



**Carlos Dionísio Pinto
de Sá Borges**

**CONCEPÇÃO E OPTIMIZAÇÃO POR ILD DE UM
DESCOMATADOR DE GRELHAS**



**Carlos Dionísio Pinto
de Sá Borges**

**CONCEPÇÃO E OPTIMIZAÇÃO POR ILD DE UM
DESCOMATADOR DE GRELHAS**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Filipe Teixeira Dias, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha esposa Cláudia pelo incansável apoio em todas as fases desta tarefa tão difícil.

“Há dias em que tudo parece impossível e, de repente... agarramo-nos com todas as forças até ao objectivo final”

Anónimo

o júri
presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Professora Doutora Marta Cardoso de Oliveira
Professora Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade de Coimbra

Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao Professor Filipe Teixeira Dias, como orientador, a sua inteira disponibilidade nem sempre a horas simpáticas.

Agradeço todo o apoio dado por toda a família, em particular à minha esposa Cláudia, pela sua determinação, a mim transmitida com muito afinco.

Agradeço o apoio dado pela empresa Bóia & Irmão, S.A., por permitir a disponibilidade para a execução deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos que sabiam desta missão, pelo apoio e força moral para concluir esta dissertação.

Sem todos não teria chegado a esta dissertação... muito obrigado

palavras-chave

Lightweight design, descolmatador, limpa-grelhas, equipamento hidromecânico, detritos, canais abertos, adução, mini-hídricas, barragens.

resumo

O presente trabalho surgiu da necessidade de desenvolver um descolmatador de grelhas, para completar uma gama de equipamentos hidromecânicos produzidos pela empresa Bóia & Irmão, S.A.. O descolmatador é um equipamento que faz parte de um conjunto de outros, que actuam em série em sistemas de condução de água, onde existe a necessidade de instalar grelhas de protecção que ficarão colmatadas a um ritmo que depende da quantidade de detritos que sejam arrastados pela água. Neste estudo seleccionou-se o caso particular de instalação no Empreendimento da EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A. O descolmatador que será desenvolvido terá aplicação num canal rectangular e será desenvolvido recorrendo aos conceitos actuais do Intelligent Lightweight Design. Este método permitirá chegar a um modelo optimizado que vá ao encontro das necessidades do mercado exigente como o dos equipamentos hidromecânicos.

keywords

Lightweight design, unclogging, rack-trash cleaner, hydromecanics equipment, debris, open-channels, water conduction, hydro power-station, dam.

abstract

The present work consists in the development of one rack-trash cleaner in order to complete the range of hydromecanics equipments produced by Bóia & Irmão, S.A. company. The unclogging is a device that makes part of one system of several equipments acting together in open-channels for water conduction, where are needed some protection grids, that will clog with a frequency depending on the quantity of debris in water course. For this study it was selected the particular of one unclogging in the EDIA undertaking. The unclogging will be developed appealing to modern concept of Intelligent Lightweight Design and it will be applied in a square section channel. This method will allow to reach one optimized model that will satisfy the needs of the hydromecanic equipments market.

Índice

1. Introdução	1
2. Objectivos	5
3. Enquadramento	7
3.1. Tipos de Descolmatadores	8
4. Descrição dos Equipamentos em Estudo	17
4.1. Comportas Vagão.....	18
4.1.1. Peças Fixas das Comportas Vagão.....	19
4.1.2. Peças Móveis das Comportas Vagão.....	20
4.2. Comportas Ensecadeiras.....	21
4.2.1. Peças Fixas das Comportas Ensecadeiras	22
4.2.2. Peças Móveis das Comportas Ensecadeiras.....	22
4.3. Grelhas.....	24
4.3.1. Peças Fixas das Grelhas.....	26
4.3.2. Peças Móveis da Grelha	26
4.4. Descolmatador.....	27
5. Condição Limite de Funcionamento	31
6. Selecção de Cargas dos Ensaios	35
7. Selecção de Materiais	41
8. Selecção de Geometrias.....	45
9. Resultados	49
9.1. Base.....	51
9.2. Braço Principal	60
9.3. Braço Secundário	70
10. Conclusões.....	83
11. Referências Bibliográficas.....	87

Índice de figuras

Figura 1 – Descolmatador instalado na derivação para o Reservatório de Faro do Alentejo.	2
Figura 2 – Descolmatador instalado na derivação para o Reservatório de Faro do Alentejo.	3
Figura 3 – Garra de descolmatador com uma carga de detritos na fase final da operação de limpeza [2].	6
Figura 4 – Descolmatador de elementos articulados instalado na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.....	9
Figura 5 – Descolmatador com transportador de detritos associado, instalado na tomada de água da Albufeira do Pisão.....	11
Figura 6 – Descolmatador de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Reutte [2].....	12
Figura 7 – Descolmatador de correntes de arrasto instalado na Central Hídrica de Gössnitz [2].	13
Figura 8 – Descolmatador móvel de accionamento por cabo do fabricante Alstom [7].	14
Figura 9 – Equipamento auxiliar do descolmatador móvel de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Feistritz [2].	15
Figura 10 – Equipamento auxiliar do descolmatador móvel de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Feistritz[2].....	16
Figura 11 – Comportas vagão de dimensões 2000x3000 [mm ²] instaladas no canal Alvito-Pisão.	18
Figura 12 – Desenho em corte de um canal com descolmatador (à esquerda), grelha, ensecadeira e comporta vagão (à direita) a instalar no Circuito de Adução à Barragem de Odivelas.	19
Figura 13 – Balancim automático para manobra das comportas ensecadeiras instaladas na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.	22
Figura 14 – Elemento de comporta ensecadeira instalada na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova...23	
Figura 15 – Pormenor de vedação de comporta ensecadeira instalada na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.....	24
Figura 16 – Grelha fixa instalada na câmara de carga da Central Hidroelétrica de Aregos (EDP Douro), com espaçamento entre barras de 20 mm.	25
Figura 17 – Descolmatador de braços articulados que servirá de base para a evolução do estudo apresentado neste trabalho.....	28
Figura 18 – Descolmatador de braços articulados implantado no canal e respectiva grelha.....	29

Figura 19 – Descolmatador de braços articulados na posição totalmente aberto.	32
Figura 20 – Descolmatador de braços articulados na posição de saída da água – posição de maior esforço teórico.	33
Figura 21 – Descolmatador na posição de saída da água e representação dos esforços.	36
Figura 22 – Esforço aplicado pelo cilindro hidráulico e sua decomposição. ...	37
Figura 23 – Esforços aplicados no braço principal e respectivas decomposições.	37
Figura 24 – Esforços aplicados no braço secundário e respectiva decomposição.	39
Figura 25 – Geometria inicial da base do descolmatador.	45
Figura 26 – Geometria evoluída da base do descolmatador.	46
Figura 27 – Geometria inicial do braço principal do descolmatador.	47
Figura 28 – Geometria evoluída do braço principal do descolmatador.	47
Figura 29 – Geometria inicial do braço secundário do descolmatador.	48
Figura 30 – Geometria evoluída do braço secundário do descolmatador.	48
Figura 31 – Discretização aplicada à geometria inicial da base (a) e representação das condições de simulação aplicadas (b).	51
Figura 32 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria inicial em aço Carbono.	52
Figura 33 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria inicial em aço Carbono.	52
Figura 34 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] e correspondente coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304.	53
Figura 35 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria inicial em aço AISI 304.	53
Figura 36 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço Carbono.	54
Figura 37 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria melhorada em aço Carbono.	54
Figura 38 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço AISI 304.	55
Figura 39 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria melhorada em aço AISI 304.	55
Figura 40 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço Carbono.	56
Figura 41 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e a 1,4(b) (a vermelho) na geometria melhorada em aço Carbono.	56

Figura 42 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de Segurança (FOS) (b) na geometria melhorada de 8 para 6 mm em aço AISI 304.....	57
Figura 43 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,4 (b) na geometria melhorada de 8 para 6 mm em aço AISI 304.....	57
Figura 44 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria final da base do descolmatador em Alumínio 6061 com 10 mm de espessura.	58
Figura 45 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,4 (b) na geometria final em Alumínio 6061 com 10 mm de espessura.	59
Figura 46 – Pormenor da malha de elementos finitos aplicada à geometria inicial do braço principal.	60
Figura 47 – Representação das condições de fronteira aplicadas à geometria de partida do braço principal.	61
Figura 48 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço Carbono com 6 mm.	61
Figura 49 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço Carbono com 6 mm.	61
Figura 50 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria inicial em aço Carbono 6 mm.	62
Figura 51 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço AISI 304 com 6 mm.	62
Figura 52 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304 com 6 mm.	62
Figura 53 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.	63
Figura 54 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.	63
Figura 55 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria evoluída1 em aço Carbono 5 mm.	64
Figura 56 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.	64
Figura 57 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.	64
Figura 58 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.	65
Figura 59 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.	65
Figura 60 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 4 mm.	66
Figura 61 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço Carbono com 4 mm.	66

Figura 62 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,35 (b) na geometria evoluída ² em aço Carbono com 4 mm.	67
Figura 63 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída ² em aço Carbono com 4 mm.	67
Figura 64 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída ² em aço AISI 304 com 4 mm.	67
Figura 65 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída ¹ em aço AISI 304 com 4 mm.	68
Figura 66 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,35 (b) na geometria evoluída ² em aço AISI 304 com 4 mm.	68
Figura 67 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída ² em aço AISI 304 com 4 mm.	68
Figura 68 – Pormenor da malha de elementos finitos aplicada à geometria inicial do braço secundário: (a) Pormenor da pá e (b) Pormenor da zona da articulação.	70
Figura 69 – Representação das condições de fronteira aplicadas à geometria inicial do braço secundário.	70
Figura 70 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.	71
Figura 71 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.	71
Figura 72 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.	72
Figura 73 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.	72
Figura 74 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.	72
Figura 75 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.	73
Figura 76 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.	73
Figura 77 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.	73
Figura 78 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.	74
Figura 79 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.	74
Figura 80 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.	75

Figura 81 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.	75
Figura 82 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.	75
Figura 83 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.	76
Figura 84 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.	76
Figura 85 – Representação (a vermelho) em pormenor, das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 1,35 na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.	76
Figura 86 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.	77
Figura 87 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.	78
Figura 88 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.	78
Figura 89 – Representação (a vermelho) do coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.	78
Figura 90 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.	79
Figura 91 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.	79
Figura 92 – Representação (a vermelho) do coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.	79
Figura 93 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.	80
Figura 94 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.	80
Figura 95 – Solução final do descolmatador.	85

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste estudo. .	42
Tabela 2 - Variação de FOS em função da dimensão média dos elementos finitos.	50
Tabela 3 - Características das malhas das diferentes geometrias analisadas.	59
Tabela 4 - Características das malhas das diferentes geometrias do braço principal analisadas.	69
Tabela 5 - Características das malhas de elementos finitos das diferentes geometrias do braço secundário.	81
Tabela 6 - Características das geometrias iniciais ensaiadas.	83
Tabela 7 - Características das geometrias evoluídas finais ensaiadas.	84

1. Introdução

O desenvolvimento do presente trabalho integra-se no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) da Universidade de Aveiro que foi concretizado em conjunto com o Departamento de Engenharia da Universidade de Aveiro e a empresa metalomecânica Bóia & Irmão, S.A. com sede também em Aveiro.

A oportunidade do presente trabalho surgiu da necessidade de desenvolver um descolmatador de grelhas, que os especialistas desta área, apelidam, simplesmente, de "limpa-grelhas". O descolmatador é um equipamento que faz parte de um conjunto de outros equipamentos que actuam em série em sistemas de condução de água, onde existe a necessidade de instalar grelhas de protecção ou limpeza que ficarão colmatadas mais depressa ou menos dependendo da quantidade de detritos que sejam arrastados pela água. Assim, existe a necessidade de instalação de descolmatadores para repor as condições de protecção e ou limpeza bem como as condições iniciais de escoamento da água através da grelha.

De todos os equipamentos, que serão apresentados no 3.º capítulo deste trabalho e que são actualmente produzidos na Bóia & Irmão, S.A. só o descolmatador fica fora da produção, devido ao facto de não se justificar, até há cerca de um ano atrás, este desenvolvimento, uma vez que a nível nacional só existem dois representantes de marcas estrangeiras de

equipamentos semelhantes, estando totalmente implantados perante os clientes, com boas e reconhecidas qualidades.

Para desenvolver este estudo seleccionou-se o caso particular de instalação no Empreendimento da EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A. O caso concreto será a aplicação na Empreitada de Construção do 4.º e 5.º Troços do Canal de Ligação Alvito-Pisão, na Derivação para o Reservatório de Faro do Alentejo, como se pode ver na Figura 1 e Figura 2. Este canal de forma trapezoidal fará a adução de água entre a barragem do Alvito e a barragem do Pisão, ambas no distrito de Beja. O descolmatador que será desenvolvido terá aplicação num canal rectangular com vão de 1600 mm e uma altura de 2400 mm, que faz a intersecção com o canal Alvito-Pisão e conduzirá água ao futuro Reservatório de Faro do Alentejo.



Figura 1 – Descolmatador instalado na derivação para o Reservatório de Faro do Alentejo.



Figura 2 – Descolmatador instalado na derivação para o Reservatório de Faro do Alentejo.

Para o desenvolvimento de todos os passos deste trabalho estarão sempre presentes alguns dos conceitos inerentes da filosofia actual de concepção mecânica – *Intelligent Lightweight Design* (ILD).

O conceito de *Intelligent Lightweight Design* foi criado no seio da indústria automóvel, a partir da constante necessidade de evolução otimizada de todos os componentes, tanto a nível económico como funcional, devido aos desafios económicos e ambientais dos dias de hoje [1]. Assim, o ILD define como princípios básicos a utilização dos materiais ideais nas quantidades ideais para as aplicações específicas, a optimização das formas geométricas e a topologia dos componentes.

Quando aplicados os princípios do ILD pode-se esperar uma diminuição dos custos de produção, a redução da potência efectiva instalada no equipamento a desenvolver, traduzindo uma diminuição do consumo energético que implica directamente nos custos de utilização, na poupança dos recursos naturais e diminuição dos respectivos custos ambientais.

| Introdução

No próximo capítulo serão estabelecidos os objectivos para este trabalho.

2. Objectivos

O objectivo deste trabalho é o aprofundar dos conceitos inerentes à concepção de um descolmatador de grelhas que, em linguagem corrente nos especialistas desta área, se designa frequentemente por “limpa-grelhas”, bem como a optimização da estrutura de um equipamento proposto para análise.

Os descolmatadores foram inventados a partir do momento em que foram criadas as primeiras centrais de produção de energia hidroeléctrica [2], onde houve a necessidade de instalar grelhas de protecção às turbinas de geração de energia. Sem a protecção destas grelhas, as turbinas teriam um desgaste prematuro ou, no limite, poderiam levar à ruína destas, devido aos detritos que são arrastados pelos cursos de água naturais ou artificiais [3].

Nos dias de hoje, os descolmatadores têm campos de aplicação bastante mais diversificados, como são os casos de canais de adução de água – em grelhas de limpeza ou simplesmente grelhas de protecção no atravessamento de obstáculos como pontes, túneis e sifões.

Outros dos casos de aplicação, não menos comuns e sempre associados à instalação de grelhas, são as tomadas de água de grupos de bombagem, estações de gradagem em estações de águas residuais domésticas ou industriais, tomadas de água em caixas de carga de centrais mini-hídricas,

centrais hídricas e em diversos casos em descarregadores de superfície de albufeiras.

Os detritos poderão ser objectos tão díspares como, árvores inteiras, troncos de árvores, ramos de árvores, algas, pedras, electrodomésticos, pneus, garrafas ou animais mortos. Na Figura 3 podemos ver um exemplo do aspecto de uma garra de limpeza com uma carga de detritos de todo o tipo, onde até uma bola de futebol se pode observar a flutuar juntamente com diversos detritos.



Figura 3 – Garra de descolmatador com uma carga de detritos na fase final da operação de limpeza [2].

Assim, uma vez que as grelhas executam a protecção referida, que funciona como filtro, estas ficam sujeitas à colmatção. Quando se verifica este fenómeno, os referidos detritos têm de ser retirados de modo expedito, sendo este o sentido da existência deste equipamento que se designa por descolmatadores.

3. Enquadramento

A empresa Bóia & Irmão, S.A. desde o início da década de 90 que tem tentado afirmar-se no mercado da produção de equipamentos hidromecânicos. Desde então, a Bóia & Irmão, S.A. tem vindo a especializar-se na concepção, fabrico e montagem de todo o género de equipamentos hidromecânicos como por exemplo comportas vagão, comportas ensecadeiras vagão e de corredeira, com actuações por diferenciais, viga pescadora ou cilindros hidráulicos. Também têm sido produzidas comportas de charneira vertical, comportas de charneira horizontal ou de Voulé, e diversos tipos de grelhas onde, em muitos casos, irão trabalhar descolmatadores.

Nos sistemas de condução/adução de água em canal aberto, canal este que é uma conduta em que a água flui com uma superfície livre [4], constituídos em muitos casos pela aplicação em série de diversos equipamentos hidromecânicos como as grelhas (simplesmente de protecção ou para filtração/limpeza), as ensecadeiras (para ensecar em situações de manutenção) e as comportas vagão (para regular o caudal) cada vez mais é exigido ou faz parte de início do projecto de arquitectura posto a concurso, a aplicação de equipamentos de limpeza das grelhas como são o caso de descolmatadores.

Como foi mencionado nos parágrafos anteriores e em termos estratégicos, a Bóia & Irmão, S.A. tem todo o interesse em poder propor

soluções de equipamentos, principalmente nas situações em que somente o descolmatador fica fora da linha dos fornecimentos.

É de acordo com os pontos apresentados anteriormente, numa estratégia de médio prazo, que se enquadra o apoio da empresa Bóia & Irmão, S.A. a este trabalho de desenvolvimento de um descolmatador.

3.1. Tipos de Descolmatadores

Os diversos tipos de descolmatadores existentes são função da aplicação particular onde estão inseridos, nomeadamente do tipo de detritos a retirar, do comprimento de limpeza de grelha e a largura de limpeza a efectuar.

Dos diversos tipos de descolmatadores existentes destacam-se dois grandes grupos: (i) os descolmatadores fixos e (ii) os descolmatadores móveis. Habitualmente, salvo casos muito particulares, esta diferença entre fixo ou móvel prende-se com a largura de grelha a limpar poder corresponder à largura do elemento de limpeza associado a cada descolmatador, ou não, e o movimento de limpeza ter de ser efectuado de modo sistemático e através de vários movimentos de translação repetitivos para uma nova posição, até perfazer a totalidade da largura da grelha a limpar.

Os descolmatadores fixos podem ser de inúmeros tipos, com inúmeras variantes, entre os quais se salientam:

- Descolmatadores de elementos articulados de actuação óleo-hidráulica por servomotores;
- Descolmatadores de accionamento por cabo, através de diferencial eléctrico;
- Descolmatadores de correntes de arrasto de actuação eléctrica;

Os descolmatadores de braços articulados de actuação óleo-hidráulica por servomotores, são os mais frequentes em situações em que a

profundidade máxima é de 6 metros (desnível entre a plataforma de manobra e o fundo da grelha a limpar). Na Figura 4 pode ver-se um caso de aplicação em que a largura do vão a limpar é de 2600 mm, a altura de desnível é de 5500 mm e a grelha tem uma inclinação de 70° com a horizontal. Em situações muito específicas podem ter-se desníveis da ordem de 15 a 20 m, o que faz com que estas situações não sejam técnica, económica e arquitecturalmente (situação muito agressiva visualmente) viáveis.

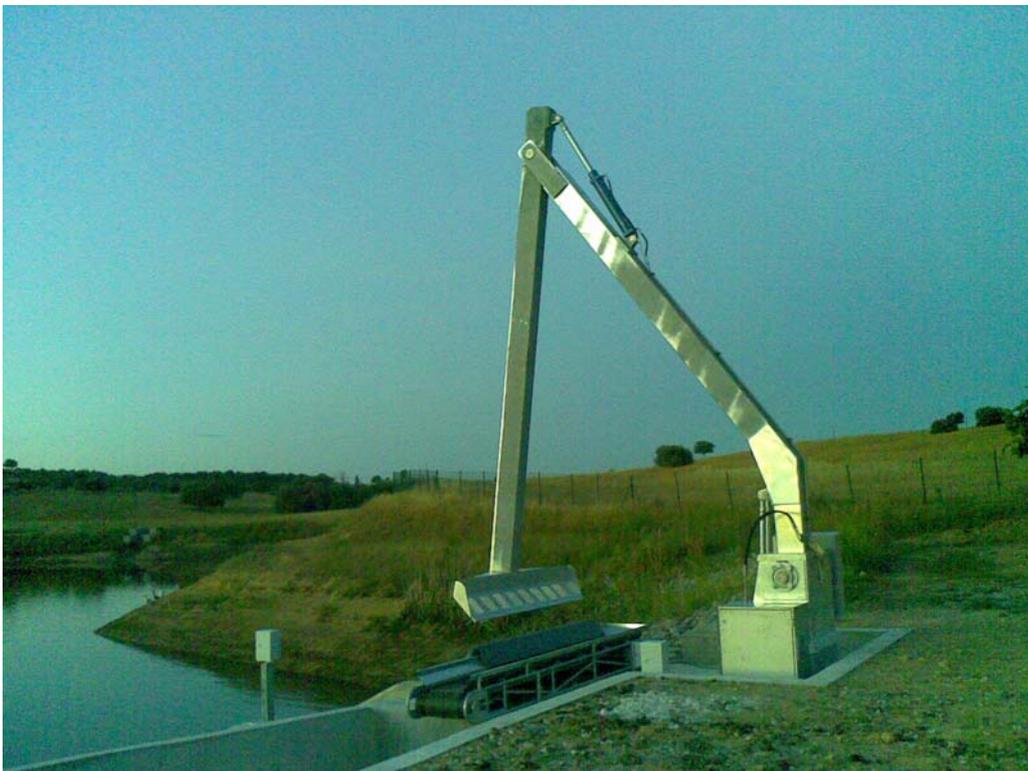


Figura 4 – Descolmatador de elementos articulados instalado na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.

A construção deste tipo de descolmatadores deverá ser robusta [5], onde existe uma base, que fica firmemente fixa à laje da plataforma de manobra, a qual possui duas chumaceiras para articular o braço principal. Nesta base fica também o apoio do cilindro hidráulico de accionamento do braço principal. O braço principal tem normalmente uma forma tubular de secção rectangular fixa, que possui nas extremidades pontos de ligação com

a base e com o braço secundário. Também neste braço principal terá de haver dois pontos de apoio dos cilindros hidráulicos próximos das extremidades.

O conjunto fica completo com o braço secundário que é aquele que possui na extremidade uma régua com um raspador, devidamente solidário com o braço de modo a conferir a rigidez necessária e garantir que a limpeza é efectuada de modo regular por toda a grelha, e não somente na zona de contacto do ponto de união com o braço, devido à flexão da régua. O braço secundário tem na extremidade oposta à régua quer o ponto de ligação ao braço principal quer o ponto de ligação ao cilindro hidráulico.

O cilindro hidráulico de actuação do braço principal é o responsável pela força necessária à retirada dos detritos bem como por vencer o peso próprio dos braços principal e secundário. O cilindro hidráulico de actuação do braço secundário tem como função principal acompanhar a grelha no movimento vertical do braço principal e como função secundária garantir a pressão necessária sobre a grelha, de modo a arrancar limos, algas ou outros detritos que estejam fixos à grelha.

A energia necessária à actuação dos cilindros hidráulicos é disponibilizada numa unidade óleo-hidráulica que, habitualmente, fica colocada na base da máquina, no local anexo também à implantação do quadro eléctrico de comando.

Neste tipo de aplicações existe um sistema associado de remoção dos detritos, que depois de arrastados pela régua instalada no braço secundário, são despejados sobre pequenos transportadores de tela que, em sistemas automatizados, fazem a condução destes para um contentor ou vazadouro para posterior despacho para o tratamento adequado (aterro ou central de reciclagem), como se pode ver na Figura 5.



Figura 5 – Descolmatador com transportador de detritos associado, instalado na tomada de água da Albufeira do Pisão.

Em situações cada vez menos usuais, por razões ambientais, existem aplicações em que os detritos, depois de retirados da grelha, são conduzidos por uma conduta de descarga para um curso de água próximo ou vazadouro, para degradação natural.

Do ponto de vista das vantagens deste tipo de descolmatador é a possibilidade de poder actuar em grelhas com qualquer inclinação, até ao extremo de limpar grelhas instaladas na vertical.

O desenvolvimento deste trabalho centra-se neste tipo de descolmatadores, por serem aqueles que terão maior procura nos próximos anos, em que se prevê uma expansão muito significativa das redes de regadio que se estão a implementar em Portugal, nomeadamente no Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira ou no Empreendimento da Empresa de Desenvolvimento de Infraestruturas do Alqueva – EDIA.

Os descolmatadores de accionamento por cabo, através de diferencial eléctrico, são muito utilizados quando as alturas de desnível ascendem a 6 m até desníveis acima de 60 m, com é o caso da barragem de Itaipu no Brasil [2]. Na Figura 6 pode-se ver um exemplo de um descolmatador fixo de accionamento por cabo.



Figura 6 – Descolmatador de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Reutte [2].

Este tipo de descolmatador é constituído por uma estrutura metálica fixa, dimensionada para ter capacidade de resistir ao esforço exercido na operação de elevação dos detritos, onde será instalado o guincho (normalmente) eléctrico. Este guincho é o mecanismo de accionamento da peça móvel que efectua propriamente a recolha dos detritos, que é ligado a esta através de um cabo de aço resistente às cargas a elevar, que podem ter valores até 5 toneladas [6].

O elemento móvel faz o movimento descendente conduzido por duas guias em perfis que podem estar encastrados no betão ou simplesmente fixos por apoios metálicos à grelha. Este elemento é muitas vezes composto por uma régua provida de dentes que articula numa outra régua que serve de base à primeira, formando uma garra com capacidade para armazenar os detritos durante o trajecto ascendente de recolha.

Uma das desvantagens deste tipo de descolmatador é a necessidade da grelha ter uma inclinação inferior a 80° com a horizontal e não ser praticável em situações de grelhas verticais.

Descolmatadores de correntes de arrasto de actuação eléctrica, são utilizados em situações em que a largura de limpeza é demasiada para se poder aplicar um descolmatador de braço articulado e onde a altura de desnível é superior a 6 m.

Os descolmatadores de correntes de arrasto são constituídos por duas cabeceiras, normalmente com uma configuração semelhante a um L, unidas uma à outra nas extremidades por meio de um ou mais tirantes fixos e por meio de um veio de accionamento ao qual está acoplado um motoredutor. As cabeceiras servem de guias para as correntes se rodam em circuito contínuo, do mesmo modo que um vulgar transportador de arrasto, como se pode ver na Figura 7. À semelhança destes transportadores, estes descolmatadores têm uma ou mais réguas de limpeza solidárias com as correntes e permitem fazer o arrasto dos detritos através da grelha até ao topo desta, onde deverá ser montado um sistema associado de remoção dos detritos já mencionado na descrição dos outros descolmatadores.



Figura 7 – Descolmatador de correntes de arrasto instalado na Central Hídrica de Gössnitz [2].

Neste tipo de descolmatador todo o sistema pode ser fixo ou pode haver variantes em que o sistema é articulado no topo, de modo a evitar que todo o sistema esteja sempre emerso e este possa influenciar o escoamento.

Os descolmatadores móveis podem ser de vários tipos mas, de acordo com o referido, esta diferença prende-se com a largura de grelha a limpar poder corresponder à largura do elemento de limpeza associado a cada descolmatador, ou não, e o movimento de limpeza ter de ser efectuado de modo sistemático e através de vários movimentos de translação repetitivos para uma nova posição, até perfazer a totalidade da largura da grelha a limpar.

No essencial, os descolmatadores móveis não são mais do que as mesmas máquinas que as fixas, às quais se aplicam mecanismos de translação quase sempre associados à instalação de um caminho de rolamento perpendicular à grelha a limpar. Neste caminho circula uma plataforma (carruagem) que tem integrado um sistema de posicionamento em pontos consecutivos de paragem, para corresponder à limpeza ordenada da grelha.

Na Figura 8 pode observar-se um exemplo de um descolmatador móvel de accionamento por cabo.



Figura 8 – Descolmatador móvel de accionamento por cabo do fabricante Alstom [7].

Quando se fala neste tipo de descolmatadores móveis é usual a situação em que dadas as dimensões dos sistemas em que estão inseridos, se torna necessário a combinação ou enriquecimento da solução com equipamentos auxiliares de modo a ter maior rendimento do equipamento base. Na Figura 9 pode observar-se uma grua hidráulica telescópica equipada com uma garra para facilitar a retirada de detritos cuja dimensão poderia dificultar a operação do equipamento base. Um outro equipamento auxiliar é o que se pode observar na Figura 10 que possibilita a concentração de detritos flutuantes de modo a aumentar a quantidade de detritos retirados da albufeira em cada ciclo de limpeza.



Figura 9 – Equipamento auxiliar do descolmatador móvel de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Feistritz [2].



Figura 10 – Equipamento auxiliar do descolmatador móvel de accionamento por cabo instalado na Central Hídrica de Feistritz[2].

4. Descrição dos Equipamentos em Estudo

A empresa Bóia & Irmão, S.A. é uma indústria metalomecânica com cerca de 80 anos de existência e que tem passado pela exploração de diversos mercados tão díspares como a construção de máquinas para a indústria da transformação de madeiras, construção de máquinas para a indústria da transformação de pedras ornamentais e construção de maquinaria para convés de navios como é o caso de guinchos de manobras, guinchos de pesca, enroladores de redes. Com o declínio destes sectores ao nível nacional, houve a necessidade de redireccionar o rumo da empresa para mercados como a assistência na manutenção industrial, a instalação de estações de tratamento de águas residuais e ou industriais e o sector da concepção, fabrico e instalação de equipamentos hidromecânicos.

Dos equipamentos hidromecânicos que vêm descritos à frente convém salientar, desde já, uma diferença marcante entre comporta vagão e comporta ensecadeira. Esta diferença prende-se com o facto de a primeira possuir pelo menos quatro rodas do lado jusante de modo a poder ser manobrada “em carga” e logo produzir menor atrito do que uma comporta sem rodas. As ensecadeiras como o próprio nome indica são concebidas para ensecar determinadas zonas ou órgãos sobretudo para operações de manutenção. Dadas as condições de funcionamento serem menos exigentes a estrutura das ensecadeiras normalmente é mais ligeira do que as comportas vagão.

4.1. Comportas Vagão

As comportas vagão são equipamentos projectados para efectuar regulação de caudal em sistemas de condução de água, podendo trabalhar em águas desequilibradas em situações de corte total desde a posição limite de totalmente aberta até à estanquidade total. No seu conjunto, estes equipamentos são constituídos por peças fixas, peça móvel designada por tabuleiro e mecanismo de actuação que pode ser manual, eléctrico ou óleo-hidráulico, como é o caso do exemplo apresentado na Figura 11 que mostra um conjunto de três comportas vagão instaladas no canal Alvito-Pisão.



Figura 11 – Comportas vagão de dimensões 2000x3000 [mm²] instaladas no canal Alvito-Pisão.

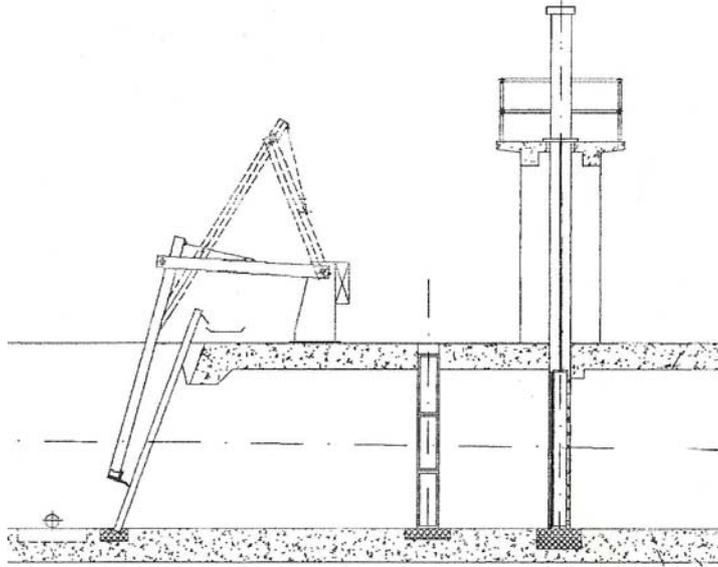


Figura 12 – Desenho em corte de um canal com descolmatador (à esquerda), grelha, ensecadeira e comporta vagão (à direita) a instalar no Circuito de Adução à Barragem de Odivelas.

4.1.1. Peças Fixas das Comportas Vagão

As peças fixas são constituídas por uma soleira e dois montantes, executados cada um deles em construção metálica electrosoldada e unidos entre eles por ligação aparafusada à montagem, passando a ligação permanente com recurso a soldadura, depois de devidamente niveladas e posicionadas.

A soleira é constituída por um perfil normalizado de aço S235 JR e por duas bases de assentamento dos dois montantes, executada em chapa de aço S235 JRG2 devidamente soldada por processos de soldadura devidamente aprovados e executado por soldadores qualificados certificados. O perfil de aço é revestido, na face de contacto com o tabuleiro, com chapa de aço AISI 304, devidamente maquinada após todas as operações de soldadura em oficina, de forma a minorar qualquer efeito de empenos causados pelos processos de soldadura.

Os montantes são constituídos basicamente por três cabeceiras: a de vedação, a de guiamento lateral e a de contra-guiamento ou guiamento anterior. A cabeceira de vedação é constituída por um perfil normalizado de

aço S235 JR e por uma base de ligação à soleira, executada em chapa de aço S235 JRG2 soldada. O perfil de aço é revestido, na face de vedação com o tabuleiro, com chapa de aço AISI 304, maquinada após todas as operações de soldadura em oficina. A cabeceira de guiamento lateral é constituída por um perfil normalizado de aço S235 JR em forma de Vignole ligeiro, onde haverá deslizamento das guias em bronze do tabuleiro. A cabeceira de contra-guiamento é constituída por um perfil construído a partir de chapa quinada de aço AISI 304 e por uma base de ligação aparafusada à soleira, executada em chapa de aço S235 JRG2 soldada.

Os elementos que constituem as peças fixas, soleira e montantes, são preparados para levar diversos afinadores, em varão roscado, ao longo dos comprimentos, de modo a permitirem o perfeito nivelamento horizontal e vertical.

Todas as soldaduras de ligação do aço Carbono ao aço AISI 304 são executadas com eléctrodo de transição do tipo 309, vulgarmente designado de P5.

Para dar por concluída a construção das peças fixas executa-se a furação de ligação da soleira e dos dois montantes, procedendo-se posteriormente a uma pré-montagem, ficando estas prontas para o transporte nesta situação.

4.1.2. Peças Móveis das Comportas Vagão

O tabuleiro da comporta será constituído essencialmente por uma chapa grossa, para garantir preponderância ao fecho, e por rodas em St 60 com uma dureza superficial de HB200 com eixos em aço AISI 410 tratado ou equivalente com os respectivos casquilhos em bronze autolubrificante do tipo Lubrite ou equivalente.

As estanqueidades nas laterais e na cabeceira frontal serão em borracha sintética de dureza 65° Shore de perfil “nota de música” revestidas a PTFE, para reduzir o atrito, sendo que na soleira a estanqueidade é garantida por

perfil de borracha em barra rectangular em material com as mesmas características.

A ligação entre o tabuleiro da comporta e o órgão de manobra, que em quase todos os casos que fizemos era um cilindro hidráulico, é feita por um conjunto de barras de suspensão interligadas por cavilhões em aço AISI 420.

O fornecimento deste tipo de equipamentos inclui um conjunto de acessórios, tais como vigas de calagem, tapamentos e bordaduras que fazem a protecção dos bordos de betão contra o contacto dos tabuleiros nas operações de manutenção.

4.2. Comportas Ensecadeiras

As comportas ensecadeiras são equipamentos projectados para isolar determinados órgãos, equipamentos ou troços de canais de modo a poderem ser efectuadas operações de manutenção (ou outras) em locais normalmente submersos. Este tipo de elementos é por princípio, menos complexo do que as comportas vagão. Porém, em alguns casos, o grau de condicionalismo é tal que também podem ficar elementos bastante complexos. Um exemplo desta complexidade é o caso de uma ensecadeira que tenha de cortar caudal, pelo peso próprio, desde o ponto máximo de abertura até à posição de totalmente fechada e, adicionalmente, estar preparada com uma válvula de equilíbrio de modo a, na operação de retirada, esta se efectue com as águas equilibradas. Todos estes requisitos levam muitas vezes a ter soluções muito compactas e, conseqüentemente, complexas.

No seu conjunto, estes equipamentos são constituídos por peças fixas, peça móvel, designado de tabuleiro e mecanismo de actuação que pode ser por grua móvel. Na manobra da ensecadeira e entre a grua e esta recorre-se, normalmente, a um balancim automático, que é uma peça que permite a colocação e retirada dos tabuleiros da posição de serviço, conforme se mostra na Figura 13.



Figura 13 – Balancim automático para manobra das comportas ensecadeiras instaladas na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.

4.2.1. Peças Fixas das Comportas Ensecadeiras

As peças fixas das comportas ensecadeiras são de construção muito semelhante às comportas vagão, com a diferença que, habitualmente, só têm duas cabeceiras por cada montante, uma para vedação e outra para guiamento anterior e lateral na mesma peça.

4.2.2. Peças Móveis das Comportas Ensecadeiras

A peça móvel de cada conjunto de ensecadeira é designada por tabuleiro e pode ter um número de elementos que vai de um único até praticamente um número ilimitado, uma vez que estes elementos podem ser sobreponíveis e intermutáveis entre eles. Porém, nas situações mais

comuns, será sensato, as ensecadeiras de múltiplos elementos não terem mais de quatro.

Nas comportas ensecadeiras, nos tabuleiros de vários elementos, estes podem ser constituídos por uma estrutura executada em construção metálica electrosoldada com recurso a perfis normalizados de aço S235 JR, conforme se mostra na Figura 14, e uma chapa de face unida à estrutura, que habitualmente fica para jusante de forma a possibilitar a aplicação directa da borracha de estanqueidade.



Figura 14 – Elemento de comporta ensecadeira instalada na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.

A estrutura dos tabuleiros tem, de ambos os lados e na zona de encosto na peça fixa, diversos pontos de enchimento a bronze com recurso a chama oxiacetilénica, de modo quer a diminuir o atrito entre as partes metálicas quer a garantir boa preservação da peça fixa.

O ponto de maior importância nos tabuleiros, são os elementos de vedação que, lateralmente, são constituídos por um perfil “nota de música” em borracha sintética de dureza Shore 65, e inferiormente, por uma barra

direita também em borracha sintética Shore 65. As duas vedações são fixas ao tabuleiro por meio de uma barra maquinada em aço AISI 316 que fica a sobrepor a borracha e é fixa através de parafusos também em aço AISI 316 com anilhas Dubo. Depois desta montagem o tabuleiro está pronto a ser entregue em obra. Na Figura 15 pode ver-se um pormenor dos elementos de vedação aplicados nas diversas comportas.



Figura 15 – Pormenor de vedação de comporta ensecadeira instalada na Estação Elevatória de Aravil, no Aproveitamento Hidroagrícola de Idanha-a-Nova.

4.3. Grelhas

Quando nos referimos a um qualquer tipo de descolmatador não nos podemos esquecer que a razão de ele existir é a existência de uma grelha. Por definição, em termos gerais, uma grelha é um equipamento composto por um conjunto de barras verticais, que actuam perpendicularmente ao sentido do escoamento, que terão de levar reforços horizontais para dar firmeza ao conjunto e evitar vibrações provocadas pelos efeitos do escoamento entre as barras. Este conjunto de barras que constituem a grelha propriamente dita é designado por painel. Cada grelha pode ter vários painéis que podem ser fixos directamente às estruturas de betão ou pode haver necessidade, por diversas razões, de existir uma estrutura de apoio dos painéis, semelhante ao esqueleto de uma comporta, de modo a formar um conjunto robusto.

No dimensionamento das grelhas, a condição extrema de utilização que mais vezes é empregue é a colmatção total. Esta situação nunca deverá acontecer, daí a necessidade de aplicação de descolmatadores. Porém, em caso de falência de todos os mecanismos de segurança e limpeza, esta situação pode ocorrer, o que levará a esforços muito significativos quando comparados com as condições de funcionamento normais.

Em termos de concepção as grelhas podem ser fixas ao betão sem peças fixas e de carácter permanente, como é o caso que se mostra na Figura 16 amovíveis com fixação ao betão com peças fixas embebidas no betão ou móveis com peças fixas. As grelhas móveis podem ser de correção ou de vagão.



Figura 16 – Grelha fixa instalada na câmara de carga da Central Hidroelétrica de Aregos (EDP Douro), com espaçamento entre barras de 20 mm.

As grelhas de protecção de equipamentos a jusante destes têm uma importância fundamental na preservação, durabilidade e fiabilidade dos inúmeros equipamentos como, por exemplo, as turbinas, bombas, elementos de filtração fina, tamizadores ou, numa escala mais abrangente, à entrada de estações de tratamento de águas residuais. Nesta função, as

grelhas podem considerar-se uns filtros grosseiros, dependendo do tamanho da passagem permitida em cada uma delas.

Outra das aplicações de grelhas são a protecção contra a entrada de pessoas ou animais em obstáculos como túneis e sifões, que aparentemente não afecta o sistema, mas tem consequências graves para os envolvidos. Estas situações são potencialmente mais prováveis em canais abertos de adução de água.

As diferentes aplicações das grelhas implicam directamente na solução construtiva destas. Porém, irão condicionar essencialmente a definição do afastamento entre barras verticais e horizontais, que por sua vez definem a secção máxima de passagem de objectos pela malha da grelha. Podem surgir situações de grelhas com 150 mm de afastamento entre barras até dimensões de 20 mm, influenciando directamente a velocidade de colmatção, implicando na frequência de trabalho do descolmatador.

4.3.1. Peças Fixas das Grelhas

As peças fixas são constituídas por uma soleira e dois montantes, executados cada um deles em construção metálica electrosoldada e unidos entre eles por ligação aparafusada à montagem, passando a ligação permanente com recurso a soldadura, depois de niveladas e posicionadas.

4.3.2. Peças Móveis da Grelha

A grelha é composta por duas peças móveis e cada uma é dividida num número de painéis que esteja de acordo com a largura total da grelha (não maiores do que 3 m de largura por razões de posterior manutenção) que estão solidários com uma estrutura móvel.

A estrutura de cada grelha é constituída por uma estrutura executada em construção metálica electrosoldada com recurso a perfis normalizados

de aço S235 JR. Cada grelha é constituída por barras direitas em aço S235 JR, igualmente espaçadas com recurso a casquilhos de aço AISI 304 construídos a partir de tubo, que se tornam solidários através de tirantes, também em aço AISI 304, roscados nas extremidades.

4.4. Descolmatador

Associado aos equipamentos mencionados atrás existem os descolmatadores em cerca de 90% dos casos onde haja a aplicação de grelhas de protecção.

Dadas as condições de mercado, no que diz respeito à quantidade de concorrência, à qualidade dos produtos existentes e à implantação e boa aceitação por parte dos clientes finais, o descolmatador a desenvolver terá de ser robusto, fiável, economicamente vantajoso para os clientes e cada vez mais, amigo do ambiente quer na óptica dos utilizadores quer ao nível da construção.

A abordagem da concepção do descolmatador efectuada de acordo com os princípios indicados no parágrafo anterior coincide, em muitos dos aspectos, com os conceitos mais recentes de concepção mecânica designados por *ILD – Intelligent Lightweight Design*.

O ponto de partida para a evolução do descolmatador estudado no âmbito deste trabalho é o que se apresenta na Figura 17, inspirado na estrutura da maioria dos descolmatadores de braços articulados existentes que, na essência, cada um dos braços é construído a partir de perfis tubulares de secção rectangular em aço carbono.

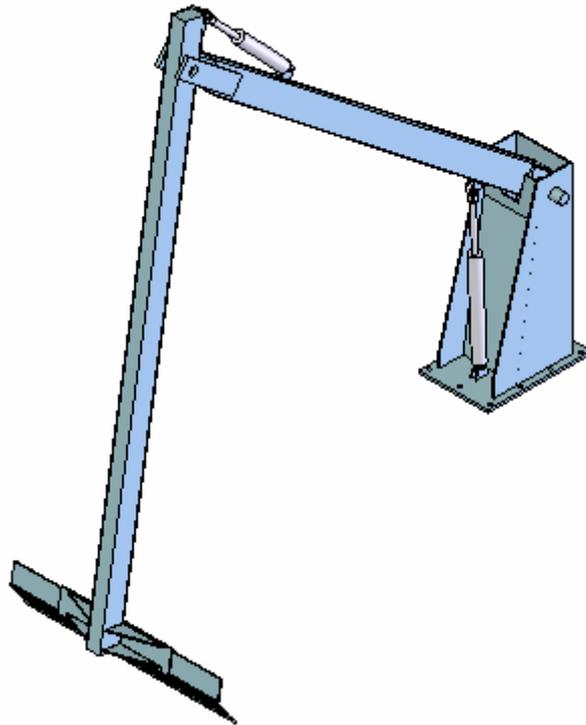


Figura 17 – Descolmatador de braços articulados que servirá de base para a evolução do estudo apresentado neste trabalho.

O funcionamento do descolmatador poderá ser de comando manual local, por temporização pré-definida e por detecção de perda de carga na grelha, definida pela diferença dos níveis de água existentes a montante e a jusante da grelha [8]. Com a instalação do descolmatador são igualmente instalados, sobretudo em sistemas de funcionamento automático, sensores de nível que fazem a leitura a montante e a jusante da grelha. Aumentando a diferença de nível entre os dois pontos de leitura detecta-se um aumento da perda de carga gerada pela grelha que significa que o grau de colmatção está a aumentar devido ao acumular de detritos retidos na grelha. Para a melhor interpretação desta descrição convém ter presente, sistema global que se encontra representado na Figura 18.

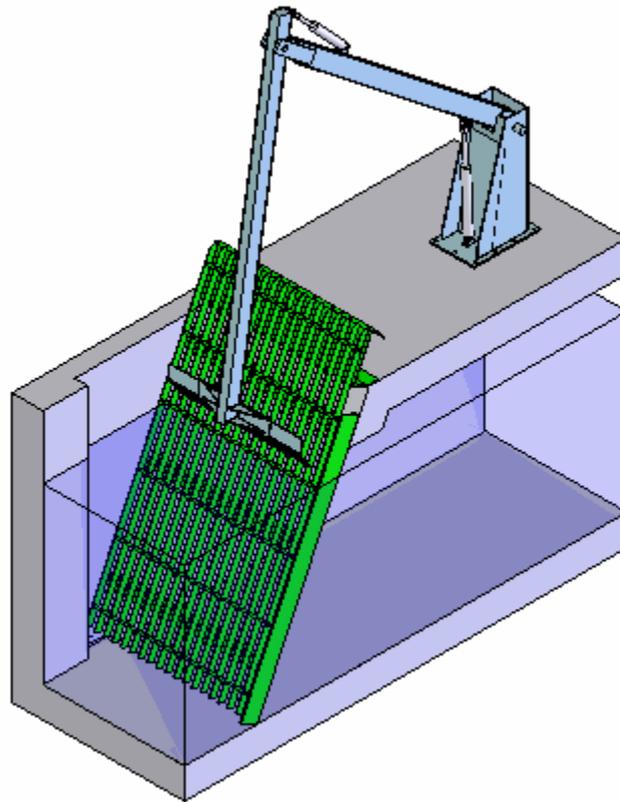


Figura 18 – Descolmatador de braços articulados implantado no canal e respectiva grelha.

Quando é transmitido o sinal de diferença de nível, em sistemas automáticos, é dada ordem de arranque à unidade óleo-hidráulica que gera energia para actuação dos cilindros dos braços articulados. O primeiro movimento é de abertura total do braço principal e do braço secundário, até começar a fazer o movimento de descida, com o conjunto a chegar ao fundo do canal com o braço secundário ainda completamente aberto. Nesta altura o braço principal está imóvel enquanto o secundário faz o movimento de aproximação da grelha, começando a abraçar os detritos contra esta. Quando o contacto da régua instalada no braço secundário com a grelha é iniciado, começa o movimento coordenado de subida do braço principal com o acompanhar da grelha pelo braço secundário, arrastando os detritos até à posição limite superior, descarregando-os no dispositivo associado de evacuação.

5. Condição Limite de Funcionamento

Nas manobras especificadas no capítulo anterior é necessário centrar o estudo em duas situações chave relativamente aos esforços a que estão sujeitos cada um dos elementos que fazem parte do conjunto do descolmatador. Assim, tem-se uma situação inicial em que o conjunto dos braços está totalmente aberto, como se pode ver na Figura 19, e, por acção do peso próprio, é transmitido um esforço à base de apoio do descolmatador que tende a arrancar essa base da sua fixação. A outra situação é aquela em que a régua está totalmente carregada de detritos e sai da água provocando um esforço adicional devido à ausência do efeito da impulsão da água.

Concretizando a situação dos braços totalmente abertos, o momento provocado pelo peso próprio dos braços, corresponde à aplicação de um momento flector na base de apoio, igual à distância desta ao centro de gravidade do conjunto dos dois braços, multiplicado pelo valor do peso próprio do mesmo conjunto.

A segunda situação é aquela em que a régua está totalmente carregada de detritos que são arrastados pela grelha acima, mas onde o peso dos detritos é contrariado pela acção da impulsão a favor do esforço de manobra, até à saída da água, altura em que o efeito da impulsão provocada pela água deixa de se fazer sentir. Nesta situação, ilustrada na Figura 20, além da falta de impulsão existe um fenómeno de aumento da

força de atrito entre os detritos e a grelha, uma vez que o coeficiente de atrito de uma superfície molhada para seca aumenta consideravelmente. No limite a frequência das manobras é tão larga que permitirá secar a grelha entre manobras.

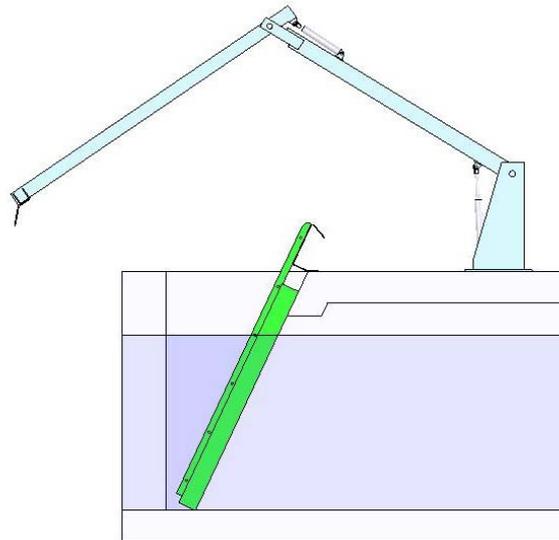


Figura 19 – Descolmatador de braços articulados na posição totalmente aberto.

A segunda situação é aquela em que a estrutura do descolmatador sofre as maiores solicitações, mas tem o condicionalismo de estar directamente relacionado com o nível de água no canal, que nem sempre poderá estar a uma cota fixa, bem como, também no limite, poderá ter um nível muito baixo. Por este facto, parte-se do princípio que, se o nível não está no máximo, o descolmatador não tem que trabalhar uma vez que os sensores de nível têm uma gama de funcionamento do nível máximo para baixo.

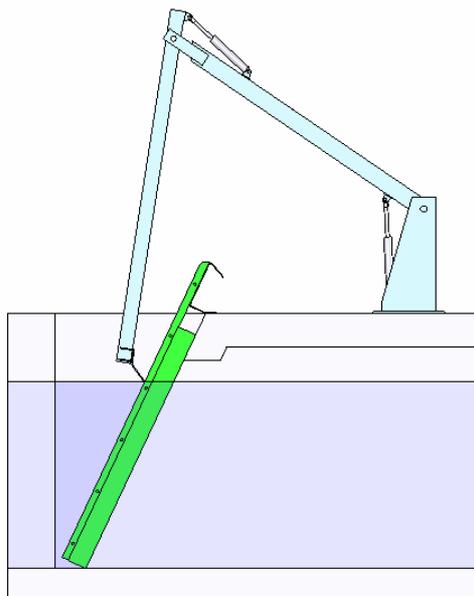


Figura 20 – Descolmatador de braços articulados na posição de saída da água – posição de maior esforço teórico.

Em qualquer uma das situações de carga extrema, a unidade hidráulica que comanda o accionamento dos cilindros hidráulicos está preparada para emitir um alarme de pressão excessiva criado por um dos vários pressostatos instalados. Após a activação deste alarme, todo o sistema fica bloqueado até ser intervencionado localmente, para averiguação do motivo desta paragem, que pode passar por um encravamento de algum dos detritos ou simplesmente o objecto a retirar do canal tem dimensões que o descolmatador não está preparado para retirar.

6. Seleção de Cargas dos Ensaios

A capacidade de remoção de detritos considerada como ponto de partida para o dimensionamento inerente a este estudo é $m=500$ kg de massa de detritos. Este valor baseia-se no caso extremo de haver a necessidade de remover, por exemplo, um animal morto de raça bovina.

Em termos de capacidade do descolmatador como máquina funcional, por agora não nos vamos preocupar com o desempenho da componente hidráulica, uma vez que, resistindo em termos estruturais é só uma questão de dimensionar cilindros e unidade hidráulica para os esforços pretendidos.

A aplicação de uma carga $P=5000$ N na extremidade do braço secundário vai provocar um momento flector no ponto A (eixo de rotação entre a base e o braço articulado principal), de acordo com a Figura 21. Para obter o valor do esforço a aplicar no cilindro hidráulico, considera-se que o somatório de todos os momentos provocados pelas várias forças envolvidas têm de ser nulo, conforme a equação

$$\sum M_A = 0. \quad (1)$$

Neste raciocínio assume-se que o ponto B (eixo de rotação entre o braço articulado principal e o secundário) está imóvel devido à ligação em carga do cilindro hidráulico de actuação do braço secundário. Assim,

$$P \cdot L + F_C \cdot L_1 = 0. \quad (2)$$

Para $P=5000\text{ N}$, $L=2,9\text{ m}$ e $L_1=0,4\text{ m}$ resulta

$$F_C = 36.250\text{ N}$$

Como entre a vertical e a inclinação do cilindro existe um ângulo $\alpha=2,7^\circ$, resulta que força real a aplicar no cilindro F_{Cxl} é

$$F_{Cxl} = \frac{F_C}{\cos 2,7^\circ} \quad (3)$$

$$F_{Cxl} = 36.290\text{ N}$$

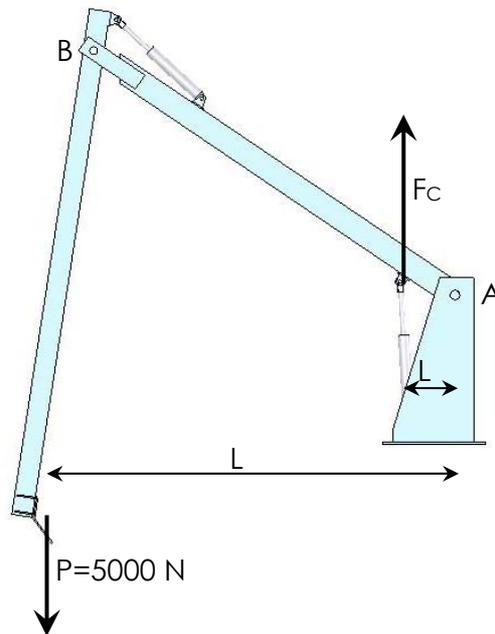


Figura 21 – Descolmatador na posição de saída da água e representação dos esforços.

Com a determinação do esforço necessário a aplicar no cilindro hidráulico, pode passar-se a determinar a reacção aplicada na base do descolmatador, decompondo a força real a aplicar no cilindro F_{Cxl} . Uma das componentes é perpendicular ao eixo do braço principal e outra é coincidente com o eixo deste braço, que será responsável pelo esforço imputado à base do descolmatador, como se pode ver na Figura 22.

$$\vec{F}_{Cxl} = \vec{F}_{Cxl_x} + \vec{F}_{Cxl_y} \quad (4)$$

$$F_{Cxl_x} = F_{Cxl} \cos \beta \quad (5)$$

$$F_{Cxl_y} = F_{Cxl} \sin \beta \quad (6)$$

Para $\beta = 50^\circ$ determinam-se as componentes da força

$$F_{Cxl_x} = 23.327 \text{ N}$$

$$F_{Cxl_y} = 27.800 \text{ N}$$

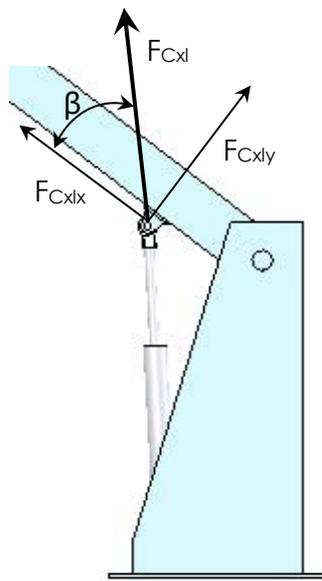


Figura 22 – Esforço aplicado pelo cilindro hidráulico e sua decomposição.

O valor a aplicar nos ensaios é o valor de F_{Cxl_x} uma vez que é somente esta componente a ter influência na base de apoio.

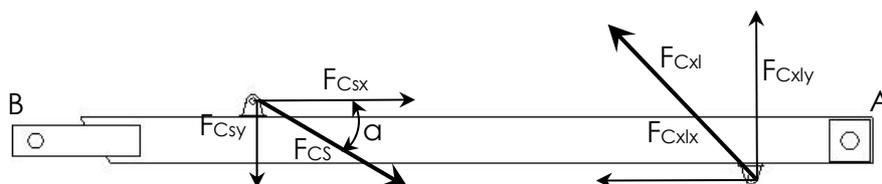


Figura 23 – Esforços aplicados no braço principal e respectivas decomposições.

Determinam-se agora os esforços a que o braço principal está sujeito além dos já determinados atrás, resultantes do esforço de accionamento F_C . Assim, resultam os esforços expostos na Figura 23.

Como foi referido no Capítulo 4.4, a função do braço secundário é apoiar a recolha de detritos. Nesta manobra, o cilindro hidráulico fará somente a força necessária para o acompanhamento da grelha no movimento ascendente. Depois deste raciocínio considera-se que, para efeitos de dimensionamento, o esforço exercido pelo cilindro hidráulico F_{Cs} é metade do valor da força exercida pelo cilindro hidráulico de accionamento do braço principal, F_{Cxl} , isto é

$$F_{Cs} = \frac{F_{Cxl}}{2}. \quad (7)$$

$$F_{Cs} = 18.145 \text{ N}$$

Aplicando o mesmo princípio ao ponto B, que se pode observar na Figura 23, em que por acção do cilindro hidráulico se considera imóvel o eixo de articulação dos dois braços, pode decompor-se a força F_{Cs} em,

$$\vec{F}_{Cs} = \vec{F}_{Cs_x} + \vec{F}_{Cs_y} \quad (8)$$

$$F_{Cs_x} = F_{Cs} \cos \alpha \quad (9)$$

$$F_{Cs_y} = F_{Cs} \sin \alpha \quad (10)$$

Na posição extrema $\alpha=8,5^\circ$ e, conseqüentemente,

$$F_{Cs_x} = 17.946 \text{ N}$$

$$F_{Cs_y} = 2.682 \text{ N}$$

O esforço a que o braço secundário está sujeito é igual a F_{Cs} mas de sentido de actuação contrário, de acordo com a Figura 24.



Figura 24 – Esforços aplicados no braço secundário e respectiva decomposição.

Na posição definida como extrema a força F_{Cs} actua com um ângulo $\theta = 56^\circ$ com o eixo do braço secundário que se decompõe nos seguintes esforços normal e axial. Assim, resulta

$$F_{C_{ssx}} = F_{Cs} \cos \theta \quad (11)$$

$$F_{C_{ssy}} = F_{Cs} \sin \theta \quad (12)$$

$$F_{C_{ssx}} = 10.147 \text{ N}$$

$$F_{C_{ssy}} = 15.043 \text{ N}$$

Neste ponto estão determinados todos os valores de esforços aplicados a cada um dos elementos do descolmatador.

7. Selecção de Materiais

Para a concretização deste estudo é necessário proceder à selecção dos materiais mais adequados para a execução do descolmatador, tendo em conta as características mais vantajosas de cada um. Os materiais que servirão de partida são aqueles que têm boas características para construção, como é o caso do aço Carbono, o aço inoxidável e o Alumínio.

O aço Carbono S235 JR (de acordo com a EN 17100) é um material de uso muito generalizado pelas boas qualidades de trabalho que possui como é o caso da soldadura, da conformação a quente, da conformação a frio e da maquinabilidade [9]. Em termos de características mecânicas, este material possui uma resistência mecânica relativamente boa, tem alguma resistência ao desgaste, sobretudo quando comparado com o Alumínio, e boa resistência à corrosão (quando devidamente protegido por processos de protecção anti-corrosiva). Quanto a factores económicos, o aço S235 JR tem duas vantagens claras sobre os outros materiais: (i) o custo, quando comparado na mesma quantidade, e (ii) a facilidade de acesso a esta matéria-prima sob a forma de perfis, tubos, acessórios e chapas, facilmente adquiríveis.

O aço inoxidável AISI 304 é um material de utilização generalizado sobretudo pelas boas qualidades anti-corrosão, mas também pelas boas qualidades de trabalho que possui como é o caso da soldadura (mas com maiores cuidados do que o S235 JR, normalmente exigida maior

especialização dos operadores), da conformação a frio e da maquinabilidade. Em termos de características mecânicas, este material possui uma resistência mecânica consideravelmente boa, tem uma resistência ao desgaste superior ao S235 JR, e muito boa resistência à corrosão [9]. Quanto a factores económicos, o aço AISI 304 é uma solução dispendiosa e que pode ser optimizada a partir do raciocínio que quando se dimensiona uma peça em aço carbono para estar exposto ao ar livre, deveria haver uma sobreespessura de corrosão que pode atingir 2 mm. A facilidade de acesso a esta matéria-prima sob a forma de perfis não estruturais, tubos, acessórios e chapas, não é tão evidente como o S235 JR mas não representa um problema. Em perfis estruturais a escolha é muito reduzida e a oferta que existe tem valores de aquisição incomportáveis.

As ligas de Alumínio 6061 são ligas comerciais de utilização generalizada sobretudo pelas características de densidade quando comparado com os outros dois materiais deste estudo, boas qualidades anti-corrosão e boas qualidades de trabalho a frio [9]. Porém, no que diz respeito à soldadura, o processo é mais complexo. Em termos de características mecânicas, este material possui uma resistência mecânica consideravelmente mais baixa que os aços e tem uma resistência ao desgaste inferior aos aços. Quanto a factores económicos, esta liga de Alumínio é uma solução que se pode revelar dispendiosa. A facilidade de acesso a esta matéria-prima sob a forma de perfis, tubos, acessórios e chapas é limitada.

Na Tabela 1 apresentam-se as principais propriedades mecânicas dos materiais descritos nos parágrafos anteriores.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste estudo.

	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão Limite de Elasticidade [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Coefficiente de Poisson
Aço Carbono S235 JR	210	220	399	0,28
Aço Inox AISI 304	190	206	517	0,29
Alumínio 6034	69	55	124	0,33

À partida pela análise destes valores podemos esperar que os resultados obtidos com o aço Carbono e o aço inoxidável serão bastante semelhantes para a mesma geometria enquanto o Alumínio terá de ver a geometria aumentada em geral de modo a ter a mesma resistência.

No capítulo seguinte irá passar-se à descrição de várias geometrias analisadas.

8. Seleção de Geometrias

Neste capítulo apresentam-se os diversos modelos geométricos analisados de acordo com a evolução dos vários estudos.

O primeiro elemento a analisar é a base do descolmatador, constituída por uma chapa de base que servirá de fixação de todo o descolmatador, onde assentam quatro chapas verticais que no essencial formam uma viga estrutural de secção variável, conforme se pode ver na Figura 25. No topo desta viga irão ser montadas duas chumaceiras que vão apoiar o eixo de rotação do braço principal.

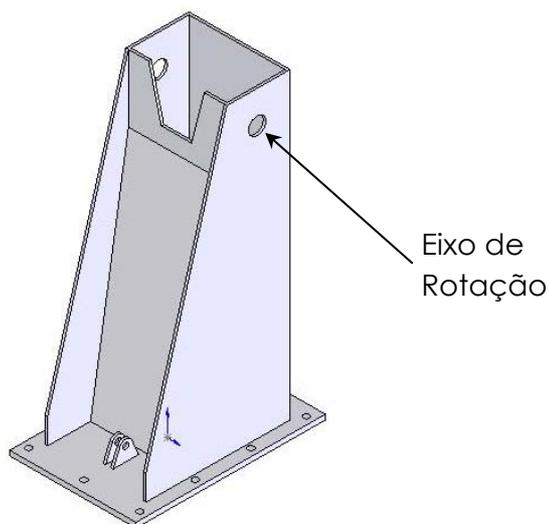


Figura 25 – Geometria inicial da base do descolmatador.

Na chapa de base existe o ponto de ligação ao cilindro hidráulico, que transmitirá uma pressão muito localizada sobre esta chapa que não será considerada para efeitos de análise devido ao seu baixo impacto sobre os restantes elementos da base do descolmatador.

A geometria inicial irá evoluir no sentido de otimizar não só o aspecto estrutural, como também os aspectos funcionais e construtivos com o objectivo de obter uma solução que seja economicamente forte. A Figura 26 mostra a evolução da geometria, com a introdução de elementos executados por quinagem que conferem resistência a elementos executados em chapa, uma vez que aumentam a inércia de um elemento.

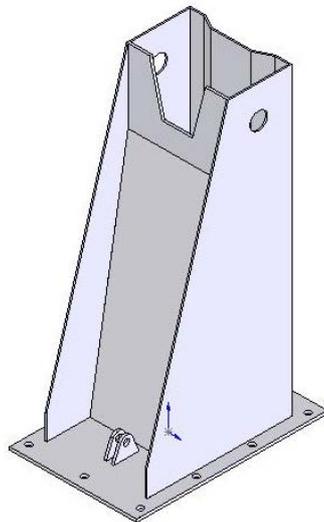


Figura 26 – Geometria evoluída da base do descolmatador.

O segundo elemento do descolmatador a analisar é o braço principal que, como já foi referido, é, na solução de partida, um elemento constituído por um perfil estrutural de secção uniforme e que tem a geometria apresentada na Figura 27.

A evolução da geometria do braço principal do descolmatador será no sentido de retirar material que não seja necessário, reforçando as zonas mais solicitadas com material adicional ou simplesmente aumentando a inércia necessária à custa da alteração da geometria da peça. Assim, a geometria final do braço principal poderá ser muito próxima da representação da Figura 28.

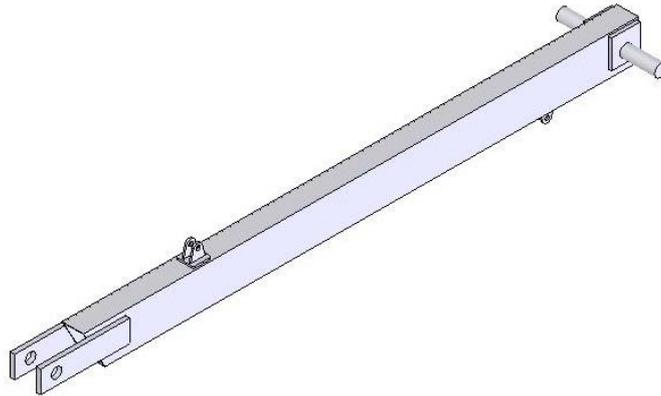


Figura 27 – Geometria inicial do braço principal do descolmatador.

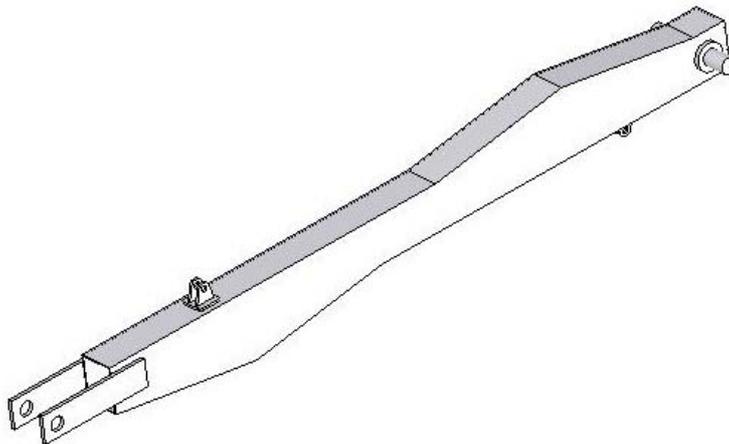


Figura 28 – Geometria evoluída do braço principal do descolmatador.

O terceiro elemento a ser estudado é o braço secundário, composto por um perfil tubular de secção transversal constante que, na extremidade, terá uma pá. A pá é uma estrutura executada em chapa quinada com a largura da grelha a limpar, que permitirá raspar nesta amparando todos os detritos que são conduzidos até ao final da grelha. A pá tem na sua extremidade montada uma régua de PTFE (vulgarmente designado por TEFLON) de modo a não ferir o tratamento superficial aplicado nas barras que constituem a grelha. Para facilitar o movimento dentro de água e retirar os detritos com o mínimo de água possível a pá terá uma parte perfurada como se pode visualizar na Figura 29.

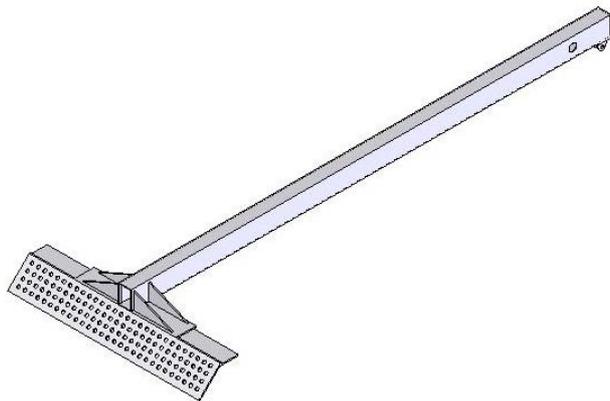


Figura 29 – Geometria inicial do braço secundário do descolmatador.

Na Figura 30 podemos observar a evolução da geometria do braço secundário com relativas alterações de modo a otimizar todo o sistema.

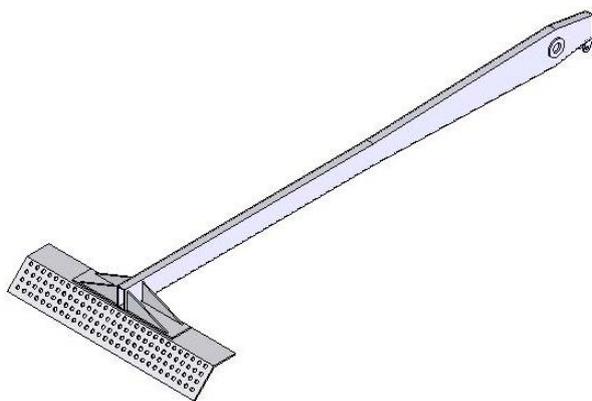


Figura 30 – Geometria evoluída do braço secundário do descolmatador.

Depois de apresentadas algumas das geometrias que servirão de ponto de partida para as evoluções pretendidas, passa-se ao próximo capítulo onde irão ser analisadas e melhoradas diversas soluções.

9. Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na aplicação das condições determinadas nos capítulos anteriores, sobre modelações tridimensionais obtidas com recurso ao *software* de modelação SolidWorks. Para a análise estrutural sobre as modelações obtidas, quer as soluções iniciais quer as respectivas evoluções, recorreu-se ao Método dos Elementos Finitos (programa de cálculo COSMOSWorks) uma vez que será o método ideal para analisar estruturas complexas.

No método de análise por Elementos Finitos, sobre a modelação que define a geometria do corpo a analisar é criada uma malha constituída por elementos tetraédricos que têm obrigatoriamente que estar interceptados entre todos em pontos designados por nós [10]. No caso do COSMOSWorks, o tamanho médio de cada elemento é controlável, tendo uma tolerância associada, mas fixa.

Para determinação do tamanho apropriado dos elementos da malha para o caso concreto deste estudo, fez-se uma análise prévia com base na geometria do braço principal do descolmatador. e com recurso a um dos parâmetros que permitisse avaliar se existiria variações significativas com a variação do tamanho dos elementos. O parâmetro escolhido foi o coeficiente de segurança (FOS – *factor of safety*) que não é mais do que a relação entre a tensão limite de elasticidade e a tensão equivalente de von Mises para determinado elemento.

Neste estudo prévio é de referir que o material utilizado foi o aço Carbono e manteve-se constante de modo que em todas as análises apenas e somente se variasse o tamanho médio do elemento.

Assim, da análise dos resultados apresentados na Tabela 2 pode observar-se que, com elementos de dimensão superior a 20 mm, os valores de FOS são conservadores e abaixo deste valor existe instabilidade nos valores destes parâmetros, que são explicados (depois de analisados os gráficos de isovalores) pela concentração de tensões existente ao nível dos elementos que coincidam ou não com cantos ou vértices da geometria analisada.

Tabela 2 – Variação de FOS em função da dimensão média dos elementos finitos.

Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dimensão Média do Elemento [mm]	35,2	25,6	20,0	15,0	14,0	13,0	13,0	12,9	12,8
FOS	8,62	7,37	7,02	5,67	4,63	4,48	5,36	5,00	5,07

Com esta análise pode concluir-se que, utilizando a dimensão média de 20 mm dará confiança nos valores obtidos tendo em conta sempre os pontos de concentrações de tensões, corrigindo em fase posterior as geometrias de modo a evitar este tipo de fenómeno.

A importância de se manter constante a dimensão média dos elementos da malha na análise estrutural de todas as peças do descolmatador fica também confirmada com este estudo prévio, confirmando que existirão variações nos resultados obtidos.

Nos pontos que se seguem apresentam-se os resultados obtidos em cada peça do descolmatador, começando por expor as restrições e os esforços aplicados.

9.1. Base

Na Figura 31, que diz respeito à geometria inicial, está representada a restrição imposta à base do descolmatador, bem como a decomposição de forças aplicadas. No caso da restrição impõe-se a imobilidade da base e no caso das forças, estas são distribuídas sobre a superfície de aplicação dos olhais dos cilindros a fim de evitar as concentrações de tensões nos ensaios. Em termos práticos, estes olhais serão posteriormente dimensionados analiticamente para os esforços aplicados.

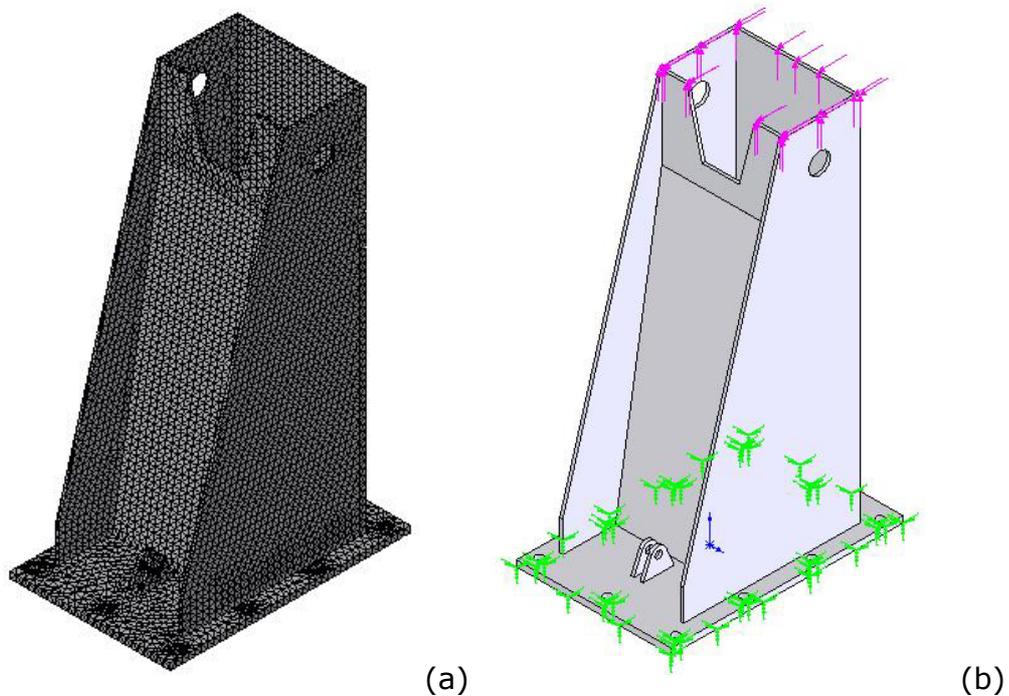


Figura 31 – Discretização aplicada à geometria inicial da base (a) e representação das condições de simulação aplicadas (b).

Em seguida apresentam-se os diversos resultados desde a geometria de partida (referência 01), passando pelas evoluções, até chegar a uma solução otimizada. Assim, na Figura 32 representa-se a tensão equivalente de von Mises e a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), para uma aplicação com aço Carbono e na Figura 33 representa-se a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3, que foi escolhido

Resultados

como o valor que permite focalizar a análise, em primeira aproximação, evitando os valores próximos do mínimo alcançado, que por princípio estará associado a pontos de concentração de tensões que desviarão a análise em termos globais. Na Figura 34 e Figura 35 apresenta-se a mesma análise para o aço AISI 304.

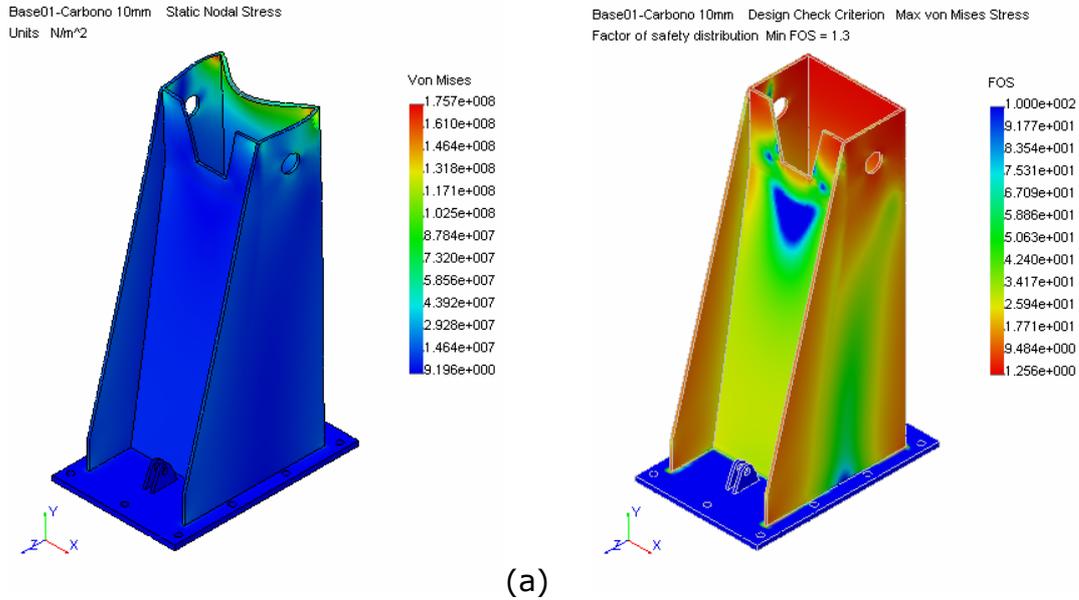


Figura 32 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria inicial em aço Carbono.

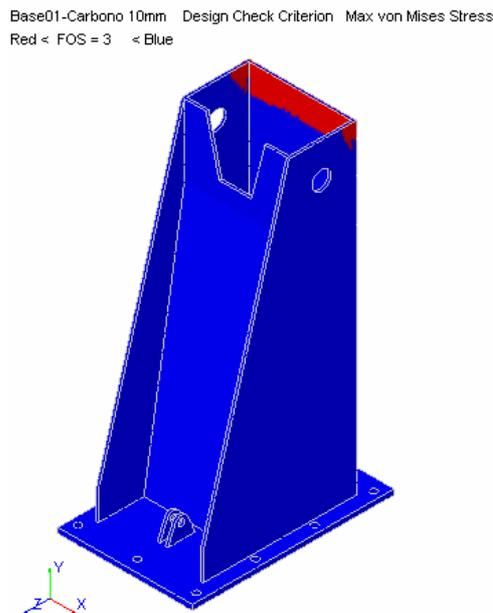


Figura 33 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria inicial em aço Carbono.

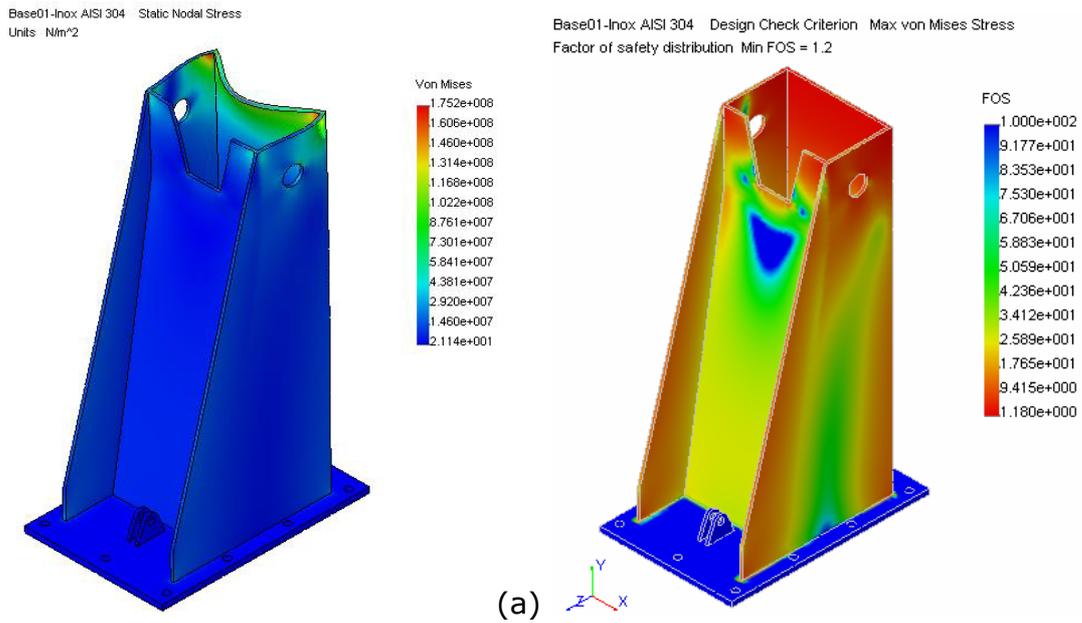


Figura 34 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] e correspondente coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304.

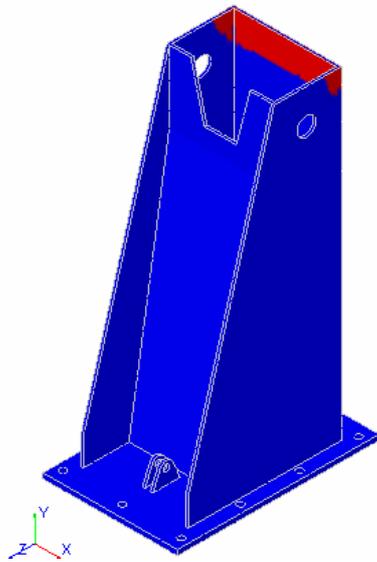


Figura 35 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria inicial em aço AISI 304.

Todos os valores das tensões equivalentes são inferiores aos valores das respectivas tensões admissíveis, apesar de se verificar alguns pontos de concentrações de tensões, o que permite avançar para uma nova geometria (referência 01 Exp) melhorada no sentido de diminuição da espessura de 10 para 8 mm nas faces que formam a viga.

Assim, na Figura 36 representa-se a tensão equivalente de von Mises e a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), para uma aplicação com aço Carbono e na Figura 37 representa-se a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3. Na Figura 38 e Figura 39 apresenta-se a mesma análise para o aço AISI 304.

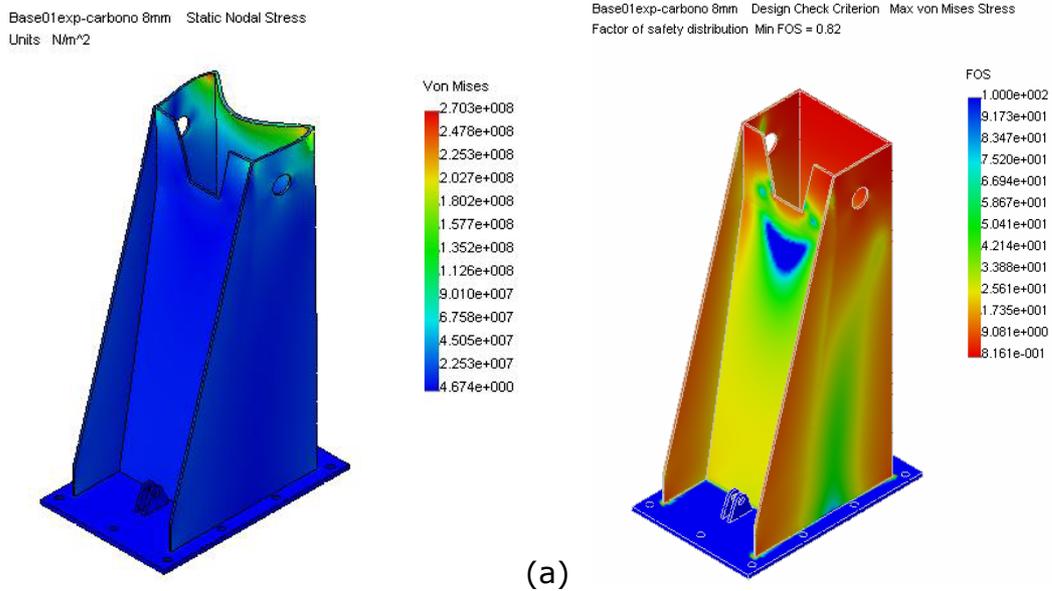


Figura 36 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço Carbono.

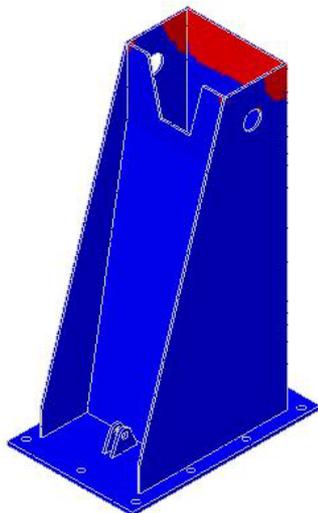


Figura 37 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria melhorada em aço Carbono.

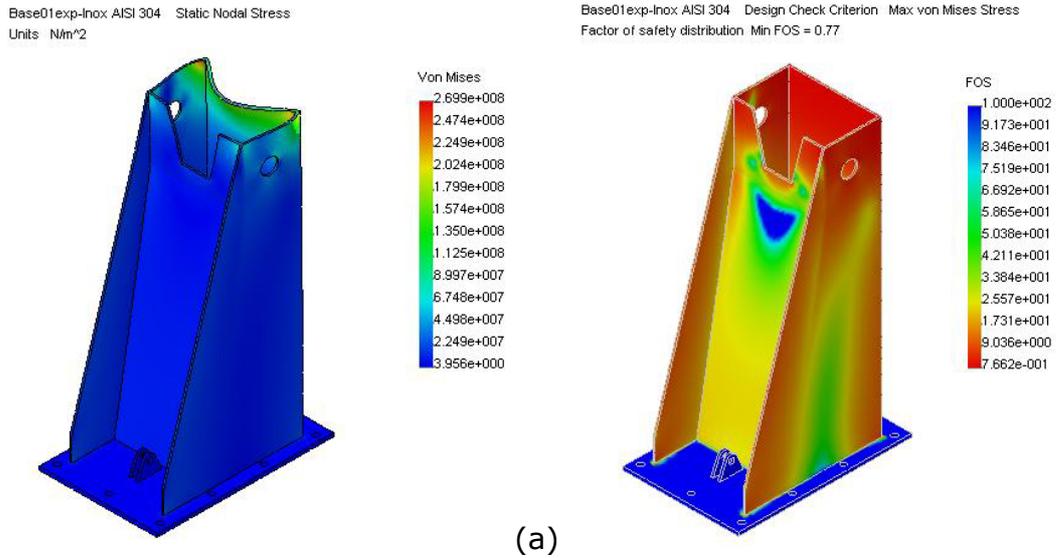


Figura 38 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço AISI 304.

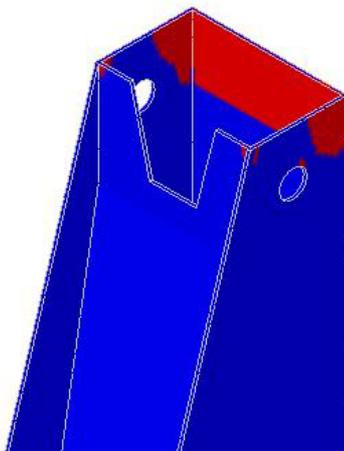


Figura 39 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a vermelho), na geometria melhorada em aço AISI 304.

Embora os valores das tensões equivalentes já tenham ultrapassado localmente os valores das respectivas tensões admissíveis (devido à concentração de tensões originadas pela geometria da peça e também pela forma de aplicação da força), avança-se para uma nova geometria (referência 02 nova). A justificação para esta medida é que, na generalidade da peça, o valor das tensões ainda está muito longe de qualquer ponto crítico.

Conseqüentemente, diminui-se a espessura da chapa de base de 20 para 16 mm e diminui-se a espessura das faces de 8 para 6 mm onde, para a compensação desta diminuição, foi necessário introduzir uma quinagem na face anterior da base para aumentar a sua resistência.

Assim, na Figura 40 representa-se a tensão equivalente de von Mises e a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), para uma aplicação com aço Carbono e na Figura 41 representa-se a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3 e abaixo de 1,4.

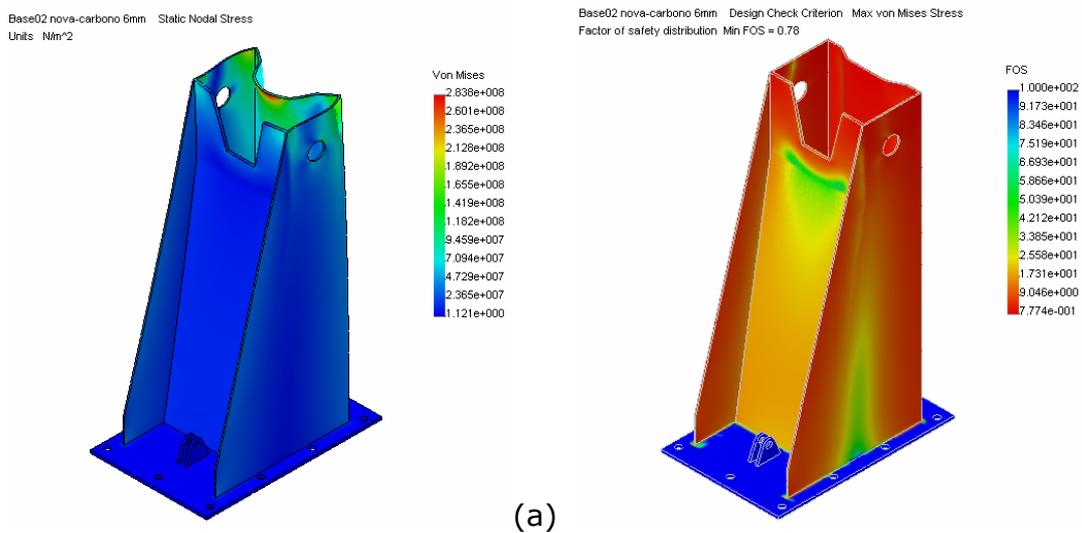


Figura 40 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria melhorada em aço Carbono.

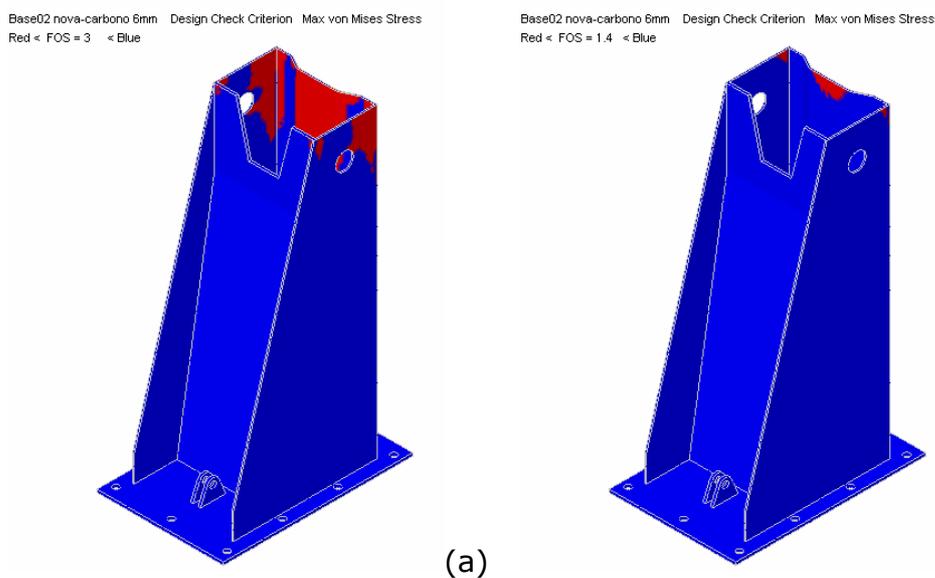


Figura 41 – Representação da zona com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e a 1,4(b) (a vermelho) na geometria melhorada em aço Carbono.

De referir que, nesta análise, se optou por apertar o coeficiente de segurança mínimo de forma a perceber quais os pontos em concreto que estariam mais afectados pelas condições impostas na simulação. O valor $FOS=1,35$ é obtido da consulta da norma DIN 19704 referente a equipamentos hidromecânicos que aconselha este valor de uma forma generalizada. Na Figura 42 e Figura 43 apresenta-se a mesma análise para o aço AISI 304.

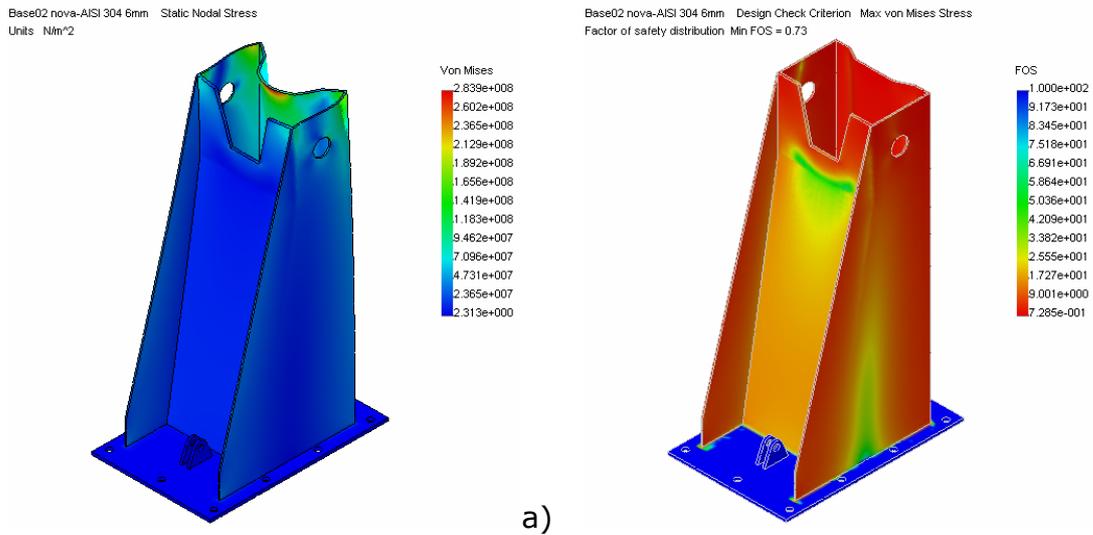


Figura 42 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de Segurança (FOS) (b) na geometria melhorada de 8 para 6 mm em aço AISI 304.

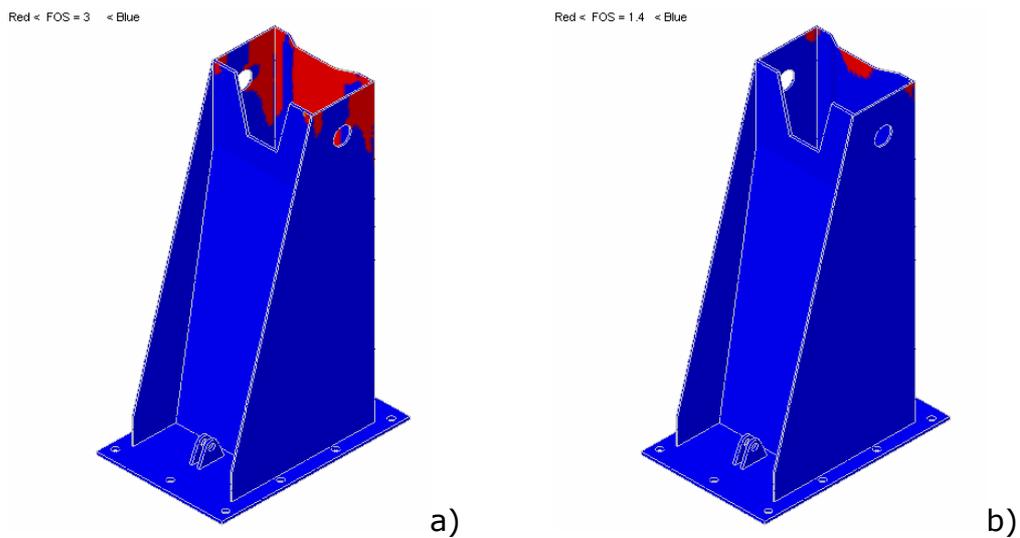


Figura 43 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,4 (b) na geometria melhorada de 8 para 6 mm em aço AISI 304.

Com a obtenção da geometria final dá-se por concluída a optimização estrutural com o intuito de se utilizar quer o aço Carbono quer o aço AISI 304, porque se se pensar em Alumínio terá de se realizar mais um ensaio para dar uma orientação relativamente aos outros dois materiais. Assim, passa-se a apresentar os resultados referentes a uma nova geometria (referência 03 Alum) em que a única diferença se prende em manter o conceito da geometria obtida anteriormente mas aumentando a espessura de 6 para 10 mm, devido às características de resistência mecânica inferiores do Alumínio.

Assim, na Figura 44 representa-se a tensão equivalente de von Mises e a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), na aplicação com Alumínio e na Figura 45 representa-se a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3 e abaixo de 1,4.

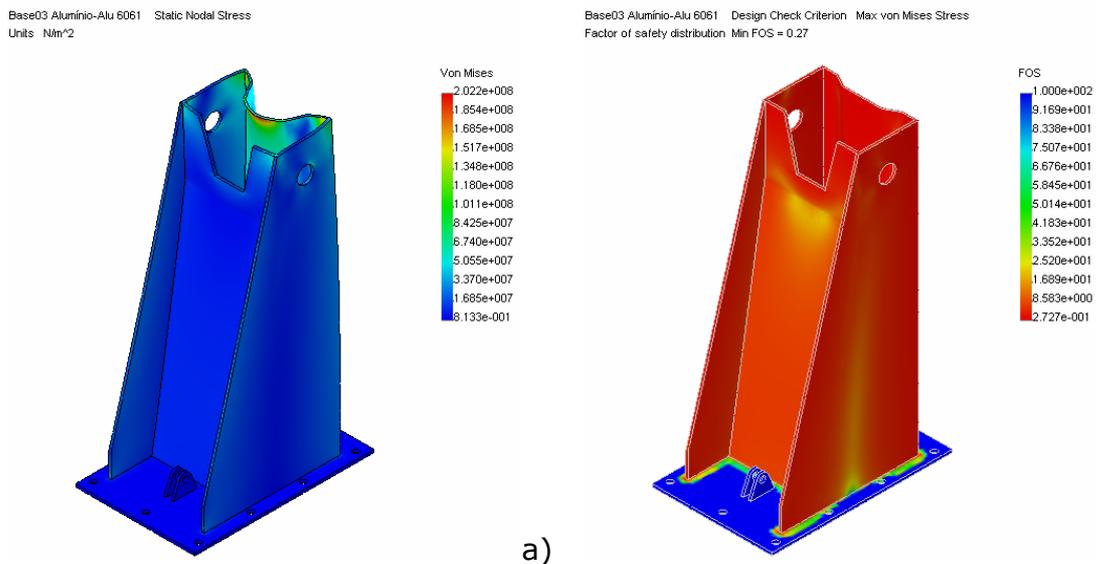


Figura 44 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] (a) e correspondente coeficiente de segurança (FOS) (b) na geometria final da base do descolmatador em Alumínio 6061 com 10 mm de espessura.

Base03 Alumínio-Alu 6061 Design Check Criterion Max von Mises Stress
Red < FOS = 3 < Blue

Base03 Alumínio-Alu 6061 Design Check Criterion Max von Mises Stress
Red < FOS = 1.4 < Blue

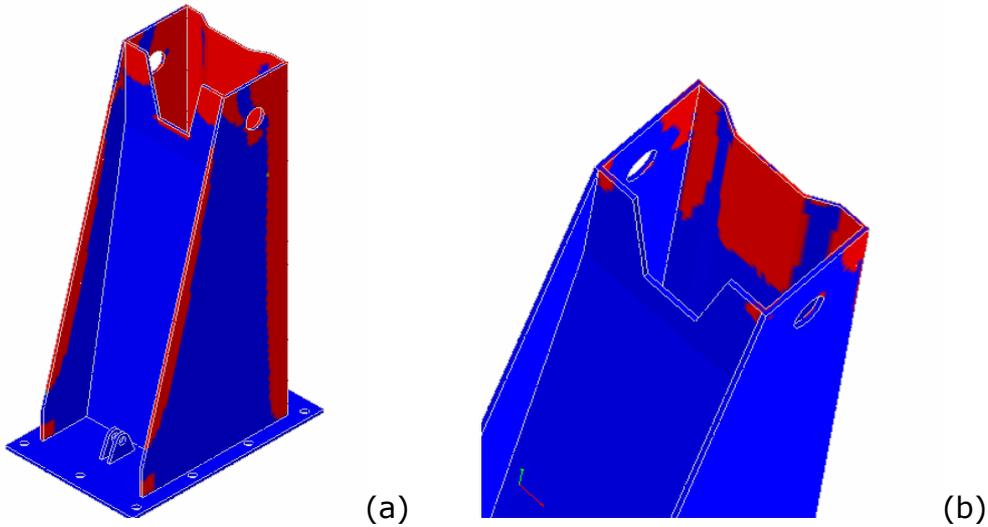


Figura 45 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,4 (b) na geometria final em Alumínio 6061 com 10 mm de espessura.

Na Tabela 3 pode observar-se um resumo das características das discretizações em elementos finitos criadas sobre cada uma das geometrias analisadas neste estudo. O elevado número de elementos traduz-se em tempos de cálculo relativamente longos.

Tabela 3 – Características das malhas das diferentes geometrias analisadas.

Referência da Geometria	01	01Exp	02Nova	03 Alum
Nº de elementos	38416	38756	38139	37926
Nº de nós	76141	76904	76039	75640
Nº de graus de liberdade	228423	230712	228117	226920

Da análise dos resultados obtidos na simulação anterior chega-se à conclusão que a solução de aplicação de Alumínio não será vantajosa uma vez que, com a geometria otimizada os 10 mm de espessura aplicados na peça não são suficientes para suportar os esforços aplicados na base do descolmatador porque, como se pode observar as zonas com coeficiente de segurança inferior a 1,35, já se estendem pela chapa e não estão só concentradas em pequenos pontos. Assim, seria necessário aumentar a

espessura da chapa em 2 mm, o que tornaria o descolmatador extremamente oneroso. Conseqüentemente, põe-se de lado a solução de utilização de Alumínio em termos de análise dos próximos elementos do descolmatador.

9.2. Braço Principal

Na Figura 46 está representada a malha de elementos finitos gerada sobre a modelação inicial do braço principal do descolmatador e na Figura 47 estão representadas as restrições impostas, bem como as forças decompostas das duas resultantes que foram determinadas no Capítulo 6. No caso das restrições representadas, podemos observar que foi considerado imóvel o eixo de articulação com a base do descolmatador. No lado oposto, no eixo de articulação com o braço secundário, foi considerado que não haveria deslocamento desse eixo, mas fosse permitida rotação sobre ele mesmo de modo a poder haver uma maior liberdade sobretudo em termos de flexão.

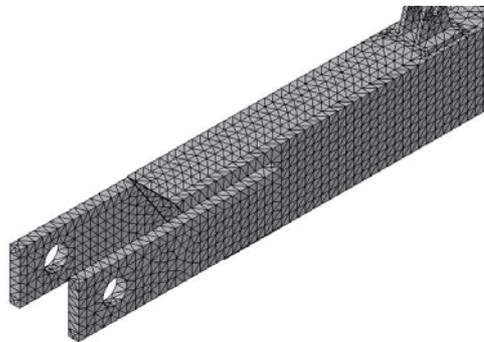


Figura 46 – Pormenor da malha de elementos finitos aplicada à geometria inicial do braço principal.

Os esforços considerados nos ensaios foram aplicados não nos olhais de aplicação das cavilhas dos cilindros hidráulicos, mas sim na chapa de reforço que lhes está associada, de modo a que a distribuição da força sobre essa superfície traduzisse uma situação mais real e evitasse o fenómeno de concentrações de tensões. Na prática, posteriormente, temos somente que dimensionar analiticamente os olhais ao esmagamento.

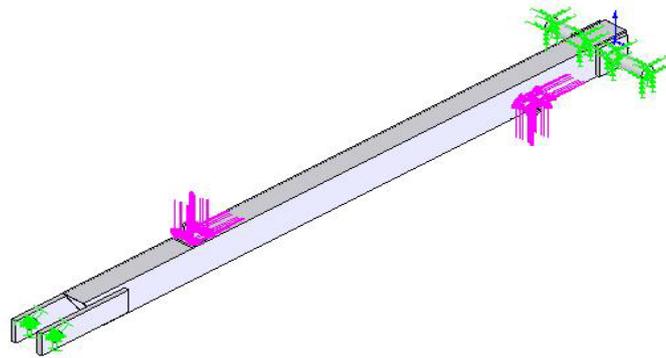


Figura 47 – Representação das condições de fronteira aplicadas à geometria de partida do braço principal.

Na geometria inicial (referência 01 6mm) começa-se com uma espessura de 6 mm em ambos os materiais e avalia-se em que sentido se deverá evoluir.

Assim, para a aplicação de aço Carbono, tem-se na Figura 48 a representação da tensão equivalente de von Mises, na Figura 49 a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), na Figura 50 representam-se as zonas com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 5.

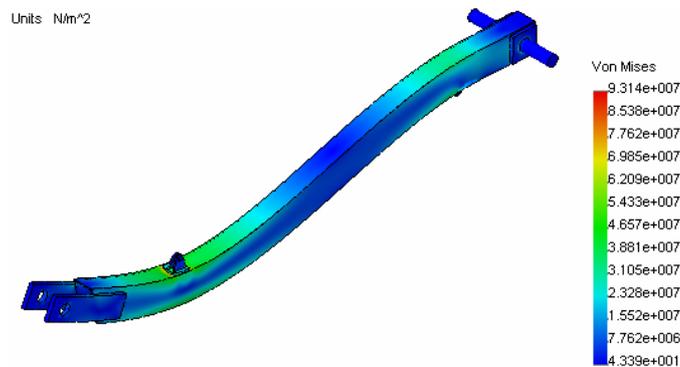


Figura 48 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço Carbono com 6 mm.

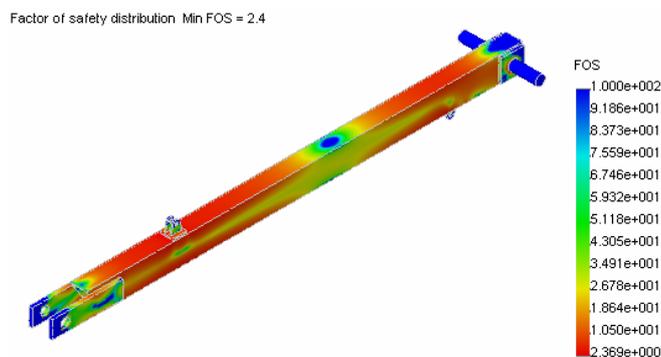


Figura 49 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço Carbono com 6 mm.

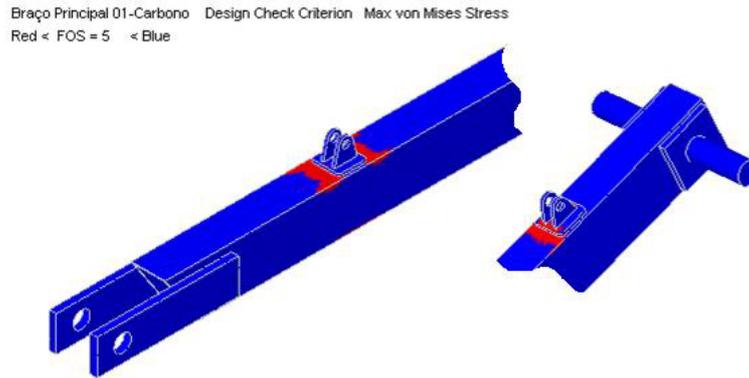


Figura 50 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria inicial em aço Carbono 6 mm.

Para a aplicação em aço AISI 304, tem-se na Figura 51 e na Figura 52 a representação da tensão equivalente de von Mises e a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), respectivamente.

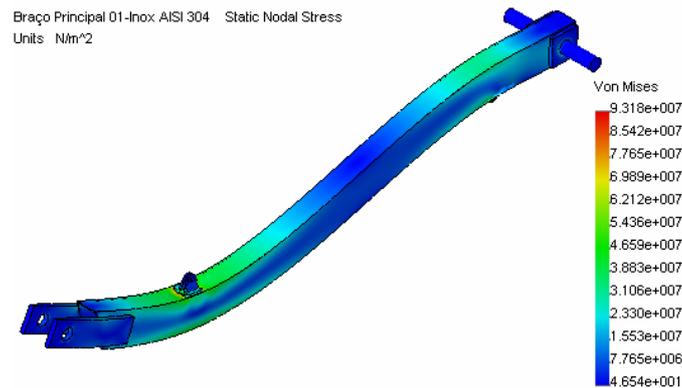


Figura 51 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço AISI 304 com 6 mm.

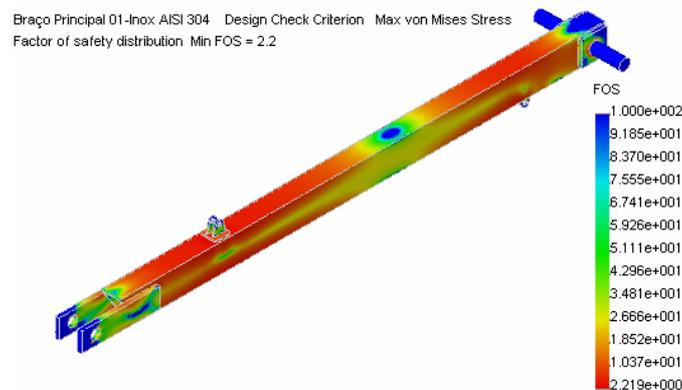


Figura 52 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304 com 6 mm.

Todos os valores das tensões equivalentes de von Mises são inferiores aos valores das tensões de cedência, apesar de se verificar alguns pontos com concentrações de tensão, o que permite avançar para uma nova geometria (referência 01 5mm) melhorada no sentido de diminuição da espessura de 6 para 5 mm no corpo da viga.

Como resultados, para a aplicação de aço Carbono, tem-se da Figura 53 à Figura 55 a representação da tensão equivalente de von Mises, a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS) e a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 5. Da Figura 56 à Figura 58, tem-se as mesmas representações para a aplicação de aço AISI 304.

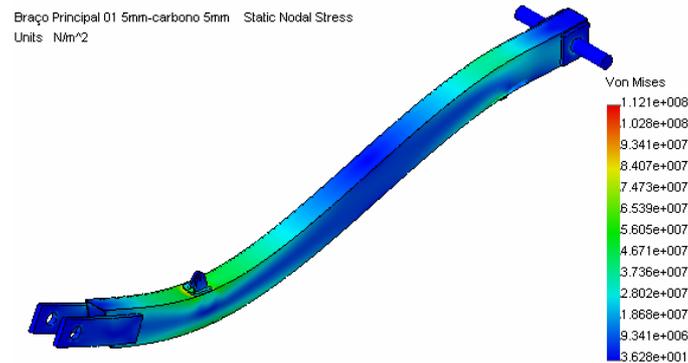


Figura 53 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.

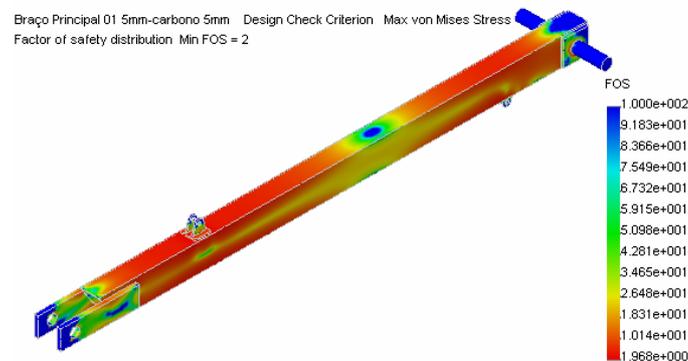


Figura 54 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.

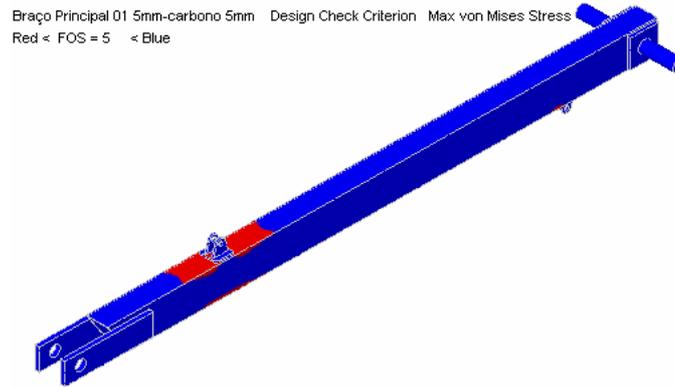


Figura 55 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria evoluída1 em aço Carbono 5 mm.

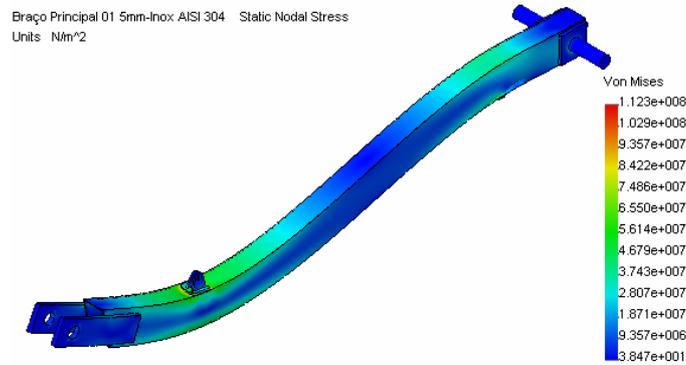


Figura 56 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.

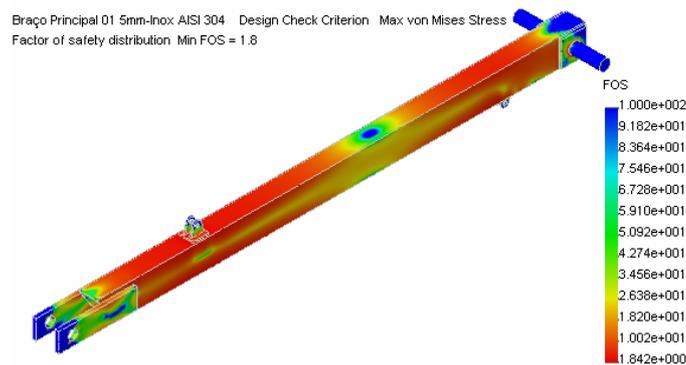


Figura 57 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.

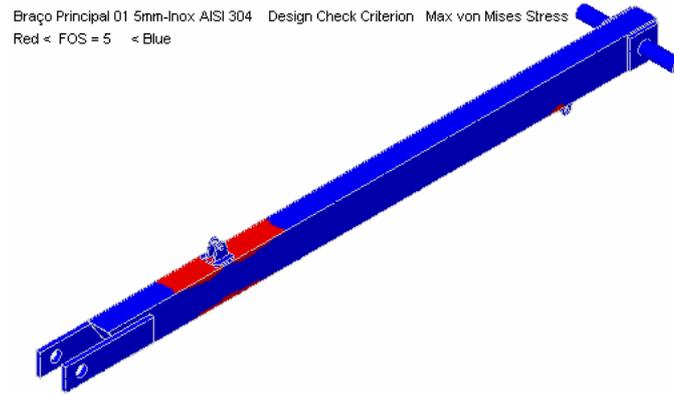


Figura 58 – Representação das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 5 (a vermelho) na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 5 mm.

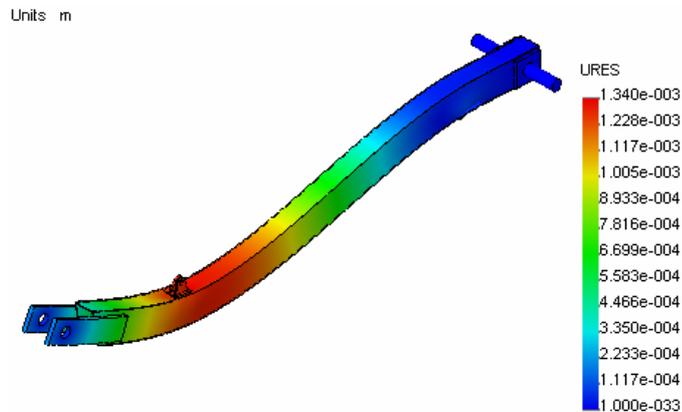


Figura 59 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 5 mm.

De notar que no caso da peça em aço AISI 304, as zonas com coeficiente de segurança inferior a 5 são maiores, devido às características de resistência mecânica serem inferiores neste, relativamente ao aço Carbono.

Analisando os resultados apresentados, com os valores das tensões equivalentes de von Mises ainda inferiores aos valores das tensões de cedência, ainda que persistam os pontos de concentrações de tensão, torna-se possível avançar para uma outra geometria em que se reduz a espessura de 5 para 4 mm. Com esta redução, a rigidez deste braço, que pode ser visualizada na Figura 59, poderá ficar afectada e por isso alterou-se a secção transversal do braço e tornando-a variável, com especial

aumento nas zonas mais solicitadas. Com a nova geometria (referência 02 4mm), mantendo as restantes condições, tem-se da Figura 60 à Figura 63 a representação da tensão equivalente de von Mises, a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3 e 1,35, e a representação dos deslocamentos resultantes. Da Figura 64 à Figura 67, tem-se as mesmas representações para a aplicação de aço AISI 304.

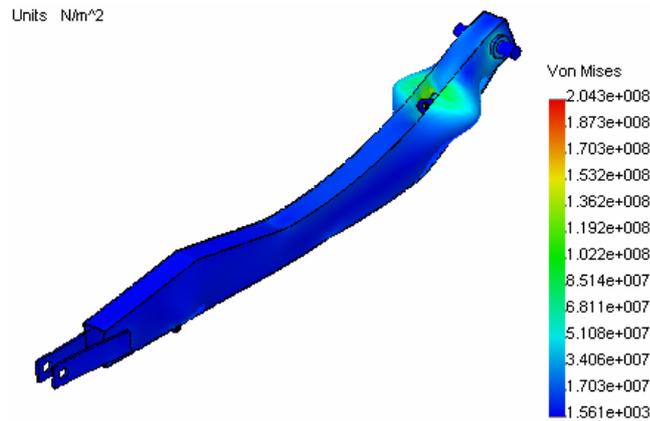


Figura 60 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída1 em aço Carbono com 4 mm.

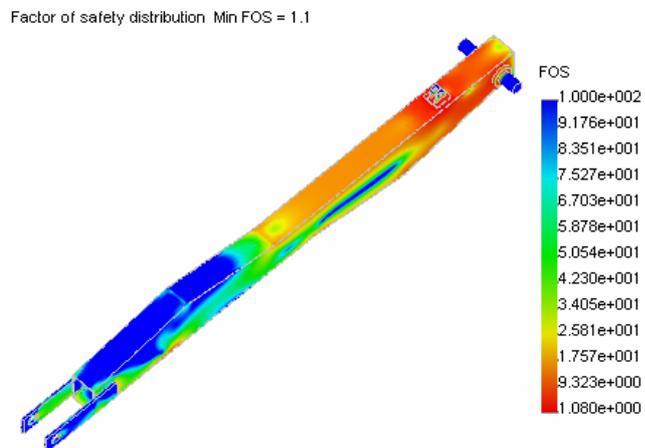


Figura 61 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço Carbono com 4 mm.

Resultados

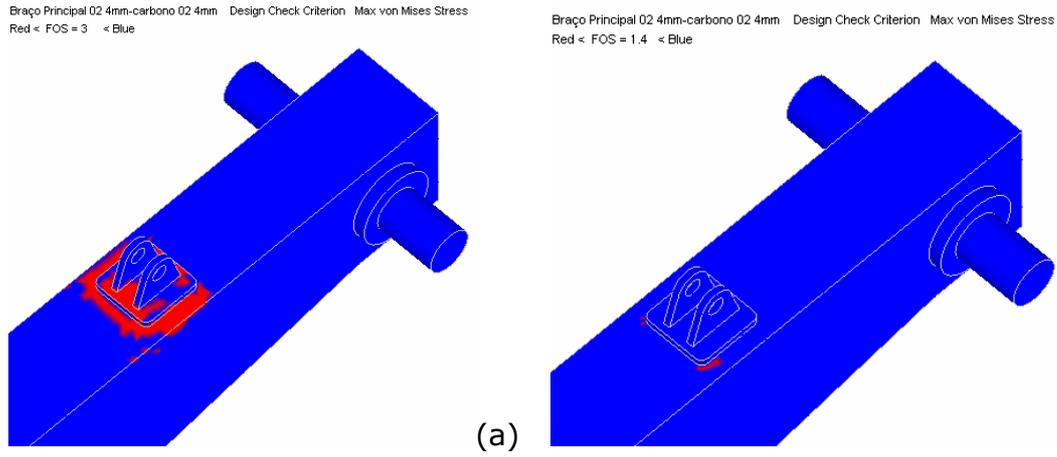


Figura 62 – Representação das zonas (a vermelho) com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,35 (b) na geometria evoluída2 em aço Carbono com 4 mm.

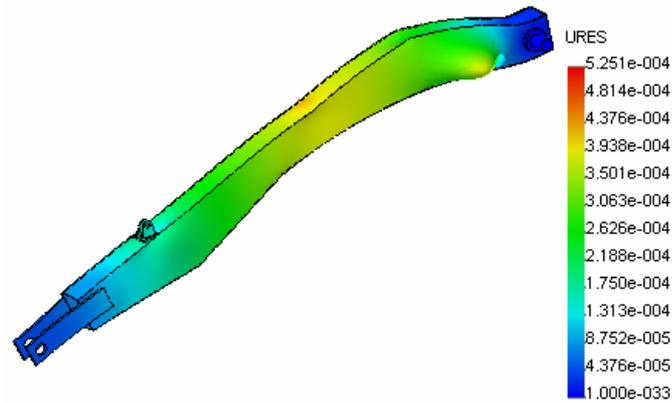


Figura 63 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída2 em aço Carbono com 4 mm.

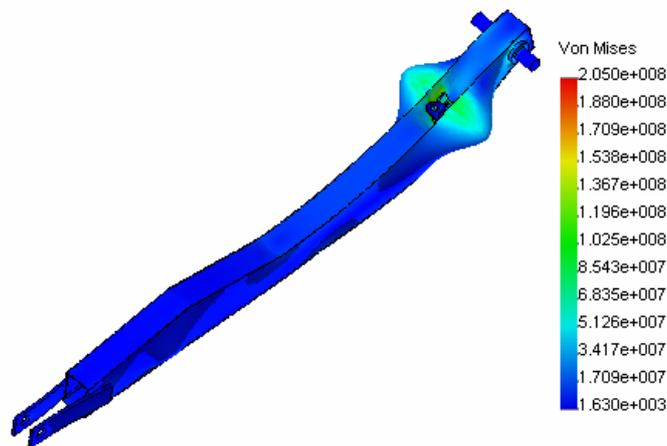


Figura 64 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 4 mm.

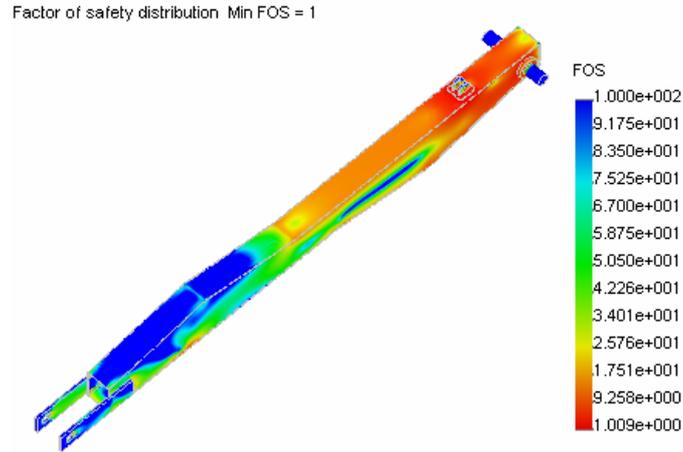


Figura 65 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída1 em aço AISI 304 com 4 mm.

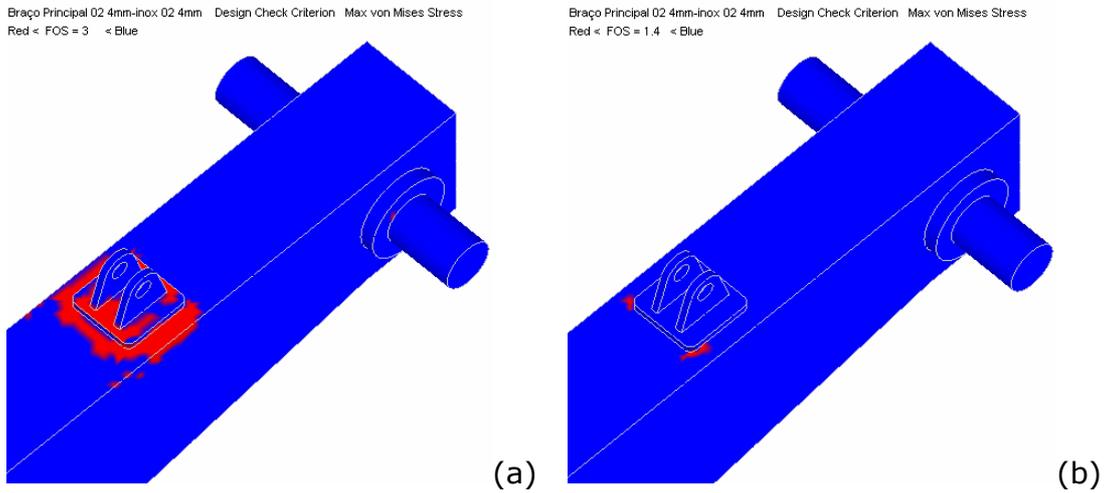


Figura 66 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 (a) e 1,35 (b) na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 4 mm.

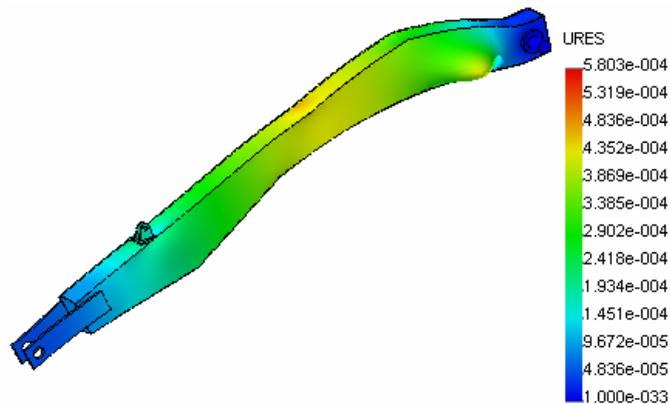


Figura 67 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 4 mm.

Analisando os resultados obtidos nesta simulação, pode dar-se esta geometria como aprovada para a evolução final, tendo necessariamente que se fazer pequenas intervenções pontuais ao nível de reforços maiores nas zonas de aplicação das cargas.

A nível da rigidez desta geometria registou-se uma melhoria significativa, diminuindo para um terço dos valores da deformação a meio da viga.

As diferenças dos valores obtidos entre as soluções aço Carbono e aço AISI 304 não são significativas uma vez não haver mais de 8% de variação entre os coeficientes de segurança entre as duas situações. Neste caso o coeficiente de segurança, por si só, dá uma boa aproximação da eficiência estrutural de cada solução uma vez que compara a tensão criada numa determinada solicitação com a tensão limite de elasticidade de cada material. Em conclusão, pode afirmar-se que a solução em aço AISI 304 é estruturalmente mais eficiente, desde que tomadas as medidas pontuais de eliminação de pontos de concentração de tensões.

Na Tabela 4 pode-se observar um resumo das características das malhas criadas sobre cada uma das geometrias do braço principal analisadas neste estudo.

Tabela 4 – Características das malhas das diferentes geometrias do braço principal analisadas.

Referência da Geometria	01 6mm	01 5mm	02 4mm
Nº de elementos	30658	30259	38326
Nº de nós	60819	60298	76644
Nº de graus de liberdade	182457	180894	229932

9.3. Braço Secundário

O último elemento a analisar é o braço secundário, que está representado na Figura 68 com malha de elementos finitos criada sobre a modelação inicial. Na Figura 69 estão representadas as restrições impostas, bem como a força decomposta da resultante que foi determinada no Capítulo 6. As restrições representadas, consideram que é permitida rotação sem deslocamento sobre o eixo do braço secundário de modo a poder haver uma maior liberdade de flexão, enquanto que no lado oposto, na régua da pá de arrasto, foi considerado que estaria imóvel na zona de contacto com a grelha.

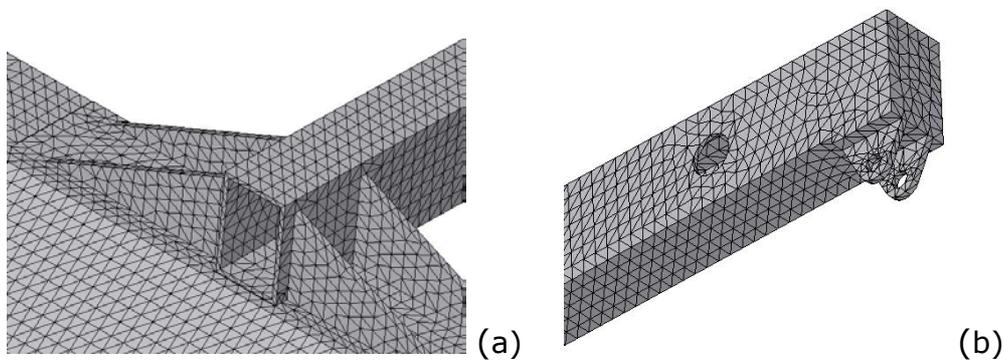


Figura 68 – Pormenor da malha de elementos finitos aplicada à geometria inicial do braço secundário: (a) Pormenor da pá e (b) Pormenor da zona da articulação.

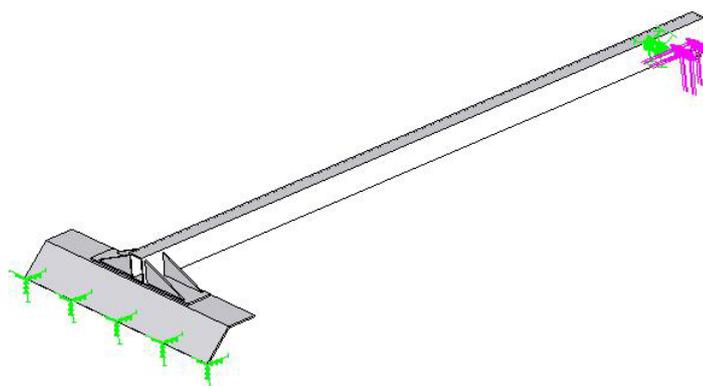


Figura 69 – Representação das condições de fronteira aplicadas à geometria inicial do braço secundário.

As forças consideradas nos ensaios foram aplicadas não no olhal da cavilha do cilindro hidráulico, mas sim na chapa de reforço que está associada a este, de modo que a distribuição da força sobre essa superfície nos traduzisse uma situação mais real e se evitassem concentrações de tensões.

Na geometria inicial (referência 01 7mm) inicia-se o estudo com uma espessura de 7 mm quer para o aço Carbono quer para o aço AISI 304 e avalia-se em que sentido se avança para o modelo seguinte. Da Figura 70 à Figura 73 apresentam-se os resultados obtidos na aplicação em aço carbono e da Figura 74 à Figura 77 os resultados da aplicação em aço AISI 304.

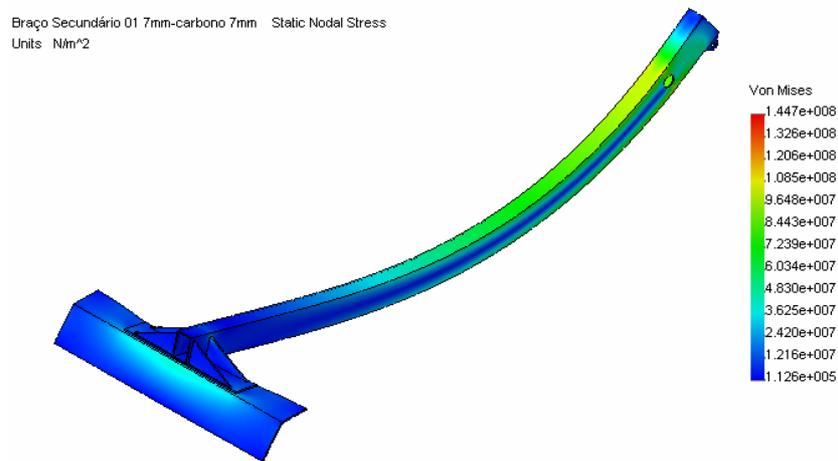


Figura 70 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.

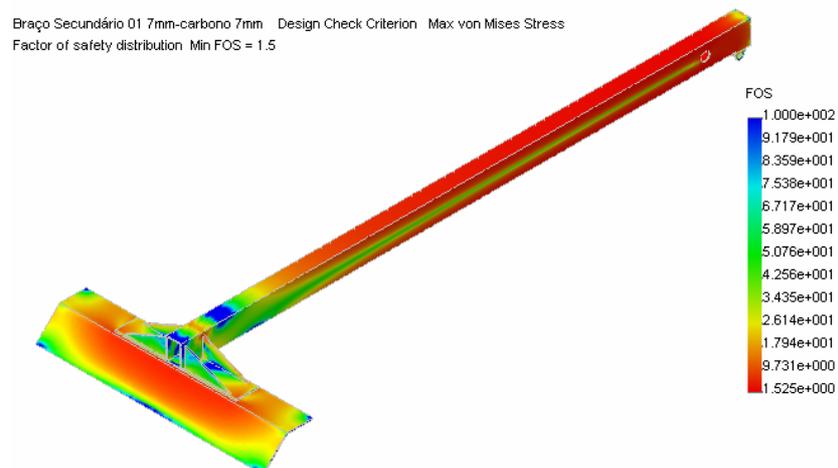


Figura 71 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.

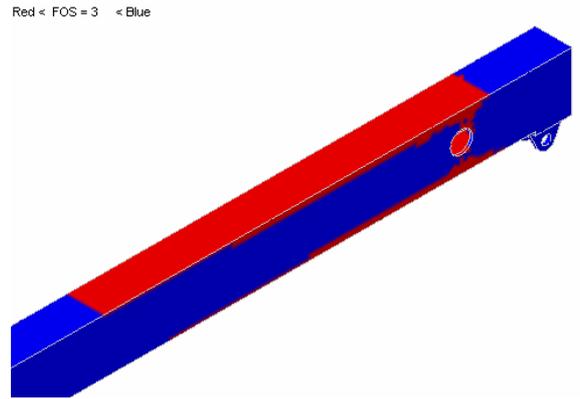


Figura 72 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.

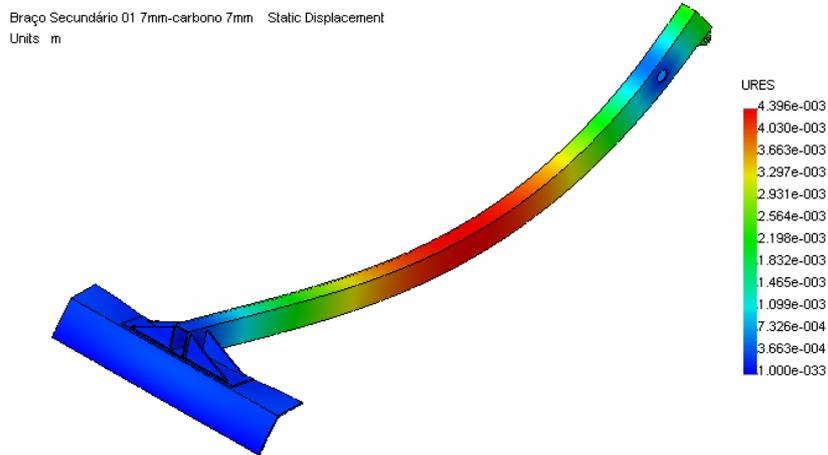


Figura 73 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria inicial em aço Carbono com 7 mm.

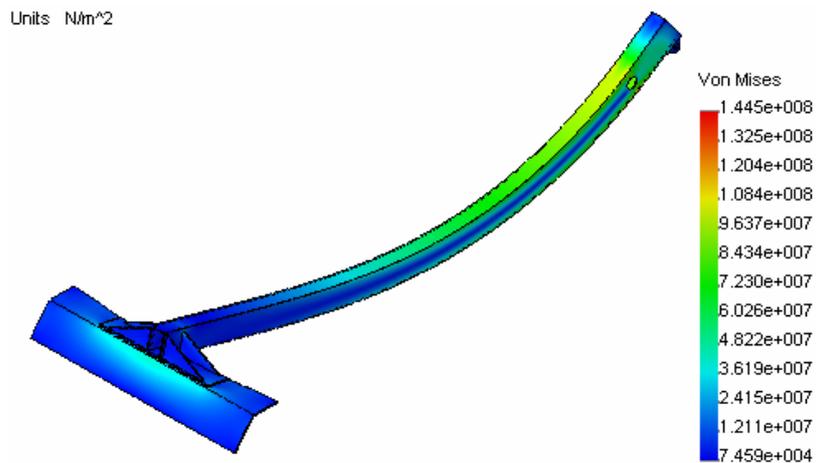


Figura 74 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.

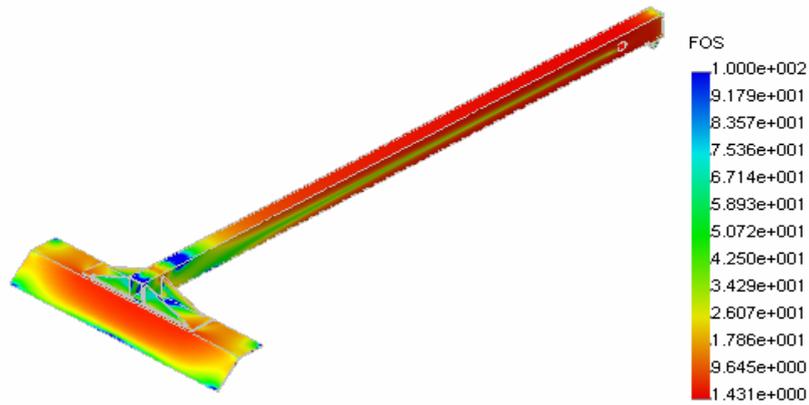


Figura 75 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.

Red < FOS = 3 < Blue

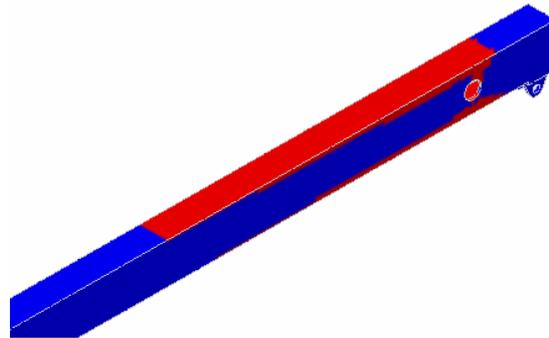


Figura 76 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.

Units m

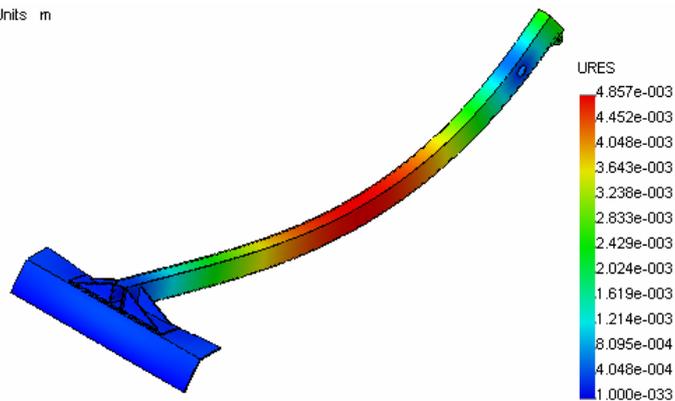


Figura 77 – Representação dos deslocamentos resultantes [m] na geometria inicial em aço AISI 304 com 7 mm.

Todos os valores das tensões equivalentes de von Mises resultam inferiores às tensões de cedência, ou seja, sempre com coeficiente de segurança (FOS) > 1, apesar de ocorrerem alguns pontos de concentração de tensões. Como o objectivo é a diminuição de peso no sentido da optimização, começa-se por reduzir a espessura da viga principal, avançando para uma nova geometria com espessura de 5 mm no corpo da viga (em vez dos anteriores 7 mm).

Com a nova geometria (referência 01 5mm), mantendo as restantes condições, tem-se da Figura 78 à Figura 81 a representação da tensão equivalente de von Mises, a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3 e a representação dos deslocamentos resultantes, respectivamente. Da Figura 82 à Figura 86, tem-se as mesmas representações para a aplicação de aço AISI 304.

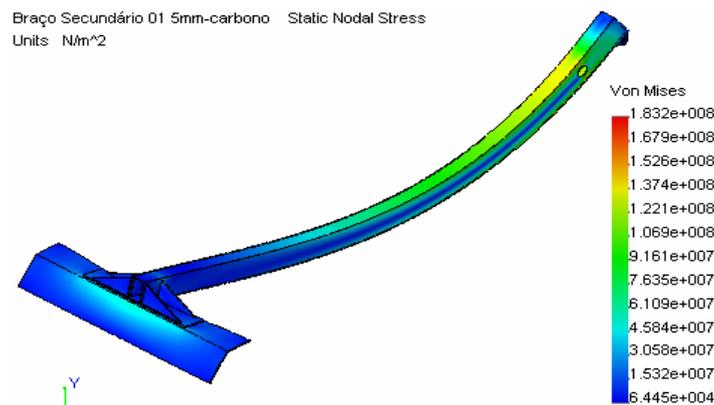


Figura 78 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.

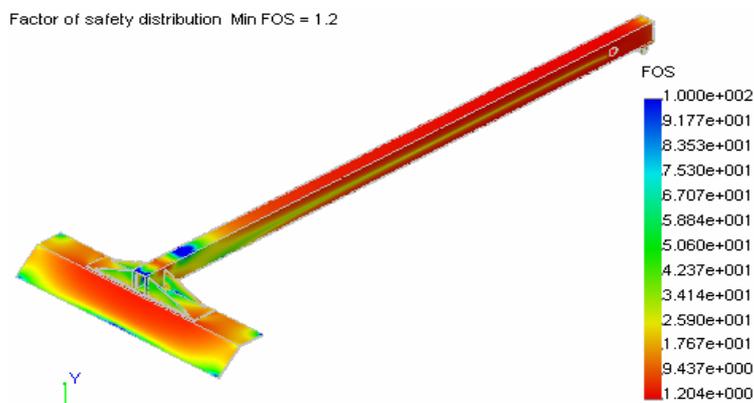


Figura 79 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.

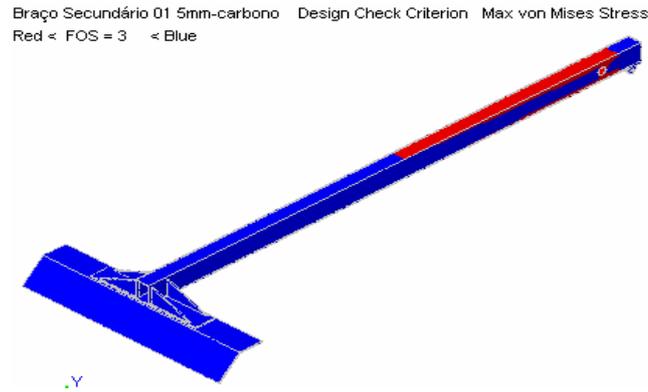


Figura 80 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.

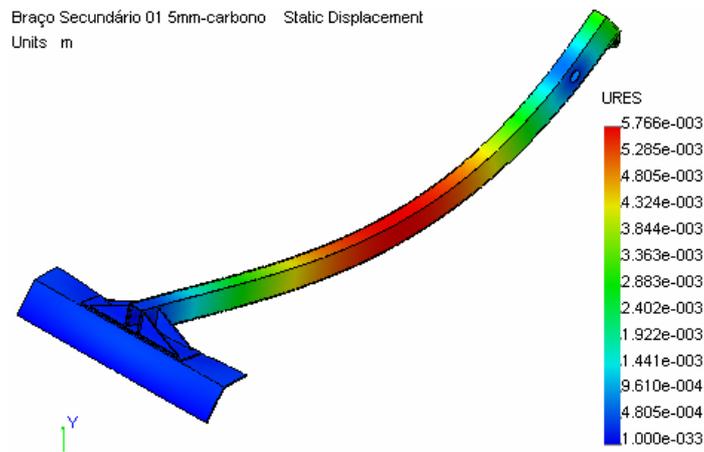


Figura 81 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída em aço Carbono com 5 mm.

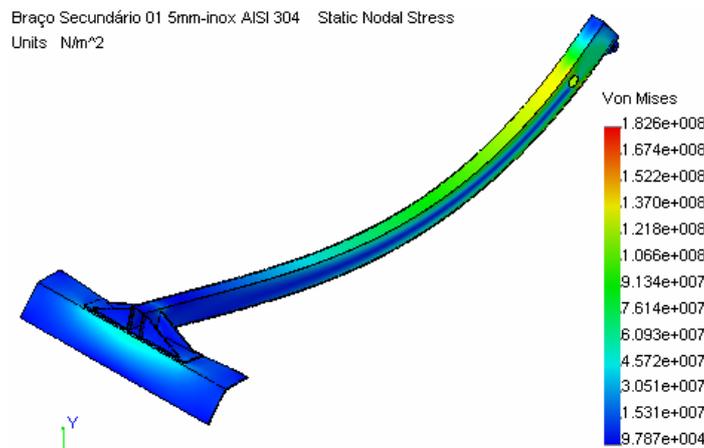


Figura 82 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.

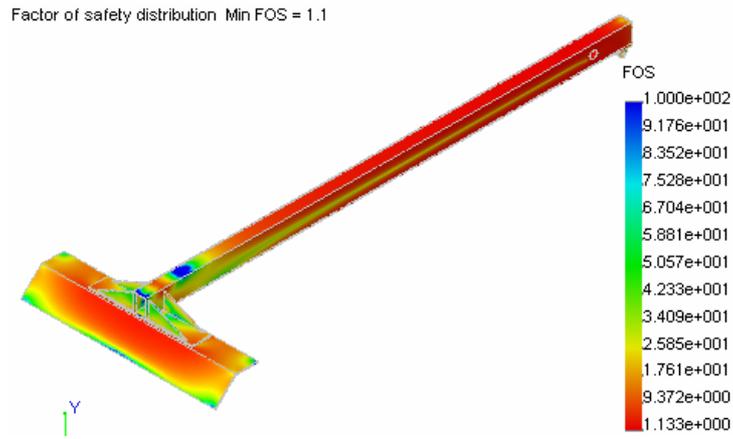


Figura 83 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.

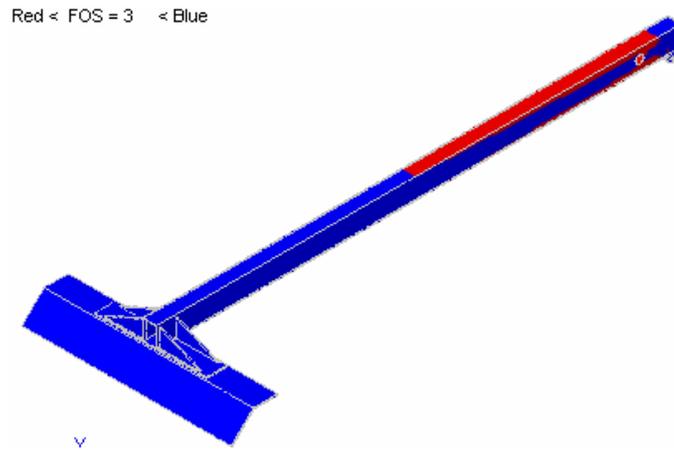


Figura 84 – Representação (a vermelho) das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.

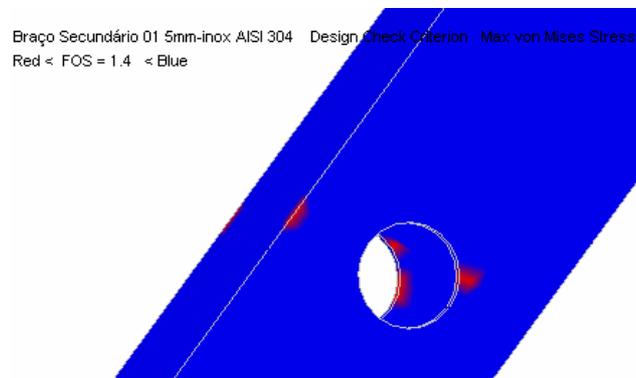


Figura 85 – Representação (a vermelho) em pormenor, das zonas com coeficiente de segurança (FOS) inferior a 1,35 na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.

Na Figura 85 tem-se um pormenor da zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 1,35, para permitir identificar as zonas pontuais mais solicitadas.

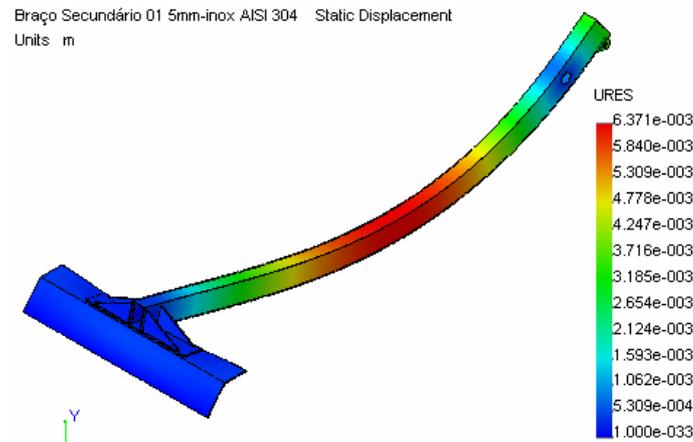


Figura 86 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída em aço AISI 304 com 5 mm.

Todos os valores das tensões equivalentes de von Mises resultam inferiores às tensões de cedência dos materiais, ou seja, o coeficiente de segurança é $(FOS) > 1.1$ no caso do ensaio com aço AISI 304, e $(FOS) > 1.2$ no caso do aço Carbono, apesar de ocorrerem alguns pontos de concentração de tensões.

No caso da evolução anterior verifica-se que o valor da tensão já é, em geral, elevado, observando a Figura 80 e Figura 84 pode confirmar-se que não se deverá reduzir a espessura sem alterar a geometria. Assim, procedeu-se à execução de uma geometria que mantivesse os 5 mm de espessura na viga, mas com secção transversal variável. Adicionalmente, dá-se atenção à optimização da pá do braço secundário, uma vez que as tensões nesta zona são relativamente baixas e as espessuras elevadas relativamente à viga.

Com a nova geometria (referência 02A 5mm) e mantendo as restantes condições passamos aos seguintes resultados. Da Figura 87 à Figura 90 tem-se a representação da tensão equivalente de von Mises, a correspondente distribuição do coeficiente de segurança (FOS), a zona com coeficiente de segurança (FOS) abaixo de 3 e a representação dos

deslocamentos resultantes, respectivamente. Da Figura 91 à Figura 94, tem-se as mesmas representações para a aplicação de aço AISI 304.

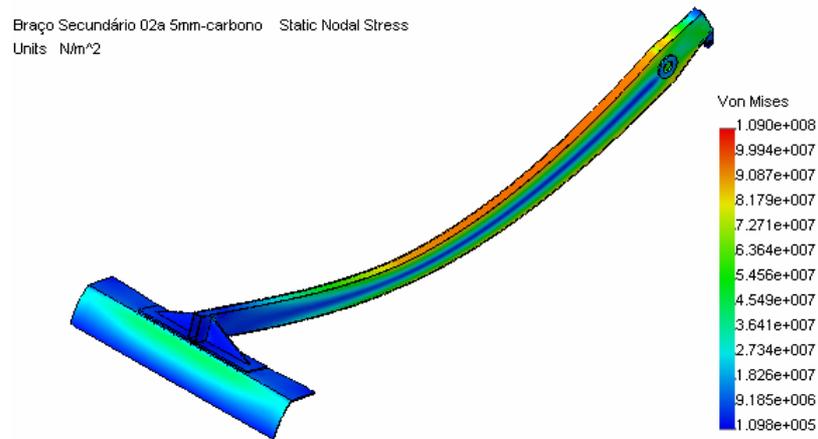


Figura 87 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.

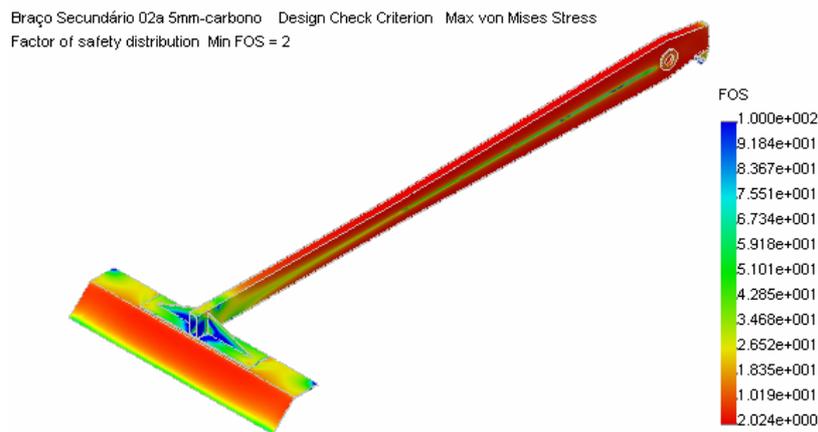


Figura 88 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.

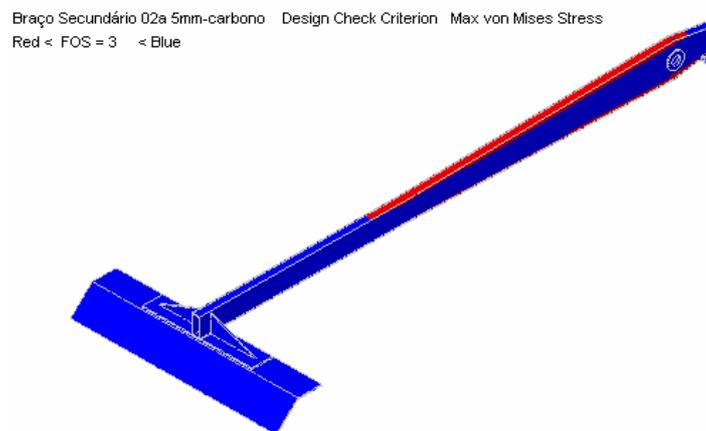


Figura 89 – Representação (a vermelho) do coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.

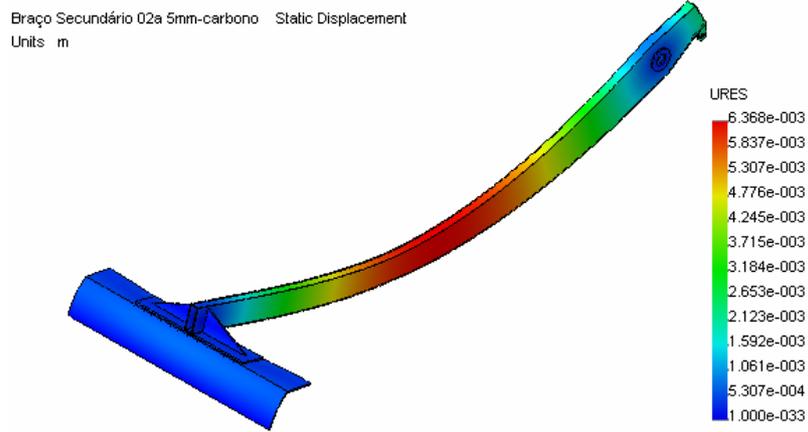


Figura 90 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída2 em aço Carbono com 5 mm.

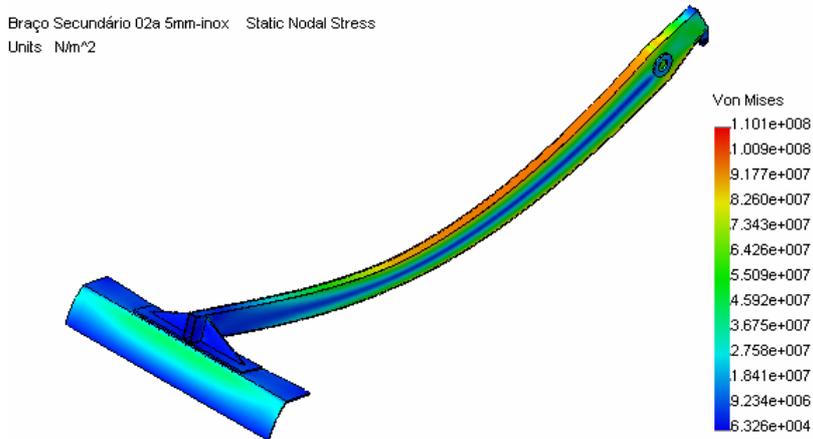


Figura 91 – Representação da tensão equivalente de von Mises [Pa] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.

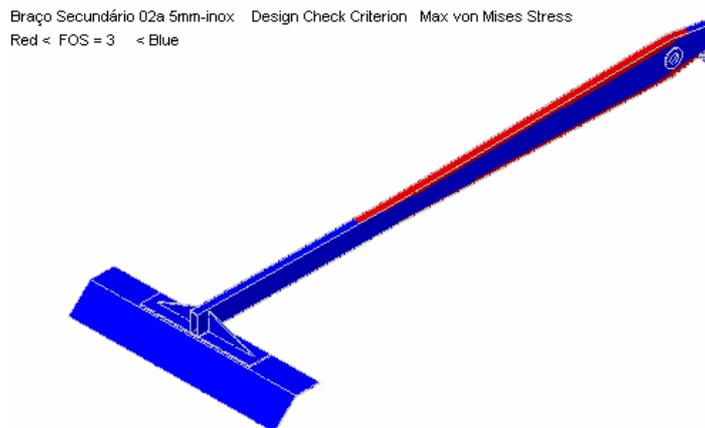


Figura 92 – Representação (a vermelho) do coeficiente de segurança (FOS) inferior a 3 na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.

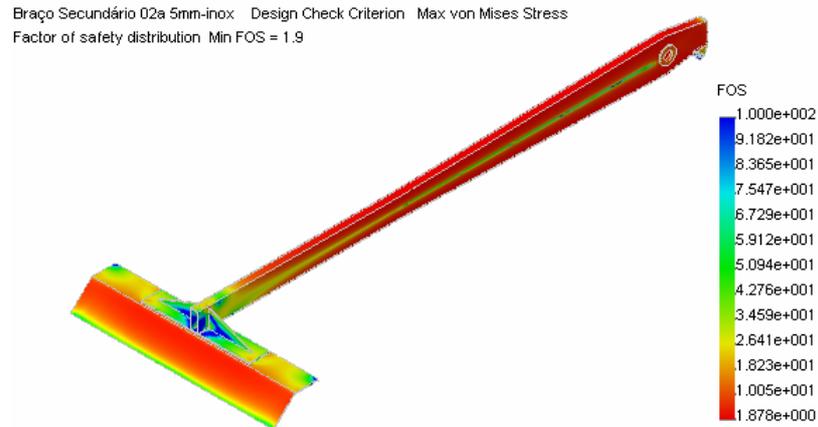


Figura 93 – Representação do coeficiente de segurança (FOS) na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.

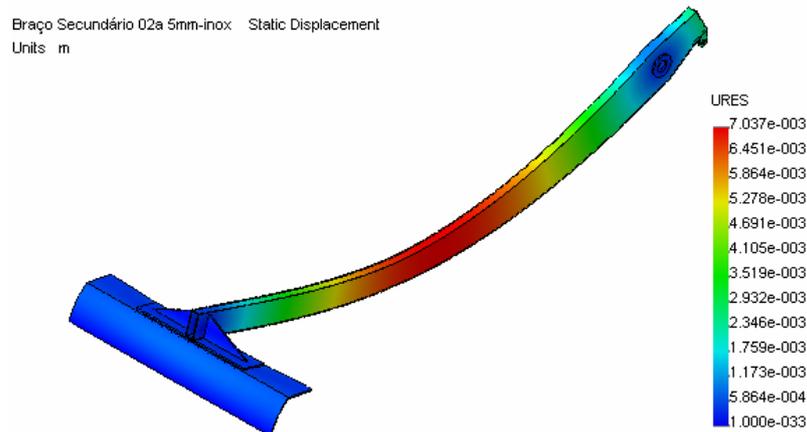


Figura 94 – Representação da deformação efectiva [m] na geometria evoluída2 em aço AISI 304 com 5 mm.

Analisando os resultados da última simulação, podemos considerar esta geometria como a evolução final, tendo necessariamente que se fazer reforços pontuais nas zonas de concentração de tensões. No geral, em ambos os materiais testados, a distribuição das tensões é bastante regular demonstrando que todos os elementos que constituem o braço secundário estão *uniformemente* solicitados a nível de tensões.

Relativamente à rigidez desta geometria, permitiu-se aumentar a flecha a meio da viga em cerca de 2 mm em ambos os materiais ensaiados, com o

objectivo de adaptar a estrutura aos esforços solicitados de modo optimizado.

As diferenças dos valores obtidos entre as soluções aço Carbono e aço AISI 304 não são significativas ao nível das tensões, sendo que entre os valores do coeficiente de segurança nas duas situações existe apenas uma diferença de cerca de 7%, favorável ao aço Carbono. Conforme referido, o coeficiente de segurança dá uma boa aproximação da eficiência estrutural de cada solução uma vez que compara a tensão instalada para uma determinada solicitação com o valor da tensão de cedência de cada material. Em conclusão, pode afirmar-se que a solução em aço AISI 304 é estruturalmente mais eficiente.

Na Tabela 5 pode observar-se um resumo das características das malhas de elementos finitos construídas sobre cada uma das geometrias do braço secundário analisadas neste estudo.

Tabela 5 – Características das malhas de elementos finitos das diferentes geometrias do braço secundário.

Referência da Geometria	01 7mm	01 5mm	02A 5mm
N.º de elementos	38524	38454	36562
N.º de nós	76932	76852	73305
N.º de graus de liberdade	230796	230556	219915

10. Conclusões

Neste capítulo compilam-se as conclusões de cada um dos elementos que levam à solução final do conjunto do descolmatador.

As diferenças entre as primeiras soluções ensaiadas e as soluções propostas para o conjunto final podem ser observadas nos pontos apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Características das geometrias iniciais ensaiadas.

Geometria	Peso [kg]	Custo Carbono [€]	Custo Inox [€]
Base Ref ^a 01	211,78	1060,00	1360,00
Braço Principal Ref ^a 01 6mm	133,40	670,00	880,00
Braço Secundário Ref ^a 01 7mm	163,61	820,00	1050,00
Totais	508,79	2550,00	3290,00

*Os valores apresentados dos custos são meramente indicativos como base de análise.

Podemos observar que, na solução inicial, a diferença de custo entre a construção em aço Carbono e a construção em aço AISI 304 é de cerca de 22,5%, favorável ao aço Carbono.

Tabela 7 – Características das geometrias evoluídas finais ensaiadas.

Geometria	Peso [kg]	Custo Carbono [€]	Custo Inox [€]
Base Refª 02Nova	131,47	760,00	970,00
Braço Principal Refª 02 4mm	123,86	720,00	910,00
Braço Secundário Refª 02A 5mm	116,63	680,00	850,00
Totais	371,96	2160,00	2730,00

*Os valores apresentados dos custos são meramente indicativos como base de análise.

Pode observar-se que na solução evoluída, a diferença de custo entre a construção em aço Carbono e a construção em aço AISI 304 é de cerca de 21%, valor ligeiramente inferior ao verificado para a solução inicial.

Em termos gerais, pode constatar-se uma redução do peso de cerca de 509 kg para cerca de 372 kg, o que corresponde a uma redução de cerca de 26,9% do peso total, que está directamente ligada ao valor associado aos materiais utilizados na construção dos elementos estudados, uma vez que a componente de mão-de-obra associada a cada um deles não deverá variar nesta proporção.

De referir que este estudo apenas se centrou na componente estrutural do descolmatador. Porém, este equipamento tem as componentes eléctrica, de automação (que pouco ou nada varia de solução para solução) e óleo-hidráulica que variará de acordo com a optimização dinâmica da máquina que se pretender.

A redução do peso da parte estrutural móvel do descolmatador (braço principal e braço secundário) em 19% permite concluir que no funcionamento da máquina em vazio, existe uma redução do consumo energético do sistema na mesma ordem, indo ao encontro dos argumentos do *Intelligent Lightweight Design* – ILD.

A geometria final seleccionada para o descolmatador é a que se apresenta na Figura 95.

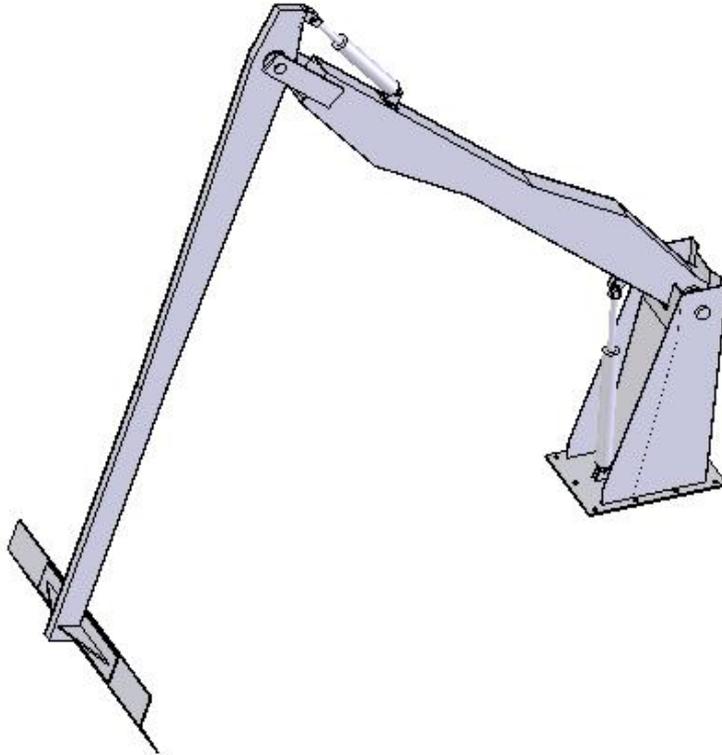


Figura 95 – Solução final do descolmatador.

Conforme referido, a solução em aço AISI 304 tem vantagem sobre a solução aço Carbono uma vez que o primeiro é resistente à corrosão e, conseqüentemente, não necessita de ter em consideração a sobreesspessura de corrosão (frequentemente entre 1 e 2 mm), consoante as condições locais de instalação. Esta solução, embora tenha um custo ligeiramente superior à solução em aço Carbono, em termos da percepção do mercado onde se inserem os descolmatadores, tem grande vantagem uma vez que teria grande aceitação pelo menos nas questões de manutenção da protecção anti-corrosiva. De forma resumida: tecnicamente ambas as soluções são viáveis. Porém, economicamente a solução em aço Carbono é a mais vantajosa. No entanto, comercialmente, dado que o impacto do valor acrescido da construção em aço AISI 304 diluído nas outras parcelas dos

| Conclusões

custos associados não representará mais do que 4% do valor final, deverá ser a solução a adoptar.

Futuramente existe o objectivo de passar à execução de um protótipo à escala de 1:2 e submetê-lo a ensaios reais, de preferência instalado num empreendimento de um cliente.

11. Referências Bibliográficas

- [1] Zambujeiro, V.M. 2008: Intelligent Lightweight Design na optimização de uma máquina de ponte. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal.
- [2] Radhuber, W. 2006: Trashrack Cleaners Types - Experiences. In: 14th International Seminar on Hydropower Plants. Institute for Waterpower and Pumps, Vienna, Austria.
- [3] 2002: Development of 3D Modelling Techniques at Hydro Trash Screens. In: Project Profile 120, Sustainable Energy Programmes, Hydroplan UK.
- [4] Chow, V. T. 1959: Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, United States of America. Capítulo 2.
- [5] 2006: Projecto de Execução do Circuito Hidráulico de Adução à barragem de Odivelas, Volume III – Caderno de Encargos. Parte III – Especificações Técnicas. Secção B – Equipamentos Hidromecânico. Rev1.
- [6] Abril 2008: http://www.watetechinc.com/kunz_trcm.htm.
- [7] Abril 2008: <http://www.hydro.power.alstom.com>.
- [8] 2005: Projecto de Execução do Troço de Ligação Alvito-Pisão, Volume II – Canal de Adução. Tomo II.1 – Memória descritiva e Justificativa. Anexo 4 – Equipamento Hidromecânico, Eléctrico e Automação.

| Referências Bibliográficas

- [9] Shigley, J. E.; Mischke, C. R. e Budynas, R. G. 2004: Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill, United States of America.
- [10] Teixeira-Dias, F. 2000: Mecânica Computacional - Textos de Apoio às Aulas. Universidade de Aveiro.