



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos de uma Telha Cerâmica

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico

Autor

Alberto Belarmino dos Santos Simões

Orientadores

Professora Doutora Maria Augusta Neto

Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro

**Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de
Coimbra**

Júri

Presidente Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins
Amaro
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Co-Orientador Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de
Coimbra

Vogal Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro de 2013

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores: a Professora Doutora Maria Augusta Neto e o Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro pela ajuda prestada, os quais me forneceram informações importantes e determinantes no desenvolvimento desta tese.

Gostaria de agradecer aos Colaboradores da Umbelino Monteiro, SA através da Dr.^a Teresa Monteiro, do Eng.^o Paulo Domingos, da Eng.^a Catarina Costa e do João Carlos pela frutuosa ajuda, colaboração prestada e na troca de ideias em que muito beneficiou o trabalho efetuado.

À memória dos meus pais: Maria Natalina dos Santos e Henriques Simões.

Agradeço a ajuda genérica de Maria de Lurdes Hébil Pires e Mário Simões.

Resumo

O objectivo do presente trabalho é o desenvolvimento de modelos de uma telha cerâmica (de argila), tendo-se como ponto de partida um modelo de uma telha existente no mercado, para a simulação numérica, de forma a se obter um modelo com menor peso e igualmente resistente. Os vários desenvolvimentos propostos são implementados e testados no programa de elementos finitos Lusas.

Verificou-se que alguns dos modelos criados obtiveram resultados que cumpriram os pressupostos definidos.

Palavras-chave: Telha, Cerâmica, Elementos Finitos, Estrutura.

Abstract

The aim of this work is the development of models of a clay tile, taking as its starting point a model of a tile on the market, for the numerical simulation in order to obtain a model with less weight and also resistant . The various proposed developments are implemented and tested in the finite element program Lusas.

It was found that some of the models were created results that met the defined assumptions.

Keywords Tile, Ceramic, Finite Element, Structure.

ÍNDICE

Simbologia.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objectivo da tese.....	2
1.3. Organização da tese.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Tipologias de soluções de coberturas com telhas cerâmicas.....	3
3. ANÁLISE ANALÍTICA.....	5
3.1. Generalidades.....	5
3.2. Caraterização do estudo.....	5
3.3. Geometrias analisadas.....	5
3.3.1. Análise do Comportamento entre uma viga com desenvolvimento horizontal e com desenvolvimento em Arco.....	6
3.3.2. Análise do Comportamento Variação da Seção de uma Viga.....	8
3.3.3. Análise do Comportamento entre uma placa maciça, uma placa com mais apoios e uma placa nervurada.....	9
3.4. Estudo com Modelo de “Grelha”.....	10
3.4.1. Resultados.....	12
3.5. Estudo Comparativo da Análise Elástica Linear.....	12
4. MODELOS NUMÉRICOS.....	14
4.1. Introdução.....	14
4.2. Abordagem do Estudo.....	14
4.3. Geometria.....	16
4.4. Material.....	16
4.5. Apoios.....	17
4.6. Solicitação.....	18
4.6.1. Introdução.....	18
4.6.2. Modelação das zonas de introdução de carga.....	19
4.7. Análise.....	19
4.8. Malha.....	20
4.8.1. Introdução.....	20
4.8.2. Malha de elementos de casca espessa.....	21
4.8.3. Malha de elementos de sólidos.....	23
4.8.1. Estudo da escolha do elemento finito, da malha e da função de forma.....	24
4.9. Resultados.....	26
4.9.1. Escolha do elemento finito, da malha e da função de forma.....	30
4.9.2. Comparação dos Resultados da Análise Elástica Linear.....	31
5. ESTUDO PARAMÉTRICO.....	33
5.1. Generalidades.....	33

5.2. Modelos Numéricos	33
5.2.1. Caraterização do Modelo M2	34
5.2.2. Caraterização do Modelo M3	35
5.2.3. Caraterização do Modelo M4	35
5.2.4. Caraterização do Modelo M5	36
5.2.5. Caraterização do Modelo M6	37
5.2.6. Caraterização do Modelo M7	37
5.3. Influências das Várias Geometrias	38
5.3.1. Tensão Principal Máxima	39
5.3.2. Tensão Corte Máxima	44
5.3.1. Variação de Volume dos Modelos	47
5.4. Resumo dos Resultados	48
5.4.1. Comparação com os Resultados da Análise Analítica	48
5.4.1. Comparação dos Resultados do Estudo Paramétrico	49
6. CONCLUSÕES	51
7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A	56
1. Análise do Comportamento - Resultados	56
ANEXO B	60
1. Deslocamentos Verticais	60
1.1. Deslocamentos verticais – vista superior	61
2. Direções das Tensões Principais	62
3. Deformadas	64
ANEXO C	66
1. Conclusões – Modelos M3 e M6	66

SIMBOLOGIA

E Módulo de elasticidade

HX8M Elemento finito paralelepipedico, com 8 nós por elemento e com função de forma linear

HX20 Elemento finito paralelepipedico, com 20 nós por elemento e com função de forma quadrática

PN6 Elemento finito pentagonal, com 6 nós por elemento e com função de forma linear

PN15 Elemento finito pentagonal, com 15 nós por elemento e com função de forma quadrática

ε Deformação

σ Tensão normal

τ Tensão de corte

u Deslocamento segundo o eixo dos xx

v Deslocamento segundo o eixo dos yy

w Deslocamento segundo o eixo dos zz

Θ_x Rotação segundo o eixo dos xx

Θ_y Rotação segundo o eixo dos yy

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A utilização de telhas cerâmicas em telhados de edifícios é desde há muitos séculos uma realidade na construção, pois estas fornecem uma série de soluções que são fortemente aceites pelo mercado. No entanto, nos últimos anos tem-se verificado o aparecimento de grandes ameaças para os telhados em telha cerâmica, nas quais se destacam:

1. soluções para coberturas em chapas metálicas, simples ou revestidas (as quais são caracterizadas pela leveza e facilidade de aplicação), coberturas planas (caracterizadas pelas tendências arquitetónicas);
2. a globalização dos mercados torna necessário colocar as telhas em mercados cada vez mais distantes.

Assim sendo, é então necessário dotar as telhas de menor peso, de forma a que se consigam obter estruturas para o suporte das mesmas mais económicas, mais facilidade no manuseamento e também se possam transportar as mesmas para mercados mais afastados, pois atendendo à sua natureza (elevado peso), o custo do transporte é condicionante.

Desta forma obtém-se uma solução que permite obter óptimas soluções em termos arquitectónicos e termos de exportação.

A presente tese visa obter através de resultados numéricos um modelo de telha cerâmica igualmente resistente mas mais leve, permitindo então tornar o produto mais competitivo.

1.2. Objectivo da tese

A presente tese visa obter através de resultados numéricos um modelo de telha cerâmica igualmente resistente mas mais leve, permitindo então tornar o produto mais competitivo.

1.3. Organização da tese

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- capítulo 1: efectua-se um enquadramento global do tema deste estudo e indicam-se quais os objectivos do mesmo;
- capítulo 2: efectua-se uma apresentação da evolução e as abordagens atualmente existentes sobre o conhecimento no âmbito deste tema;
- capítulo 3: é apresentada uma análise analítica para o caso em estudo;
- capítulo 4: neste capítulo apresenta-se uma descrição pormenorizada do modelo numérico (caracterização, materiais utilizados e análise efectuada);
- capítulo 5: contém o estudo paramétrico pormenorizado;
- capítulo 6: expõem-se as conclusões obtidas;
- capítulo 7 e 8: efectua-se uma antevisão a desenvolvimentos futuros e apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de suporte a este trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Relativamente ao comportamento estrutural individual das telhas cerâmicas de argilas não existe um conhecimento alargado sobre o assunto, como sucede com chapas metálicas, fibro-cimento utilizadas em coberturas e outros elementos estruturais tais como tijolos cerâmicos e blocos de betão.

Atendendo à crescente procura de outras soluções para coberturas que não a telha cerâmica de argila, é necessário que se efectuem estudos científicos sobre este assunto, de forma a que encontrem soluções económicas competitivas.

2.2. Tipologias de soluções de coberturas com telhas cerâmicas

As coberturas têm como principal função a protecção dos edifícios do ambiente exterior, contra a acção da chuva, do vento e neve, bem como promover conforto através do isolamento térmico e acústico tendo também funções estéticas.

As telhas cerâmicas são os elementos de cobertura dos edifícios mais usados em Portugal e em outros países. A telha cerâmica enquadra-se em qualquer paisagem conferindo às construções uma beleza intemporal, conseguindo adaptar-se bem tanto na arquitectura urbana contemporânea como na rural. São elementos de utilização tradicional e característico dos edifícios, que importa preservar e valorizar. Na figura 2.1 apresentam-se alguns edifícios em que é utilizada a telha cerâmica na respetiva cobertura.



Figura 2.1. Exemplos do uso de telhas em coberturas.

No mercado existem vários tipos de forma de telha cerâmica, com variações de cor e de texturas; sendo que os principais tipo de telha cerâmica comercializadas em Portugal (em função da sua geometria), são:

- Telha Lusa;
- Telha Marselha;
- Telha Canudo;
- Telha Romana;
- Telha Plana.

Na figura 2.2 apresentam-se imagens da telha lusa, marselha e canudo à cor vermelha natural.

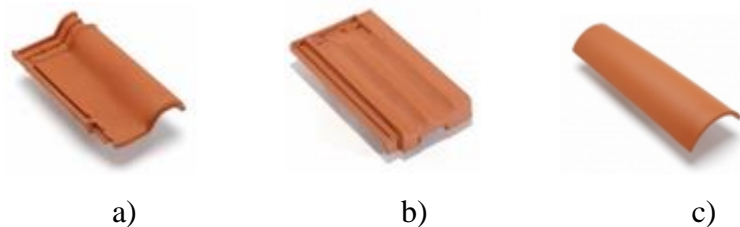


Figura 2.2. Telhas: lusa (a), marselha (b) e canudo (c).

As caraterísticas principais consideradas nas telhas cerâmicas são:

- resistência à flexão;
- permeabilidade;
- resistência ao gelo;
- reação ao fogo;
- planaridade;
- peso.

O estudo do presente trabalho vai incidir sobre a telha lusa e sobre as suas caraterísticas de resistência à flexão e do peso.

3. ANÁLISE ANALÍTICA

3.1. Generalidades

Esta análise justifica-se por que é necessário conhecer ainda que aproximada (ordem de grandeza), dos valores presentes no protótipo (em termos de tensões), para os poder comparar com os resultados obtidos pelo método numérico e também permitir chegar a soluções de modelos de forma mais objetiva.

Desta forma, foi efetuado um estudo sobre algumas das características geométricas que devidamente utilizadas numa estrutura (de forma isolada ou em conjunto), vão permitir melhorar o seu desempenho com menor mobilização de material.

Também foi efetuado um estudo em que o protótipo da telha foi modelado através de uma “grelha”, visando comparar os resultados obtidos em termos de tensões, com os obtidos através da modelação de elementos finitos.

Para aferir a ordem de grandeza do erro dos resultados obtidos através da modelação numérica, em termos da análise elástica linear, foi efetuado um estudo relativamente às tensões produzidas numa viga.

3.2. Caracterização do estudo

No presente estudo foi considerada a telha com o comportamento de uma placa. Foram efetuadas simplificações na geometria da telha, em que apenas foram considerados os aspetos mais relevantes para resistência mecânica da mesma.

3.3. Geometrias analisadas

Foram efetuados os modelos indicados na tabela 3.1:

Tabela 3.1. Modelos analíticos.

Modelo Analítico	Descrição
A1	Desenvolvimento Horizontal e em Arco
A2	Variação da seção da Viga
A3	Placa Maciça e Placas Nervuradas

3.3.1. Análise do Comportamento entre uma viga com desenvolvimento horizontal e com desenvolvimento em Arco

A utilização de uma geometria em arco numa estrutura tem vantagens em termos de resistência mecânica. Na figura 3.1, apresentam duas estruturas simples: a configuração e a carga aplicada às mesmas. Sendo que ambas as estruturas têm a mesma seção, são ambas tipo viga, têm o mesmo material e estão restringidas nos seus extremos em termos de deslocamentos e rotações.

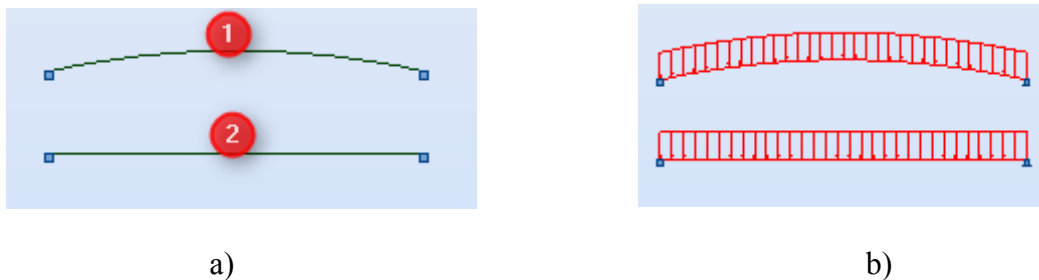


Figura 3.1. Vista das estruturas a) configuração geométrica b) carregamento utilizado.

A estrutura 2 é uma viga horizontal. A estrutura 1, é a tem a forma geométrica de um arco (curva anti funicular [6]), sendo no seu cálculo foi considerado:

- Uma flecha (f) de 5,0 mm;
- Um vão (L) de 91,6 mm;
- Equação da curva: $y(x) = \frac{q_0 x^2}{2 H}$; (3.1)
- Equação da reação horizontal (H): $H = \frac{q_0 L^2}{8 f}$; (3.2)

Sendo:

- y – a ordenada;

- x – a abcissa;
- q_0 – a carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento;
- H – a reação horizontal.

Após os cálculos efetuados no programa de cálculo denominado “Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013”, obtiveram-se os resultados em termos de reações, de tensões principais máximas, de tensões principais mínimas e de tensões axiais, os quais são apresentados na figura. 3.2.

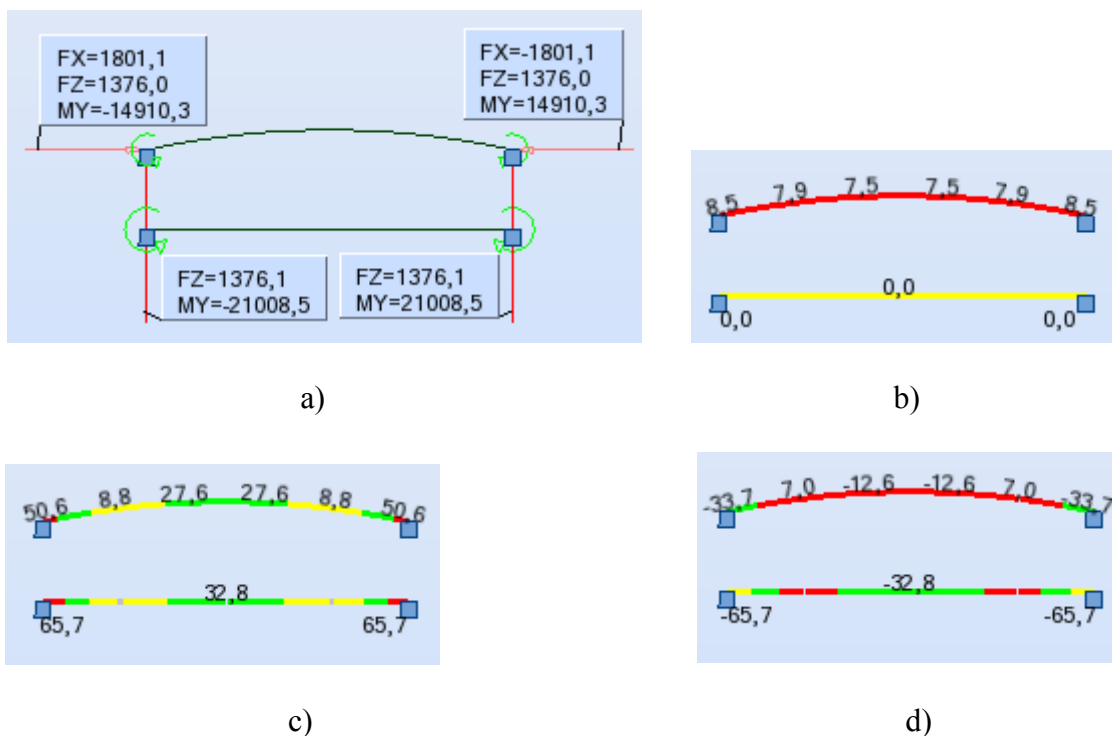


Figura 3.2. Resultados: a) reações, b) tensões axiais, c) tensões principais máximas e d) tensões principais mínimas.

Verifica-se que a estrutura com geometria em arco tem melhores resultados, pois tem menores momentos nos apoios, contudo, verifica-se a existência de esforço axial. Tem menores valores de tensão principal máxima e mínima.

3.3.2. Análise do Comportamento Variação da Seção de uma Viga

Nesta análise pretende-se mostrar que alterando a geometria da seção de uma viga, conseguem-se obter melhores resultados em termos de tensões principais máximas e mínimas.

A estrutura indicada com o número 2 da figura 3.3, tem metade da altura do seção designada com o número 3. As restantes características são idênticas.

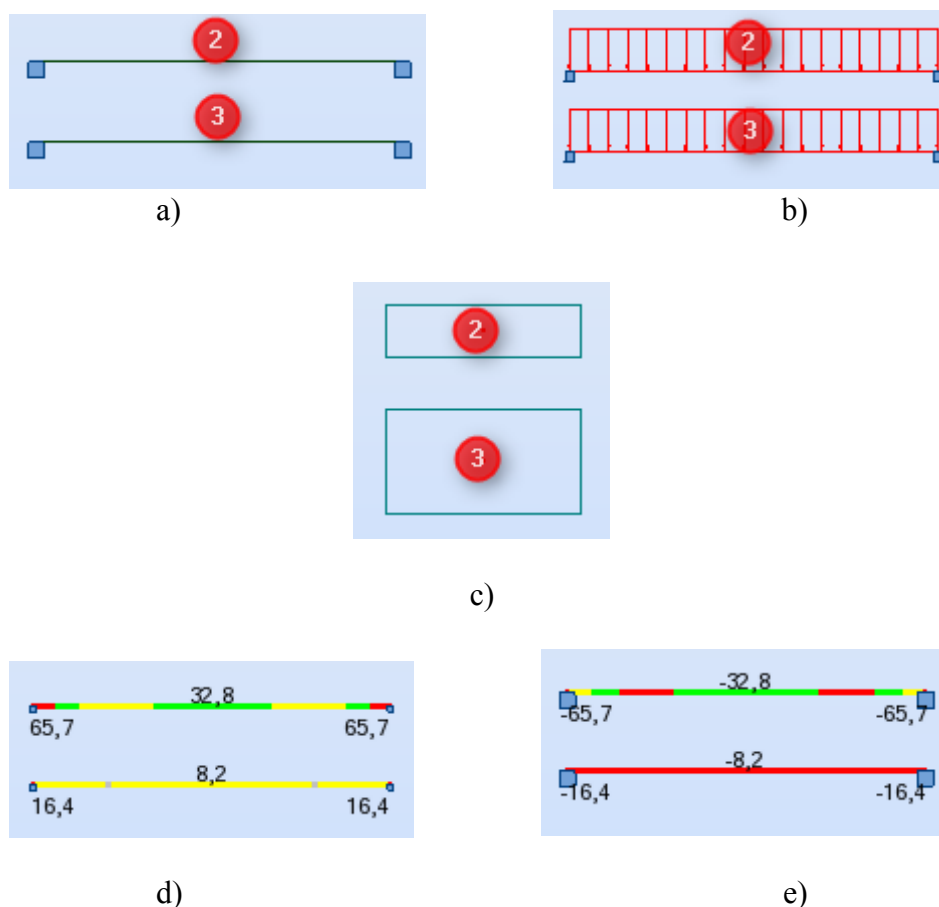


Figura 3.3. Estruturas e resultados: a) identificação, b) carregamentos, c) seções, d) tensões principais máximas e e) tensões principais mínimas.

Verifica-se que aumentando, apenas, a altura da seção transversal na estrutura 2, as tensões principais máximas e mínimas baixaram significativamente. Neste caso tal situação deve-se ao aumento do momento de inércia segundo o eixo da viga, o qual é obtido por:

$$I = \frac{a b^3}{12} \quad (3.3)$$

Sendo:

- I – momento de inércia;
- a e b – a largura e a altura da seção respetivamente.

3.3.3. Análise do Comportamento entre uma placa maciça, uma placa com mais apoios e uma placa nervurada

Com o objetivo de verificar o possível comportamento dos modelos numéricos perante algumas modificações nos seus apoios e seção, foram criados quatro modelos com uma geometria simplificada. Estes modelos respeitam as medidas exteriores, o tipo e o posicionamento tanto dos apoios como da carga aplicada. A superfície dos modelos é toda plana.

Este estudo foi efetuado no programa de cálculo denominado “Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013” e visou obter resultados em termos de tensões principais máximas, tensões de corte, direções principais de tensões e deslocamentos verticais. Desta forma é então, possível avaliar os efeitos de algumas alterações efetuadas aos modelos.

Neste estudo foram criados quatro modelos, com características idênticas com a exceção das características a seguir apresentadas:

- Um modelo a partir do modelo do protótipo existente, o qual será referenciado pelo número 1;
- O modelo 2, idêntico ao modelo 1 mas que tem mais um apoio simples em cada linha de apoios;
- O modelo 3, idêntico ao modelo 1 mas que na sua seção foram colocadas vigas transversais;
- Modelo 4, idêntico ao modelo 3 mas neste caso também foram colocadas vigas longitudinais.

Na figura 3.4 apresentam-se os vários modelos referidos, com a respetiva identificação e localização dos apoios.

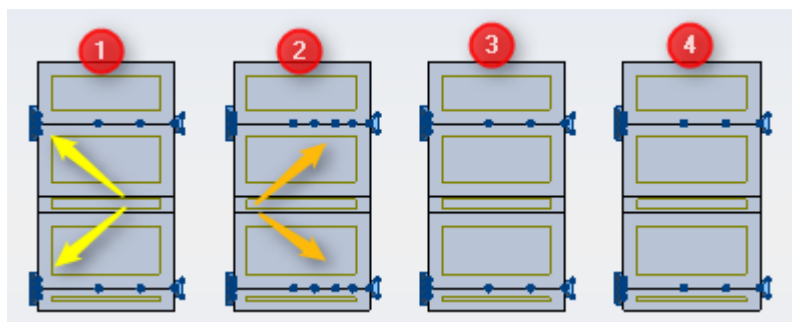


Figura 3.4. Modelos efetuados.

Nas próximas referências a estes modelos, a sua identificação será a indicada na figura 3.4

Na figura 3.5 apresentam-se os perfis da seção dos modelos 3 e 4 respetivamente, com respetiva indicação das cotas.

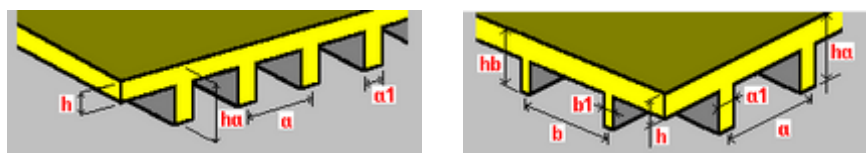


Figura 3.5. Perspetiva dos perfis da placa (Robot).

O valor das cotas está na unidade de mm e apresentam-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Cotas das nervuras (Robot).

h = 8	ha = 16
hb = 16	
a = 10	a1 = 6
b = 10	b1 = 6

No anexo “A” apresentam-se pormenores desta análise.

3.4. Estudo com Modelo de “Grelha”

Para obter resultados de um modelo sem recurso ao método dos elementos finitos usado na modelação numérica, foi efectuada uma modelação em grelha, em a estrutura da telha foi efectuada através de elementos de viga, tendo em conta a respectiva área de influência. Os resultados obtidos neste tipo de modelação são confiáveis em relação às tensões.

Na figura 3.6 pode-se observar-se a estrutura em perspectiva, vista de frente, vista de frente com o carregamento, um pormenor da estrutura e uma vista de cima.

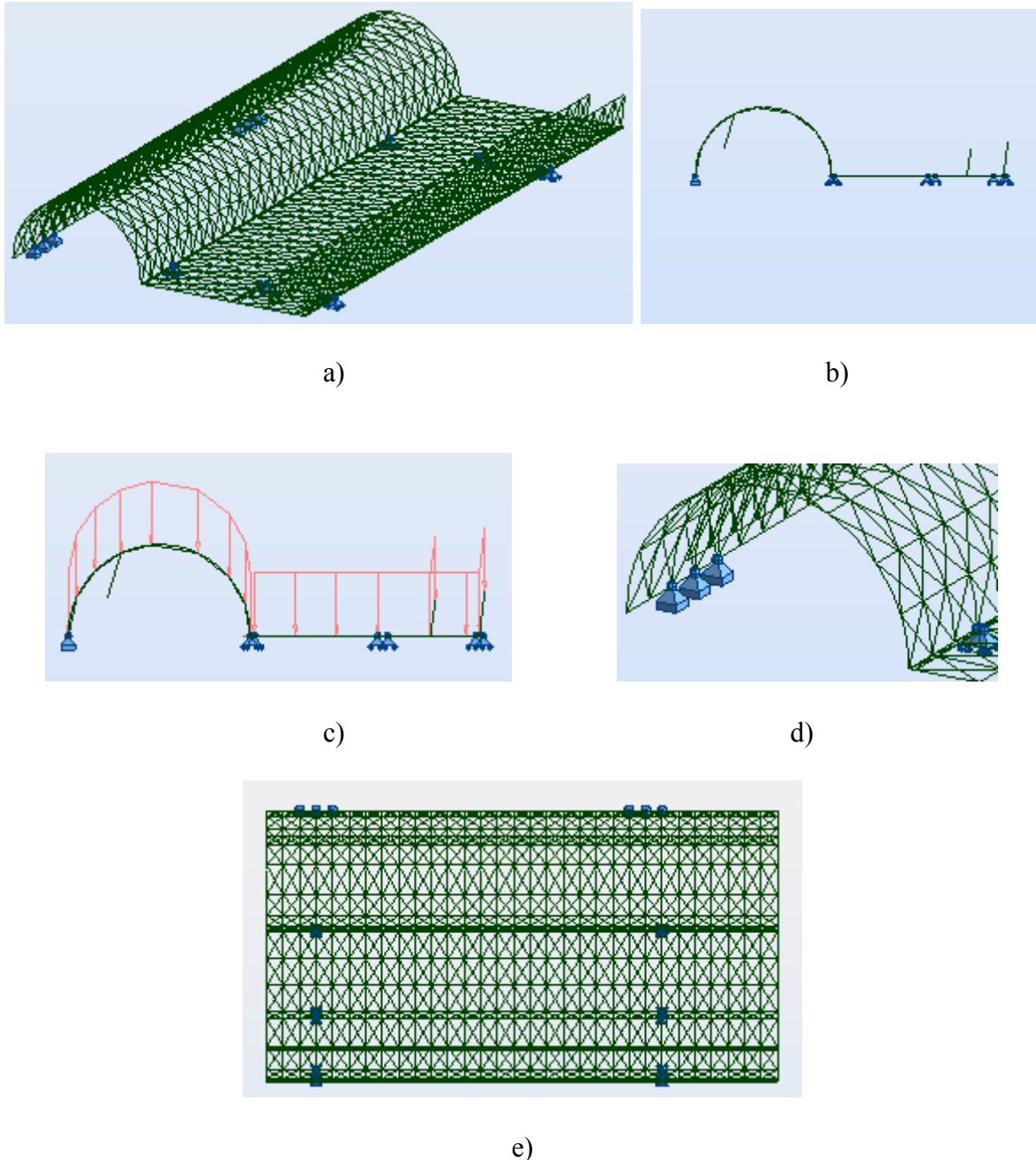


Figura 3.6. Modelo em: a) perspectiva, b) e c) vista de frente, d) pormenor e e) de vista de cima.

3.4.1. Resultados

Os resultados obtidos apresentam-se na figura 3.7, em termos de tensões principais máximas, mínimas e deformada.

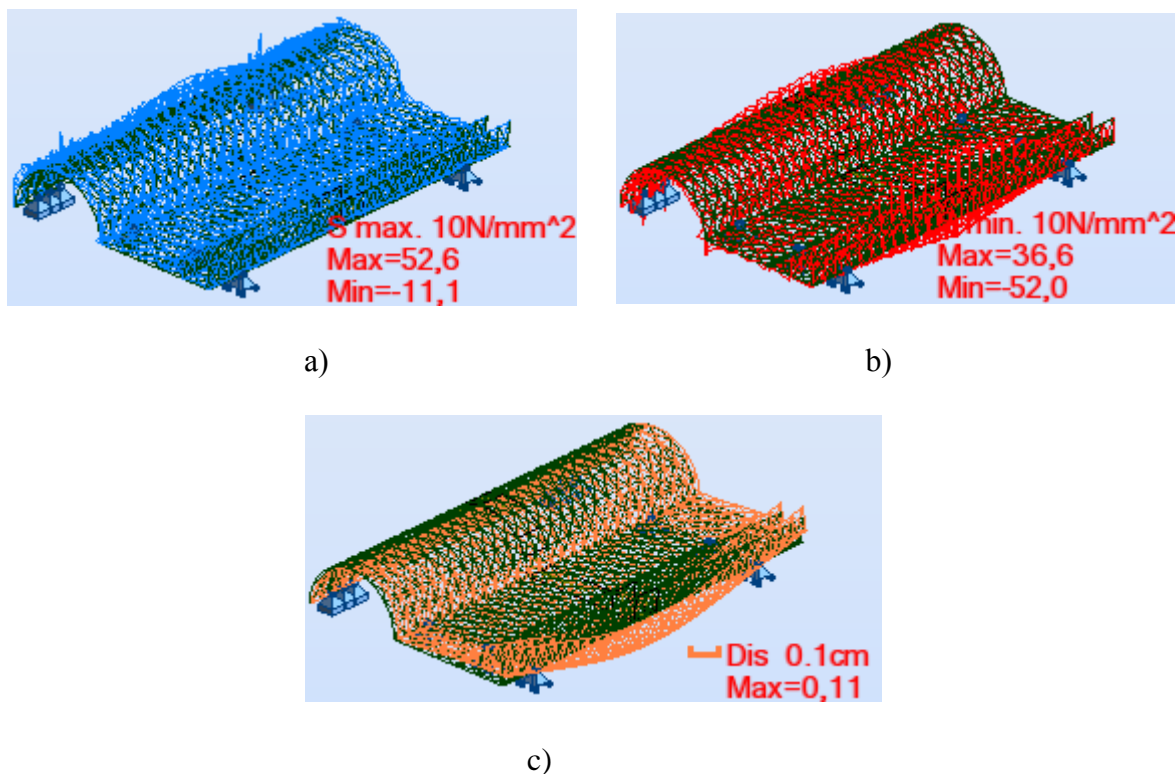


Figura 3.7. Resultados: tensões principais máximas em a), mínimas em b) e c) deformada.

3.5. Estudo Comparativo da Análise Elástica Linear

Para avaliar a grandeza do erro existente entre os resultados do cálculo analítico e os obtidos pela modelação numérica foi efetuada a comparação entre os valores das tensões obtidas pelos dois processos.

Nesta análise foi considerada uma viga, com uma carga uniformemente distribuída aplicada nesta e estando numa das suas extremidades sujeita a restrições de deslocamentos (vertical e horizontal) e na outra a restrições a deslocamentos verticais.

Na figura 3.8 apresenta-se o modelo, sendo o seu comprimento (l) de 1 000 mm e seção quadrada de 100 mm de lado.

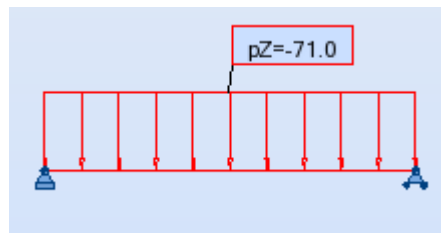


Figura 3.8. Modelo, com identificação da carga.

O momento fletor a meio vão é dado por: $M = \frac{q_0 l^2}{8}$, em que $q_0 = 71$ N/mm, $l = 1\ 000$ mm; obtendo-se $M = 8\ 875\ 000$ N.mm.

A tensão normal obtém-se através de: $\sigma = \frac{M y}{\frac{b h^3}{12}}$, sendo y a distância à fibra neutra, b e h a

largura e a altura respetivamente da seção da viga. Obtendo-se então a tensão de $\sigma = 53,25$ N/mm².

Este valor vai ser comparado com o resultado obtido num modelo idêntico efetuado em elementos finitos. Esta comparação é feita no capítulo 4.

4. MODELOS NUMÉRICOS

4.1. Introdução

O objectivo desta parte do trabalho passou pela elaboração de modelos numéricos de elementos finitos que permitissem caracterizar o comportamento dos elementos em estudo e sobre os quais pudesse ser efectuada a análise paramétrica prevista. Para garantir que os modelos tivessem um bom comportamento com o mínimo de esforço computacional, foram tidos em conta os seguintes aspectos:

- estudo de convergência de malha;
- tipo de elemento finito e
- tipo de função de forma – linear ou quadrática.

A análise realizada permitiu obter modelos representativos do protótipo em estudo e informação sobre os parâmetros mais determinantes relativamente ao comportamento estrutural.

As modelações numéricas foram efectuadas com recurso ao software “Lusas ®” versão 14.

4.2. Abordagem do Estudo

O estudo foi efetuado tendo como por base o ensaio de resistência mecânica - verificação da aptidão da telha para resistir a uma carga centrada, quando solicitada sobre dois apoios simples (resistência à flexão), preconizado para as telhas cerâmicas de argila. Este ensaio é definido pela norma portuguesa: NP EN 538 – “Telhas cerâmicas para a colocação descontínua – Determinação da resistência à flexão” [7] e esta abrange o tipo de telha presente neste estudo. A norma define os ensaios a efetuar em termos de estrutura de suporte para as telhas, tipos de apoios e forma de aplicação da carga. De acordo com a norma, a telha deve ser colocada sobre os apoios situados no mesmo plano horizontal, constituídos pelos dois apoios inferiores, de tal forma que:

- o primeiro apoio se situe no local previsto para assentar nas ripas do telhado;
- o segundo apoio se situe em relação ao primeiro, a uma distância igual a dois terços do comprimento total da telha.

O rolo de aplicação da carga deve ser aplicado paralelo aos dois apoios inferiores. Na figura 4.1 apresenta-se em a) o esquema do conjunto (telha, apoios e aplicação da carga) [7] e em b) vista em superior da telha (cotada na unidade de mm), sendo a zona à cor amarela, a localização de aplicação da carga e à cor laranja a localização dos apoios inferiores.

Na figura 4.1 em c) e d) apresenta-se o equipamento de ensaio e o protótipo colocado no mesmo.

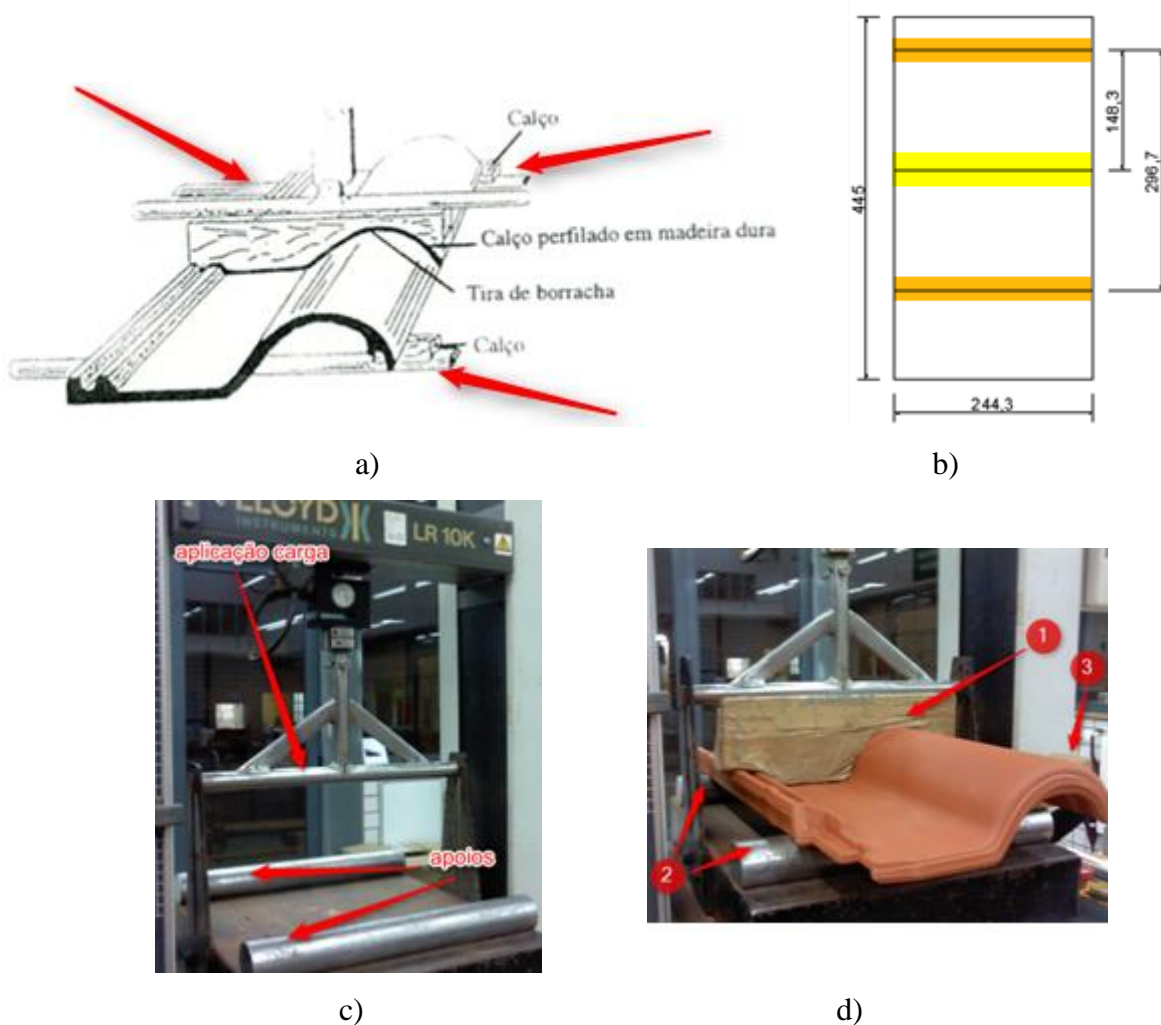


Figura 4.1. Equipamento de ensaio da telha: a) esquema de ensaio [7], b) vista superior do conjunto, c) equipamento e d) protótipo no equipamento.

Na figura 4.1 b) no ponto 1 tem-se o calço para a transmissão da carga vertical ao protótipo, no ponto 2 os apoios metálicos cilíndricos e no ponto 3 indica-se o calço cuja função é o de impedir o movimento horizontal. No apoio cilíndrico posterior também está aplicado um calço idêntico ao mostrado no ponto 3, o qual não está visível.

4.3. Geometria

Devido à complexidade da forma da telha (protótipo), foram efetuadas algumas simplificações na geometria dos modelos. Como a zona entre apoios é a zona resistente e é onde é aplicada a carga, foi então considerado o perfil da telha na zona onde é exercida a carga, o qual foi estendido para ambos os lados, sendo o perfil longitudinal constante. A geometria dos modelos foram efetuados a partir do perfil obtido pelo corte da telha na zona indicada na figura 4.2 a). Na figura 4.2 b) apresenta-se o perfil transversal da telha que foi usado na definição geométrica dos modelos.

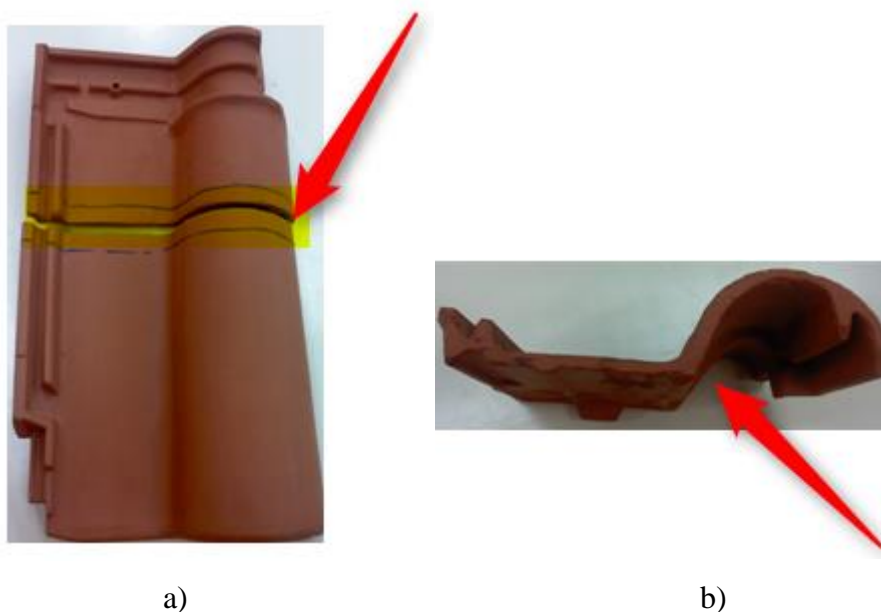


Figura 4.2. Zona de corte da telha a) e respetivo perfil em b).

4.4. Material

O material que constitui o protótipo é a argila cozida, sendo um material cerâmico. Este material é obtido pela cozedura da argila e aditivos a temperaturas superiores a 1 000° C.

Este material é caracterizado por ter um comportamento frágil. Na figura 4.3 apresenta-se a respetiva curva da variação da tensão (σ) com a deformação (ϵ).

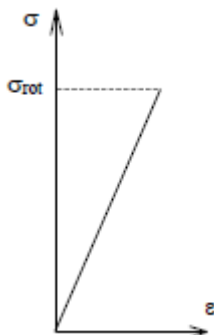


Figura 4.3. Curva tensão – deformação de materiais frágeis.

A argila é um material que tem um comportamento elástico linear e isotrópico.

As propriedades do material considerado são as seguintes:

- Módulo de elasticidade: $E = 15 \text{ kN/mm}^2$;
- Coeficiente de *Poisson* em regime elástico: $\nu = 0,3$;
- Tensão de rotura: não conhecida;
- Carga de rotura: 6,457 kN.

4.5. Apoios

Os modelos numéricos foram considerados apoiados nas zonas periféricas de acordo com os apoios considerados no ensaio de flexão. Na zona curva foram considerados impedimentos verticais (eixo dos yy) e horizontais (eixos dos xx e zz). Nos restantes apoios foram apenas consideradas impedimentos verticais (segundo o eixo dos yy). Na figura 4.4 a) e b) apresentam-se imagens da estrutura e do protótipo usados no ensaio de flexão, onde se podem verificar os apoios.



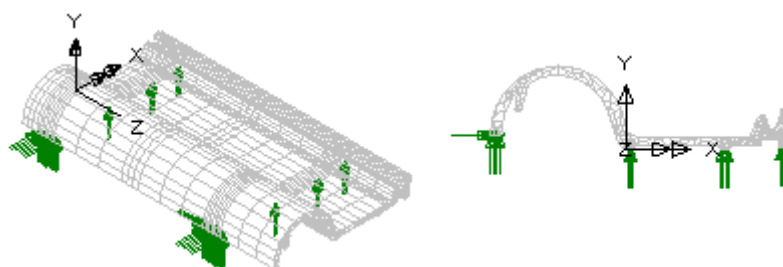
a)

b)

Figura 4.4. Localização dos apoios.

Os apoios para os modelos numéricos foram então definidos a partir da estrutura usada no ensaio de flexão, o qual se apresenta na figura 4.5 a) e b), para o modelo sólido HX8M.

No entanto ao longo do trabalho, foram efetuados modelos em que os apoios foram alterados relativamente ao modelo inicial mas mantiveram-se sempre as condições da estrutura de ensaio em termos de apoios.



a)

b)

Figura 4.5. Localização dos apoios: a) em perspetiva e b) vista frente.

4.6. Solicitação

4.6.1. Introdução

Os modelos desenvolvidos na presente tese representam a zona central da telha, a qual está sujeita a um carregamento de compressão nas sua área superior, com uma largura de 30 mm. Na figura 4.6 apresenta-se uma imagem da aplicação da carga.



Figura 4.6. Localização da aplicação da carga no protótipo.

4.6.2. Modelação das zonas de introdução de carga

A solicitação é aplicada na área superior da telha, cuja a direção de atuação é vertical, conforme de pode observar na figura 4.7.

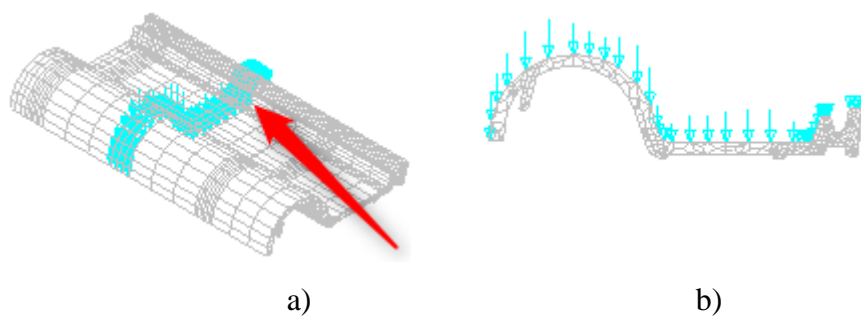


Figura 4.7. Localização da aplicação da carga: a) perspectiva e b) vista frente.

4.7. Análise

A análise realizada é material e geométrica elástica e linear.

Como o material é considerado frágil, tem-se que a tensão de limite de resistência (σ_{lim}) é igual é tensão de rotura do material (σ_{rot}):

$$\sigma_{lim} = \sigma_{rot} \tag{4.1}$$

O critério de resistência para determinar o estado de tensão equivalente (σ_{eq}) para os materiais frágeis são:

- Critério da Tensão Normal Máxima
- Critério de *Mohr*.

O critério de resistência usado no presente trabalho foi o critério da tensão normal máxima, o qual é um critério aplicável somente a materiais com comportamento frágil. O que é o caso do material usado no protótipo sobre o qual se está a estudar. Assim sendo, não existindo, nestes caso tensão de cedência, a tensão limite de resistência é $\sigma_{lim} = \sigma_{rot}$ e assim para condição limite de resistência tem-se:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{rot} \quad (4.2)$$

Este critério estabelece que a rotura num dado ponto de uma material ocorre quando a maior (em valor absoluto), das três tensões principais do estado de tensão nesse ponto iguala a tensão de rotura determinada no ensaio de tracção. Assim sendo, segundo este critério, a tensão equivalente é determinada pela expressão:

$$\sigma_{eq} = \text{Max} (|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \quad (4.3)$$

O critério da tensão normal máxima tem dois inconvenientes:

- Assume que o valor da tensão de rotura à tracção é o mesmo da tensão de rotura à compressão, facto este que raramente acontece nos materiais frágeis;
- Despreza os efeitos das tensões de corte no mecanismo de rotura.

Foi então considerado que a tensão de rotura do material é a maior das tensões em módulo, em qualquer ponto, que se obtém para o modelo de referência indicado neste trabalho, para a carga aplicada. No presente trabalho, as tensões máximas foram obtidas em σ_1 e σ_3 .

Como não foi disponibilizado a curva de tensão-deformação relativo ao material em estudo, a análise foi efetuada tendo como referência a tensão principal máxima e a tensão de corte máxima obtida para o modelo de referência. Estes valores serviram para comparar com os resultados dos modelos definidos no capítulo 5.

4.8. Malha

4.8.1. Introdução

Os resultados obtidos pela modelação numérica são fortemente influenciados por vários factores, sendo um deles o tipo de elementos finitos com que é definido o modelo. Tendo em conta a geometria da estrutura e o estado de tensão a que está sujeita, a

sua modelação poderá ser efectuada com elementos de casca ou de sólidos. Os elementos casca conduzem a um modelo com menos esforço de cálculo e os elementos sólidos permitem obter modelos mais pormenorizados. Assim sendo, foi efectuada uma análise entre elementos finitos tipo casca - elementos finitos tipo sólido, para o modelo em questão, de forma a verificar qual o tipo de elementos finitos melhor se adequa à situação em estudo.

4.8.2. Malha de elementos de casca espessa

Os elementos finitos são de casca espessa, lineares, considerando as deformações de membrana, corte transversal e flexão. A formulação dos elementos é efectuada através de uma abordagem isoparamétrica e contempla um campo de extensões que garante que o elemento não bloqueia quando a sua espessura for pequena. No software de cálculo usado – LUSAS, estes elementos quadriláteros têm a designação QTS4 com 4 nós por elemento com função de forma linear ver figura 4.8 b) e QTS8 com 8 nós por elemento e função de forma quadrática, ver figura 4.8 c):

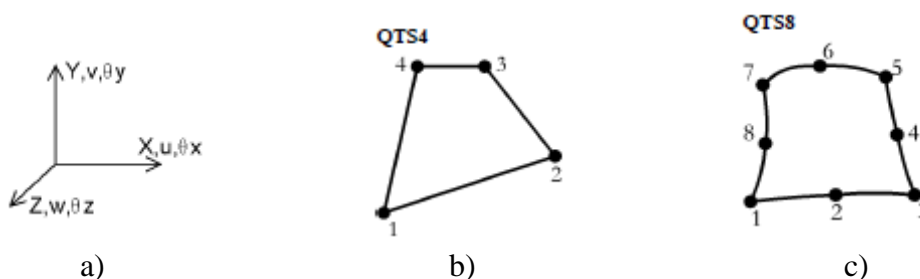


Figura 4.8. Eixos com os graus de liberdade em a) e representação dos elementos de casca em b) e c).

Por defeito, os graus de liberdade associados a cada nó são cinco (três deslocamentos e duas rotações nodais respectivamente): u , v , w , θ_x e θ_y .

Na figura 4.9 apresentam-se as configurações do modelo em estudo em malha, com duas discretizações e renderizado, com os apoios e carga aplicada.

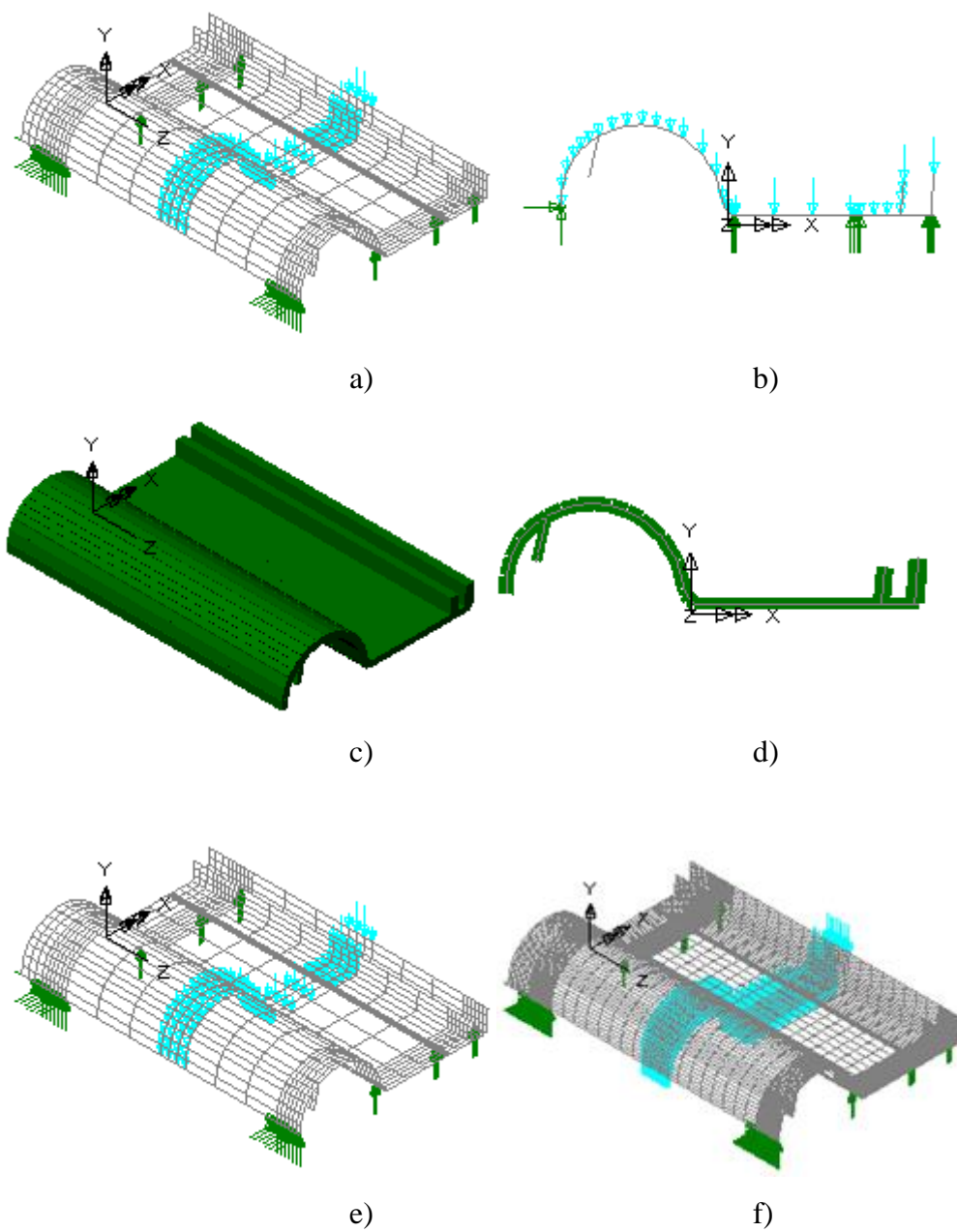


Figura 4.9. Modelo visto em malha: a) perspectiva, b) vista frente, c) renderizado com o material – perspectiva, d) renderizado vista frente, e) discretização malha de 3 e f) discretização malha de 8.

4.8.3. Malha de elementos de sólidos

Foram efectuados modelos com elementos finitos sólidos 3D para comparar os resultados obtidos com os elementos finitos tipo casca referidos anteriormente.

Estes elementos finitos sólidos com a discretização de malha 3 usada no programa de cálculo utilizado – Lusas, estes tipos de elementos designam-se por:

- HX8M – têm 8 nós por elemento, é paralelepipedico (ver figura 4.10 – a)), linear, com três graus de liberdade por nó: u , v e w , têm uma formulação do tipo isoparamétrica, em que inclui um campo de extensões incompatível, assegurando assim um comportamento superior a outros elementos;
- HX20 – têm 20 nós por elemento, com as restantes características idênticas ao HX8M (ver figura 4.10 – b)) mas as funções de forma são quadráticas;
- PN6 – têm 6 nós por elemento, é pentagonal – as restantes características são idênticas ao HX8M (ver figura 4.10 – c));
- PN15 – têm 15 nós por elemento, é pentagonal (ver figura 4.10 – d)). As restantes características são idênticas ao PN6 (ver figura 4.10 – c)), mas as funções de forma são quadráticas.

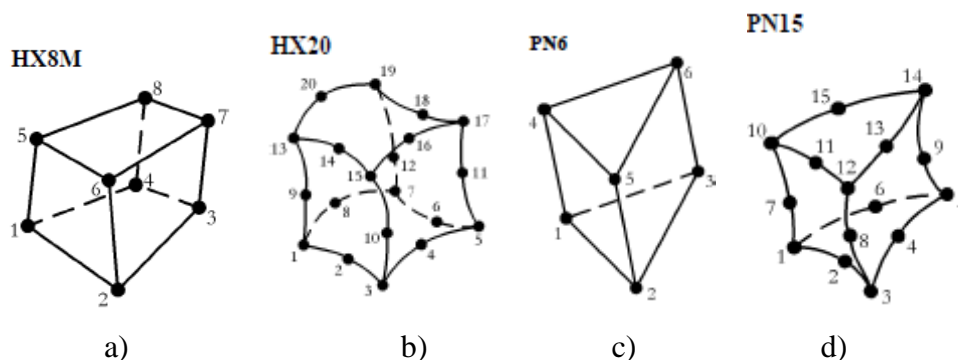


Figura 4.10. Representação dos elementos finitos sólidos 3D.

O modelo finito tipo sólido considerado apresenta-se na figura 4.11 a), b), c) d) e e), onde estão indicados: o perfil, a geometria, a malha, a carga e os apoios.

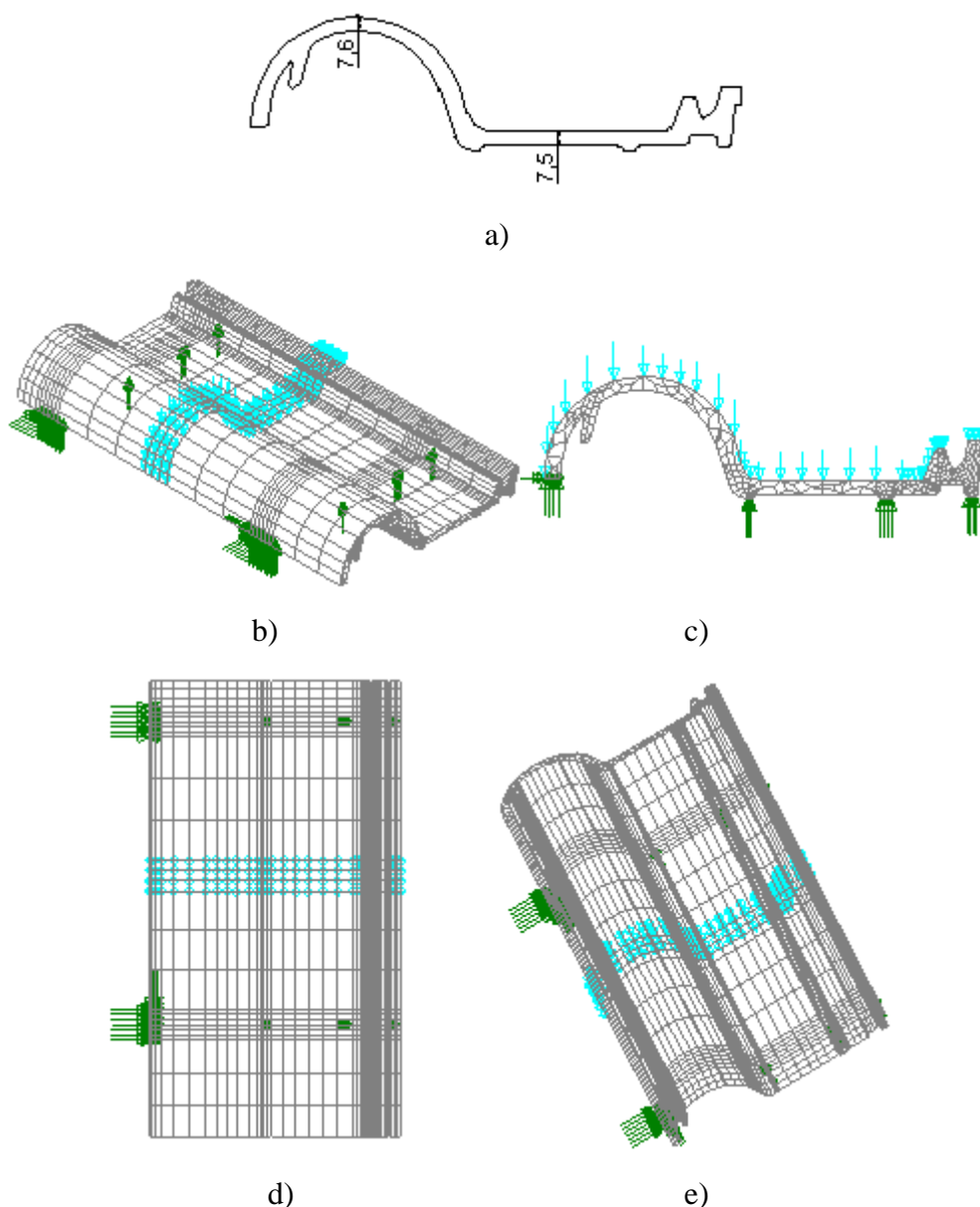


Figura 4.11. Modelo finito tipo sólido 3D - HX8M: a) perfil, b) perspectiva, c) vista frente, d) vista cima e e) vista por debaixo.

4.8.1. Estudo da escolha do elemento finito, da malha e da função de forma

Para a escolha do elemento finito, da malha e da função de forma a usar nos modelos foi efetuado um estudo em que se comparou estas três variáveis, pois estas condicionam fortemente os resultados.

Na tabela 4.1 apresentam-se os modelos efetuados para este estudo, onde se indica o tipo de elemento finito, a malha e qual a função de forma.

Tabela 4.1. Modelos de elementos finitos.

Elemento Finito	Malha	Função de Forma
QTS4	3	linear
QTS4	8	linear
PN6	3	linear
HX8M	3	linear
QTS8	3	quadrática
QTS8	8	quadrática
PN15	3	quadrática
HX20	3	quadrática

Foram criados oito modelos de elementos finitos, quatro destes modelos com função de forma linear e restantes quatro com função de forma quadrática. Os modelos finitos criados foram do tipo casca espessa (QTS4 e QTS8) e do tipo sólido (PN6, HX8M e PN15, HX20). Os modelos com casca foram efectuados com a malha de 3 e de 8, enquanto que os modelos de sólidos foram efectuados com a malha de 3.

Para a escolher qual o tipo de modelo que melhor se adequa ao presente estudo, foram comparados os valores das tensões principais máximas, tensões de corte máxima e deslocamentos verticais nos pontos indicados na figura 4.12. Esta comparação foi efetuada entre modelos com função de forma lineares, quadráticos e também entre modelos sólidos e de casca.

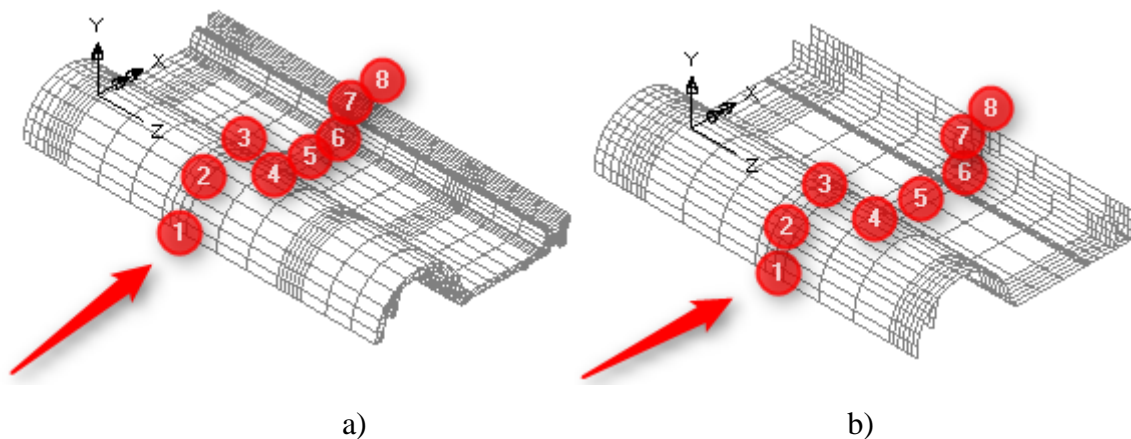


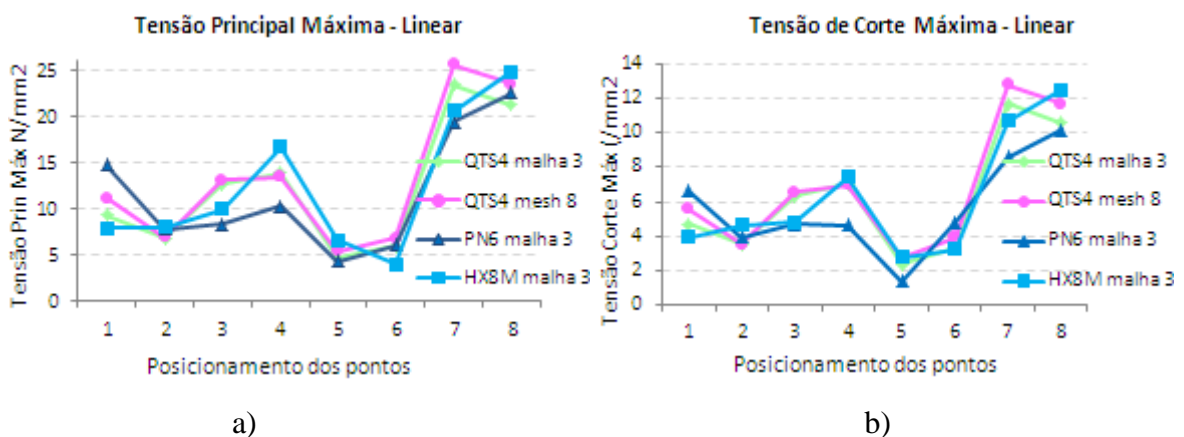
Figura 4.12. Localização dos pontos em estudo nos modelos: a) sólido e b) casca.

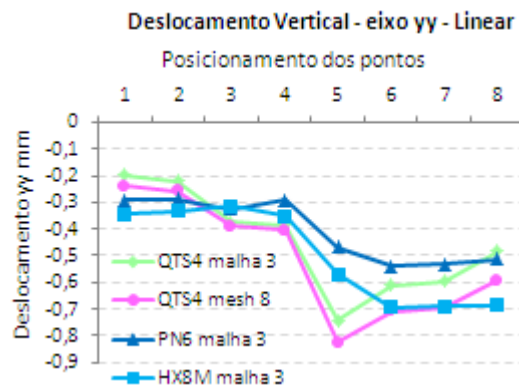
4.9. Resultados

O estudo foi efetuado para os modelos lineares, quadráticos, entre sólidos e entre casca, os quais se apresentam nos pontos seguintes com recurso a gráficos. A análise incidiu de relativamente às tensões principais máximas e às tensões de corte máximas, pois são os valores considerados determinantes na presente tese.

- Modelos lineares:

A comparação entre os modelos com funções de forma lineares apresentam-se nas figuras 4.13 a), b) e c).





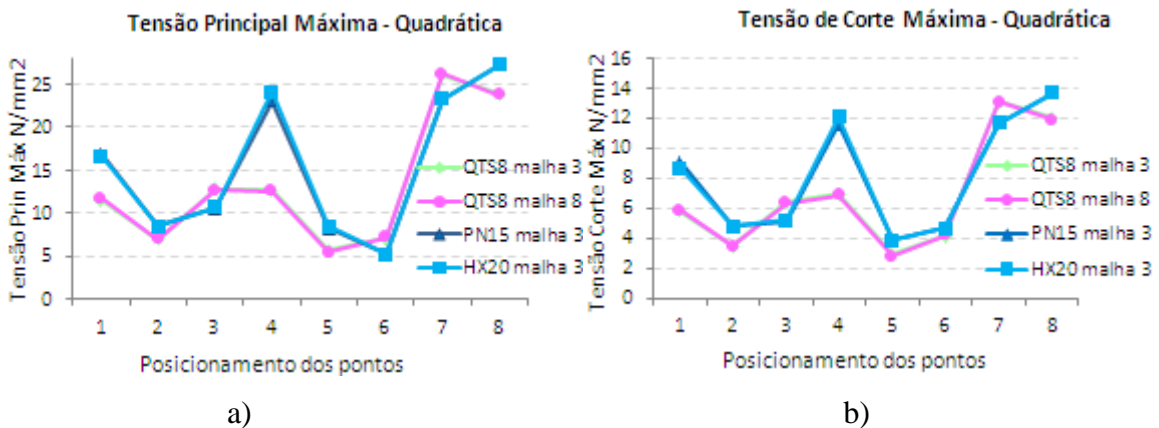
c)

Figura 4.13. Modelos lineares: a) tensão principal máxima, b) tensão de corte máxima e c) deslocamentos.

Verifica-se que relativamente às tensões e deslocamentos os modelos de casca têm resultados muito próximos entre si e também com o elemento finito sólido HX8M. De um modo geral, pode-se considerar que os resultados entre os vários elementos finitos obtidos são próximos.

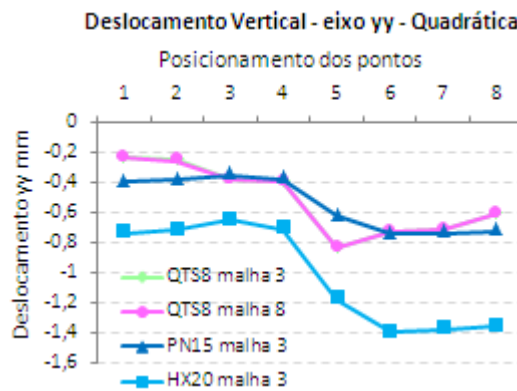
o Modelos quadráticos:

A comparação entre os modelos com funções de forma quadráticas apresentam-se nas figuras 4.14 a), b) e c).



a)

b)



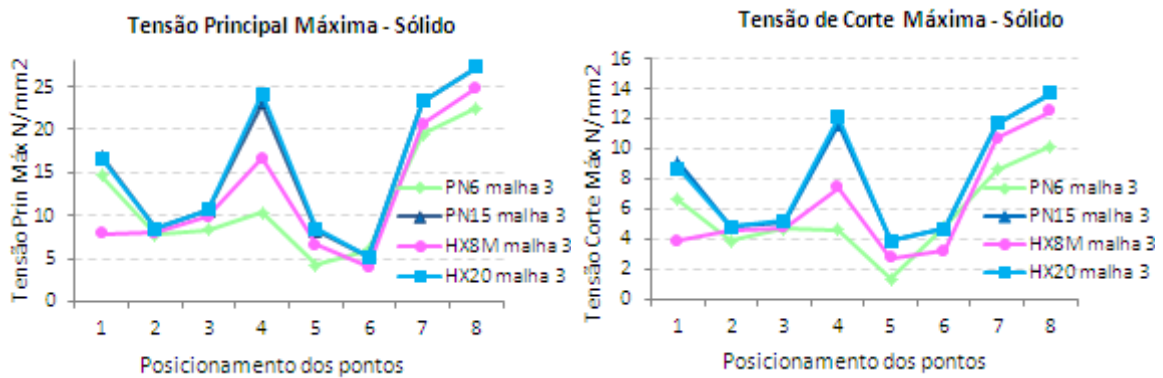
c)

Figura 4.14. Modelos quadráticos: a) tensão principal máxima, b) tensão de corte máxima e c) deslocamentos.

Verifica-se que relativamente às tensões e deslocamentos os modelos de casca têm resultados muito próximos entre si. Tal situação também sucede com os elementos sólidos em termos de tensões, pois em termos de deslocamentos o elemento finito HX20 afasta-se dos restantes.

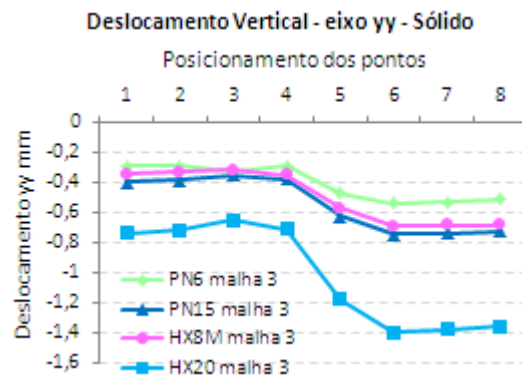
o Modelos sólidos:

A comparação entre os modelos sólidos apresentam-se na figuras 4.15 a), b) e c).



a)

b)



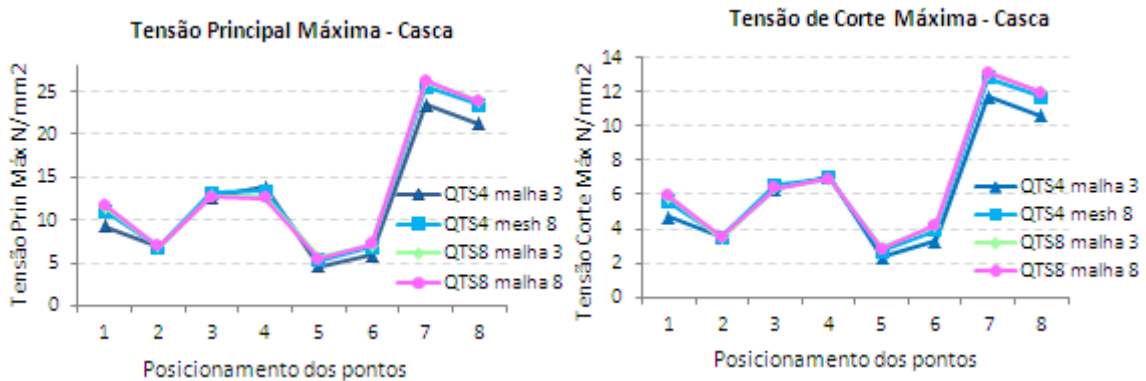
c)

Figura 4.15. Modelos sólidos: a) tensão principal máxima, b) tensão de corte máxima e c) deslocamentos.

Verifica-se que relativamente às tensões, os modelos sólidos com função de forma quadrática têm resultados muito próximos entre si, mas tal situação não sucede em termos de deslocamentos em que o modelo HX20 tem um deslocamento superior. Também se verifica que o modelo sólido HX8M tem um comportamento próximo dos elementos finitos quadráticos em termos de tensões.

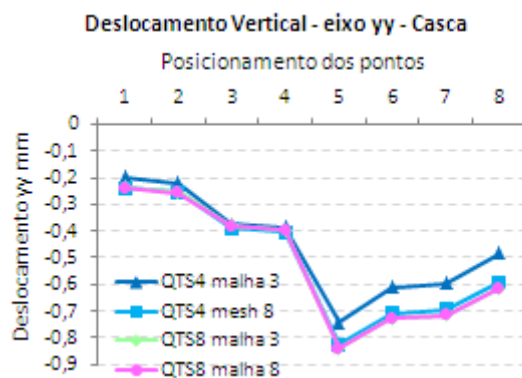
o Modelos casca:

A comparação entre os modelos de casca apresentam-se na figuras 4.16 a), b) e c).



a)

b)



c)

Figura 4.16. Modelos casca: a) tensão principal máxima, b) tensão de corte máxima e c) deslocamentos.

Verifica-se que tanto em termo de tensões como em termos de deslocamentos os modelos de casca têm resultados muito próximos entre si. Existindo maior proximidade entre os elementos de função de forma quadrática.

4.9.1. Escolha do elemento finito, da malha e da função de forma

Após a análise dos resultados obtidos da comparações efetuadas, verifica-se que o modelo finito sólido HX8M, com malha 3 é o mais indicado para a presente tese. Pois este elemento finito:

- têm resultados próximos dos obtidos pelos elementos casca e pelos elementos sólidos com funções quadráticas;
- por ter funções de forma lineares, vai conduzir a menor dispêndio de tempo em cálculos;
- vai permitir obter um modelo mais próximo (em termos geométricos), do protótipo, em comparação com os modelos casca.

Também se salienta que era importante ter resultados experimentais (que não existem), que os permitisse confrontar com os resultados obtidos por via numérica.

4.9.2. Comparação dos Resultados da Análise Elástica Linear

No capítulo dois foi efetuado o cálculo analítico da tensão em uma viga, o qual vai ser então comparado em termos de tensões principais máximas, com os resultados obtidos por um modelo em elementos finitos, do tipo HX8M com malha 3, com malha 12 e com funções de forma lineares. Ver figura 4.17.

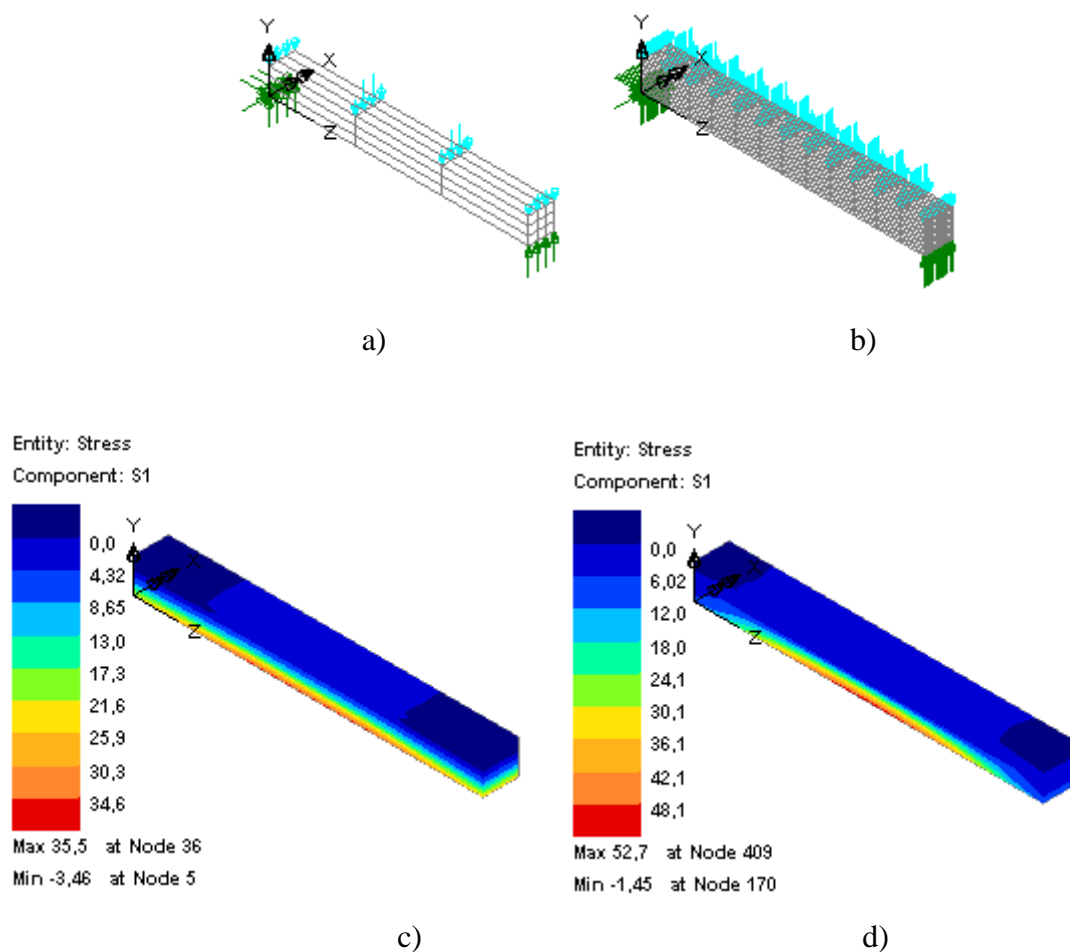


Figura 4.17. Comparação de resultados: a) HX8M malha 3, b) HX8M malha 12 e tensões principais máximas: c) HX8M malha 3 e d) HX8M malha 12.

Os valores obtidos apresentam-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Comparação dos resultados dos modelos.

Modelo	Tensão principal máxima (N/mm ²)	Δ erro
Analítico	53,25	referência
HX8M - malha 3	35,50	-33%
HX8M - malha 12	52,70	-1%

O valor obtido pelo modelo HX8M com malha 12 é o que melhor se aproxima do valor analítico. Destes resultados retira-se a conclusão, mais uma vez, que a definição do elemento finito influencia muito os resultados obtidos.

5. ESTUDO PARAMÉTRICO

5.1. Generalidades

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados da análise paramétrica (baseada nos modelos elementos finitos), para avaliar o comportamento da telha à flexão. A variação da geometria da seção da telha foi o parâmetro analisado.

5.2. Modelos Numéricos

Tendo como base o modelo inicial da telha simplificado foram efetuados novos modelos sendo apenas alterada a geometria do perfil transversal.

Para tal, foram efectuados os modelos apresentados na tabela 5.1, em que se mantiveram constantes todas as outras características: material e tipo numérico do modelo, já anteriormente indicadas.

Tabela 5.1. Modelos e respetiva referência.

Modelo	Referência
Modelo existente - serve de referência	M1
Modelo existente com redução espessura	M2
Modelo existente com redução espessura, com apoio	M3
Modelo existente com redução espessura, com nervuras	M4
Modelo existente com redução espessura, com arco	M5
Modelo composto 1 (com elementos vigas nos apoios)	M6
Modelo composto 2 (idêntico ao M6 e com elementos vigas transversais nas zonas entre apoios)	M7

Ao longo do subsequente trabalho vão ser referidas partes geométricas do modelo que se apresentam na figura 5.1:



Figura 5.1. Modelo M1: a) perfil, b) perspectiva e c) vista frente.

As vigas transversais referidas ao longo deste trabalho, supõem-se perpendiculares à viga longitudinal apresentada no ponto 3 na figura 5.1.

As caracterizações dos vários modelos a partir do modelo M1 (já apresentado anteriormente), são apresentadas nas subsecções seguintes.

5.2.1. Caracterização do Modelo M2

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo da telha em argila cozida, em que foi reduzida a seção transversal. Toda a seção transversal é constante longitudinalmente, ver figura 5.2.

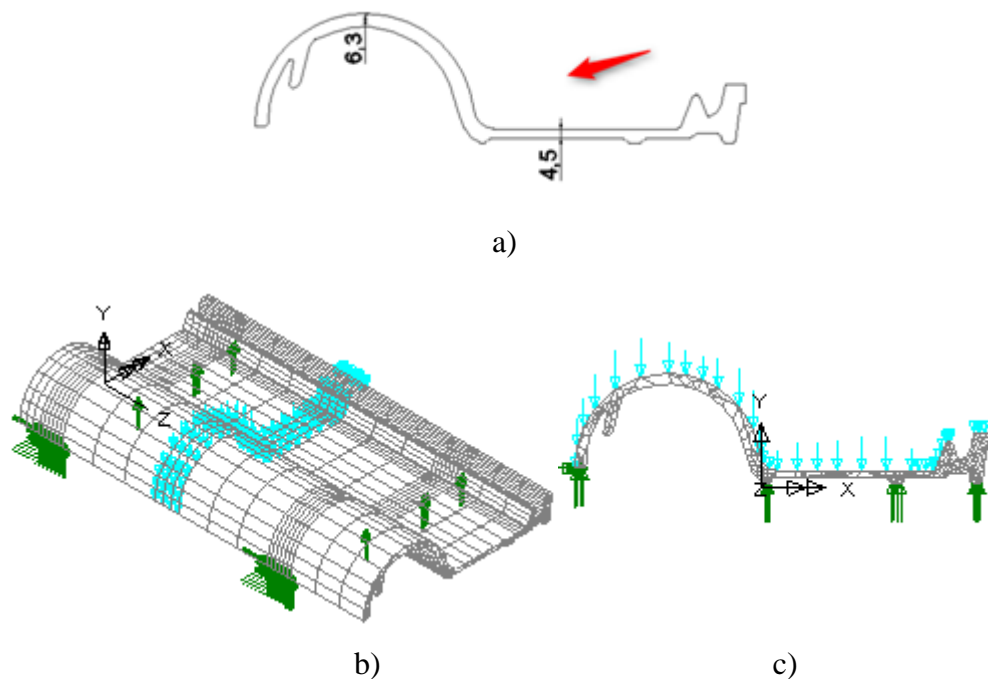


Figura 5.2. Modelo M2: a) perfil, b) perspectiva e c) vista frente.

5.2.2. Caraterização do Modelo M3

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo M2, em que os apoios foram aumentados de forma linear. A seção transversal é constante e é de acordo com a figura 5.3.

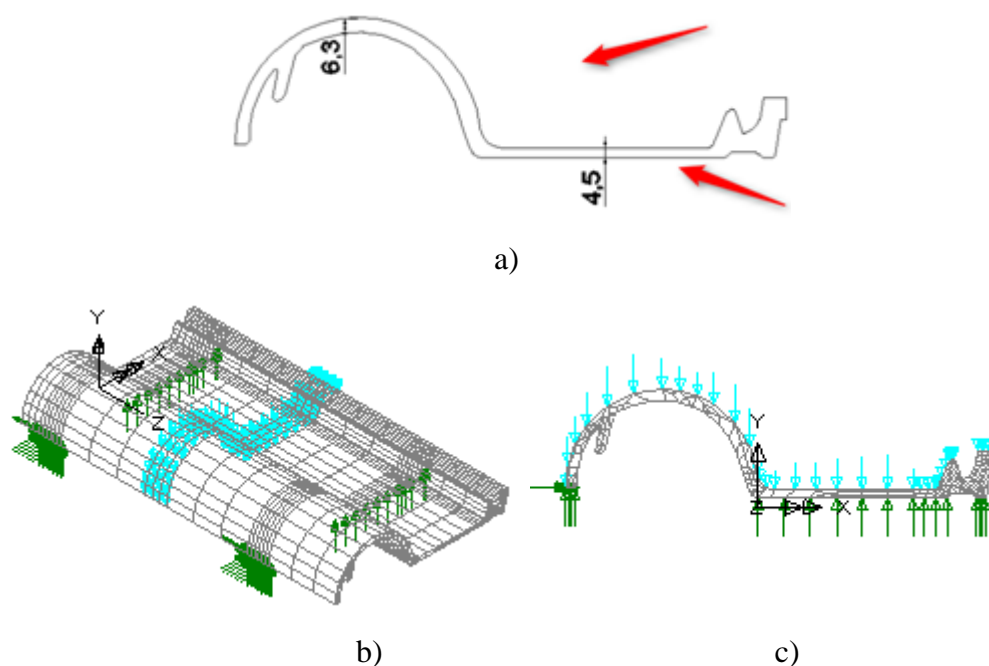


Figura 5.3. Modelo M3: a) perfil, b) perspetiv e, c) vista frente.

5.2.3. Caraterização do Modelo M4

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo M2, em que foram criados reforços que também serviram de apoios. Na zona dos apoios a seção transversal é de acordo com a figura 5.4, sendo a restante seção constante e idêntica à do modelo M2.



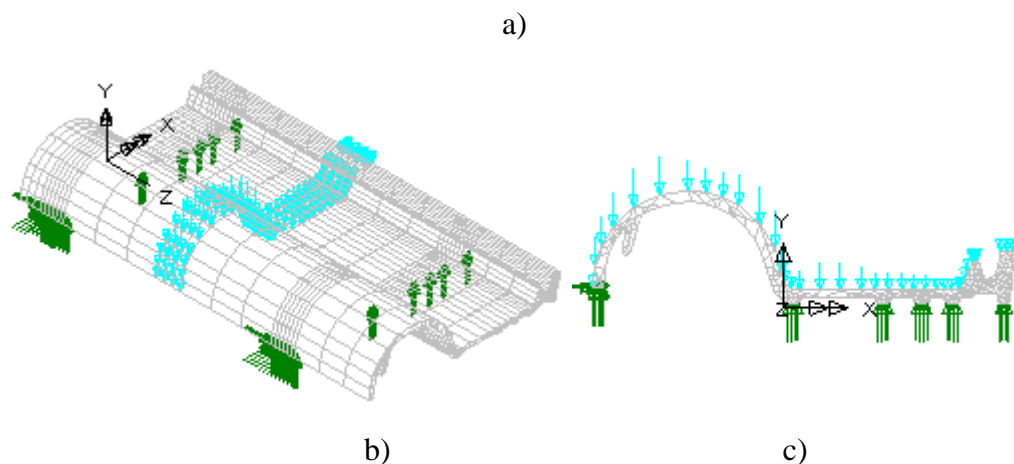


Figura 5.4. Modelo M4: a) perfil, b) perspectiva e c) vista frente.

5.2.4. Caracterização do Modelo M5

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo M2, em que a zona plana foi substituída por uma geometria em arco. Toda a seção é constante longitudinalmente, ver figura 5.5.

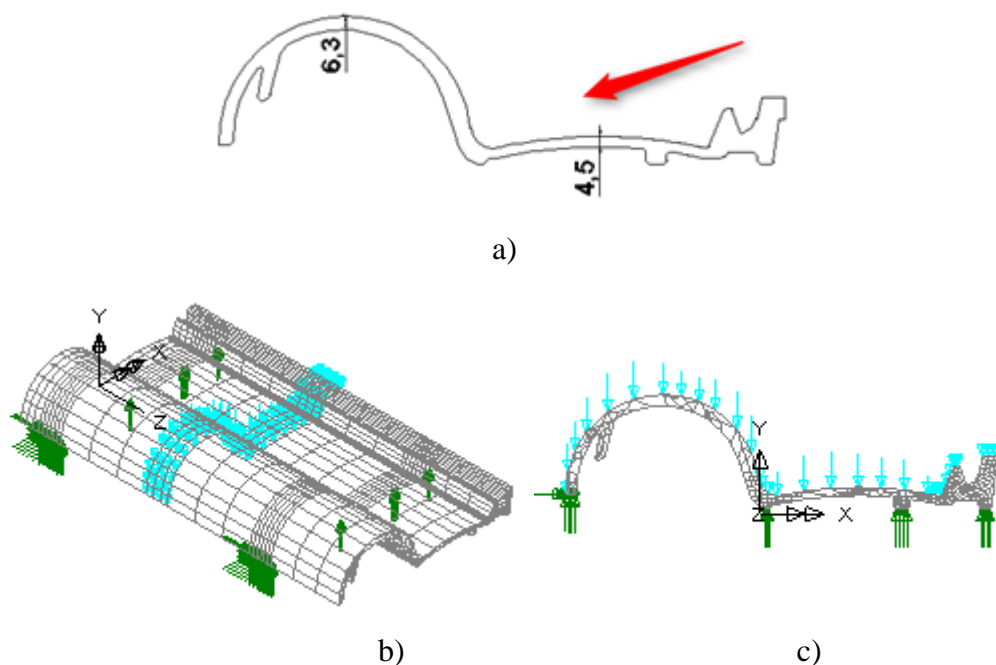


Figura 5.5. Modelo M5: a) perfil, b) perspectiva e c) vista frente.

5.2.5. Caraterização do Modelo M6

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo M2 e considerando a alterações efetuadas no modelo M3, M4 e M5. A seção é constante longitudinalmente entre apoios, sendo que na zona dos apoios a seção é plana. Ver a figura 5.6. a) e b) respectivamente.

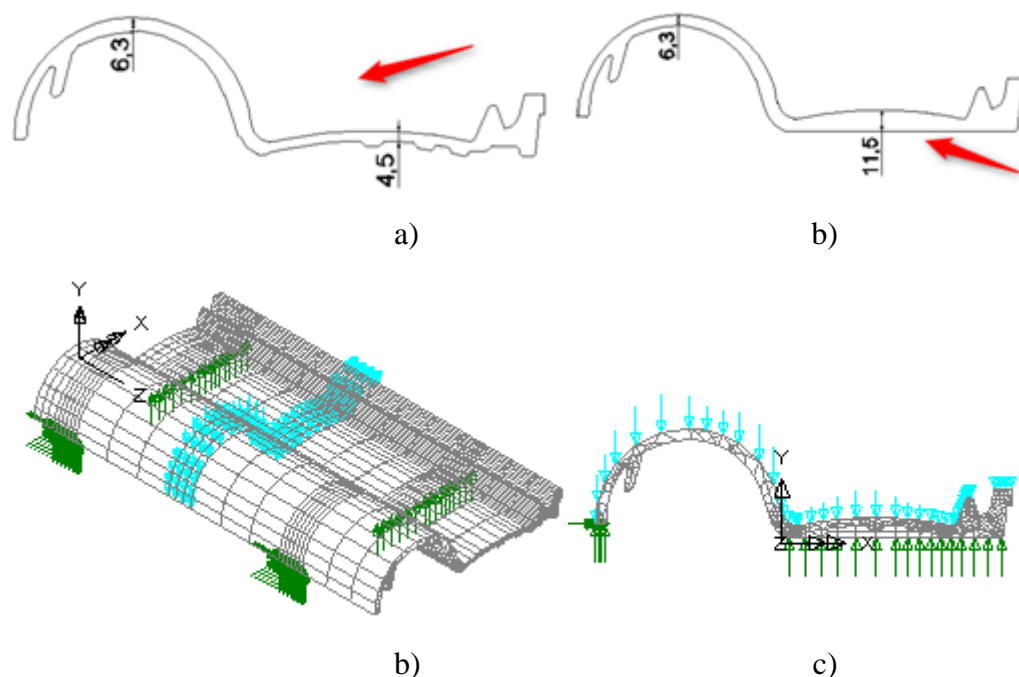


Figura 5.6. Modelo M6: a), b) perfil, c) perspectiva e d) vista frente.

5.2.6. Caraterização do Modelo M7

Este modelo foi desenvolvido a partir da seção transversal do modelo M1 e considerando a alterações efetuadas no modelo M3, M4 e M5 mas o perfil foi alterado, sendo a principal alteração diminuição da espessura (ver figura 5.7 a). A seção é constante longitudinalmente entre apoios, sendo que na zona dos apoios a seção é constante. A seção apresentada na figura 5.7 b) é utilizada nos apoios e em determinadas zonas entre estes.



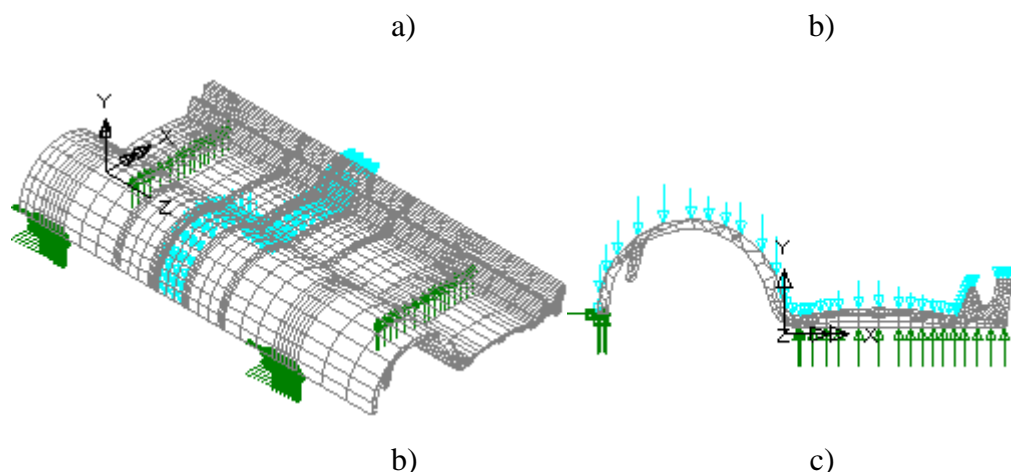


Figura 5.7. Modelo M7: a) perfil da zona entre elementos vigas b) perfil do elemento viga, c) perspectiva e d) vista frente.

5.3. Influências das Várias Geometrias

Para a análise dos resultados obtidos, foram efetuadas comparações entre os resultados obtidos em termos de tensões principais máximas, das tensões de corte máximas e dos deslocamentos para cada modelo, tendo sempre como referência o modelo M1. Os resultados são apresentados nos gráficos à cor rosa para o modelo M1 (de referência) e os modelos que tiverem melhores resultados que o modelo M1 à cor verde.

Também se apresenta uma comparação entre os contornos das direções principais, das deformadas e dos volumes de material dos vários modelos.

Nas figuras seguintes, a convenção definida para as tensões principais são:

- valor positivo: tração e
- valor negativo: compressão.

Os resultados dos vários modelos também foram comparados nos valores obtidos para cada caso, num ponto específico do mesmo. Na figura 5.8, apresenta-se a localização geométrica do ponto no modelo.

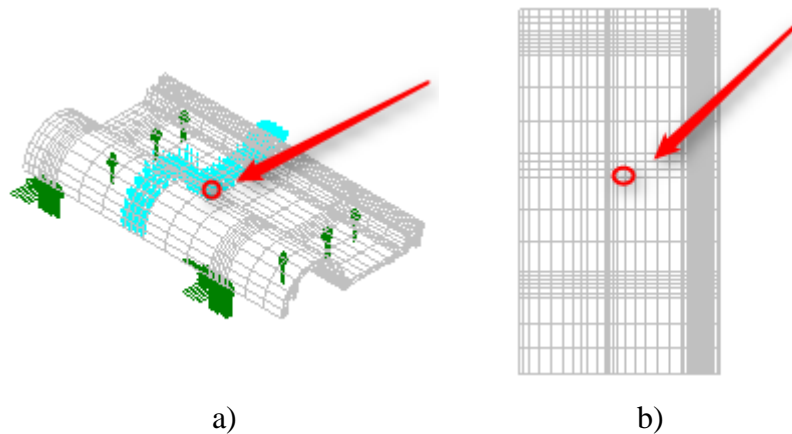


Figura 5.8. Localização do ponto de referência no modelo: a) perspectiva e b) vista de cima.

5.3.1. Tensão Principal Máxima

Os resultados obtidos para as tensões principais máximas ocorridas no modelo e no ponto de referência estão apresentadas na figura 5.9 a) e b) respetivamente.

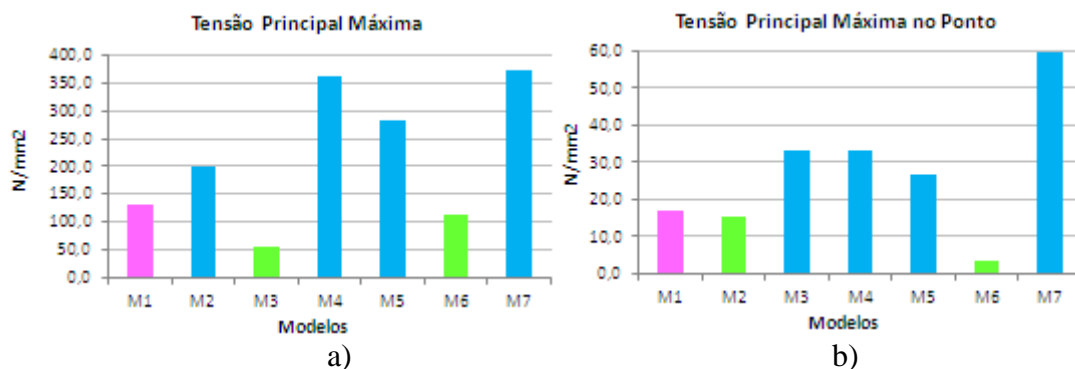


Figura 5.9. Tensões principais máximas: a) no modelo e b) no ponto de referência.

Na análise dos resultados apresentados na figura 5.9 a), verifica-se que os modelos M3 e M6 têm uma tensão principal máxima inferior ao modelo de referência. São então estes os modelos que servem o propósito deste estudo. Também se verifica que nos resultados apresentados na figura 5.9 b), que a tensão máxima no ponto de referência dos modelos M2 e M6 também são inferiores ao do modelo de referência M1.

5.3.1.1. Tensão Principal Máxima – vista superior

Na figura de 5.10 apresentam-se imagens (vista superior), das tensões principais máximas para os modelos de M1 a M7.

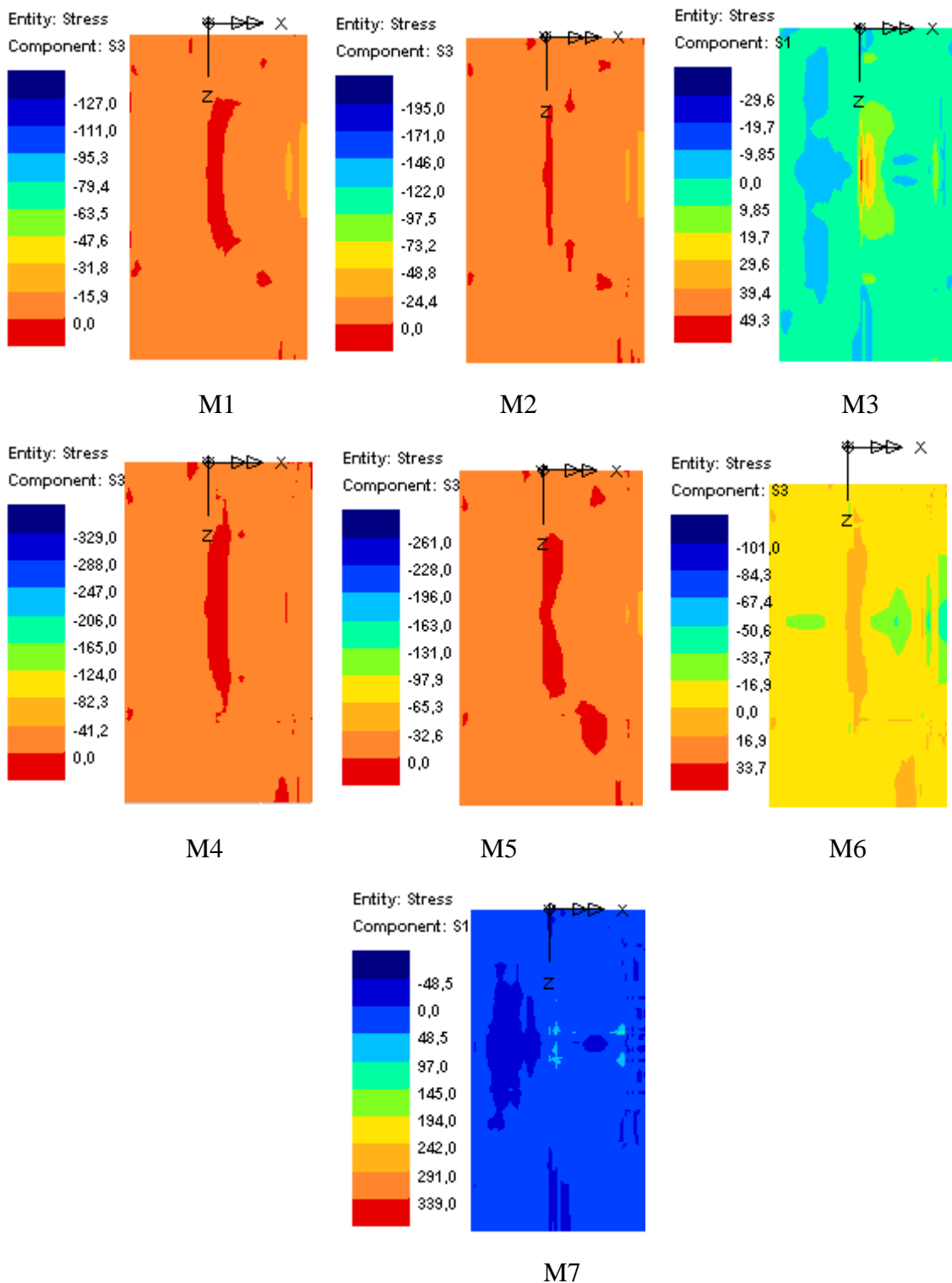
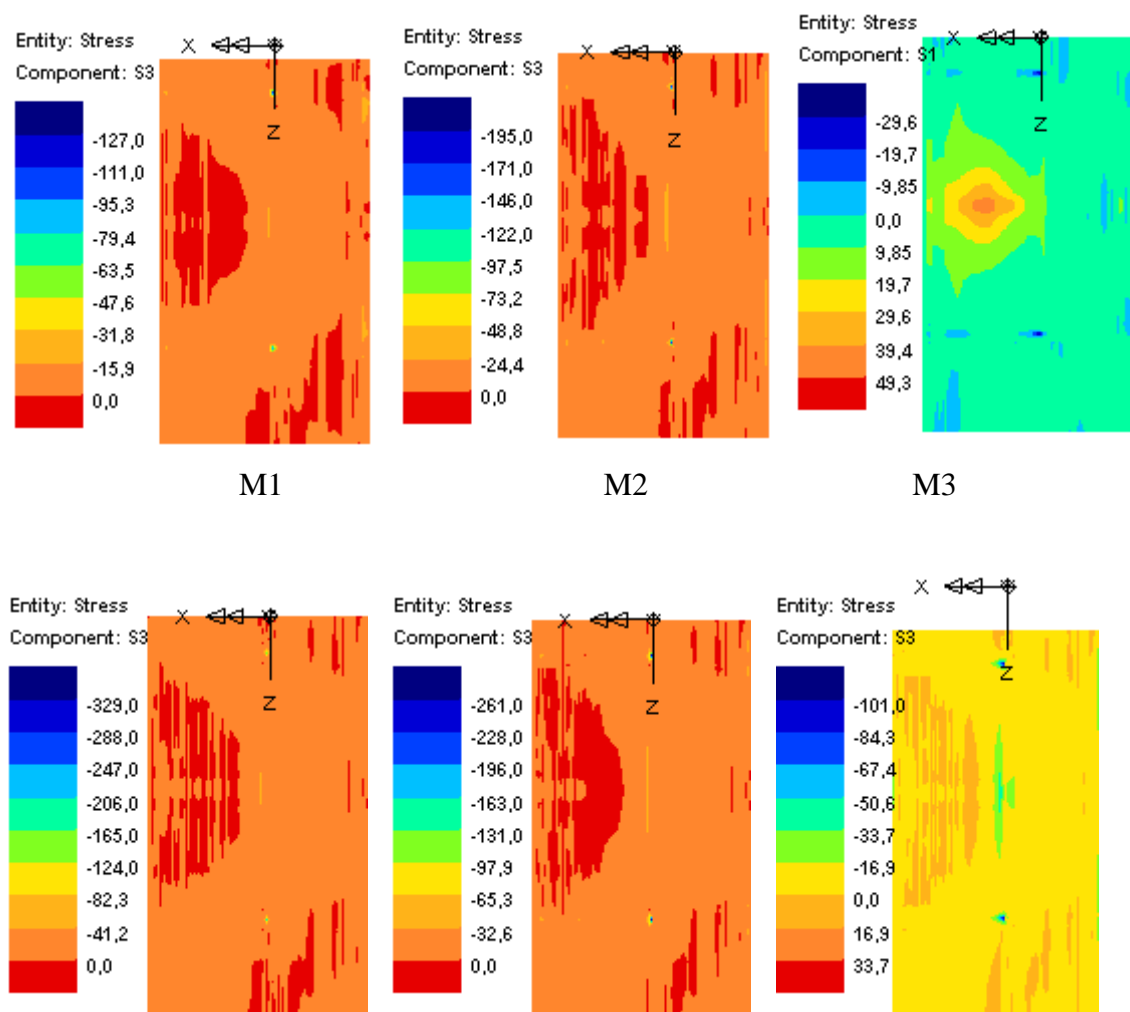


Figura 5.10. Tensões principais máximas para os vários modelos – vista superior.

Verifica-se que nos modelos M3 e M7 o valor da tensão principal máxima ocorre em tração e nos restantes em compressão. Nos modelos M3 e M6 a gama de tensões é mais fechada, em que se verifica que toda a estrutura do modelo se mobiliza na absorção dos esforços. No modelo M3 a tensão máxima de tração ocorre na zona de introdução de carga, junto à alteração geométrica entre as zonas curva e plana. Nos modelos M1, M2, M4 e M5 apenas estão sujeitos a tensões de compressão, tendo uma distribuição similar, variando o valor máximo atingido para cada um dos casos.

5.3.1.2. Tensão Principal Máxima – vista inferior

Na figura 5.11 apresentam-se imagens (vista inferior), das tensões principais máximas para os modelos de M1 a M7.



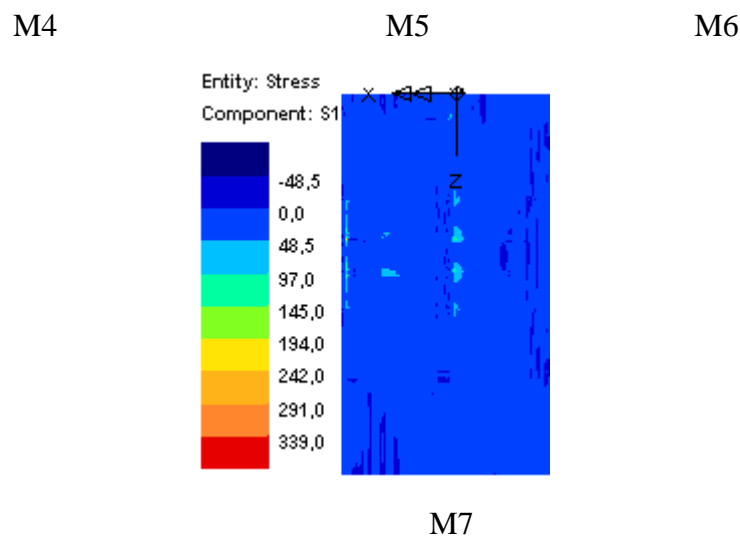


Figura 5.11. Tensões principais máximas para os vários modelos – vista inferior.

Verifica-se que em todos os modelos à exceção dos modelos M3 e M7, as tensões estão relativamente distribuídas por todo o modelo, com valores de tensão baixos relativamente à tensão máxima absoluta atingida; sendo que esta se localiza na zona dos apoios. No modelo M7, o valor da tensão máxima absoluta ocorre junto à “viga” de rebordo.

5.3.1.3. Tensão Principal Máxima – vista em corte

Nas figuras 5.12 a 5.18 apresentam-se em perspetiva os vários modelos, com indicação dos valores máximos e mínimos e respetiva localização. Também se apresenta em vista de frente o corte onde ocorre a tensão principal máxima absoluta.

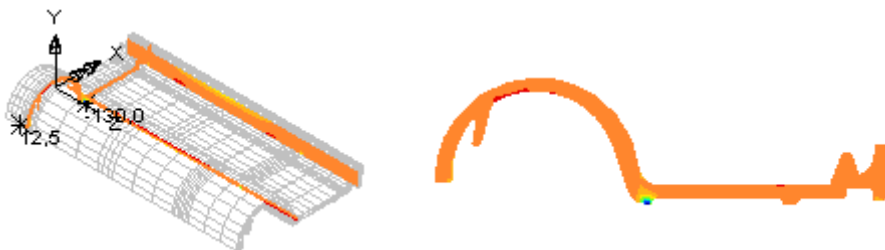


Figura 5.12. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M1.

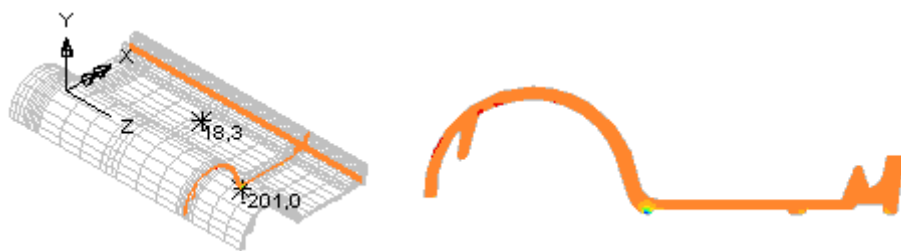


Figura 5.13. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M2.

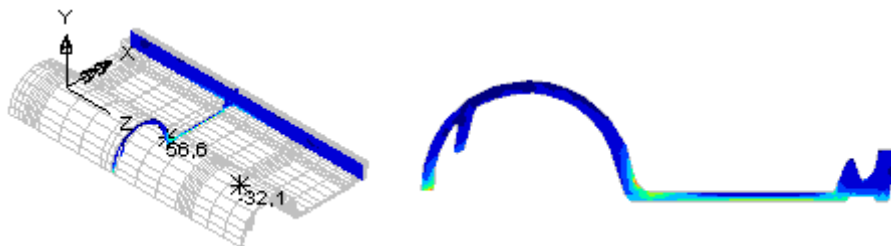


Figura 5.14. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M3.

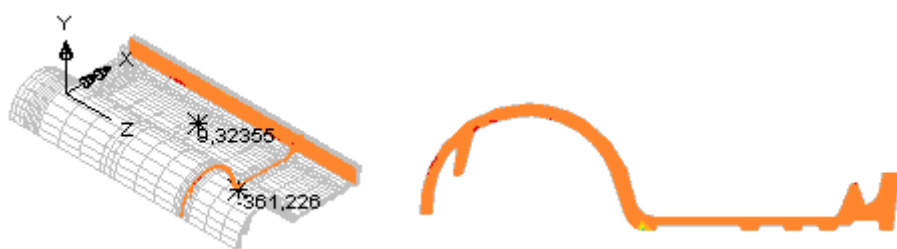


Figura 5.15. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M4.

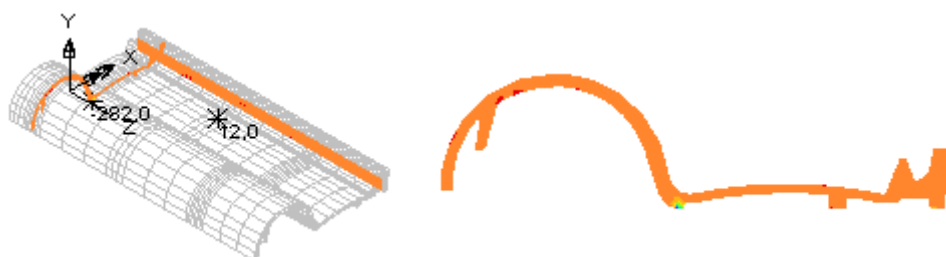


Figura 5.16. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M5.

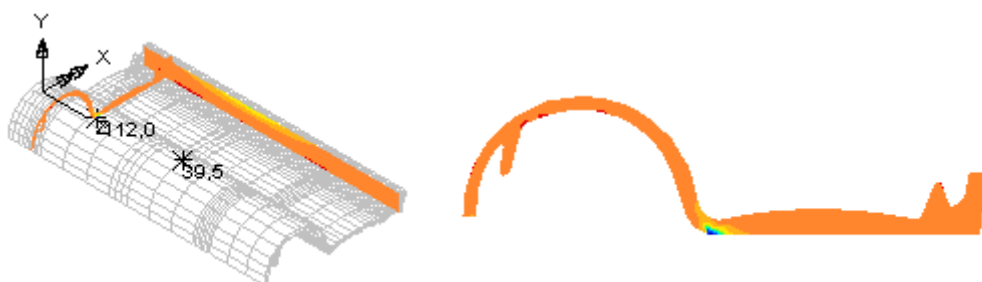


Figura 5.17. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M6.



Figura 5.18. Tensões principais máximas – localização e corte: modelo M7.

Verifica-se que nos modelos em todos os modelos com exceção dos modelos M3 e M7, a tensão máxima ocorre nos apoios, situados entre a parte interna curva do cano do modelo e zona plana ou em arco (zona de transição).

No modelo M3, a tensão máxima ocorre na seção superior (zona em tração), na zona de transição entre a curva do cano e a zona plana do modelo. Está localizada onde a carga é aplicada.

No modelo M7, a tensão máxima ocorre na parte inferior das “viga” de rebordo longitudinal. Está localizada onde a carga é aplicada. Verifica-se que o valor da tensão de tração é bastante elevado, sendo pontual.

5.3.2. Tensão Corte Máxima

Os resultados obtidos para as tensões de corte máximas ocorridas no modelo e no ponto de referência estão apresentadas nas figuras 5.19 a) e b) respetivamente.

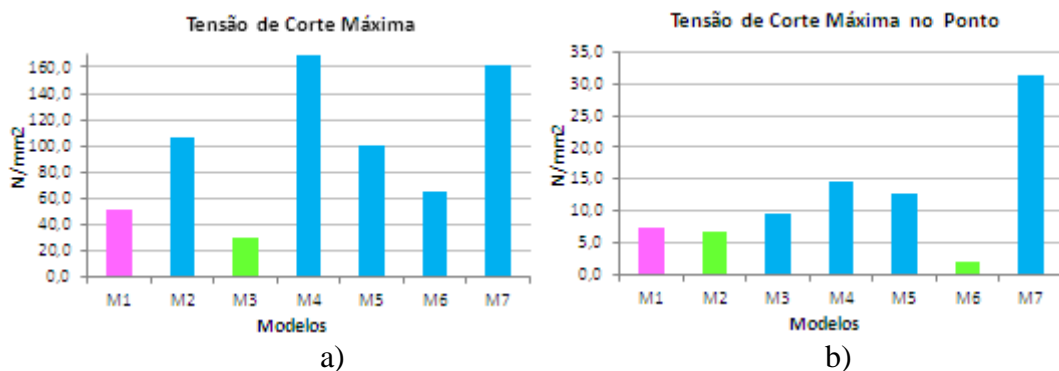


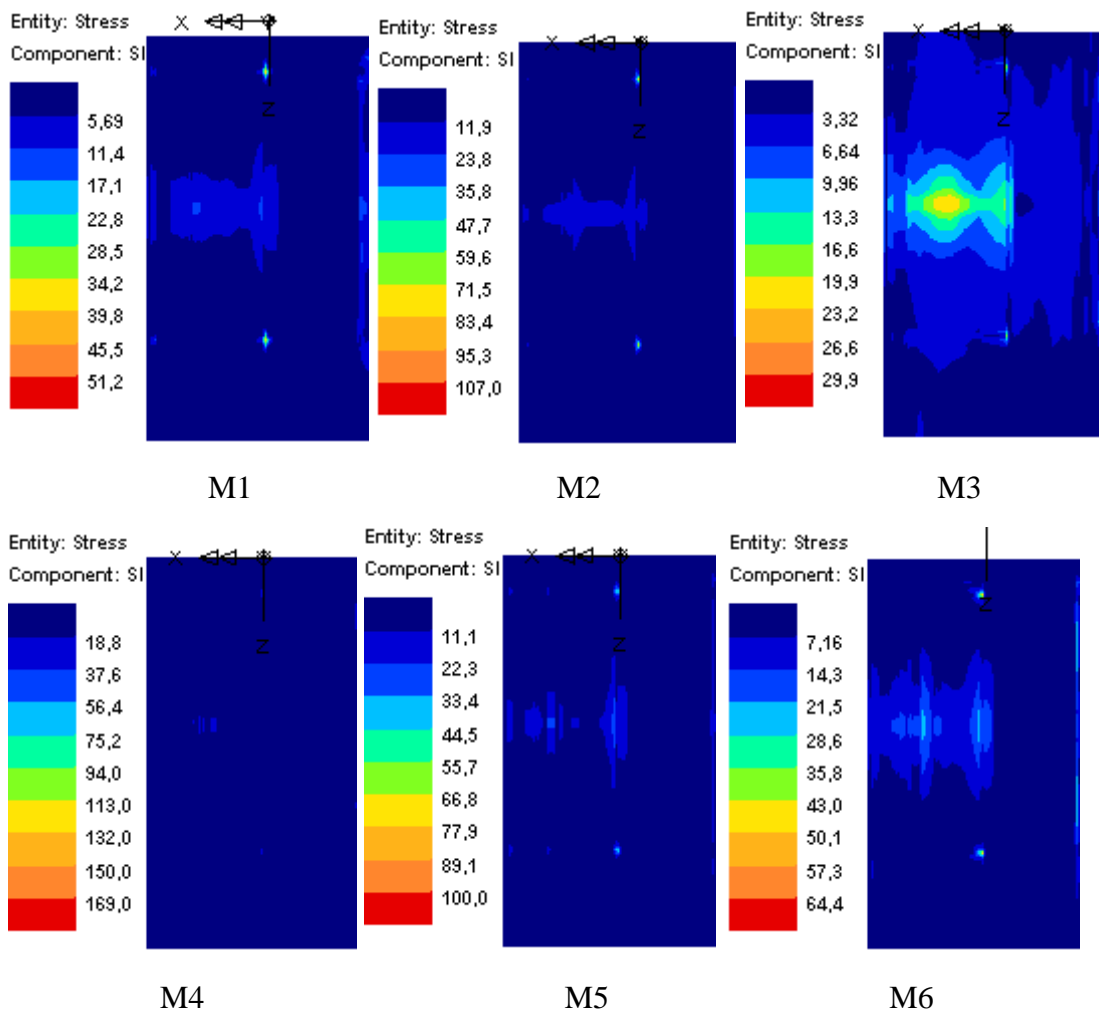
Figura 5.19. Tensões corte máximas: a) no modelo e b) no ponto de referência.

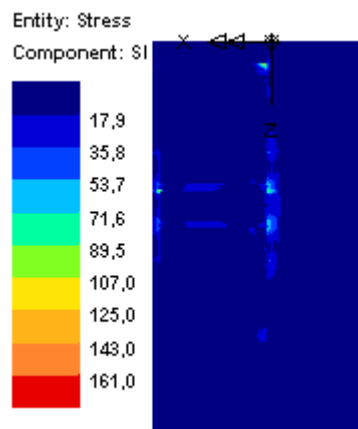
Verifica-se que apenas o modelo M3 tem uma tensão de corte máxima inferior ao valor obtido pelo modelo M1 (de referência). A seguir, o modelo com o valor mais próximo do modelo de referência é o modelo M6 mas com valor superior.

Nas tensões de corte máximas obtidas no ponto de referência verifica-se que no modelo M6 se obtém um valor significativamente mais baixo que o modelo de referência. O modelo M2 também tem um valor inferior ao do modelo de referência.

5.3.2.1. Tensão de Corte Máxima – vista inferior

Na figura 5.20 apresentam-se imagens (vista inferior), das tensões de corte máximas para os modelos de M1 a M7





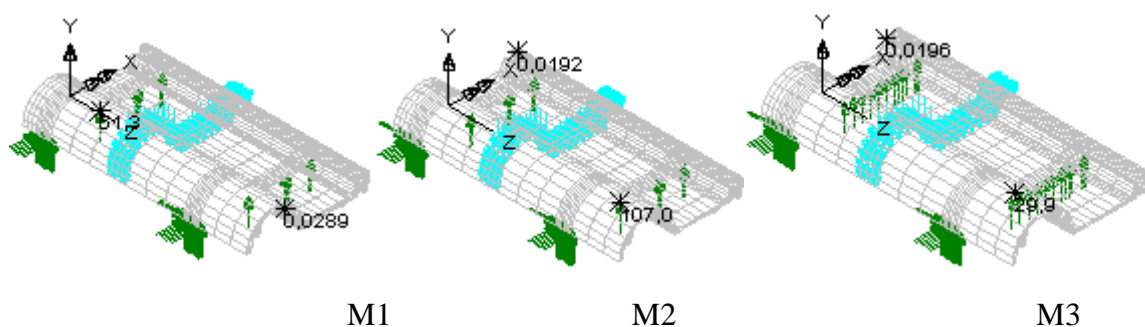
M7

Figura 5.20. Tensões de corte máximas para os vários modelos – vista inferior.

Verifica-se que nos vários modelos a distribuição das tensões de corte é relativamente uniforme, tendo incluído valores baixos. Verifica-se que os valores mais elevados são localizados e ocorrem de um modo geral junto aos apoios, situados entre a parte interna curva do cano do modelo e zona plana ou em arco (zona de transição). No modelo M3, verifica-se que a zona central onde está aplicada a carga é mobilizada e desta forma obtém-se um valor de corte máximo bastante inferior ao obtido pelo modelo de referência. No modelo M7, os valores mais elevados ocorrem de forma localizada junto aos apoios, na zona interna – zona de transição entre a curva do cano e a zona em arco, onde está aplicada a carga. Mas neste modelo, o valor de corte máximo ocorre na parte inferior da “viga” de rebordo, atingindo um valor bastante alto.

5.3.2.1. Tensão de Corte Máxima – valor e localização

Na figura 5.21, apresentam-se em perspetiva os vários modelos, com indicação dos valores máximos, mínimos e respetiva localização.



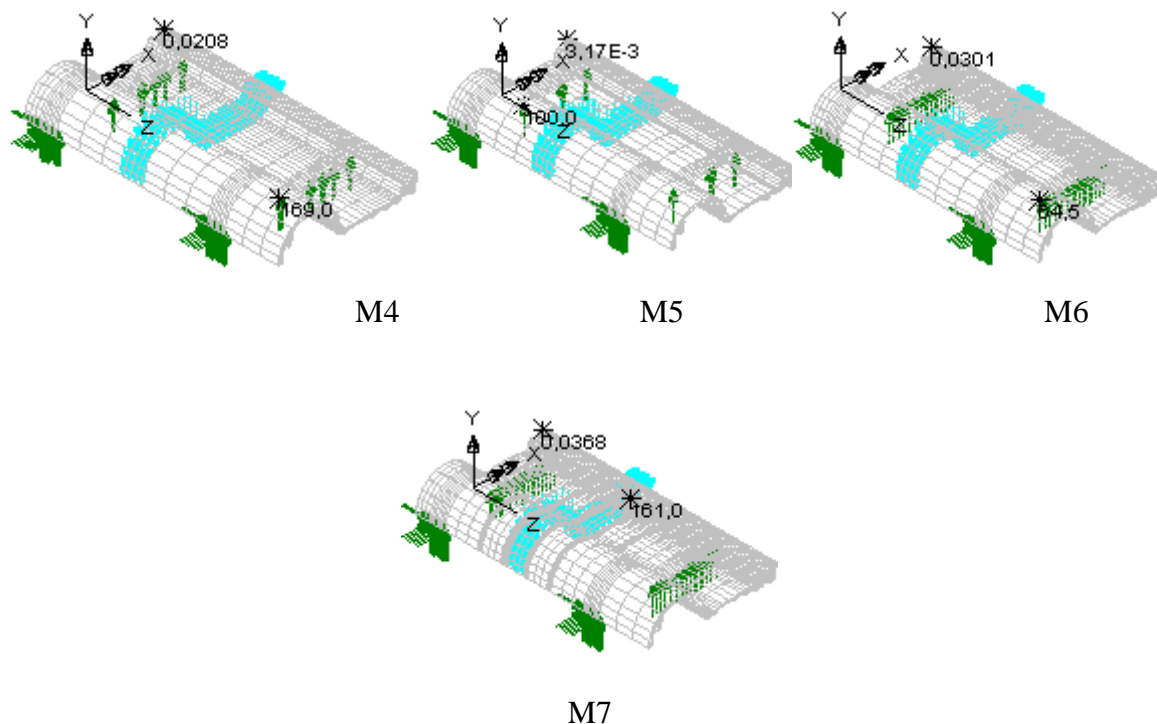


Figura 5.21. Tensões de corte máxima e mínima – localização para os vários modelos – vista perspectiva.

Verifica-se que em todos os modelos com exceção do modelo M7, a tensão de corte máxima ocorre nos apoios, situados entre a parte interna curva do cano do modelo e zona plana ou em arco (zona de transição).

No modelo M7, a tensão de corte máxima ocorre na parte inferior das “viga” de rebordo longitudinal está localizada onde a carga é aplicada. Verifica-se que o valor da tensão de tração é bastante elevado, sendo pontual.

No anexo “B” estão apresentados pormenores dos deslocamentos verticais, das direções das tensões principais e das deformadas.

5.3.1. Variação de Volume dos Modelos

As diferenças de volume entre os vários modelos é apresentado na figura 5.24, a qual permite comparação entre os mesmos.

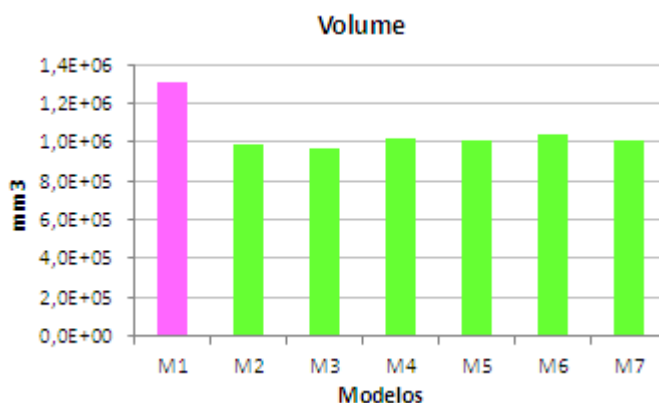


Figura 5.22. Volume de material dos vários modelos.

Os modelos efetuados M2 a M7, tiveram uma redução bastante interessante de volume. Verifica-se o modelo M3 seguido do modelo M2 são os que têm menor volume. Os modelos M6 e M4 são os que tiveram menor redução de volume respetivamente.

5.4. Resumo dos Resultados

Apresentam-se os resultados obtidos na comparação do modelo M1 com os modelos efetuados na análise analítica e também os resultados obtidos na comparação dos modelos definidos no estudo paramétrico.

5.4.1. Comparação com os Resultados da Análise Analítica

Interessa agora comparar os resultados obtidos na análise analítica e os obtidos para o modelo HX8M – referência M1.

Assim sendo, na tabela 5.2 têm-se os resultados obtidos para o modelo tipo placa (definido com o número 1), o modelo efectuado em grelha e o modelo M1. As variáveis em comparação são a tensão principal máxima, a tensão de corte e o deslocamento vertical.

Tabela 5.2. Comparação dos resultados dos modelos.

Modelo	Tensão Principal Máxima (N/mm ²)	Tensão de Corte (N/mm ²)	Deslocamento Vertical Máximo (mm)
Placa - número 1	277,5	250,7	-1,6
Grelha	52,6	-	-1,1
HX8M - M1	130,0	51,3	-0,7

O modelo M1 é o que tem os valores mais corretos, pois este modelo é o que se aproxima mais da geometria do protótipo e utiliza de meios de cálculo mais sofisticados. Verifica-se que os valores obtidos para os outros modelos (placa e grelha), estão na mesma ordem de grandeza do modelo M1.

O deslocamento vertical do modelo de grelha é meramente indicativo, pois devido às falhas na definição da rigidez das vigas para as tornar compatíveis com o material do protótipo, que é um elemento contínuo, os deslocamentos não são compatíveis com os reais.

5.4.1. Comparação dos Resultados do Estudo Paramétrico

Os resultados obtidos nas várias análises estão apresentados de forma compacta na tabela 5.3. Estão apresentados para cada modelo as tensões principais máximas, as tensões de corte máximas, o deslocamento vertical (segundo o eixo dos yy), máximo e mínimo, o volume e a diferença de volume entre o modelo de M1 e os restantes modelos.

Tabela 5.3. Resumo dos resultados.

Modelo	Max/Min/Nó	σ_1 (N/mm ²)	σ_3 (N/mm ²)	τ_{Max} (N/mm ²)	Desl γ (mm)	Volume (mm ³)
M1	max	36,9	12,5	51,3	0,65	1,3E+06
	min	-41,6	-130,0	0,0	-0,71	
	6193	16,7	1,9	7,4		
M2	max	114,0	18,3	107,0	1,11	9,9E+05
	min	-72,4	-201,0	0,0	-1,35	dif Vol (mm ³)
	5241	15,6	2,0	6,8		-3,2E+05
M3	max	56,6	14,4	29,9	1,14	9,6E+05
	min	-32,1	-47,8	0,0	-1,50	dif Vol (mm ³)
	4488	33,4	14,3	9,6		-3,5E+05
M4	max	154,0	9,3	169,0	1,00	1,0E+06
	min	-39,8	-361,0	0,0	-1,25	dif Vol (mm ³)
	7204	33,0	3,7	14,7		-3,0E+05
M5	max	78,8	12,0	100,0	1,16	1,0E+06
	min	-81,4	-282,0	0,0	-1,41	dif Vol (mm ³)
	6073	26,8	1,6	12,6		-3,1E+05
M6	max	93,9	39,5	64,5	1,13	1,0E+06
	min	-24,3	-112,0	0,0	-1,55	dif Vol (mm ³)
	1086	3,5	-0,6	2,1		-2,8E+05
M7	max	374,0	52,0	161,0	2,48	1E+06
	min	-62,2	-299,0	0,0	-2,82	dif Vol (mm ³)
	13945	59,8	-2,53	31,2		-3,0E+05

6. CONCLUSÕES

O objectivo desta tese foi a verificação da possibilidade de reduzir massa volúmica a uma telha cerâmica e obter um modelo em que em simultâneo se tenham valores de tensão principais máximas e de corte máxima inferiores ao do modelo de referência, mantendo inalteradas algumas das suas características:

- Dimensões principais: comprimento, largura e altura;
- Resistência mecânica instalada;
- Tipo de material;
- Formato geral do tipo de telha.

Após o presente estudo conclui-se que:

- É possível obter modelos com menor massa volúmica, mantendo os pressupostos definidos;
- Esta situação foi verificada no caso do modelo M3 em a tensão principal máxima e a tensão de corte máxima são bastante inferiores aos impostos pelo modelo de referência M1;
- O modelo M6 também está próximo de atingir os objetivos propostos, tendo conseguido atingir os objetivos em termos da tensão principal máxima mas não em termos da tensão de corte máxima, sendo que mesmo assim o valor está bastante próximo do pretendido;
- As zonas críticas verificadas nos vários modelos ocorrem sempre localizados nos apoios, na zona interna – zona de transição entre a curva do cano e a zona plana/arco, onde está aplicada a carga. Tendo como exceção o modelo M7, em que a zona crítica ocorre na zona da viga de rebordo;
- De um modo geral, as tensões principais máximas e de corte máxima ocorrem na mesma proximidade;

- Verifica-se que a redução da espessura dos modelos provocou que a deformação aumentasse;
- A inclusão de elementos tipos estruturais como reforços a simular a ação de vigas tanto na direção longitudinal como na direção transversal, permitiu aos modelos tornarem-se mais “diretos” em termos de transmissão dos esforços para os apoios, existindo menos mobilização do restante material. A inclusão destes elementos (nos modelos onde foi aplicado), criou uma dualidade em termos de resposta à carga aplicada, os modelos ficaram com uma espécie de “chassis” resistente e outra menos resistente. A transmissão de esforços deixou de funcionar como corpo de resistência similar, em que todo ele era mobilizado para resistir à carga aplicada;
- O modelo M3 é o exemplo do modelo em que sem a introdução de reforços e com a alteração dos apoios centrais, se verifica a maior mobilização de todo o modelo na resposta à carga imposta;
- A inclusão da curva de arco na zona plana do modelo provocou um aumento de resistência do modelo nesta zona e um também um aumento de tensões na zona das extremidades deste;
- A curva do arco também introduz um agradável efeito estético na telha, como vai permitir a que este modelo tenha uma nova funcionalidade embutida: self-cleaning, o qual funciona através duma ação hídrica. Pois, a água da chuva ao incidir nesta parte da telha vai deslocar-se para as laterais desta face e desta forma limpa a zona central de impurezas depositadas;
- Esta situação também vai permitir que a telha seque mais rapidamente sob ação da água, pois o tempo de escoamento da água nesta área diminui;
- Esta nova funcionalidade vai aumentar a durabilidade da telha e a qualidade visual da mesma.

No anexo “C” apresentam-se imagens dos modelos M3 e M6.

7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Deseja-se que sejam efectuadas comparações entre os resultados numéricos obtidos neste trabalho e resultados obtidos por via experimental, de forma a se poderem tirar conclusões mais concisas.

Também devem ser efetuadas mais variantes ao modelo inicial, tendo como ponto de partida os resultados obtidos neste trabalho.

Em abordagens futuras, ter-se-á de ter em atenção na definição da geometria da telha a questão do processo de fabrico e da embalagem das mesmas.

Finalmente, salienta-se que existe ainda muito trabalho de investigação a efectuar sobre a temática estudada nesta tese, pois este tipo de soluções vai permitir desenvolver outros produtos, tornando-os bastante mais competitivos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, Fernando. (2012). “MECÂNICA APLICADA, Uma Abordagem Prática”. Lidel.
- [2] Apontamentos da disciplina ”Betão Armado II”. (2010) Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.
- [3] Farinha, J. S. Brazão, e Reis A. Correia dos,. (1996). “TABELAS TÉCNICAS”.
- [4] Lusas, “Modeller Reference Manual, Version 14: Issue: 1”.
- [5] Negrão, João H. (2009). “Estática Aplicada, para Engenharia Civil e Arquitectura”. Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.
- [6] Negrão, João H. (2011). Apontamentos da disciplina “Concepção, Dimensionamento e Reabilitação de Estruturas”. Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.
- [7] NP EN 538, (1997). “Telhas Cerâmicas para colocação descontínua”. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade.
- [8] ISEP, Dep. Eng. Mecânica. “ORGÃOS DE MÁQUINAS”.
- [9] Sass, F. e Bouché, Ch. E Leitner, A. (1980). “Manual do Engenheiro Mecânico” da 13ª edição alemã, revista e ampliada.
- [10] Simões, Luís Miguel da Cruz. (2009). “ANÁLISE DE ESTRUTURAS, Vol II”.
Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.

[11] Simões da Silva, L. e Gervásio, Helena. (2007). “Dimensionamento de Ligações Metálicas: Métodos Avançados”. CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra, Portugal.

ANEXO A

Pormenores dos resultados obtidos no ponto 3.3 – “Análise do Comportamento entre uma placa maciça, uma placa com mais apoios e uma placa nervurada”.

1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO - RESULTADOS

Na figura 1.1 apresentam as tensões principais máximas obtidas na direção 1:

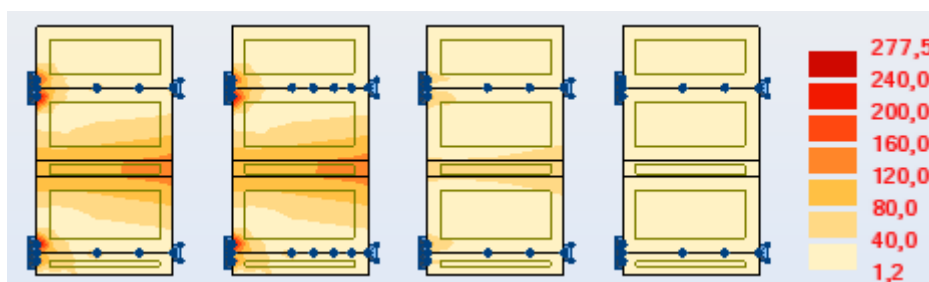


Figura 1.1. Tensões principais máximas – direção 1.

Verifica-se que nos modelos 1 e 2 os valores são similares (e altos) e que nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.2 apresentam as tensões principais mínimas obtidas na direção 1:

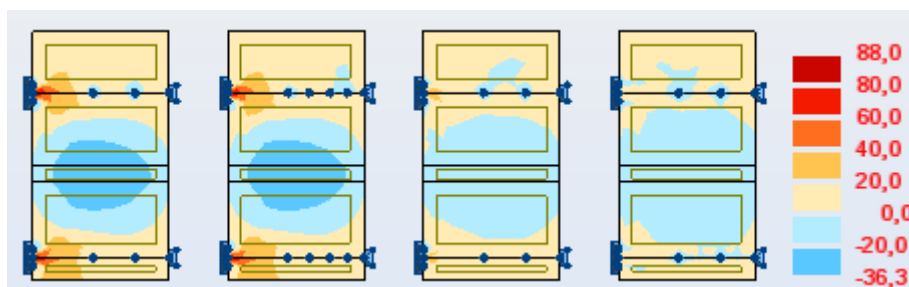


Figura 1.2. Tensões principais mínimas – direção 1.

Verifica-se que nos modelos 1 e 2 os valores são similares (e altos) e que nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.3 apresentam as tensões principais máximas obtidas na direção 2:

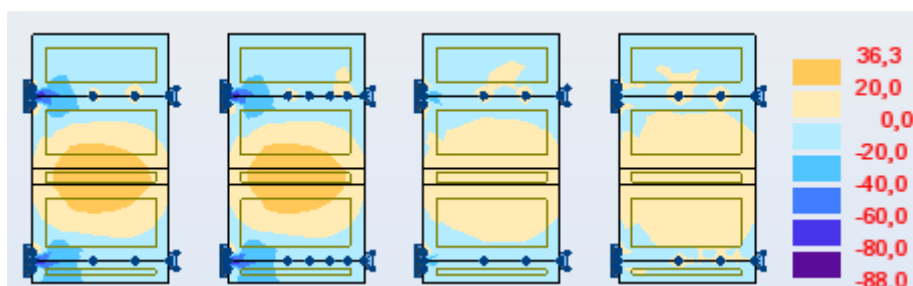


Figura 1.3.Tensões principais máximas – direção 2.

Verifica-se que nos modelos 1 e 2 os valores são similares (e altos) e que nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.4 apresentam as tensões principais mínimas obtidas na direção 2:

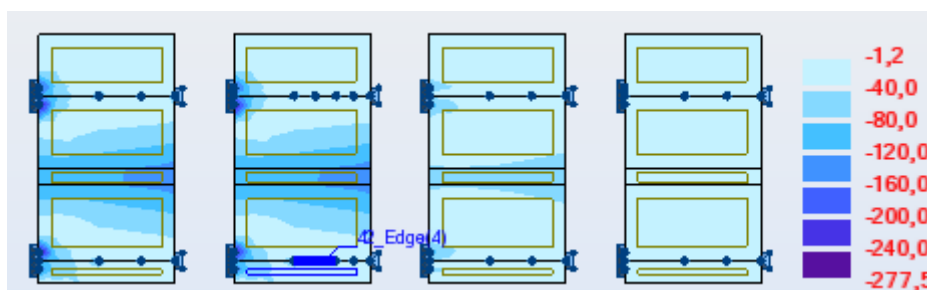


Figura 1.4.Tensões principais mínimas – direção 2.

Verifica-se que nos modelos 1 e 2 os valores são similares (e altos) e que nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.5 apresentam os deslocamentos verticais obtidos:

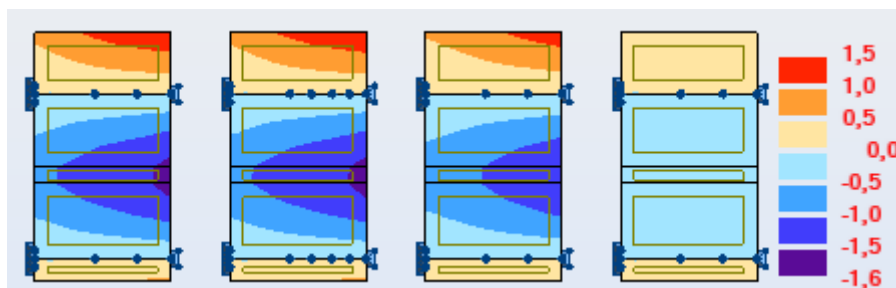


Figura 1.5.Deslocamentos verticais.

Verifica-se que nos modelos 1, 2 e 3 os valores são similares (e altos), e no modelos 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.6 apresentam as tensões de corte obtidas:

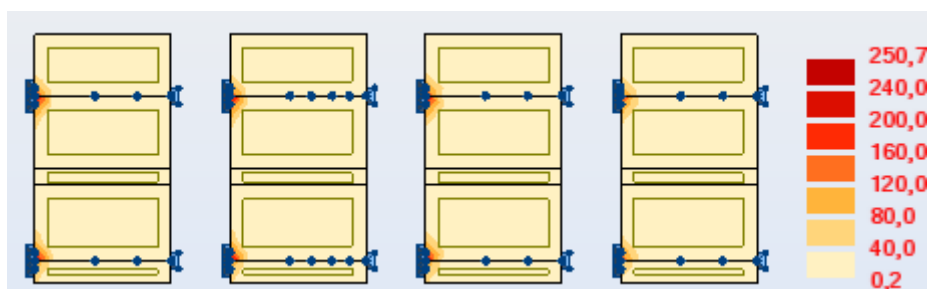


Figura 1.6.Tensões de corte.

Os valores são similares nos vários modelos e localizados junto aos apoios mais restringidos.

Na figura 1.7 apresentam as trajetórias das tensões principais obtidas: nas fibras superiores:

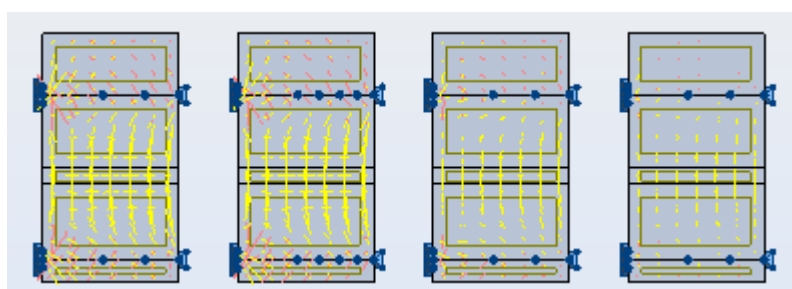


Figura 1.7.Direções das tensões principais fibras superiores.

Verifica-se que nos modelos 1, 2 as trajetórias de compressão mais intensas e similares e nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

Na figura 1.8 apresentam as trajetórias das tensões principais obtidas nas fibras inferiores:

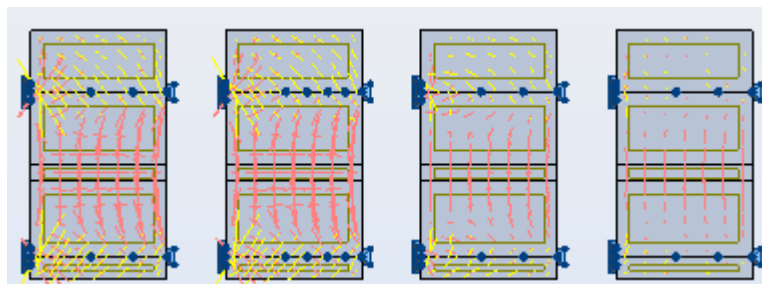


Figura 1.8. Direções das tensões principais – fibras inferiores.

Verifica-se que nos modelos 1, 2 as trajetórias de tração mais intensas e similares e nos modelos 3 e 4 os valores são muito mais baixos.

ANEXO B

Pormenores dos resultados obtidos no ponto 5.3 “Influências das Várias Geometrias”.

1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os resultados obtidos para os deslocamentos verticais, segundo o eixo dos yy, para os modelos e no ponto de referência estão apresentadas nas figuras 1.1 a) e b) respetivamente.

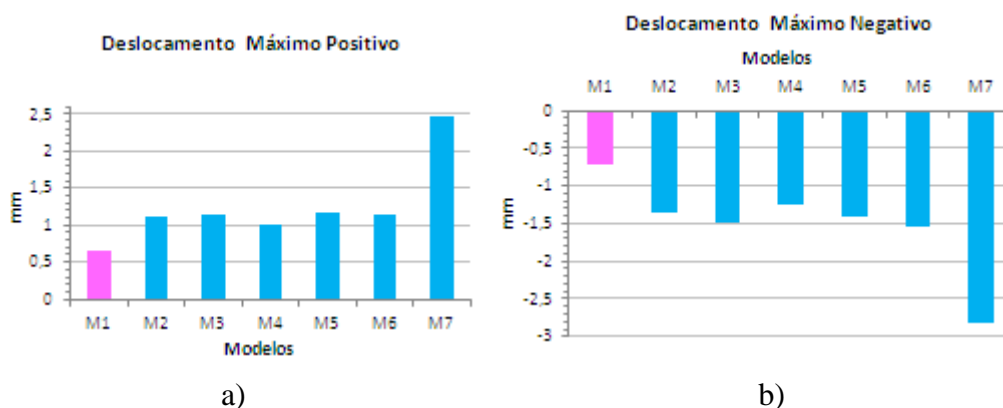
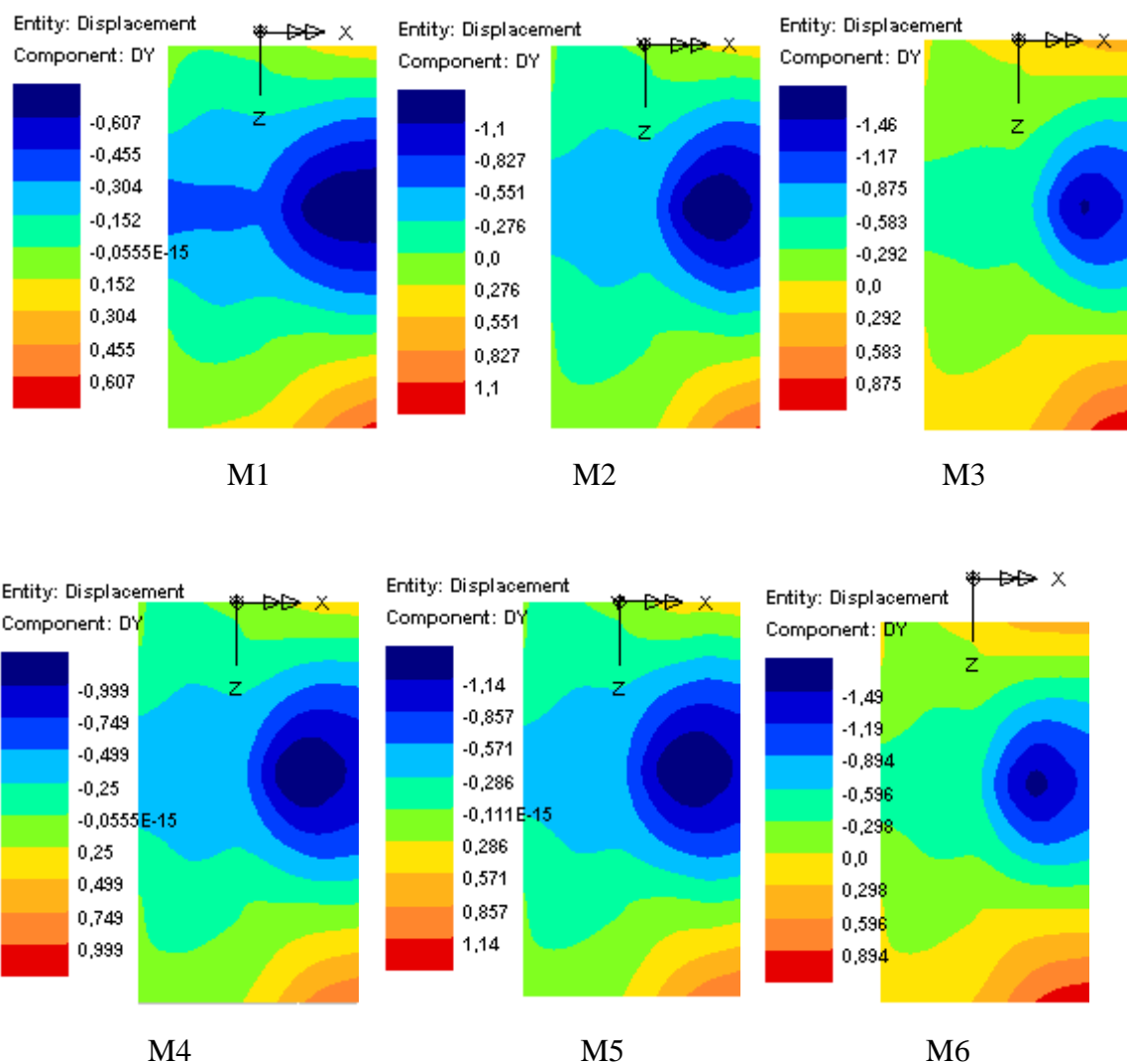


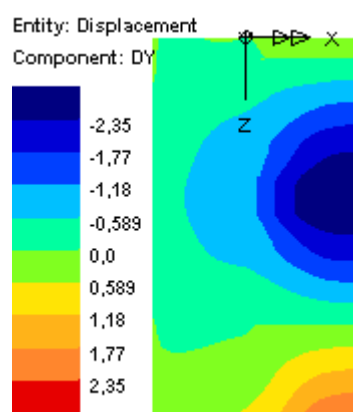
Figura 1.1. Deslocamentos máximos: a) no modelo e b) no ponto de referência.

Os deslocamentos em todos os modelos são superiores aos valores obtidos no modelo M1. Sendo que o modelo M7 atinge valores de deslocamento bastante mais elevados que os restantes modelos. Estas situações seriam de esperar pois os novos modelos forma obtidos com diminuição de material. Convém no entanto verificar a localização e extensão destes deslocamentos, o que se apresenta no ponto seguinte deste trabalho.

1.1. Deslocamentos verticais – vista superior

Na figura 1.2 apresentam-se imagens (vista superior), dos deslocamentos verticais segundo o eixo dos yy para os modelos de M1 a M7.





M7

Figura 1.2. Deslocamentos verticais para os vários modelos – vista superior.

Verifica-se que em todos os modelos que a zona central onde é aplicada a carga é onde ocorrem os maiores deslocamentos negativos (para dentro do plano). Na zona mais afastada relativamente à aplicação da carga ocorrem os maiores deslocamentos positivos (para fora do plano). Estas situações ocorrem de acordo com o esperado para a situação em estudo. O modelo M1 é aquele onde é mobilizada uma maior área com deslocamentos negativos mas devido a esse fato obtêm-se valores mais baixos. Tal situação deve-se à maior espessura deste modelo. Os modelos M3 e M6 têm claramente os deslocamentos negativos e concentrados numa pequena área, junto à zona onde está situada a “viga” do rebordo, daí se obterem valores altos. O modelo M7 tem os valores mais elevados de deslocamentos negativos e positivos. Sendo localização dos deslocamentos negativos na zona de aplicação da carga, mais concretamente nas “vigas” do rebordo. Sendo que esta situação se deve ao fato de este modelo ter na zona de ligação entre a zona em arco e as “vigas” de rebordo menos espessura que os restantes.

2. DIREÇÕES DAS TENSÕES PRINCIPAIS

Na figura 2.1 seguintes apresentam-se em perspetiva as direções das tensões principais para os vários modelos. A cor vermelha corresponde a tensões de tração e a cor azul a tensões de compressão.

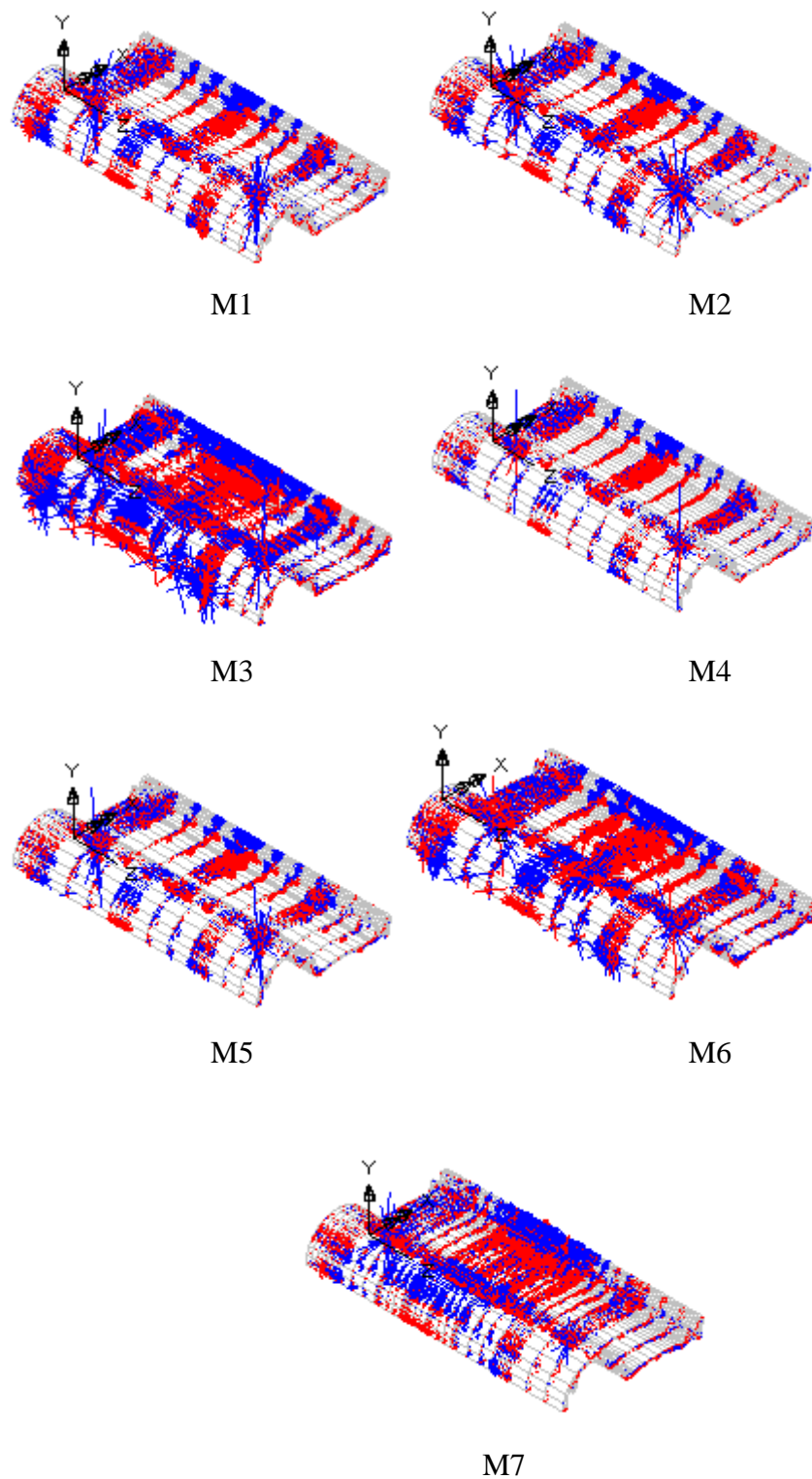
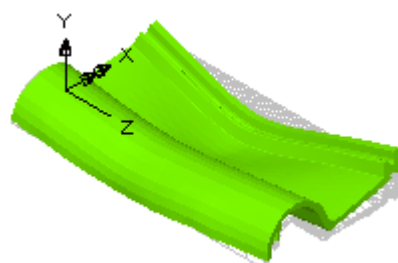


Figura 2.1. Direções das tensões principais para os vários modelos.

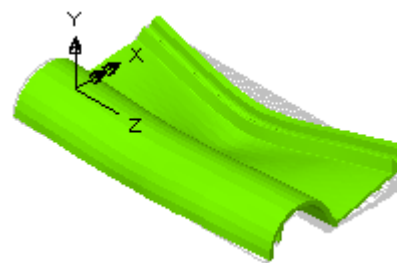
Verifica-se que em todos os modelos surgem picos de tensão nas zona dos apoios situados entre a parte interna curva do cano do modelo e zona plana ou em arco (zona de transição). Sendo que no modelo M4 se pode verificar que os picos (nos apoios), ocorrem de forma intensa – tensões de compressão. A zona central dos modelos onde está aplicada a carga, de um modo geral, está sujeita a esforços de flexão mais intensos, o que provoca que nesta zona que o modelo esteja mais fortemente sujeito a tensões de tração. As zonas situadas na parte superior da curva do cano e nas vigas de rebordo, estão sujeitas a tensões de compressão. Nos modelos M3, M6 e M7 verifica-se uma maior mobilização, de todo o volume do modelo, o que vai permitir obter tensões mais baixas, pois os esforços estão “mais distribuídos” por um maior volume.

3. DEFORMADAS

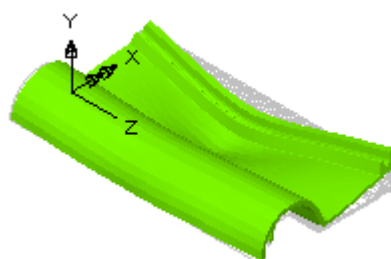
Para compreender melhor o comportamento de cada modelo às condições de carga e apoios às quais estão sujeitos, apresenta-se na figura 3.1 as respetivas deformadas.



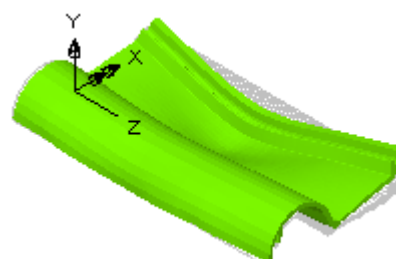
M1



M2



M3



M4

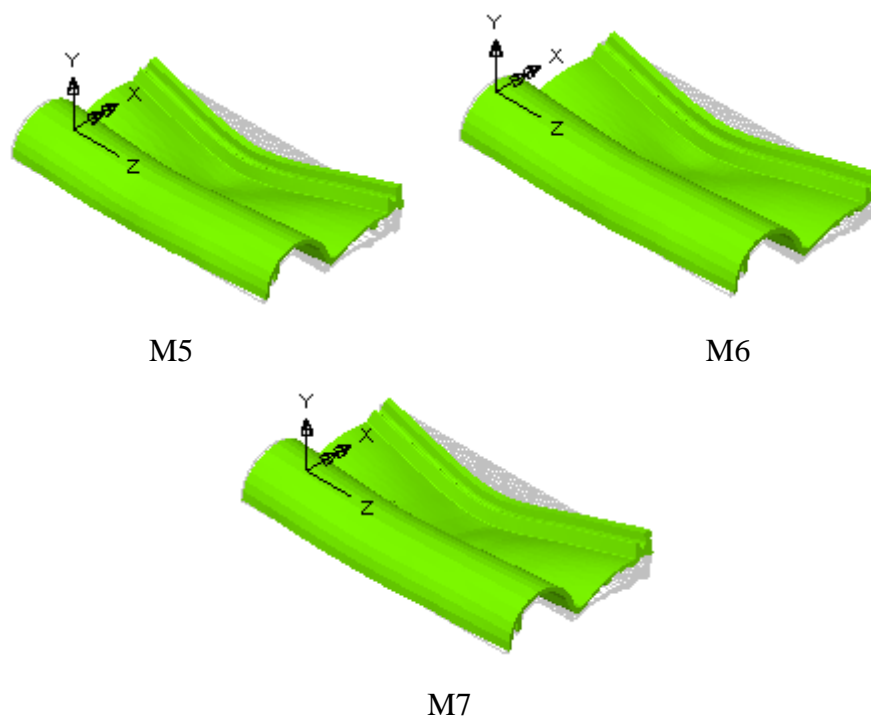


Figura 3.1. Deformadas para os vários modelos.

Verifica-se que o modelo M1 é aquele que apresenta uma deformação menos pronunciada, podendo-se verificar que o “cano” também é fortemente mobilizado, na resistência da estrutura. Tal, deve-se ao fato de que a espessura deste modelo ser maior. No modelo M3 pode-se verificar que a deformação é mais localizada, apresentando uma deformação vincada na zona plana, próximo das “vigas” de rebordo. No modelo M7 verifica-se que a deformação é mais pronunciada na zona das “vigas” de rebordo e onde está aplicada a carga. Verifica-se também que a deformação da zona do “cano” é pequena e tendo no lado oposto uma deformação fortemente pronunciada.

ANEXO C

1. CONCLUSÕES – MODELOS M3 E M6

Nas figuras 1.1 e 1.2 apresentam-se imagens dos modelos M3 e M6, sendo que estes modelos cumpriram e quase cumpriram respetivamente os requisitos propostos.

- Modelo M3:

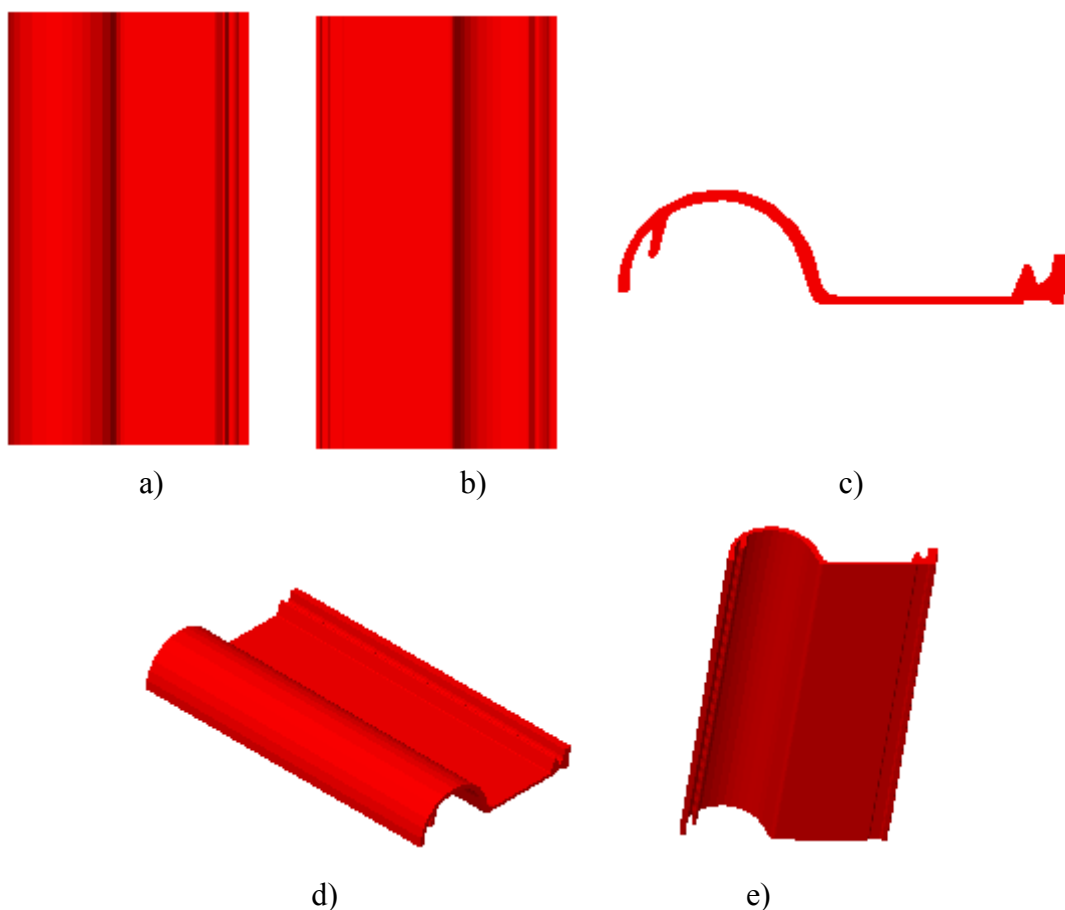


Figura 1.1. Vista: a) de cima, b) de baixo c) em perfil, d) perspectiva e e) perspectiva de baixo do modelo M3.

o Modelo M6:

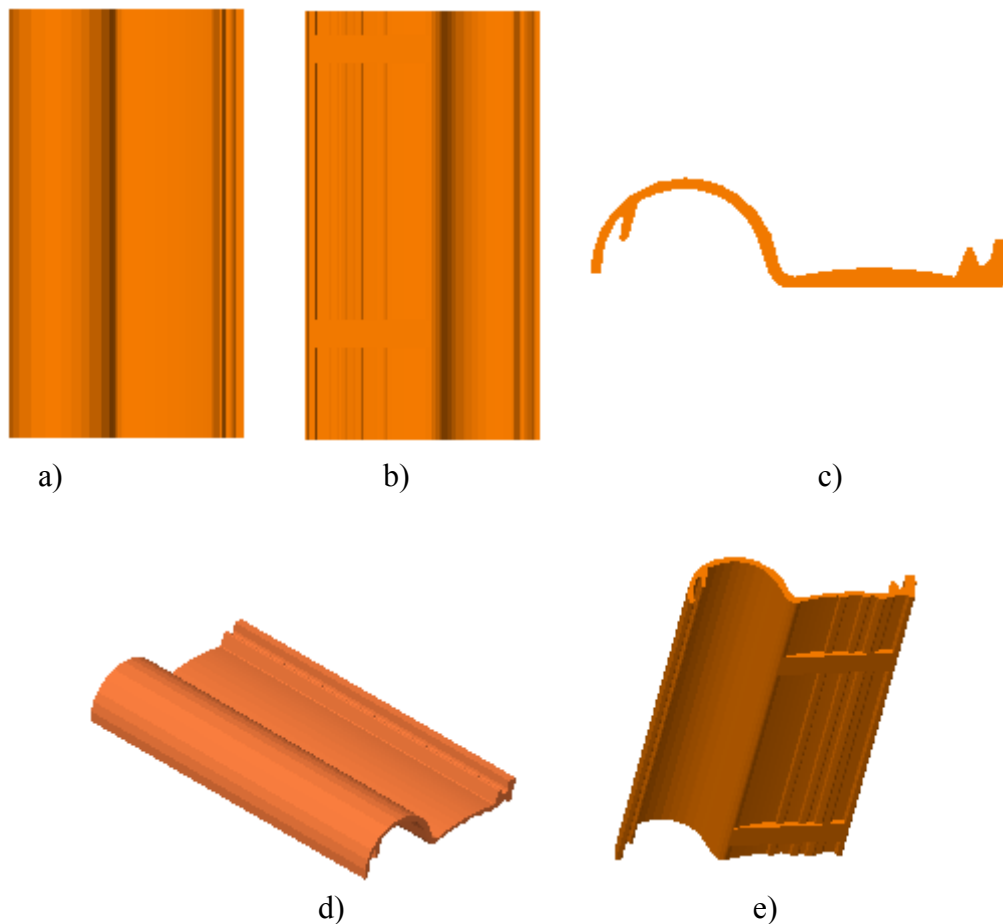


Figura 1.2. Vista: a) de cima, b) de baixo, c) em perfil, d) perspectiva e e) perspectiva de baixo do modelo M6.

Na figura 1.3 apresenta-se o pormenor da função de *self-cleaning*, existente neste modelo, onde mostra a zona de escoamento das águas da chuva do centro para os lados arrastando as impurezas existentes.



Figura 1.3. Pormenor da propriedade *self-cleaning* do modelo M6.