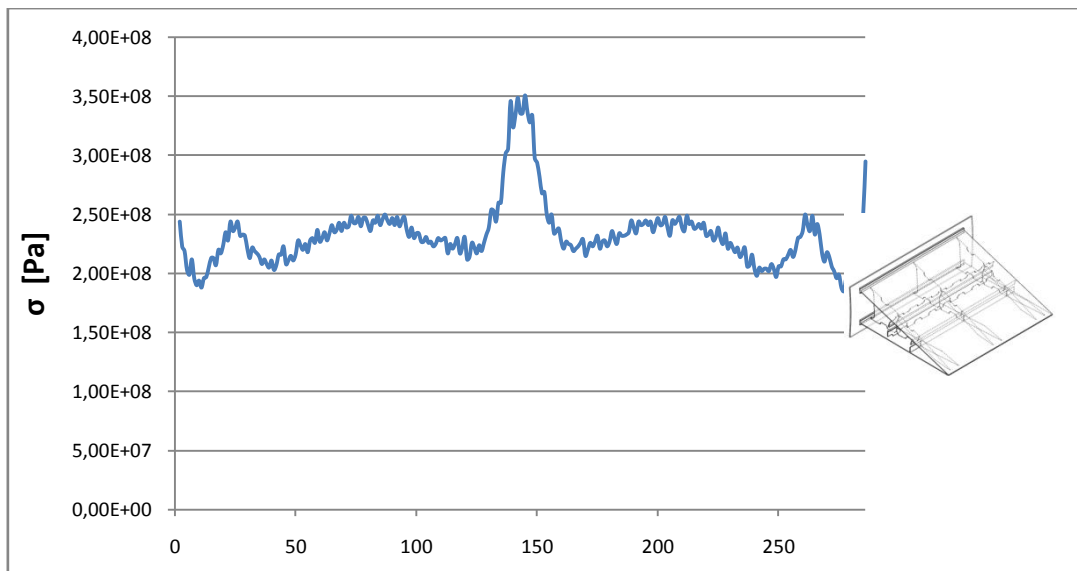
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com dois reforços transversais do robalete.



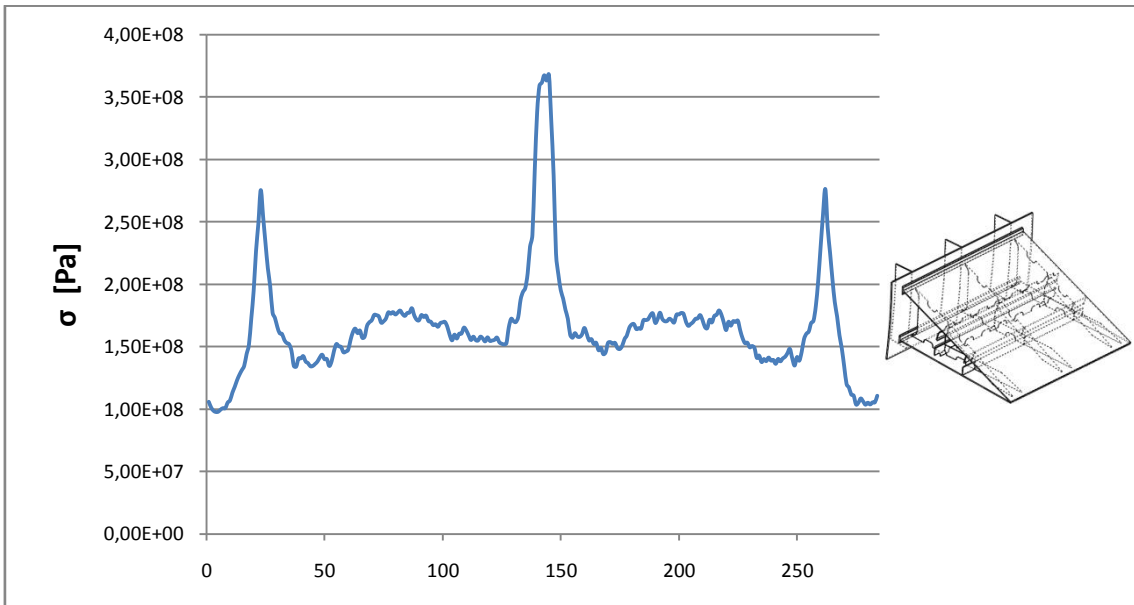
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com dois reforços transversais do robalete e não-alinhamento entre reforços transversais.



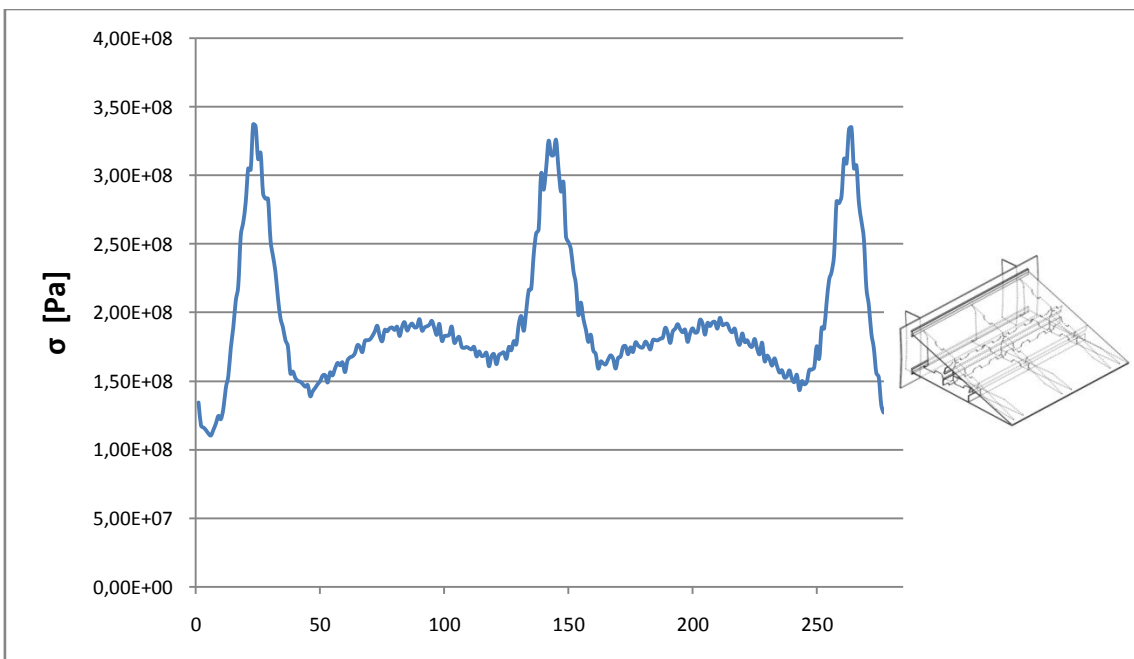
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robaete ao casco, com dois reforços transversais do robaete e alinhamento entre os reforços transversais.



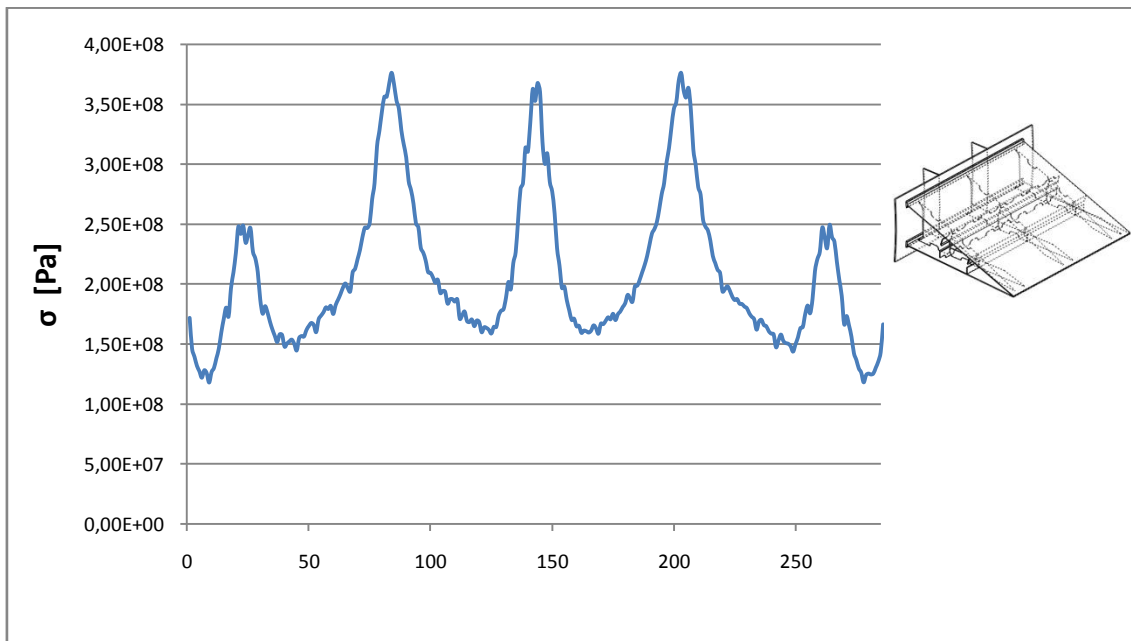
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robaete ao casco, com três reforços transversais do robaete.



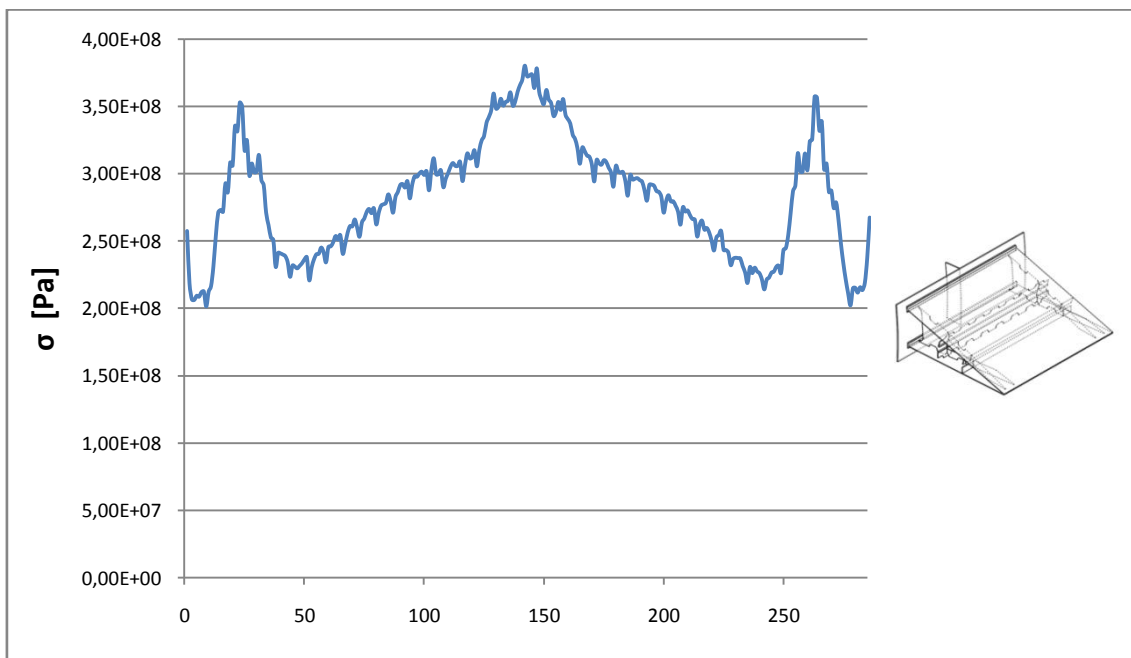
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com três reforços transversais do robalete e alinhamento entre os reforços transversais.



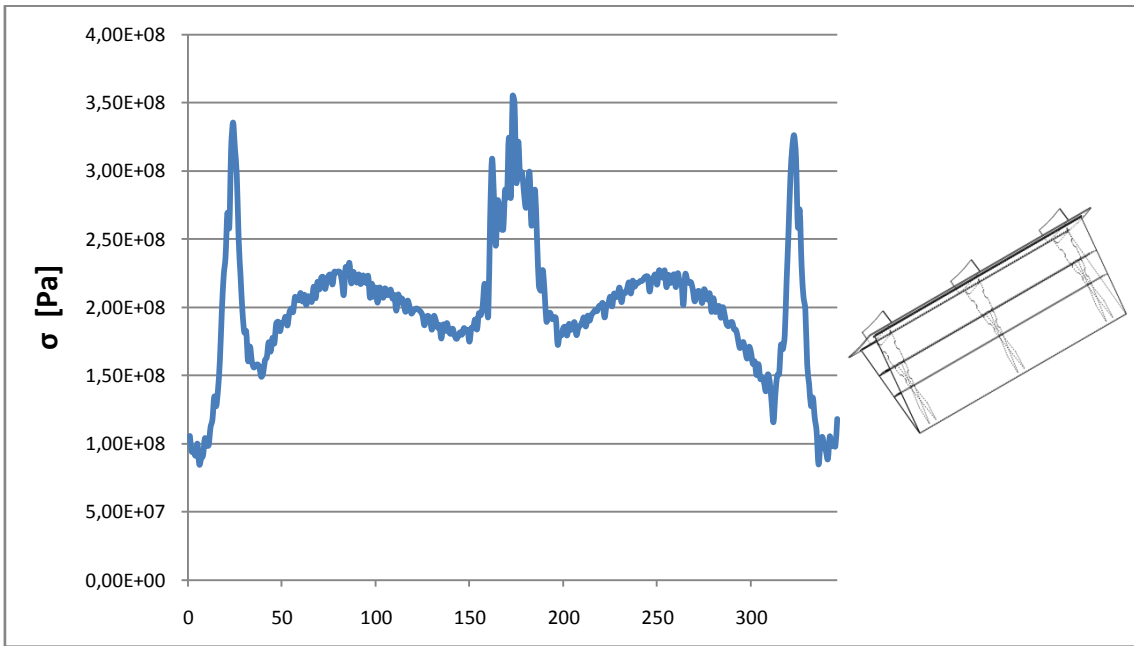
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com três reforços transversais do robalete e alinhamento entre dois os reforços transversais.



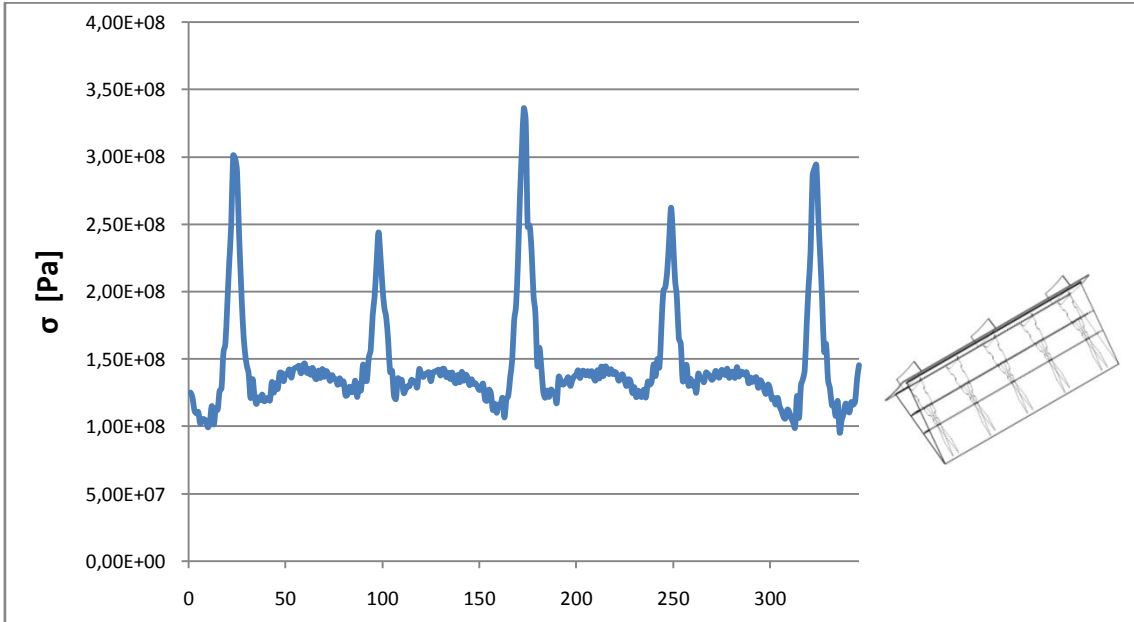
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com três reforços transversais do robalete e não-alinhamento entre os reforços transversais.



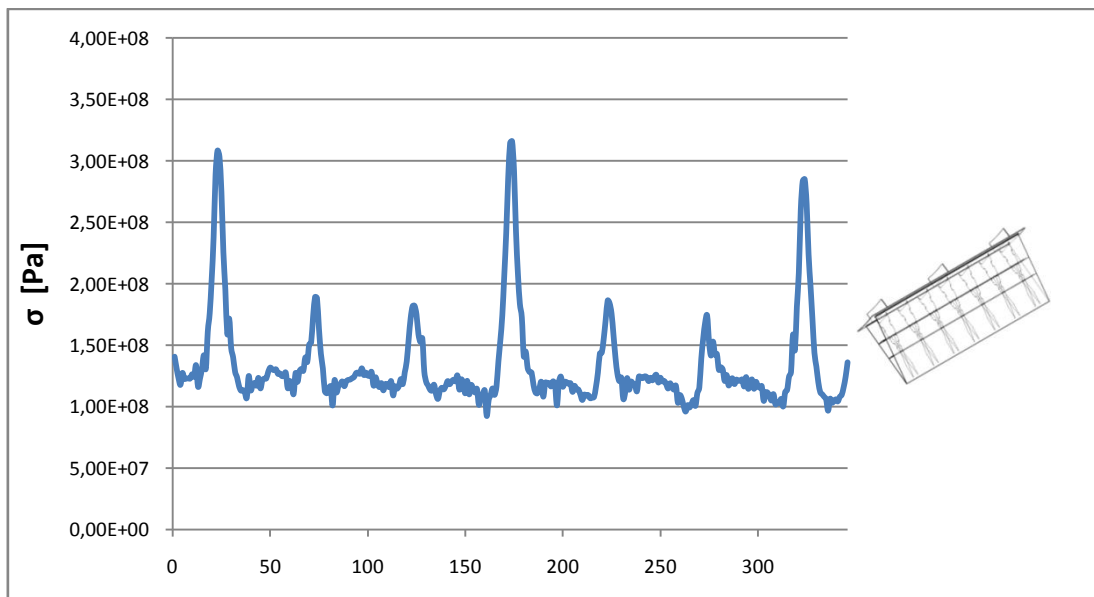
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete ao casco, com dois reforços transversais do robalete e um reforço transversal do casco.



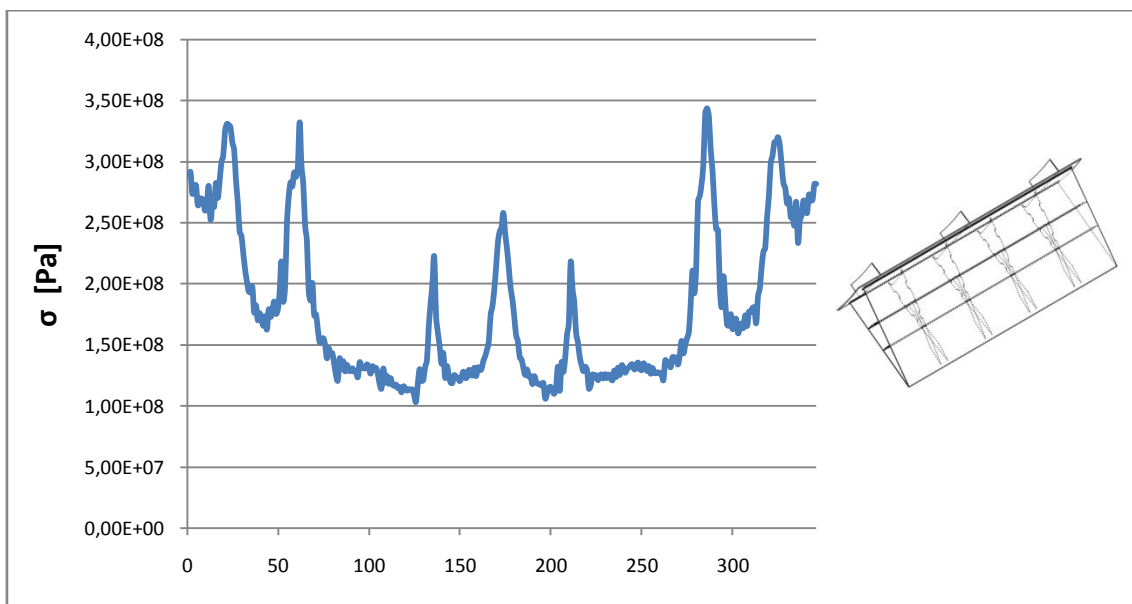
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, com alinhamento entre reforços transversais.



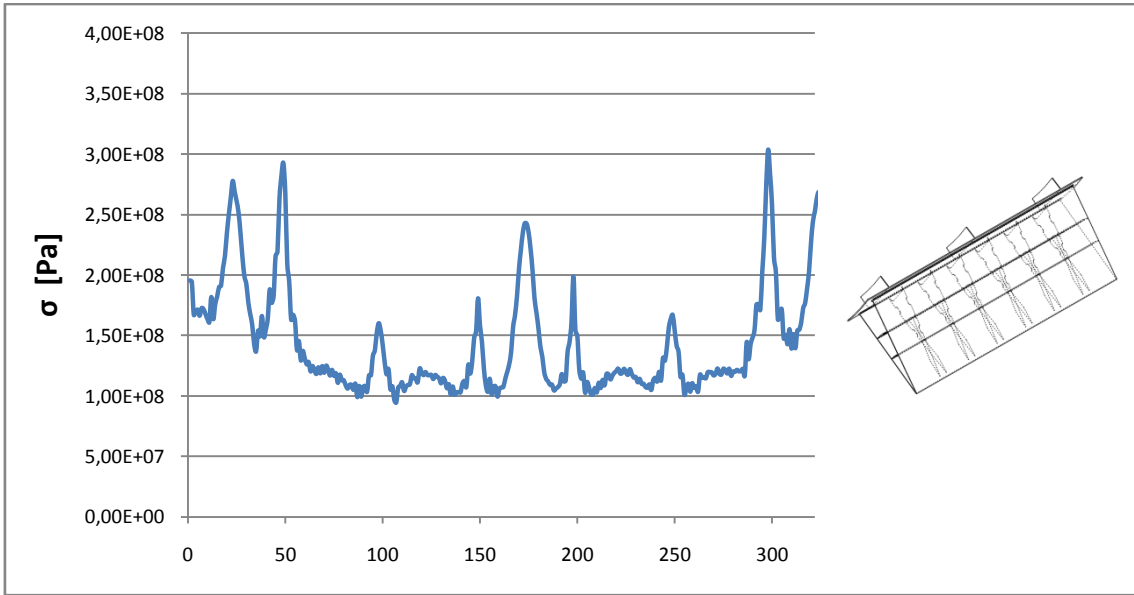
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, com alinhamento entre reforços transversais e um reforço transversal entre alinhamentos.



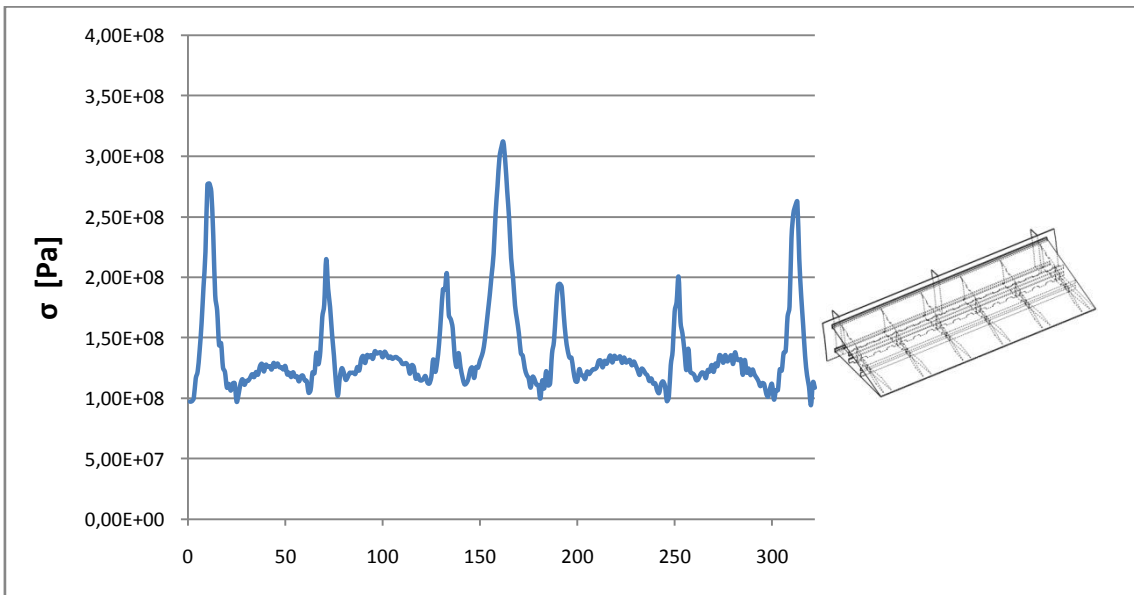
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, com alinhamento entre reforços transversais e dois reforços transversais entre alinhamentos.



Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, com dois reforços transversais entre os reforços transversais do casco.



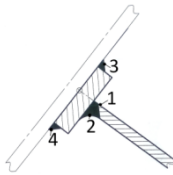
Distribuição de tensões ao longo da ligação do robalete, com três reforços transversais entre os reforços transversais do casco.



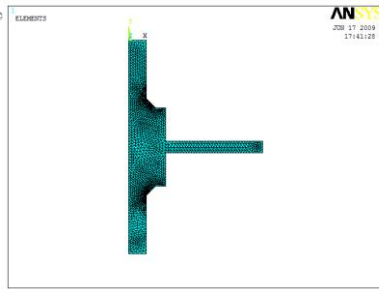
Distribuição de tensões ao longo da ligação actual do robalete.

ANEXO E

ANÁLISE BIDIMENSIONAL COMPLETA

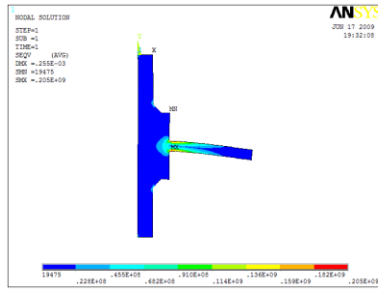


Placa Distribuidora de Tensões Inferior:



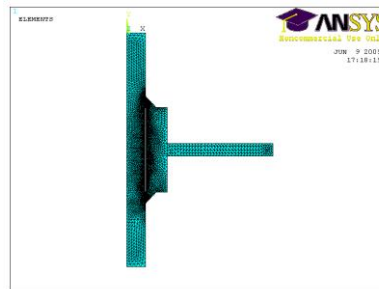
1=184[MPa]

2=205[MPa]



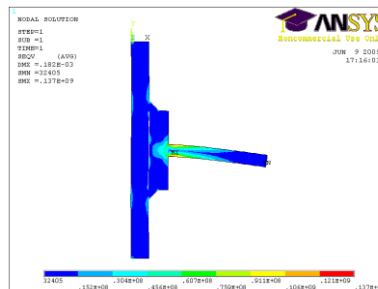
3=63,6[MPa]

4=63,8[MPa]



1=126[MPa]

2=137[MPa]

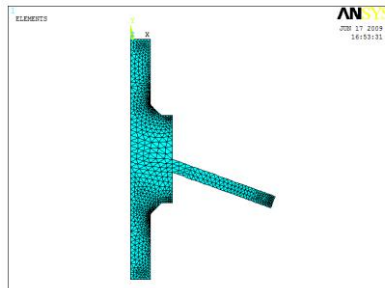


3=37[MPa]

4=37[MPa]

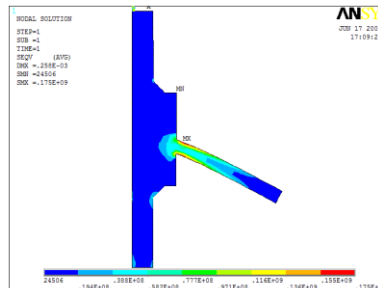


Placa Distribuidora de Tensões Superior:



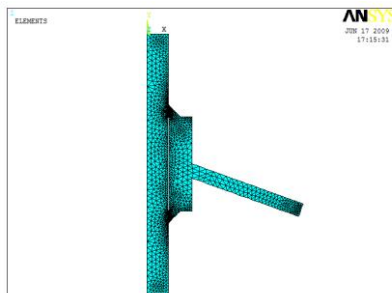
1=175[MPa]

2=168[MPa]



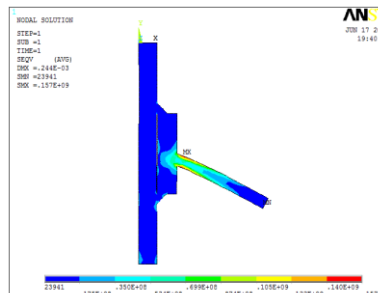
3=40[MPa]

4=65[MPa]



1=157[MPa]

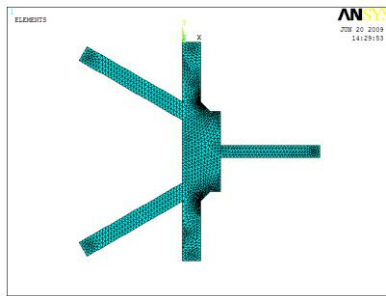
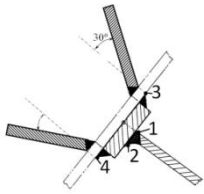
2=149[MPa]



3=29[MPa]

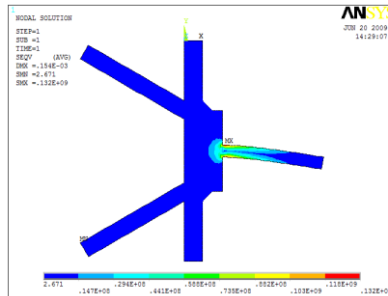
4=50.6[MPa]

Placa Distribuidora de Tensões Inferior, com brackets:



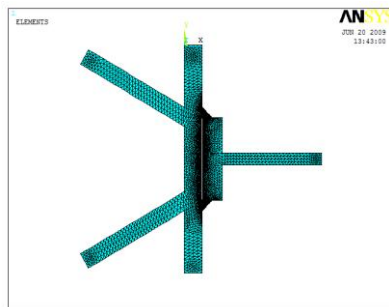
1=132[MPa]

2=118[MPa]



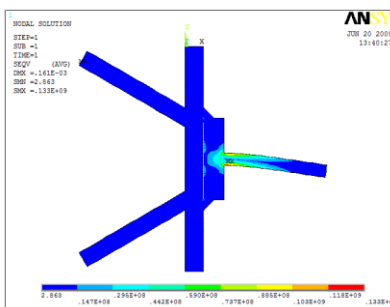
3=22.9[MPa]

4=21.6[MPa]



1=122[MPa]

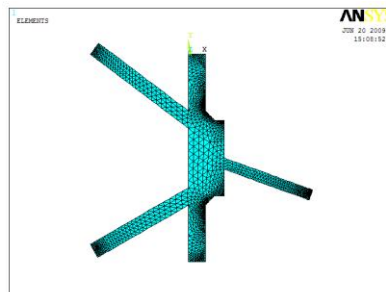
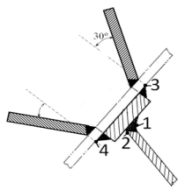
2=133[MPa]



3=5.3[MPa]

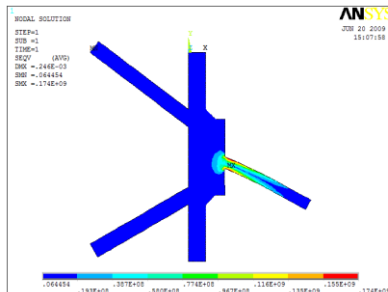
4=5.7[MPa]

Placa Distribuidora de Tensões Superior, com brackets:



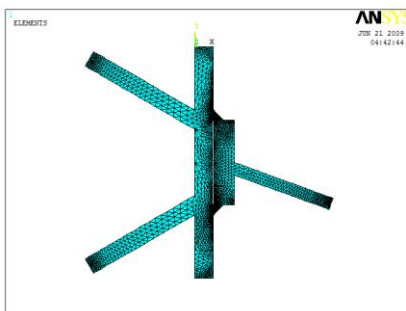
1=169[MPa]

2=174[MPa]



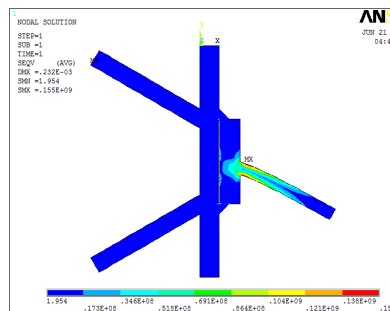
3=19.4[MPa]

4=27.6[MPa]



1=155[MPa]

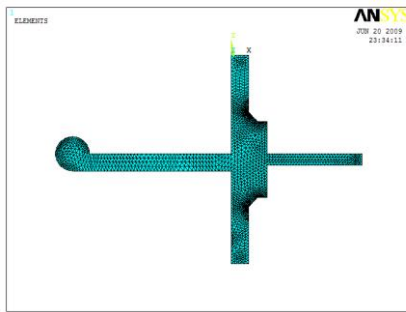
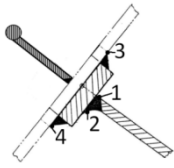
2=154[MPa]



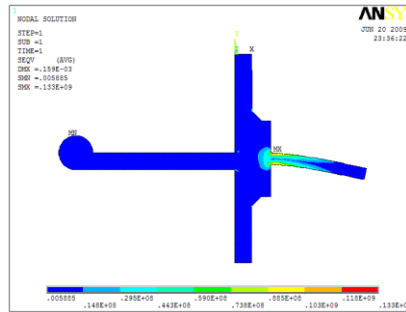
3=4.8[MPa]

4=3.9[MPa]

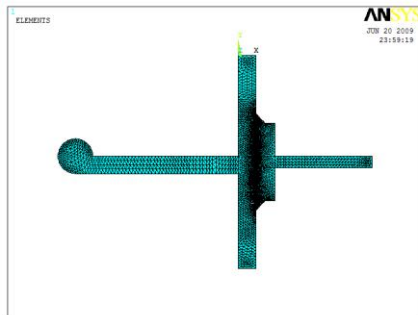
Placa Distribuidora de Tensões Inferior, com bulb plate:



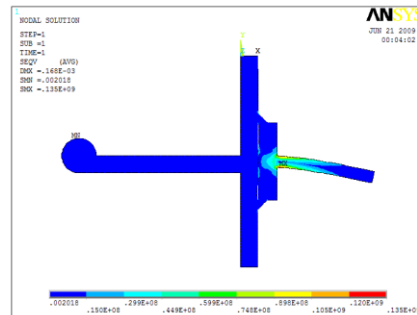
1=133[MPa] 2=117[MPa]



3=29.9[MPa] 4=27.7[MPa]

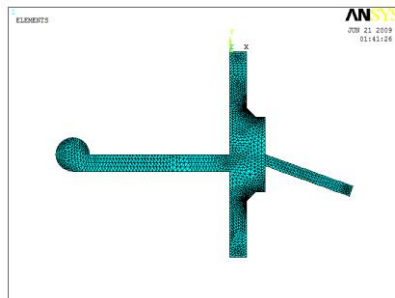
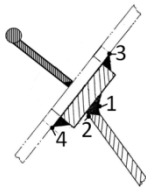


1=122[MPa] 2=134[MPa]

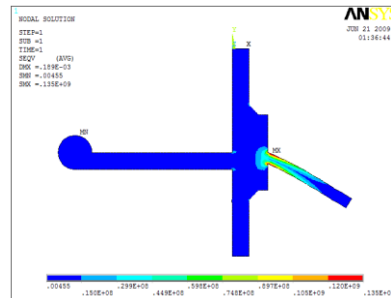


3=29.7[MPa] 4=27.3[MPa]

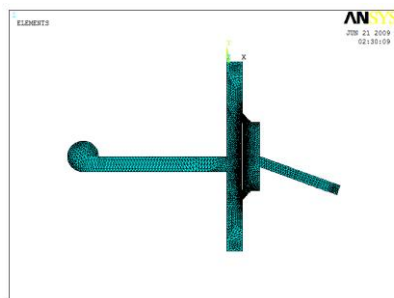
Placa Distribuidora de Tensões Superior, com bulb plate:



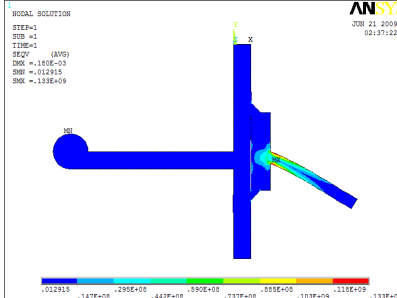
1=135[MPa] 2=135[MPa]



3=31.9[MPa] 4=28.8[MPa]



1=121[MPa] 2=133[MPa]



3=27.6[MPa] 4=25.5[MPa]