



Análise de integridade estrutural de uma flare industrial

RICARDO JORGE OLIVEIRA JESUS SOARES

Julho de 2014

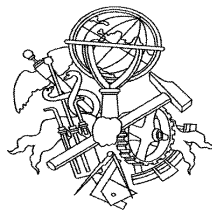
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise de Integridade Estrutural de uma Flare Industrial

Ricardo Jorge Oliveira Jesus Soares

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



9 de agosto de 2014

**Relatório da Unidade Curricular de Projeto do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica**

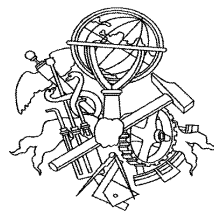
Candidato: Ricardo Jorge Oliveira Jesus Soares, N° 1081280, 1081280@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



9 de agosto de 2014

Dedico este trabalho à minha esposa e ao meu filho pela esforço extraordinário advindo dum pai ausente durante um longo período.

Agradecimentos

Agradeço ao professor e orientador Dr.º Eng.º Raul Campilho pelo auxílio e dedicação, e àqueles que me apoiaram e contribuíram para o enriquecimento do meu saber.

Resumo

Para garantir que um equipamento opere com segurança e fiabilidade durante o seu ciclo de vida, desde a sua instalação ao desmantelamento, devem ser realizadas inspeções e/ou monitorizações que, dependendo dos dados recolhidos, podem implicar avaliações *Fitness-For-Service* (FFS) que definirão a necessidade de reparação ou alteração do equipamento ou das condições processuais.

A combinação de inspeção ou monitorização com os melhores procedimentos e técnicas de avaliação atuais fazem sobressair insuficiências dos procedimentos mais antigos. Usando métodos mais avançados de avaliação, validados e suportados através de uma vasta experiência de campo, pode-se agora avaliar defeitos nos ativos (equipamentos) e determinar a adequação ao serviço com uma análise FFS.

As análises FFS tornaram-se cada vez mais aceites em toda a indústria ao longo dos últimos anos. A norma API 579 - 1/ASME FFS-1: 2007 fornece diretrizes para avaliar os tipos de danos que afetam os equipamentos processuais e a norma API RP 571: 2011 descreve os mecanismos de degradação que afetam os equipamentos nas petroquímicas e refinarias, que incluem os danos por corrosão, desalinhamentos, deformações plásticas, laminações, fissuras, entre outros.

Este trabalho consiste na análise de Integridade Estrutural de uma *Flare* Industrial que surgiu da necessidade real de análise do equipamento no âmbito da atividade profissional do candidato. O estudo realizado a nível profissional é de grande abrangência, incluindo a inspeção do equipamento, identificação da falha ou dano, recolha e registo de dados, definição de estratégia de atuação e seleção de técnicas de avaliação da condição para posterior alteração, reparação ou desmantelamento. Na presente dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Ramo Construções Mecânicas, pretende-se efetuar o estudo aprofundado de uma das etapas de projeto, nomeadamente estudar a causa, avaliar a falha e implicações estruturais ou processuais devido à degradação interior do *riser* de uma *flare*,

com base numa análise FFS, assumindo a operabilidade em segurança e garantindo resolutas condições de funcionamento.

A presente análise FFS tem como finalidade validar ou não a integridade atual (avaliação técnica quantitativa) de modo a conhecer se o item em questão é seguro e confiável para continuar a operar em condições específicas durante um período de tempo determinado, tendo em consideração as condições verificadas no ato de inspeção e especificações de projeto, segundo os itens de verificação de segurança estabelecidos na norma EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 e com base na norma API 579-1/ASME FFS-1: 2007. No âmbito do presente trabalho foram realizadas as seguintes tarefas:

- Identificar e analisar os mecanismos de degradação com base na norma API RP 571: 2011, face às condições processuais e geométricas que o equipamento em análise está sujeito de modo a perceber a evolução da degradação estrutural e quais as implicações na sua longevidade.
- Avaliar e propor soluções de reparação e ou alterações processuais e ou geométricas do equipamento em análise de modo a permitir a continuidade em funcionamento sem afetar as condições de segurança e por conseguinte minimizar ou evitar o elevado custo económico associado a um novo equipamento e tempo de paragem processual.
- Assumir limites estruturais face às condições processuais e ações externas ou adjacentes.
- Garantir a segurança e qualidade da vida humana ou meio que o rodeia, do equipamento, das instalações, das infraestruturas envolventes e evitar o colapso económico, quer por motivos processuais, quer indemnizações ou agravamento do prémio do seguro.

Verificou-se que os resultados serão a base para as alterações inerentes, tais como reforço estrutural, alteração da geometria do defletor, ajuste no tensionamento dos cabos e controlo da espessura mínima, de modo a alargar o período de vida útil da *flare* com segurança.

Palavras-Chave

Fitness-For-Service, Falha, Corrosão, Rotura, Deformação, Tensões, MEF, CFD, Ações, Modal, Amplitude, Fadiga, Segurança, Processo.

Abstract

To ensure that an equipment operates safely and reliably during its lifecycle, from installation to decommission, inspection and/or monitoring operations must be performed that, depending on the data collected, may involve Fitness-For-Service (FFS) evaluations to define the need for repair or changes of the equipment or in the process conditions.

The combination of inspection or monitoring procedures with the best state of art assessment techniques stand out limitations of the older procedures. Using more advanced evaluation methods, validated and supported by a wide field experience, it is now possible to evaluate defects in the assets (equipments) and to determine the suitability for service by an FFS analysis swiftly and with confidence.

FFS analyzes have become increasingly more accepted across the industry over the past few years. The standard API 579 - 1/ASME FFS-1: 2007 provides guidelines for assessing the types of damages that affect the process equipment and the standard API RP 571: 2011 describes the degradation mechanisms that affect the equipment in petrochemical plants and refineries, which include damage due to corrosion, misalignments, plastic deformations, laminations, cracks, among others.

This work consists in a Structural Integrity Analysis of an Industrial Flare that comes from the real need for analysis of an equipment under the scope of the professional activity of the candidate. The study was carried out at the professional level and it has a wide scope, including the inspection of the equipment, identification of failure or damage, data collection and recording, definition of acting strategy and selection of techniques for assessing the condition for further modification, repair or decommissioning. In this Mechanical Engineering dissertation in Mechanical Constructions, we intend to make an in-depth study of one of the stages of design, particularly studying the source, evaluate the failure and structural or process implications due to degradation inside the flare riser, based on a FFS analysis, to achieve safe operability and ensuring certain operation conditions.

This FFS analysis aims to validate or not the current integrity (technical quantitative assessment) in order to know if the asset is safe and reliable to continue to operate under specified conditions for a for a certain period of time, taking into account the conditions verified at the time of inspection and design specifications, according to the security check items present in the standard EN 1990:2002 / A1: 2005/AC: 2010 and based on the standard API 579-1/ASME FFS-1: 2007. The following tasks were performed:

- Identify and analyze the degradation mechanisms based on the standard API RP 571: 2011, with the process and geometric conditions that the studied equipment is subjected to, in order to understand the evolution of structural degradation and which are the implications on its longevity.
- Evaluate and propose repair solutions and/or procedural and/or geometric changes and the equipment in demand to allow continuity in operation without affecting the safety conditions and therefore minimize or avoid the high economic cost associated with new equipment and process downtime.
- Impose structural limits with the process conditions and external or adjacent actions.
- Ensure the safety and quality of human life or the surrounding, equipment, facilities, the surrounding infrastructure and avoid economic collapse, either on process reasons or by compensation or worsening of the insurance premium.

The obtained results are the basis for inherent modifications such as structural reinforcement, amendment of the deflector geometry, adjusting the tensioning of the cables and control the minimum thickness in order to extend the safely life of the flare.

Keywords

Fitness-For-Service, Failure, Corrosion, Rupture, Deformation, Stresses, FEA, CFD, Actions, Modal, Amplitude, Fatigue, Safety, Process.

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
NOMENCLATURA	XXIII
RESUMO NORMATIVO	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 EQUIPAMENTO E SEU FUNCIONAMENTO PROCESSUAL.....	3
2.2 AVALIAÇÃO FITNESS-FOR-SERVICE (FFS).....	9
2.2.1 <i>Aparecimento da avaliação Fitness-For-Service (FFS)</i>	9
2.2.2 <i>Âmbito da avaliação FFS por API/ASME padrão API 579-1/ASME FFS- 1</i>	10
2.2.3 <i>Tipos de falhas e condições de falha</i>	10
2.2.4 <i>Níveis e técnicas de avaliação</i>	11
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	13
2.3.1 <i>Dinâmica computacional de fluidos - CFD</i>	14
2.4 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	17
2.4.1 <i>Natureza da corrosão</i>	18
2.4.2 <i>Fatores de corrosão</i>	18
2.4.2.1 <i>Efeito de escoamento de fluidos</i>	19
2.4.2.2 <i>Efeito de temperatura</i>	19
3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA FLARE INDUSTRIAL	21
3.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	21
3.2 IDENTIFICAÇÃO DA FLARE	23
3.3 CARATERIZAÇÃO DA FLARE	25
3.4 CONFIGURAÇÃO/DIMENSÕES DA FLARE.....	26
3.5 EQUIPAMENTOS	30
3.6 MODELAÇÃO E CONSIDERAÇÕES	31
3.6.1 <i>Parâmetros considerados - MEF</i>	31
3.6.1.1 <i>Modelo e criação de malha</i>	31

3.6.1.2	Condição fronteira do modelo	38
3.6.2	<i>Parâmetros considerados - CFD</i>	39
3.6.2.1	Modelo e criação de malha	40
3.6.2.2	Condição fronteira do modelo	42
3.7	AÇÕES ESTRUTURAIS E NÃO ESTRUTURAIS	42
3.7.1	<i>Ações permanentes</i>	43
3.7.2	<i>Ações variáveis</i>	43
3.7.2.1	Sobrecarga de utilização no topo	43
3.7.2.2	Ações do gelo	43
3.7.2.3	Ações térmicas	44
3.7.2.4	Ações devidas ao movimento das fundações.....	46
3.7.2.5	Ações devidas a sismos	47
3.7.2.6	Ações devidas ao vento	48
3.8	MÉTODO DE CÁLCULO	49
3.8.1	<i>Método de cálculo, dimensionamento e modelação estrutural</i>	49
3.8.2	<i>Método de cálculo, dimensionamento e modelação cabos</i>	50
3.9	RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL	51
3.9.1	<i>Verificação de segurança aos estados limites últimos</i>	51
3.9.1.1	Determinação da ação de base	51
3.9.1.2	Verificação de segurança do corpo da flare	53
3.9.1.3	Verificação de segurança dos olhais de amarração em pormenor.....	56
3.9.1.4	Verificação de segurança dos cabos	59
3.9.2	<i>Verificação de segurança aos estados limites de utilização</i>	62
3.9.2.1	Verificação de segurança da flare	62
3.9.2.2	Verificação de segurança dos cabos	63
3.10	LIGAÇÃO AO SOLO.....	65
3.10.1	<i>Fixação</i>	65
3.11	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA À FADIGA.....	65
3.11.1	<i>Análise modal</i>	65
3.11.2	<i>Verificação da segurança à fadiga do corpo da flare</i>	67
3.11.3	<i>Verificação da segurança à fadiga dos cabos</i>	68
3.11.4	<i>Vibração nos cabos</i>	69
3.12	ROTURA DA ESPIA DE MAIOR SOLICITAÇÃO	72
4	ESTUDO DOS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E BENEFICIAÇÃO DA ESTRUTURA ..	75
4.1	MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	75
4.1.1	<i>Análise numérica para interpretação e análise do comportamento do fluido nas condições atuais de funcionamento</i>	77
4.1.2	<i>Análise numérica para interpretação e análise do comportamento do fluido com alterações idealizadas</i>	81
5	CONCLUSÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	87
6	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	91

<i>ANEXO A. DESENHO GERAL DA FLARE</i>	93
<i>ANEXO B. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA FLARE</i>	95
<i>ANEXO C. ESPECIFICAÇÕES DA FLARE</i>	97
<i>ANEXO D. ESPECIFICAÇÕES DOS CABOS DA FLARE</i>	111

Índice de figuras

Figura 1 - Sistema de queima simplificado	5
Figura 2 - Sistema operacional - ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008	7
Figura 3 - Tipos de flares - API Std 537 / ISO 25457:2008.....	8
Figura 4 - Conteúdo da API 579-1/ASME FFS 1: 2007	11
Figura 5 - Níveis e técnicas de avaliação aplicadas	11
Figura 6 – Ações e sequência de atuação	22
Figura 7 - <i>Flare</i> -FL-0000	24
Figura 8 – Implantação da <i>flare</i>	24
Figura 9 – Espiamento – Nível 1, 2 e 3	25
Figura 10 – Base da <i>flare</i>	25
Figura 11 – Ligação das espias à fundação	25
Figura 12 – Ligação de 36” balão- <i>flare</i>	25
Figura 13 - Ligação das espias à <i>flare</i>	25
Figura 14 - <i>Flare</i> e orientação.....	27
Figura 15 - Balão de selagem molecular.....	28
Figura 16 - Queimador	28
Figura 17 - Cabo 6×36 com alma metálica	29
Figura 18 - Ligação das espias	29
Figura 19 - Ligação da base	30
Figura 20 – Pormenor do desenho geral da <i>flare</i>	32
Figura 21 - Localização das espias.....	33
Figura 22 - Modelo da <i>flare</i>	34
Figura 23 – Caracterização estrutural.....	35
Figura 24 – Malha – Global	37
Figura 25- Refinamento da malha - Base.....	37
Figura 26 – Pormenor - apoios da base.....	38
Figura 27 - Ligações ao exterior do modelo.....	39
Figura 28 - Entrada e saída - <i>flare</i>	40
Figura 29 - Malha do fluido - geral.....	41
Figura 30 - Malha do fluido - pormenor	41
Figura 31 - Volume de controlo	42
Figura 32 - Zonamento do país para a ação do gelo.....	44
Figura 33 - Distribuição de temperatura no corpo da <i>flare</i>	45

Figura 34 - Distribuição das isolinhas no corpo da <i>flare</i>	46
Figura 35 - Carga do vento no corpo da <i>flare</i>	48
Figura 36 - Carga do vento nas espias da <i>flare</i>	49
Figura 37 - Resultados da aplicação das ações do vento (a) e sísmica (b).....	51
Figura 38 - Combinações fundamentais – Ação de base: vento.....	53
Figura 39 - Distribuição de tensões equivalentes de von Mises no corpo (MPa).....	54
Figura 40 - Pormenor de localização das tensões equivalentes de von Mises mais elevadas (MPa).....	55
Figura 41 – Pormenor de olhais de amarração	56
Figura 42 - Discretização mais refinada - olhal de amarração do 3º espionamento.....	57
Figura 43 - Resultados gráficos das tensões nos olhais de amarração - situação atual	57
Figura 44 - Representação gráfica das soluções apresentadas	58
Figura 45 - Resultados gráficos das tensões nos olhais de amarração - situação proposta	59
Figura 46 - Resultados gráficos da deslocação máxima no topo (resultados em cm).....	63
Figura 47 - Espectro de turbulência atmosférica.....	66
Figura 48 - Resultados da velocidade crítica do vento.....	68
Figura 49 - Cargas devidas à ação do vento a 15m/s e peso próprio.....	70
Figura 50 - Amplitude máxima nos cabos - ação do vento 15m/s	71
Figura 51 - Carga accidental-rotura da espia de maior solicitação	72
Figura 52 - Rotura da espia de maior solicitação no modelo em análise	73
Figura 53 - Tensão máxima na espia mais solicitada após rotura	73
Figura 54 – Componentes do corpo da <i>flare</i> : <i>riser</i> (pos.8), chapa de fundo defletora (pos.10) e flange de entrada do fluido (pos.12).....	76
Figura 55 - Cavados no <i>riser</i> e chapa de fundo defletora.....	77
Figura 56 - Modelo de simulação do comportamento do fluido	78
Figura 57 - Pormenores da entrada e saída do fluido no corpo da <i>flare</i>	79
Figura 58 - Velocidade de fluido obtida à entrada da <i>flare</i>	80
Figura 59 - Vorticidade de fluido, obtida na ligação da entrada da <i>flare</i> e o <i>riser</i>	80
Figura 60 - Comportamento do fluido.....	81
Figura 61 - Representação do defletor em meia cana.....	82
Figura 62 - Representação da chapa de fundo defletora côncava.....	83
Figura 63 - Velocidade do fluido obtida com alterações idealizadas.....	83
Figura 64 - Vorticidade de fluido obtida com alterações idealizadas.....	84
Figura 65 - Variação da pressão ao longo da parede.....	84
Figura 66 - Comportamento das partículas no fluido obtido com alterações idealizadas	85

Índice de tabelas

Tabela 1 - Localização da flare	24
Tabela 2 -Equivalências de materiais.....	26
Tabela 3 – Valores mínimos de tensão limite de elasticidade a 0,2% para elevadas temperaturas (MPa).....	26
Tabela 4 - Equipamentos instalados.....	30
Tabela 5 - Opções de geração de malha	36
Tabela 6 - Parâmetros para definição dos elementos cabo.....	38
Tabela 7 - N° células da malha CFD	41
Tabela 8 - Limites do volume de controle	42
Tabela 9 - Valores característicos dos cabos.....	60
Tabela 10 - Resultados de F_{Rd}	61
Tabela 11 - Resultados do cociente da F_{ed} e F_{rd}	61
Tabela 12 – Resultados de deslocamento obtidos	62
Tabela 13 - Resultados obtidos	64
Tabela 14 - Valores de coeficiente de segurança	64
Tabela 15 - Resultados da análise modal	66
Tabela 16 - Resultados obtidos	69
Tabela 17 - Coeficiente de segurança	74
Tabela 18 - Valores de pré-esforço	88

Nomenclatura

Caracteres Gregos

- \emptyset – Diâmetro genérico
- θ – Ângulo genérico
- σ – Tensão genérica
- η – Coeficiente dependente da zona de ação do gelo

Abreviaturas

- API - *American Petroleum Institute*
- ASME - *American Society of Mechanical Engineers*
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- CFD - *Computational Fluid Dynamics*
- FFS - *Fitness-for-Service*
- MEF - Método de elementos finitos
- PV - *Pressure Vessel*
- RSAEEP - Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes

Resumo normativo

- | | |
|---------------------------------------|--|
| API 579-1/ASME FFS-1:2007 | - <i>Fitness-For-Service</i> |
| API 579-2/ASME FFS-2:2009 | - <i>Fitness-For-Service Example Problem Manual</i> |
| API Std 537 / ISO 25457:2008 | - <i>Flare Details For General Refinery and Petrochemical Service</i> |
| ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008 | - <i>Pressure-Relieving and Depressuring Systems</i> |
| API Std 520-1: 2013 / ISO 4126 | - <i>Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices</i> |
| EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 | - <i>Eurocode - Basis of structural design</i> |
| EN 1991-1-5:2003/AC:2009 | - <i>Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions</i> |
| EN 1993-1-9:2005/AC:2009 | - <i>Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue</i> |
| EN 1991-1-4:2005/AC:2010 | - <i>Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions</i> |
| EN 1993-3-1:2006/AC:2009 | - <i>Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts</i> |
| EN 1993-1-6:2007/AC:2009 | - <i>Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures</i> |

- EN 1993-1-11:2006/AC:2009 - *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-11: Design of structures with tension components*
- EN 10264-1:2012 - *Steel wire and wire products - Steel wire for ropes - Part 1: General requirements*
- EN 1997-1:2004/AC:2009 - *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*
- EN 1998-6:2005 - *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 6: Towers, masts and chimneys*
- EN 1998-1:2004/AC:2009 - *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*
- API RP 571: 2011 - *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining and Petrochemical Industries*
- EN ISO 12494:2001 - *Atmospheric icing of structures*
- ASME B & PV Secção VIII Divisão 1 e 2:2013 - *Boiler and Pressure Vessel Code*
Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels
Division 1 - Basic Rules
Division 2 - Alternative Rules
Division 3 - Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels

- ASME Section I:2010 - *Rules for Construction of Power Boilers*
- ASME B31.3:2009 - *Process Piping*
- EN 10028-2:2009 - *Flat Products Made of Steels for Pressure Purposes - Part 2: Non-Alloy and Alloy Steels with Specified Elevated Temperature Properties*
- EN 12385-2:2002+A1:2008 - *Steel Wire Ropes - Safety - Part 2: Definitions, Designation and Classification*
- API Std 650:2013 - *Welded Steel Tanks for Oil Storage*
- API Std 620:2008+A1:2009+A2:2010 - *Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks*
- API Std 510:2014 - *Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration*
- API Std 570:2009 - *Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems*
- API RP 580:2013 - *Risk Based Inspection Training*
- API RP 581:2008 - *Risk-Based Inspection Technology*
- API Std 653:2008 +A1:2010 +A2:2012 +A3:2013 - *Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction*

1 Introdução

O presente trabalho é realizado no âmbito do mestrado de Engenharia Mecânica, Ramo Construções Mecânicas e consiste na Análise de Integridade Estrutural de uma *Flare* Industrial.

Face à perda de espessura no *riser*¹ de uma *flare*, equipamento processual de uma refinaria, dano identificado aquando a inspeção, surgiu a necessidade de uma avaliação especializada com a finalidade de perceber o impacto processual, condicionalismo estrutural e assegurar a sua continuidade em serviço, com recurso a técnicas e metodologia de avaliação *FFS*, Nível 3, segundo norma API 579-1/ASME FFS-1: 2007.

Esta avaliação terá por base a recolha e registo de dados no ato da inspeção do equipamento, a falha ou dano identificado, o projeto inicial do equipamento, as condições processuais de operação, de projeto e as ações externas. A análise documental do equipamento será realizada em paralelo com os códigos inerentes ao tipo de equipamento, *flare*, e sistema operacional conforme as normas API Std 537 / ISO 25457:2008 e ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008, respetivamente.

A finalidade é a validação da integridade atual do equipamento, procedendo a uma avaliação técnica quantitativa, segundo os itens de verificação de segurança estabelecidos na norma EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 e com base na norma API 579-1/ASME FFS-1: 2007, assumindo a operabilidade em segurança e garantindo resolutas condições de

¹ *Riser* significa tubo de subida de gases.

funcionamento. Esta validação será realizada com recurso a ferramentas de análise avançada computadorizadas, método de elementos finitos (MEF).

Pretende-se também identificar e analisar os mecanismos de degradação com base na norma API RP 571: 2011, face às condições processuais e geométricas do equipamento de modo a perceber a evolução da degradação estrutural e qual a sua implicação no período de vida útil. Esta análise também será realizada com recurso a ferramentas de análise avançada computadorizadas, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para analisar o comportamento do fluido.

Por conseguinte, pretende-se avaliar e propor soluções de reparação e ou alterações processuais e ou geométricas do equipamento em análise, de modo a permitir a continuidade em funcionamento sem afetar as condições de segurança e paragem processual. Serão utilizadas mais uma vez as ferramentas de MEF, que permitiram encontrar o melhor cenário de reforço ou alteração, sem que sejam realizadas quaisquer alterações físicas ao equipamento.

Para terminar, procurar estabelecer limites estruturais face às condições processuais e ações externas ou adjacentes para posterior controlo ou monitorização da condição do equipamento, alteração, reforço e ou reparação.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Equipamento e seu funcionamento processual

Uma *flare* é um dispositivo de queima de gás presente nas indústrias, tais como refinarias de petróleo, indústrias químicas, fábricas de processamento de gás natural, bem como nos locais de produção de petróleo ou gás que têm poços de petróleo *onshore* ou *offshore*², plataformas de gás e aterros sanitários.

Nas plantas industriais, as *flares* são usadas principalmente para a queima de gás inflamável libertado por válvulas de alívio de pressão de equipamentos processuais, durante o funcionamento normal ou não planejado, paragens programadas ou não e durante *startups*³.

As *flares* são também muitas vezes utilizadas para a combustão de gases em períodos planejados. Na produção de petróleo e gás, quando o óleo é extraído do petróleo bruto e produzido a partir de poços de petróleo em terra ou mar, o gás natural bruto associado ao processo é libertado à superfície. Especialmente em áreas que não existam oleodutos ou outras infraestruturas de transporte de gás, uma grande quantidade desse gás é frequentemente queimado como resíduo ou gás inutilizável. A queima desse gás pode ocorrer no topo de uma *flare* [1-3].

² Onshore entende-se por exploração petrolífera que opera em terra e offshore entende-se por exploração petrolífera que opera afastado da costa (produção no mar).

³ Startups significa atos de começar algo, arranques.

Durante este processo os gases e líquidos libertados são encaminhadas através de sistemas de tubagens para a queima. A maioria das plantas industriais têm um separador de líquido-gás, *Knockout Drum*, a montante da queima para remover quaisquer líquidos que possam estar presentes nos gases libertados.

O tamanho e o brilho da chama resultante depende do caudal e da composição química inflamável dos gases.

Frequentemente é injetado vapor enriquecido com ar na corrente de gás, na extremidade do queimador, com dois objetivos. Em primeiro lugar, o ar melhora a combustão e em segundo, o vapor serve para criar turbulência e assim misturar o ar e ventilar o gás ainda mais, e por conseguinte reduzir a formação de fumo negro. O problema é que algumas operadoras parecem acreditar que se um pouco de vapor é bom, mais vapor é melhor. Se o gás de combustão se tornar demasiado diluído a queima torna-se menos eficiente ou até interrompe queima. Esta situação é conhecida como "*over steaming*". As emissões tornam-se assim mais elevadas [4].

A fim de manter o sistema de queima funcional, uma pequena quantidade de gás é queimado continuamente, por uma chama piloto, de modo a que o sistema esteja sempre pronto para a sua função primária, ou seja, sistema de segurança para um sistema de processo sobre pressão.

Para melhor perceção do funcionamento da queima o diagrama que se segue (Figura 1) ilustra os principais componentes de um sistema típico simplificado [5-7].

Descrevem-se de seguida os principais constituintes de um sistema de queima por flare:

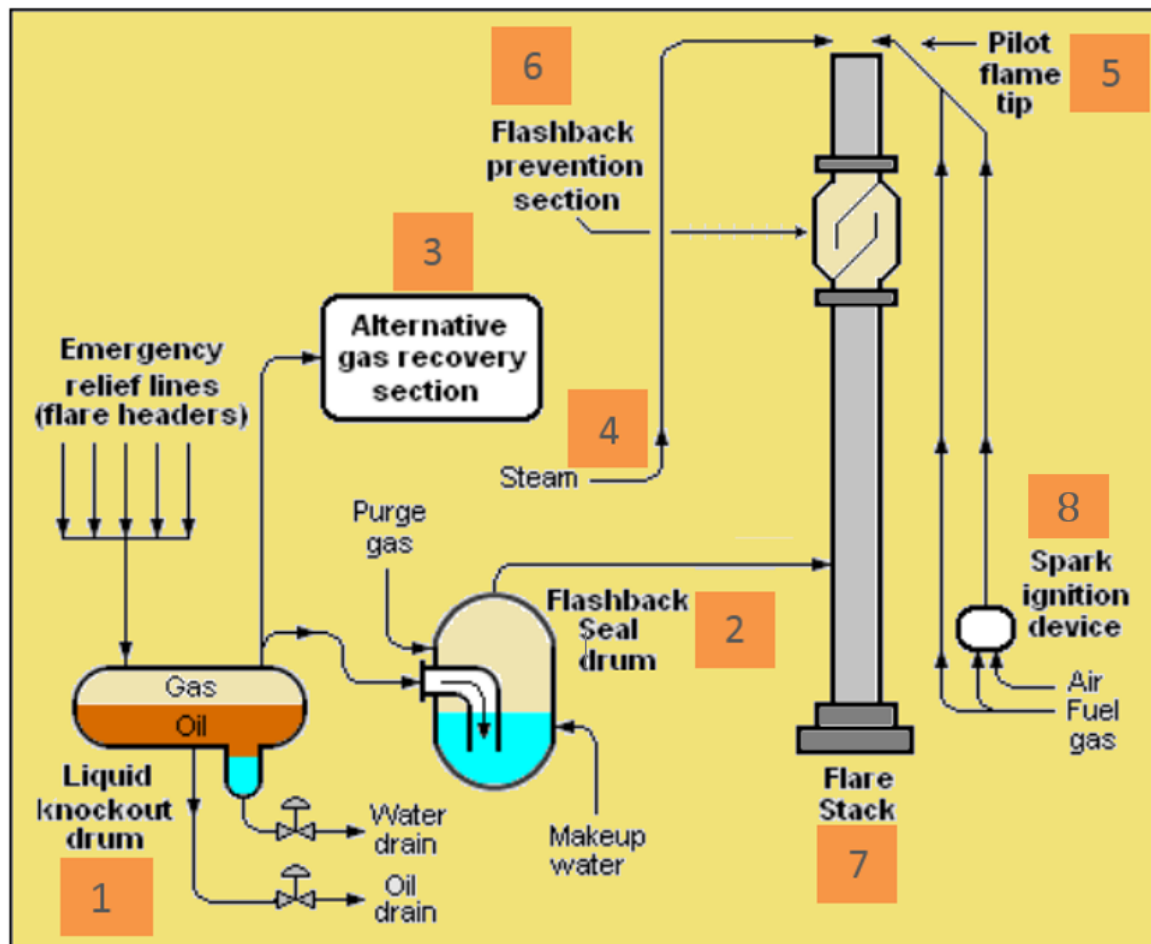


Figura 1 - Sistema de queima simplificado

1- Knockout drum – Equipamento processual que tem como finalidade remover grande parte do fluido líquido, o que permite recuperar os hidrocarbonetos líquidos e retirar a água dos gases libertados para uma melhor queima, o que permite aumentar o período de vida útil da flare;

2- Water seal drum – Equipamento de segurança que tem como finalidade evitar qualquer retrocesso da chama, infiltração de ar e ajudar a manter a pressão. Alguns sistemas incluem um flame arrestor (supressor de chamas) adicional;

3- Alternative gas recovery section – Sistema alternativo de recuperação de gás, onde o gás recuperado é encaminhado para o sistema de combustão geral;

4- Steam line - Sistema de injeção de vapor que tem como finalidade proporcionar uma força de impulso externa à chama;

5- Pilot flame - Chama piloto (com sistema de ignição) que tem como finalidade garantir a operacionalidade da queima sempre que necessário;

6- Molecular seal – Equipamento instalado no corpo da *flare* tem como principais funções impedir o retrocesso do gás para queima e a entrada do ar na *flare*, também designado por balão de selagem molecular. Este tipo de selagem utiliza a diferença entre as massas moleculares do gás para queima e o ar infiltrado para formar uma vedação e assim evitar a entrada do ar na *flare* por gravidade. Um arranjo combinado de duas curvas de 180 ° (uma dobra para cima e uma dobra para baixo) impede que o ar entre no *riser* da *flare*. Se o gás para queima é mais leve do que o ar, então o gás acumula-se na parte superior do balão de selagem, e impede a infiltração do ar no sistema. Se o gás para queima é mais pesado do que o ar, o gás de purga acumula-se na parte inferior da vedação e impede a infiltração de ar.

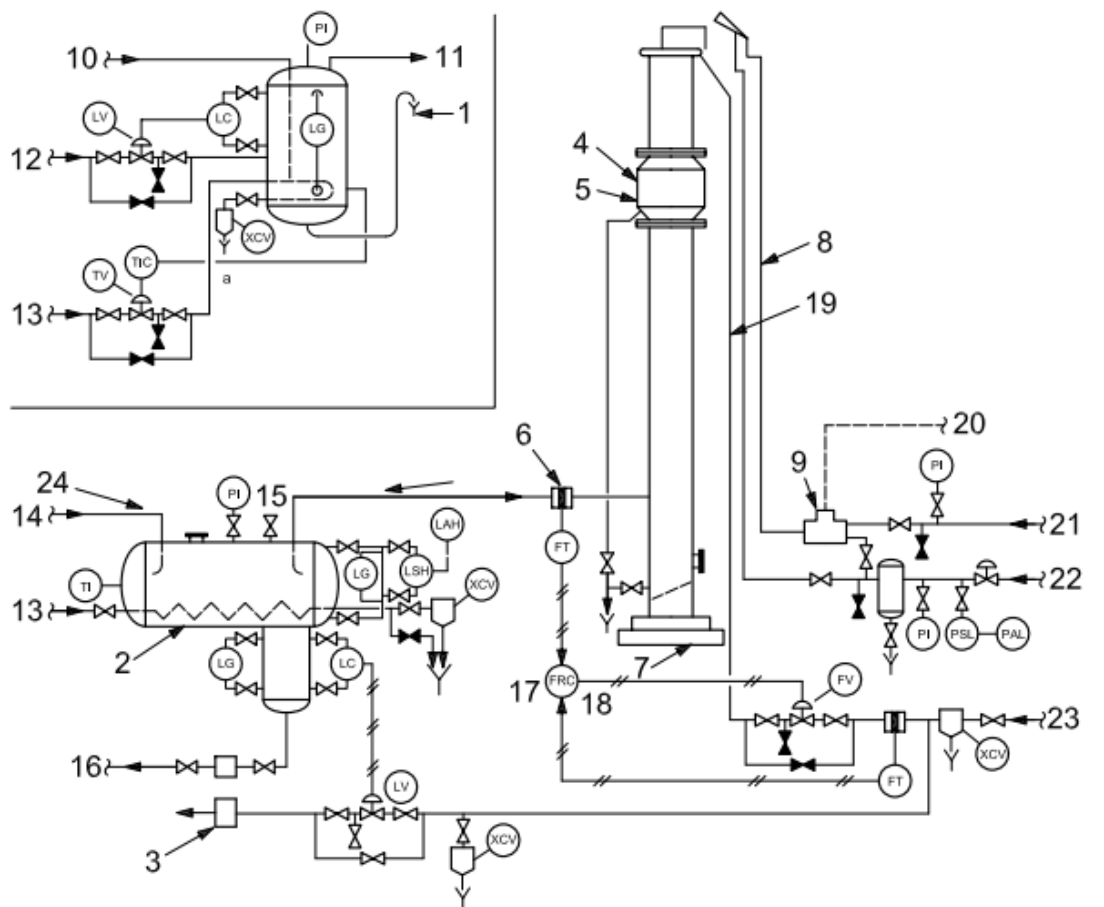
7- Flare – Equipamento que tem como finalidade a combustão de gases excedentes do processo químico, ou seja, converter vapores inflamáveis, tóxicos ou corrosivos para outras composições químicas menos prejudiciais ao meio ambiente.

8- Spark ignition device – Sistema de ignição por faísca que tem como objetivo dar início e manter a chama piloto ativa e operacional.

Para o projeto mecânico, operação e manutenção de sistemas de queima nas refinarias e petroquímicas a prática recomendada é a norma API Std 537 / ISO 25457:2008. A informação exposta destina-se a auxiliar a conceção e seleção de um sistema de queima mais apropriado para os riscos e circunstâncias. Embora esta prática recomendada seja destinada principalmente para ampliações ou novas instalações, pode ser usada como um guia para a avaliação das instalações existentes, juntamente com as considerações de custo e de avaliação de riscos apropriados. Esta prática recomendada destina-se a complementar as práticas estabelecidas na norma ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008 [8].

A norma ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008 é destinada ao projeto de sistemas de alívio de pressão, seus critérios e limitações. Esta prática recomendável aplica-se a sistemas de alívio de pressão presentes principalmente em refinarias de petróleo, embora também seja aplicável a instalações petroquímicas, centrais de gás, instalações de gás natural liquefeito (GNL), e instalações de produção de petróleo e gás. A informação prestada destina-se a ajudar na escolha do sistema que é mais apropriado para os riscos e as circunstâncias

envolvidas em várias instalações. Destina-se a complementar as práticas estabelecidas na norma API Std 520-1: 2013 / ISO 4126 para a criação do projeto base.



Key

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | oily water sewer (to sour water system if large quantities of H ₂ S are flared continuously) | 13 | steam |
| 2 | knockout drum | 14 | from relief or vent header system |
| 3 | steam-driven pump and electrically-driven spare | 15 | vent |
| 4 | molecular seal | 16 | to oil recovery facilities or slop |
| 5 | purge gas | 17 | panel-mounted |
| 6 | flow-measuring element | 18 | ratio |
| 7 | flare stack | 19 | steam to nozzle manifold for smokeless burning |
| 8 | igniter line | 20 | power supply for spark ignition |
| 9 | flame-front generator | 21 | air supply |
| 10 | from knockout drum | 22 | fuel gas to pilots and ignition |
| 11 | to flame stack | 23 | steam for smokeless burning |
| 12 | water | 24 | slope towards drum |

^a Insert shows alternative sealing method (water seal).

Figura 2 - Sistema operacional - ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008

A Figura 2 representa um arranjo de um sistema operacional e respectivos componentes presentes na norma ANSI/API Std 521/ISO 3251:2007/AC2008. O arranjo do sistema varia em função do desempenho exigido. Do mesmo modo, a seleção do tipo e quantidades de

componentes, bem como suas aplicações, deve corresponder às necessidades particulares do tipo de processo e as suas especificações.

A Figura 3 ilustra tipos de *flares* presentes na norma API Std 537 / ISO 25457:2008. O tipo de *flare* a utilizar depende das condições processuais, limites de utilização, localização, imposições legais, entre outros aspetos.

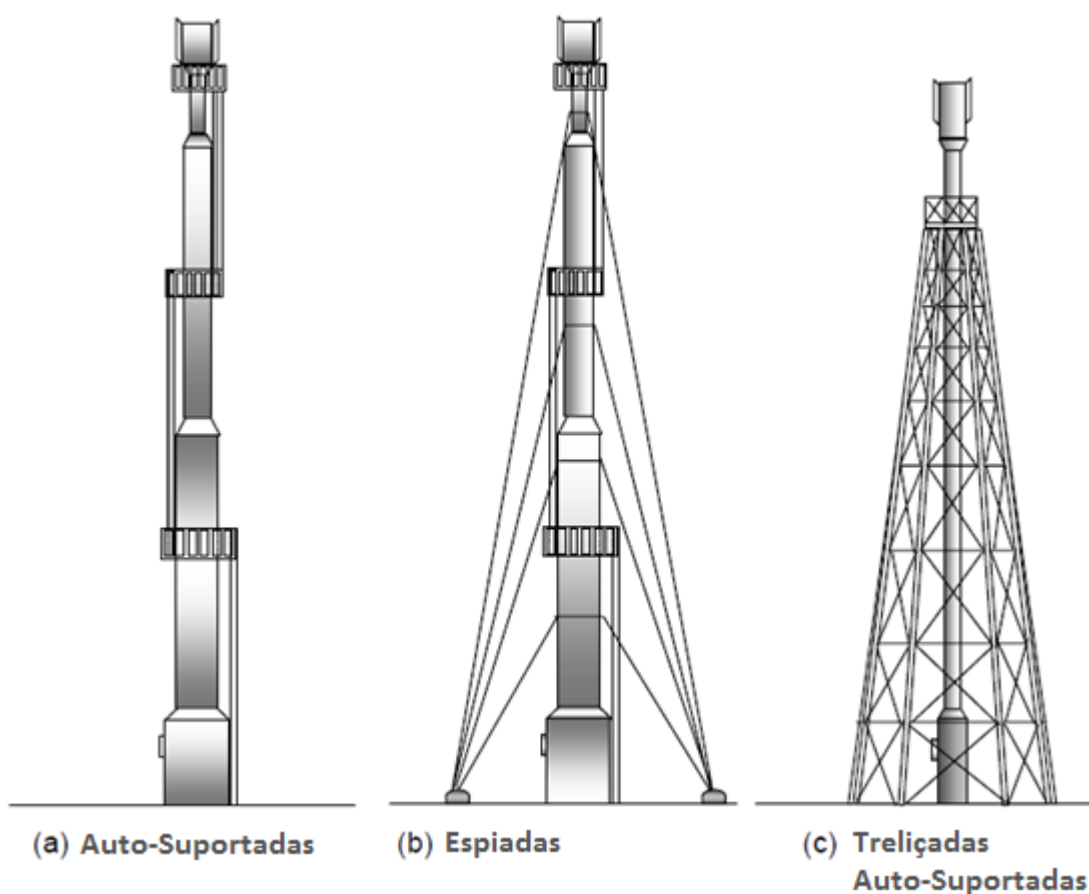


Figura 3 - Tipos de flares - API Std 537 / ISO 25457:2008

As *flares* auto-suportadas são as mais utilizadas. No entanto, são mais dispendiosas do que os outros tipos, uma vez que precisam de paredes mais espessas para assegurar a integridade estrutural sobre a condição prevista. A altura das *flares* auto-suportadas está compreendida entre 60 e 90 metros.

As *flares* espiadas são menos dispendiosas, mas necessitam de maior área de implantação devido ao afastamento dos maciços das espigas. Este tipo de *flares* já foi aplicado com alturas compreendidas entre 140 e 240 metros.

As *flares* treliçadas auto-suportadas não são normalmente utilizadas. São usadas quando pretendidas alturas elevadas e não existe área de implantação disponível para a colocação de espias. No entanto, têm como vantagem a possibilidade de permitir baixar o balão de selagem molecular com carrinhos móveis para inspeção e manutenção [9].

2.2 Avaliação Fitness-For-Service (FFS)

A avaliação *FFS* é uma apreciação técnica quantitativa para determinar se um equipamento em serviço é seguro e confiável para operar em condições específicas durante um tempo determinado.

A avaliação *FFS* é aplicável nas refinarias e petroquímicas para as seguintes necessidades:

- Quando os ativos carecem de informação de projeto original;
- Tempo de vida útil já ultrapassado;
- Descomissionamento de equipamentos que podem ser usados para outros fins;
- Equipamentos a operar em gamas de temperatura elevadas e / ou ações cíclicas;
- Ativos que tenham sido submetidos a quaisquer eventos que por sua vez afetaram a sua manutenção, tais como ciclos de temperatura, sobrecargas, diferentes ambientes internos/externos ou como por exemplo um incêndio;
- Conclusões da inspeção revelam uma condição que pode afetar a futura operação do ativo tais como, a perda de metal, distorção (desalinhamento, ovalização, saliências ou mossas), laminações, fissuras ou inclusões, entre outras.

2.2.1 Aparecimento da avaliação Fitness-For-Service (FFS)

Antes do século XXI não existiam normas ou práticas recomendadas sobre avaliação *FFS*. O Conselho de Propriedades de Materiais iniciou as atividades em 1991 como *Group Sponsored Project*. O âmbito original era avaliar equipamentos pressurizados nas refinarias e petroquímicas e expandir para outras indústrias. A primeira edição da *FFS* foi publicada em 2000, como Prática Recomendada API RP 579. O comité misto da ASME e da API

apenas iniciou as atividades em 2003, sendo que a segunda edição do documento ASME/API padrão foi publicado em 2007 (API 579-1/ASME FFS-1) e em 2009 foram publicados alguns exemplos (API 579-2/ASME FFS-2:2009).

2.2.2 Âmbito da avaliação FFS por API/ASME padrão API 579-1/ASME FFS- 1

O âmbito da Avaliação FFS é perceber o que acontece com o equipamento em serviço, ou seja, qual a degradação num período de tempo, qual a alteração da condição operacional (pressão, temperatura) e o tipo de interação fluido – material. A avaliação FFS permite determinar qual a inspeção a realizar aquando o fabrico do equipamento ou em serviço e a manutenção, incluindo reparação e substituição. Serve também de guia e apoio à tomada de decisão para definição do tipo de funcionamento, reparação ou substituição dos equipamentos em serviço. A avaliação ou reavaliação FFS abrange os componentes projetados e construídos segundo códigos e padrões internacionais, tais como, ASME B & PV Secção VIII Divisão 1 e 2:2013, ASME Secção I:2010, ASME B31.3:2009, padrões API Std 650:2013 e API Std 620:2008+A1:2009+A2:2010, e métodos e procedimentos destinados a complementar a API Std 510:2014, API Std 570:2009 e API Std 653:2008+A1:2010+ A2:2012+A3:2013.

2.2.3 Tipos de falhas e condições de falha

Existem tipos de falhas frequentes que sucedem nos ativos presentes nas indústrias quando submetidos a determinadas condições, tais como fratura frágil, dano por exposição a altas temperaturas, perda de material devido à corrosão/erosão (localizada, global ou *pitting*⁴), danos HIC⁵ (*Hydrogen Induced Cracking*), laminações, deformações e fissuras na presença

⁴ *Pitting* é definido pela API 579 como regiões localizadas de perda de material, caracterizado por um diâmetro de “picada” aproximado ou inferior à espessura do componente. É um tipo de corrosão que ocorre ao longo de uma região significativa do componente.

⁵ HIC significa fissuras induzidas pelo hidrogénio. O hidrogénio reage com o carboneto de ferro e gera metano. As moléculas de metano, que são grandes, acumulam-se nos contornos de grão e provocam fissuras quando atingem um volume suficiente. Estas fissuras tornam o aço frágil, as roturas associadas a danos por hidrogénio são normalmente de “lábios grossos” e pouca ductilidade. A microestrutura dos aços danificados pelo ataque pelo hidrogénio apresentam descarbonatação e fissuras intergranulares provocadas pelo metano.

de amina, amónia (amoníaco em solução aquosa), carbonato de sódio, hidrogénio, soda caustica e cloretos (sais derivados do ácido clorídrico) [10].

No organograma da Figura 4 é apresentado o conteúdo da API 579-1/ASME FFS 1: 2007.

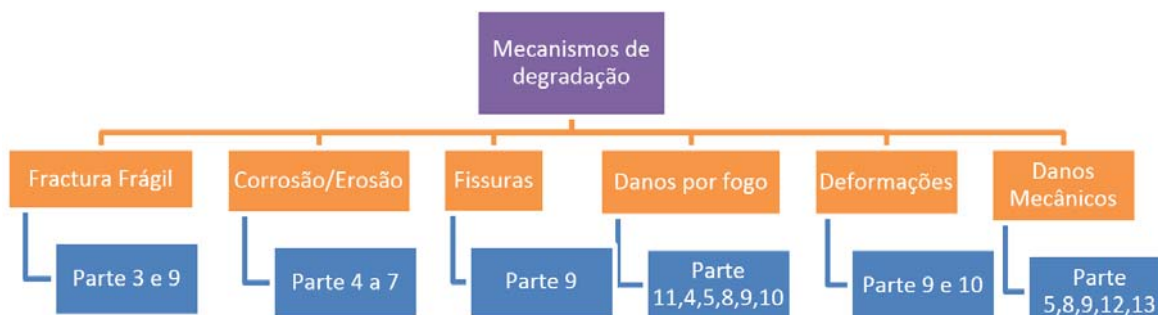


Figura 4 - Conteúdo da API 579-1/ASME FFS 1: 2007

2.2.4 Níveis e técnicas de avaliação

Na análise FFS existem três níveis de avaliação que podem ser aplicados dependendo do pormenor e rigor pretendido ou criticidade (Figura 5). Para cada nível de avaliação, encontram-se especificadas técnicas de avaliação aplicadas.

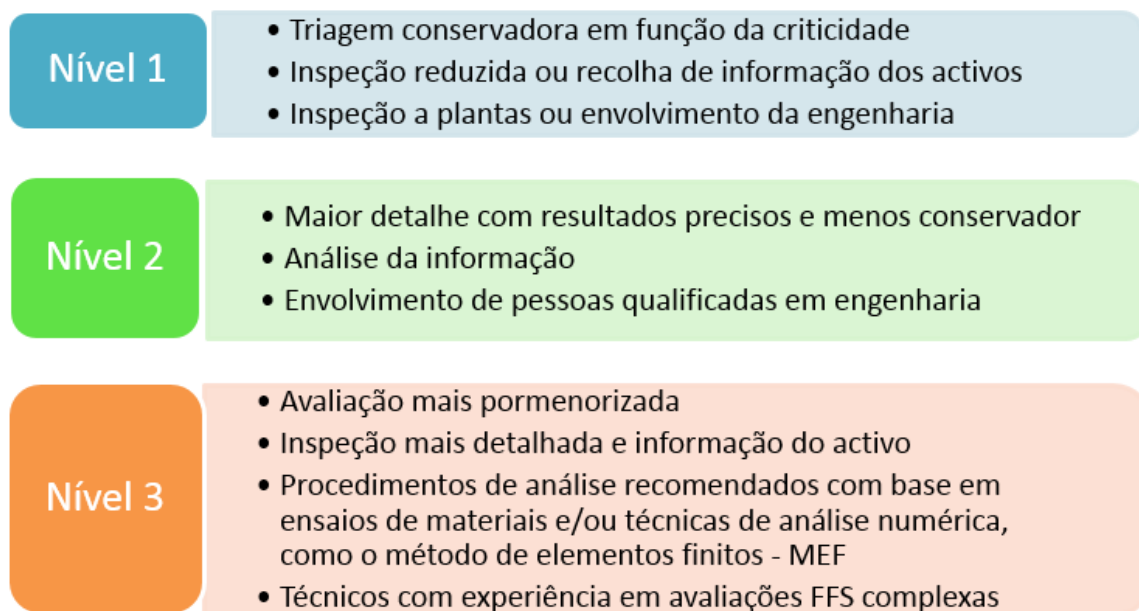


Figura 5 - Níveis e técnicas de avaliação aplicadas

As avaliações Nível 1 devem ser limitadas a componentes com danos de corrosão generalizada unilateral e projetados por um código reconhecido ou padrão usando uma

equação que relaciona a pressão e uma espessura de parede necessária. A única carga considerada é a pressão interna.

As avaliações Nível 2 podem ser usadas para avaliar componentes que não atendam aos critérios de avaliação Nível 1. As normas de avaliação de Nível 2 proporcionam uma melhor estimativa da integridade estrutural de um componente, uma vez que é diretamente utilizado na avaliação um parâmetro com dimensão real dos danos. A avaliação Nível 2 deve ser usada quando o dano ocorre em ambos os lados do componente.

As avaliações Nível 3 podem ser usadas para avaliar componentes que não são abrangidos pelos Níveis 1 ou 2 ou quando estes níveis de avaliação produzem resultados excessivamente conservadores. Os procedimentos de avaliação do Nível 3 são destinados a avaliar as regiões mais complexas de corrosão, condições de carga, e/ou componentes com detalhes, onde as regras de projeto são fornecidas por códigos, normas ou bibliografia aplicável.

Para técnicas de análise pormenorizadas de tensões e ou deformações deve ser utilizada uma avaliação de Nível 3. As informações necessárias para realizar uma avaliação do nível 3 dependem do método de análise utilizado. Para estabelecer as condições admissíveis de operação, deve ser usado um procedimento de verificação da carga limite utilizando uma técnica de análise numérica.

Para a avaliação FFS existe um procedimento geral de avaliação por etapas:

- 1) Etapa 1 – Identificação da falha/condição (modo de falha)
- 2) Etapa 2 - Aplicabilidade e limitações
- 3) Etapa 3 - Recolha de dados
- 4) Etapa 4 - Técnicas de avaliação e critérios de aceitação
- 5) Etapa 5 - Avaliação da vida restante
- 6) Etapa 6 - Reparação
- 7) Etapa 7 – Monitorização em serviço
- 8) Etapa 8 - Documentação

2.3 Método de elementos finitos

O MEF é uma ferramenta de simulação, avaliação ou análise de um modelo virtual com propriedades e características próximas de um modelo real.

O método nasce da análise de estruturas sólidas, mas com o aumento da capacidade de processamento dos computadores rapidamente se tornou numa ferramenta útil a outras áreas. Baseia o seu cálculo na divisão do modelo em estudo em áreas ou volumes infinitesimais (estudo 2D e 3D, respetivamente), e subsequentemente calcula as interações matemáticas (forças, deslocamentos, cargas térmicas, etc...) entre o elemento e a sua vizinhança, *Finite Element Analysis* - FEA, ou como descrito pelo *Yijun Liu* [11], "...pensar nos modelos como LEGO's..."

O MEF é uma técnica numérica usada para encontrar soluções aproximadas que utiliza como recurso os elementos infinitesimais. Desta forma, ao utilizar equações diferenciais basta um pequeno incremento no número de elementos para minimizar o erro existente. Este método usa técnicas variacionais para minimizar uma função de erro e produzir uma solução estável.

Existem diversas vantagens quando abordamos geometrias compostas ou complexas e procedemos à subdivisão de um domínio em partes mais simples, tais como:

1. Representação precisa de geometrias complexas;
2. Inclusão de propriedades de materiais diferentes;
3. Fácil representação da solução geral;
4. Pormenorização localizada da fronteira e interior da geometria.

Os programas de modelação permitem definir o domínio de estudo utilizando vários parâmetros na definição da malha de MEF, podendo ser as características a definir:

1. Tipo de forma do elemento;
2. Tamanho;

3. Número e ou elementos por região;
4. Aproximação dos elementos aos contornos de uma forma complexa (refinamento de malha).

Podem ser utilizados ou combinados vários tipos de elementos na definição do cálculo, tais como barra, mola, triângulo, quadrilátero, casca, cúbicos e tetraédricos.

O MEF é uma ferramenta computacional utilizada em análises avançadas, que inclui ferramentas de geração de malhas para dividir um problema complexo em pequenos elementos, bem como algoritmos de processamento de resultados. Na aplicação MEF, um problema complexo é geralmente um sistema físico com os subjacentes da física, tais como a equação de calor de *Euler-Bernoulli* ou a de *Navier-Stokes*, que se sintetiza em diferenciais parciais ou equações de integrais. Os problemas complexos são simplificados por diversos elementos de pequena dimensão (malha de pequenos elementos) de modo a representar diferentes áreas de um sistema físico.

FEA é uma boa escolha para a análise de problemas com domínios complexos que apresentam ou não fronteiras móveis, ou, quando a precisão desejada varia ao longo de todo o domínio.

A sua aplicabilidade não se encontra limitada ao cálculo de estruturas, é também utilizado na mecânica de fluidos, CFD.

2.3.1 Dinâmica computacional de fluidos - CFD

O papel do CFD no estudo de vários problemas de engenharia, relacionados com o escoamento de fluidos, tem sido cada vez mais valorizado e utilizado em várias aplicações de investigação e projeto. Deste modo, atualmente estes modelos numéricos são uma mais-valia na análise de problemas associados à dinâmica de fluidos em detrimento da abordagem experimental e analítica. Os modelos CFD suportam e muitas vezes substituem tanto os estudos experimentais como as componentes teóricas.

Na prática isto traduz-se por análises mais económicas quando comparadas às baseadas em estudos com recurso a ensaios experimentais. Adicionalmente aos custos associados, os modelos CFD devidamente calibrados e validados permitem obter informações detalhadas

relativas aos campos de velocidade e pressão, muitos deles de difícil medição nos modelos físicos.

Os três princípios físicos fundamentais seguintes: (1) conservação da massa, (2) conservação da quantidade de movimento e (3) conservação da energia, regem os aspectos físicos de qualquer escoamento de um fluido. Estes princípios podem ser expressos em termos de equações matemáticas, que usualmente se apresentam na forma de equações diferenciais de derivadas parciais. Os modelos CFD permitem resolver as equações diferenciais de derivadas parciais que regem a dinâmica de fluidos por forma a obter valores com distribuição espacial e temporal, e descrição numérica completa do escoamento.

Os resultados dos modelos CFD são validados com modelos físicos baseados nas equações fundamentais e nas condições de fronteira, e portanto estão sujeitos a erros, particularmente no caso dos escoamentos turbulentos. No entanto, os resultados dos modelos CFD são consideravelmente precisos para um grande número de problemas de engenharia [12].

Conforme referido, a base dos modelos CFD são as equações fundamentais que regem a dinâmica de fluidos, designadamente:

- 1) Equação da continuidade;
- 2) Equação do movimento ou equação de conservação da quantidade de movimento ou momento linear;
- 3) Equação de conservação da energia.

As referidas equações são, respetivamente, as formulações matemáticas dos três princípios físicos fundamentais que a seguir se enumeram, sobre os quais toda a dinâmica de fluidos é baseada:

- 1) Conservação da massa;
- 2) 2ª Lei de Newton;
- 3) 1ª Lei da termodinâmica.

O modelo CFD resolve as equações de *Navier-Stokes*, que são formulações das leis de conservação da massa, do momento linear e da energia para o escoamento de fluidos. Estas

equações são complementadas por equações de estado, que definem a natureza do fluido, e por dependências empíricas da massa volúmica, viscosidade e condutividade térmica do fluido com a temperatura.

O modelo considera fluidos incompressíveis, não newtonianos, recorrendo à introdução de uma dependência da respetiva viscosidade dinâmica com a tensão tangencial e a temperatura do escoamento. Adicionalmente considera líquidos compressíveis por introdução de uma dependência da respetiva massa volúmica com a pressão. Neste modelo, um determinado estado requer a definição da respetiva geometria sólida e das condições iniciais e de fronteira [12].

O modelo CFD utilizado é capaz de modelar tanto campos de escoamento laminar como turbulento. A maioria dos escoamentos de fluidos, que se encontram nas aplicações de engenharia comuns, são turbulentos, pelo que o modelo foi desenvolvido essencialmente para simular e estudar este tipo de escoamentos. Assim, no cálculo de escoamentos turbulentos recorre-se às equações de *Favre-averaged Navier Stokes*, nas quais é considerada a média temporal dos efeitos da turbulência do escoamento, enquanto os fenómenos de larga escala, dependentes do tempo, são tidos em conta diretamente. Através deste procedimento, os termos denominados tensões de *Reynolds* surgem nas equações. Neste sistema de equações, o modelo recorre às equações de transporte da energia cinética turbulenta e da respetiva taxa de dissipação, que constituem o modelo. Assim, o modelo utiliza o sistema de equações para descrever tanto escoamentos laminares como turbulentos. Adicionalmente, também analisa o escoamento de transição de regime laminar para turbulento e/ou vice-versa.

Os escoamentos em modelos geométricos com fronteiras sólidas (paredes) ou móveis (que não provoquem alterações na geometria do modelo) são calculados pela especificação das correspondentes condições fronteira.

Os escoamentos em modelos geométricos com componentes rotativas são calculados em relação a sistemas de coordenadas ligados às componentes rotativas do modelo, ou seja rodando com essas componentes. Nestes casos as componentes estacionárias do modelo devem ser axi-simétricas em relação ao eixo de rotação [12].

Desta forma obtêm-se as equações que regem a dinâmica de fluidos, que podem ser obtidas na forma conservativa e não conservativa. No caso de modelos CFD, a obtenção de resultados fiáveis, ou de flutuações ou até instabilidades dos resultados numéricos, depende da forma, conservativa ou não conservativa, em que se consideram as equações. Assim, para analisar determinados problemas de engenharia, por recurso a modelos CFD, é importante saber qual é a forma mais adequada a utilizar. Por simples manipulação uma das formas pode ser obtida a partir da outra [13].

2.4 Mecanismos de degradação

Os mecanismos de degradação podem levar a falhas graves nas infraestruturas das plantas industriais e equipamentos, o que acarreta reparações dispendiosas, perda de produto ou contaminação, danos ambientais e risco de segurança humana. As decisões sobre a integridade futura de uma estrutura ou seus componentes dependem de uma avaliação precisa das condições que afetam a sua corrosão e taxa de deterioração.

A decisão quanto ao tipo da recolha de informação ou monitorização da condição e avaliação, custo e urgência de possíveis medidas corretivas e níveis necessários de manutenção pode variar muito, dependendo da criticidade do dano, do tipo de processo ou equipamentos e dos meios de operação.

Para uma avaliação de integridade usando a norma API 579-1/ASME FFS 1: 2007 é necessário identificar os mecanismos de degradação, para que estes possam ser considerados na avaliação. A norma API RP 571: 2011 descreve os mecanismos de degradação que afetam os equipamentos nas petroquímicas e refinarias. Um primeiro passo fundamental na gestão de segurança e confiabilidade do equipamento é a identificação e compreensão dos diversos mecanismos. A identificação adequada de mecanismos de degradação também é necessária para a aplicação dos códigos de inspeção API (API Std 510:2014, API Std 570:2009, API Std 653:2008+A1:2010+ A2:2012+A3:2013) e na realização da inspeção baseada no risco (RBI) pela API RP 580:2013 e API RP 581:2008.

2.4.1 Natureza da corrosão

A degradação de materiais geralmente ocorre de três formas: corrosão, fratura e desgaste. A corrosão está normalmente relacionada com processos químicos (alteração de ligações químicas), enquanto a fratura está relacionada a processos mecânicos (rotura de ligações) e o desgaste com o movimento relativo de ligações (movimento que origina a quebra de ligações). Estes três conceitos representam mecanismos distintos, mas encontram-se de certa forma interligados. Os ambientes químicos aceleram a fratura e o desgaste. Por sua vez, o depósito das partículas originadas pelo desgaste pode provocar corrosão, e os processos de fratura podem permitir que um componente contamine o outro.

Em contacto com o meio ambiente, a corrosão é um caminho primário para a deterioração dos metais. A maioria dos metais corroem em contato com água ou humidade, ácidos, sais, produtos químicos sólidos, líquidos e gasosos, tais como vapores de ácido, gás de amónia, e gases que contenham enxofre, entre outros.

Os danos de corrosão podem ser concentrados originando fossas ou fendas, ou estenderem-se a uma grande área. A corrosão localizada pode proporcionar locais para a iniciação da fadiga e, além disso, os agentes corrosivos, tais como água do mar, podem conduzir a uma aceleração do crescimento das fissuras de fadiga. Em áreas que sofreram mudanças microestruturais, tal como operações de soldadura, a corrosão localizada ocorre mais rápido [14, 15].

2.4.2 Fatores de corrosão

Face ao grande número de variáveis possíveis de condições e ambientes, a destruição por corrosão assume várias formas, dependendo da complexa interação de uma multiplicidade de fatores.

Para prever e assegurar um desempenho confiável dos materiais é necessário conhecer o ambiente ao qual vão estar expostos. No entanto sabe-se que os ambientes são difíceis de caracterizar dado à sua incerteza e instabilidade.

Existe uma preocupação acrescida quando as superfícies dos materiais são expostas a efeitos de escoamentos de fluidos, térmicos e ataques químicos, entre outros [16].

2.4.2.1 Efeito de escoamento de fluidos

A destruição de uma película protetora de uma superfície metálica exposta a elevadas taxas de fluxo pode ter um impacto importante sobre a aceleração da corrosão.

As taxas de corrosão resultantes são tipicamente <1 mm/ano dependendo da dissolução do filme de óxido de superfície que varia em função do comportamento do escoamento do fluido ou aumento de tensões de corte [17].

2.4.2.2 Efeito de temperatura

Os metais, como muitos outros materiais, podem ser gravemente afetados pelo aumento da temperatura de serviço mesmo afastada do respetivo limite térmico.

Nas indústrias químicas que lidam com produtos muito corrosivos, a escolha dos materiais dos equipamentos depende de uma multiplicidade de fatores que incluem a temperatura de projeto. Em ambientes húmidos, o aumento da temperatura provoca um aumento da taxa de reação química na superfície dos materiais, que por sua vez contribui para um aumento ainda maior de temperatura e fluxo de calor, provocando concentrações de tensão de superfície associadas, tornando os materiais mais vulneráveis aos ataques químicos e assim um aumento significativo da corrosão.

A corrosão também pode surgir sem a presença de um eletrólito líquido quando a superfície dos metais está sujeita a elevadas temperaturas, dano designado por "corrosão seca" [14, 16].

3 Análise estrutural de uma *flare* industrial

3.1 Metodologia de análise

Para a presente avaliação serviu de base o fluxograma que se segue de ações (Figura 6) onde traduz a metodologia tomada. As três primeiras ações foram elaboradas no âmbito da atividade profissional. As subsequentes ações são as apresentadas na presente avaliação de um modo simplificado para corresponder com as necessidades próprias do enquadramento da dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

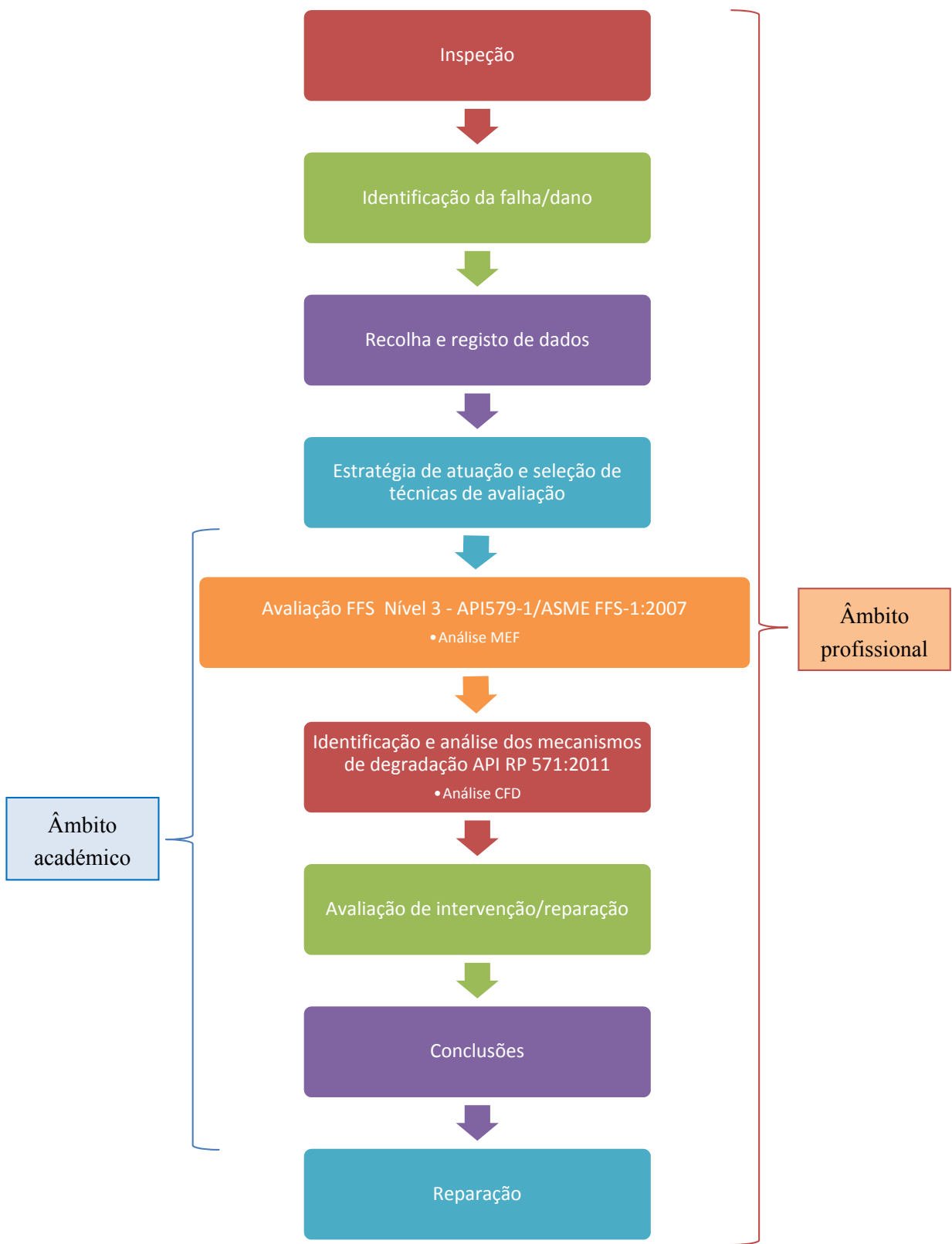


Figura 6 – Ações e sequência de atuação

Descrevem-se com algum detalhe as diferentes etapas do projeto a desenvolver. Como atividades a montante do presente estudo, destacam-se:

- Após detecção do dano no *riser* da *flare*, perda de espessura generalizada, durante a inspeção dá-se a necessidade de mapear, registrar e documentar as espessuras atuais do equipamento.
- Dada a importância do equipamento dá-se a necessidade de definir uma estratégia de atuação e selecionar a técnica de avaliação com base numa análise FFS - API 579-1/ASME FFS 1: 2007.

Como atividades realizadas no âmbito da presente dissertação, referem-se:

- A seleção da análise FFS segundo o Nível 3 surge da carência duma avaliação mais pormenorizada que consiste na aplicação de técnicas de análise numérica MEF, e requer técnicos altamente especializados com experiência em avaliações complexas.
- De modo a possibilitar a tomada de decisão de intervenção, reparação, alteração de condições processuais ou substituição do equipamento dá-se a necessidade de identificar e analisar os mecanismos de degradação com base na norma API RP 571: 2011, utilizando a técnica de análise CFD por forma a analisar os fenómenos da hidrodinâmica do escoamento e seus efeitos sobre a estrutura.
- A procura de solução e avaliação de intervenção/reparação aparece da necessidade da continuidade e operacionalidade do equipamento em segurança estrutural e processual.
- As conclusões servirão para reunir e discutir os resultados obtidos nas ações anteriores e ajudar na tomada de decisão para eventual ação de reparação, alteração, substituição ou recondicionamento.

3.2 Identificação da *flare*

O presente artigo em estudo é referente a uma *flare* com denominação FL-0000 (Figura 7), instalada numa refinaria de produtos petrolíferos.

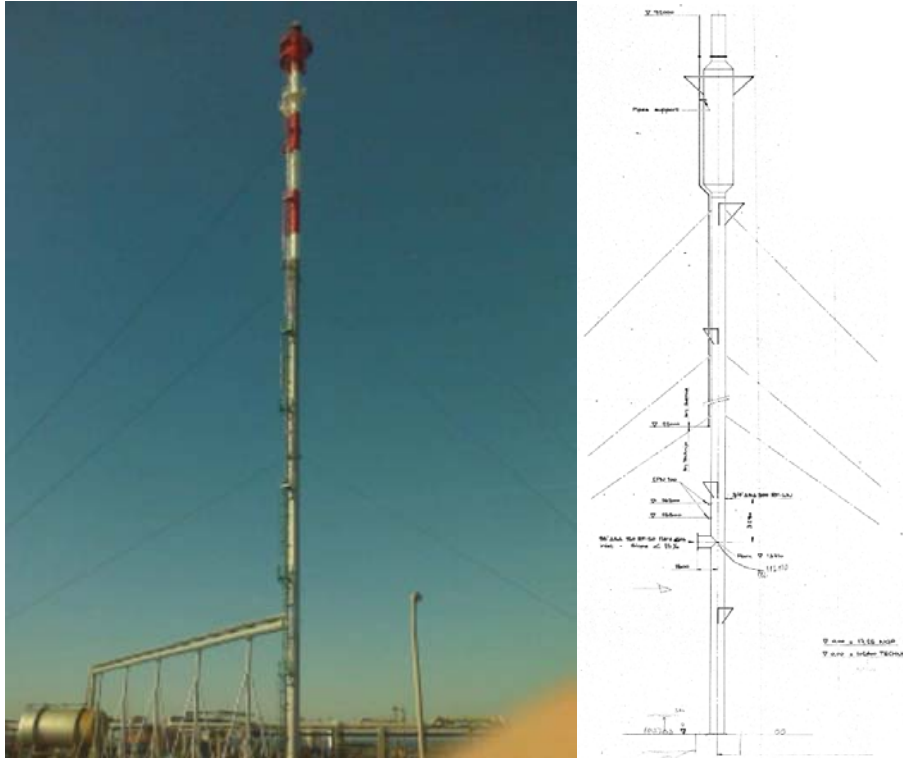


Figura 7 - Flare-FL-0000

A seguinte Tabela 1 juntamente com a Figura 8 resumem a localização da flare em causa.

Tabela 1 - Localização da flare

Código	FL-0000
Altitude	25 m
Coordenadas	00°00'00"N; 0°00'00"W



Figura 8 – Implantação da flare

3.3 Caraterização da flare

A flare a estudar apresenta um diâmetro de 1060 mm (42”), tem uma altura de 92 m e é espiada por cabos em 3 secções diferentes. As Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13 ajudam na percepção da flare em questão, focando elementos em específico.



Figura 9 – Espiamento – Nível 1, 2 e 3



Figura 10 – Base da flare



Figura 11 – Ligação das espigas à fundação



Figura 12 – Ligação de 36” balão-flare



Figura 13 - Ligação das espigas à flare

O material de construção da flare referido no projeto de base é o A 285 Gr. C segundo norma ASTM. Para harmonização do material com o Eurocódigo e equivalência foi tomado em consideração para análise o P235GH segundo norma NP EN 10028-2:2009. Considera-se

que, para temperaturas até aproximadamente 150° C e espessuras compreendidas entre 6 mm e 16 mm, a tensão de cedência é de 198 MPa, ver tabelas que se seguem.

Na Tabela 2 são apresentadas equivalências de algumas especificações de materiais entre as normas EN 10028-2:2009, ASTM e BS 1501 [18].

Tabela 2 -Equivalências de materiais

EN 10028-2	ASTM	BS 1501
P235GH	A285 Gr C	
P265GH	A516 Gr 60	151Gr 430A 161Gr 430A 151Gr 430B 161Gr 430B
P295GH	A516 Gr 65	
	A516 Gr 70	224 Gr 490B
16Mo3		

Segundo a NP EN 10028-2:2009, as características mecânicas de materiais para aplicação em equipamentos sob pressão quando sujeitos a elevadas temperaturas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores mínimos de tensão limite de elasticidade a 0,2% para elevadas temperaturas (MPa)

Steel grade	Thickness (mm)	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
EN 10028-2											
P235GH	6 ≤ t ≤ 16	227	214	198	182	167	153	142	133	-	-
	16 < t ≤ 40	218	205	190	174	160	147	136	128		
	40 < t ≤ 60	208	196	181	167	153	140	130	122		
P265GH	6 ≤ t ≤ 16	256	241	223	205	188	173	160	150		
	16 < t ≤ 40	247	232	215	197	181	166	154	145		
	40 < t ≤ 60	237	223	206	190	174	160	148	139		
P295GH	6 ≤ t ≤ 16	285	268	249	228	209	192	178	167		
	16 < t ≤ 40	280	264	244	225	206	189	175	165		
16Mo3	6 ≤ t ≤ 16	273	264	250	233	213	194	175	159	147	141
	16 < t ≤ 40	268	259	245	228	209	190	172	156	145	139
	40 < t ≤ 60	258	250	236	220	202	183	165	150	139	134
EN 10028-3											
P355NH	6 ≤ t ≤ 16	343	323	299	275	252	232	214	202	-	-
	16 < t ≤ 40	334	314	291	267	245	225	208	196		
	40 < t ≤ 60	324	305	282	259	238	219	202	190		

3.4 Configuração/dimensões da flare

A secção da flare é circular de 42” × 92 m de altura e tem anéis de reforço nas zonas de ligação das espigas em 3 níveis diferentes, à cota absoluta de nível de 31 m, 53 m e 75 m. A

Figura 14 ilustra o corpo da *flare*, constituído pelo *riser* e balão de selagem molecular, níveis de espiamento e orientação.

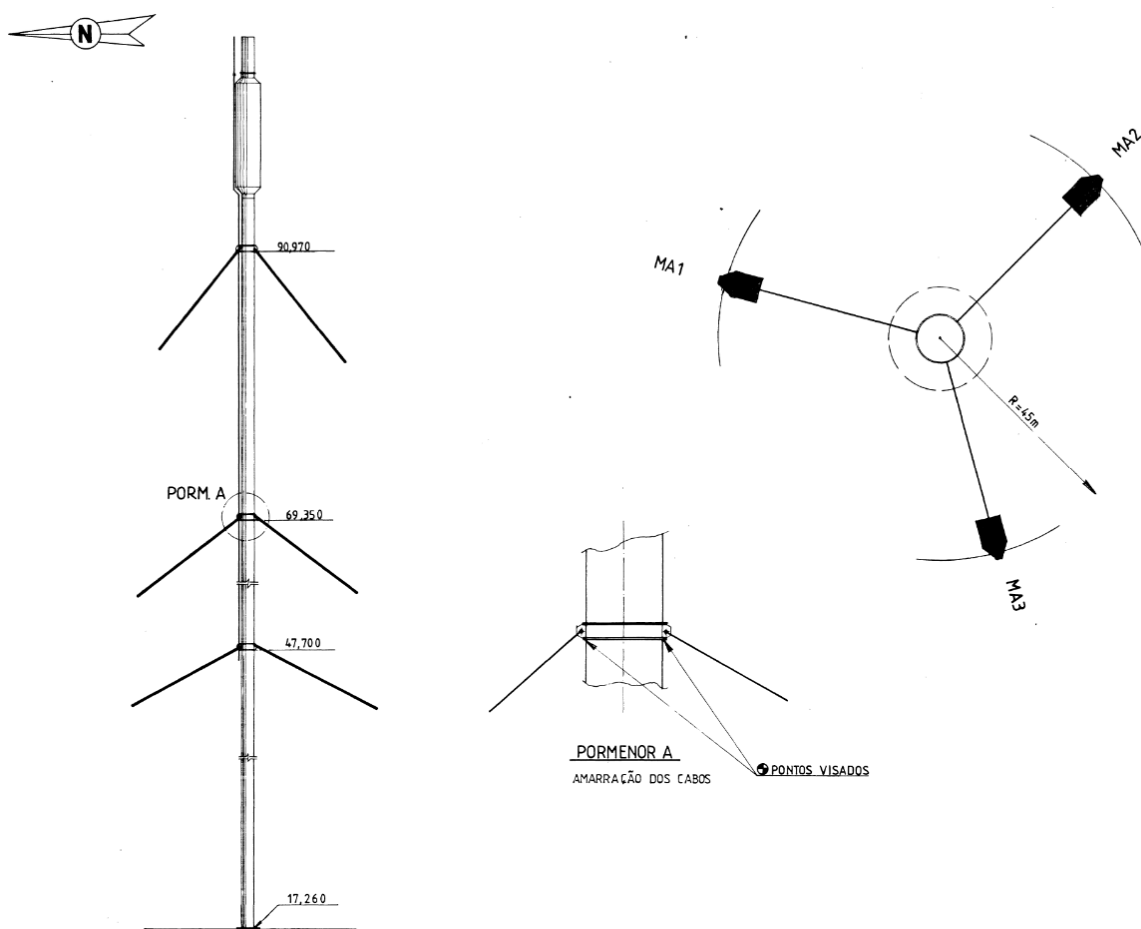


Figura 14 - Flare e orientação

Para uma descrição mais detalhada da estrutura consultar anexo A.

No topo da *flare* encontram-se instalados um balão de selagem molecular com diâmetro de 2,362 m e um queimador com as dimensões de $\text{Ø}1,056 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ de altura, como se pode observar na Figura 15 e Figura 16.

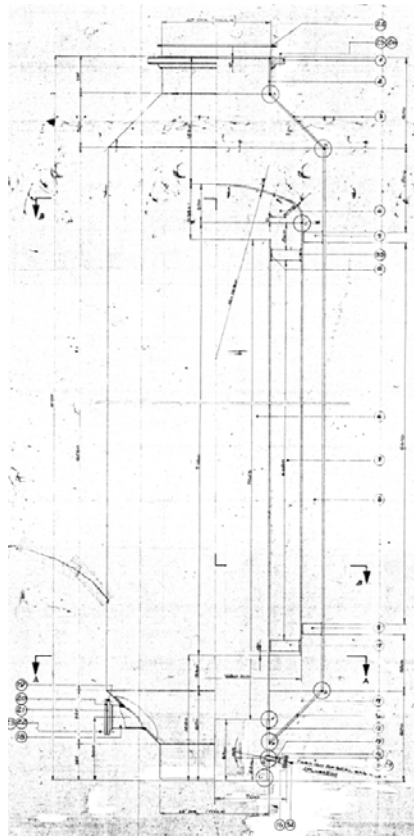


Figura 15 - Balão de selagem molecular

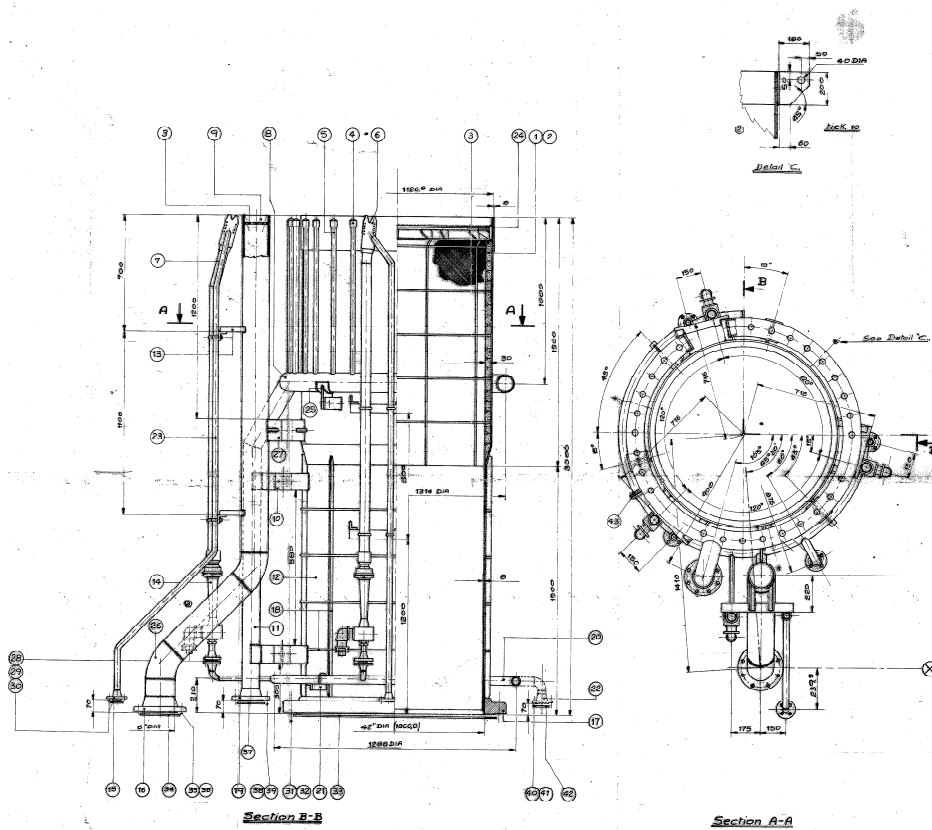


Figura 16 - Queimador

O corpo é travado pelas espigas com $\varnothing 24$ mm, $\varnothing 30$ mm e $\varnothing 36$ mm nos Níveis 1, 2 e 3, respetivamente. A alma dos cabos é metálica e todo o cabo é em aço galvanizado de construção 6×36 (número de cordas \times número filamentos por corda), com uma tensão de rotura do aço de 180 kg/mm^2 [19].

A Figura 17 ilustra a secção do cabo 6×36 com alma metálica.

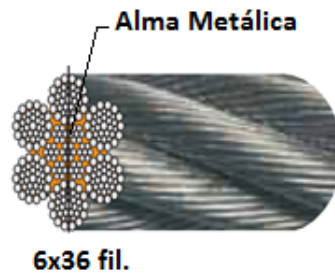


Figura 17 - Cabo 6×36 com alma metálica

A especificação dos cabos encontra-se detalhada no anexo B.

Os cabos das espigas são ligados aos maciços e ao *riser* da *flare* como ilustrado na Figura 18.

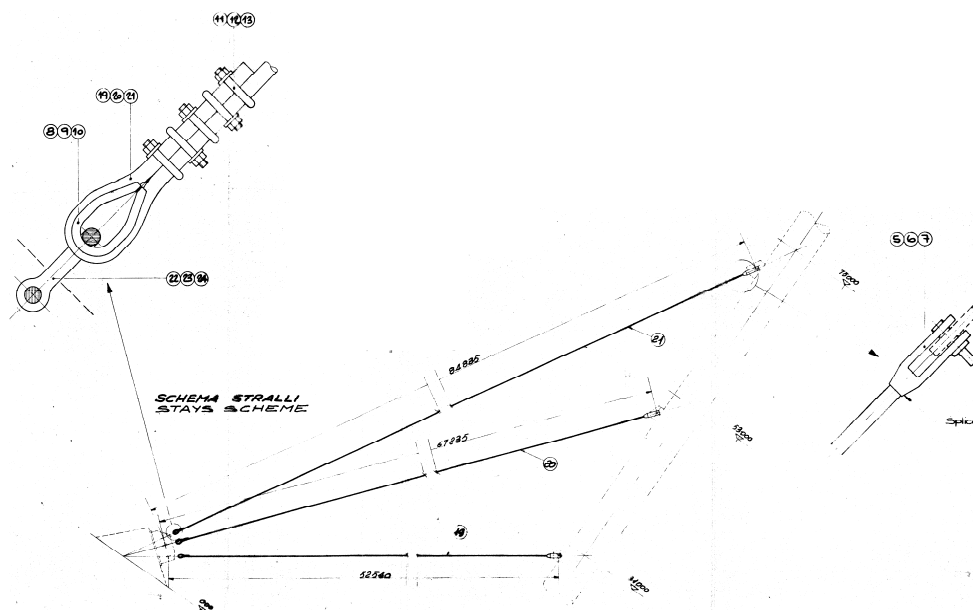


Figura 18 - Ligação das espigas

A fixação da base da *flare* ao solo é em consola por intermédio de uma ligação aparafusada aos chumbadouros do maciço da base (Figura 19).

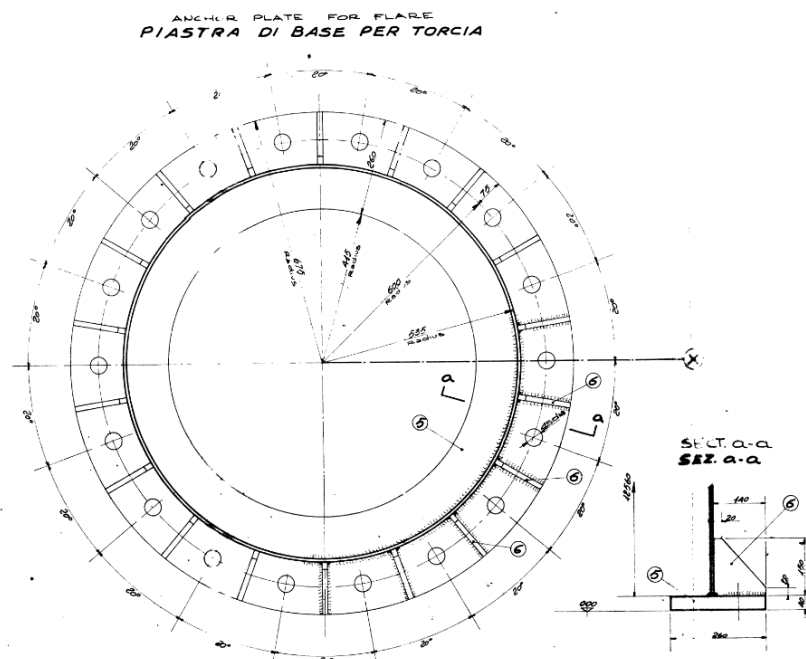


Figura 19 - Ligação da base

3.5 Equipamentos

Na Tabela 4 estão listados todos os equipamentos e sua localização na estrutura em análise.

Tabela 4 - Equipamentos instalados

Equipamentos Instalados				
Referência	Tipo	Unid.	Altura (m)	Afastamento do eixo (m)
A1	Balão de selagem molecular 42"	1	79	0
A2	Queimador	1	89	0
A3	Acumulador de selagem do Gás sulfídrico 6"	1	87	1,18
Equipamentos adicionais				
Referência	Tipo	Altura (m)		
B1	Plataformas	9, 18, 27, 36, 45, 54, 63, 70,8, 78,6 e 87,6		
B2	Escadas verticais	0 até 87,6		
B3	Tubagem	0 até 92		

3.6 Modelação e considerações

Para proceder à análise avançada optou-se por efetuar os modelos à escala real de modo a não utilizar fatores de semelhança no cálculo, garantindo assim uma maior fiabilidade de resultados.

Foram construídos dois modelos distintos para as análises MEF e CFD utilizando os seguintes *softwares*:

- *Autodesk Robot Structural Analysis*;
- *Solidworks*.

3.6.1 Parâmetros considerados - MEF

Seguindo a metodologia MEF, suprimiu-se os elementos redundantes, de modo a focalizar a análise nos elementos a avaliar, considerando as restrições impostas pelos elementos suprimidos.

3.6.1.1 Modelo e criação de malha

Para a modelação utilizaram-se como suporte os desenhos do projeto da *flare*.

A Figura 20 ilustra um pormenor do desenho geral da *flare*.

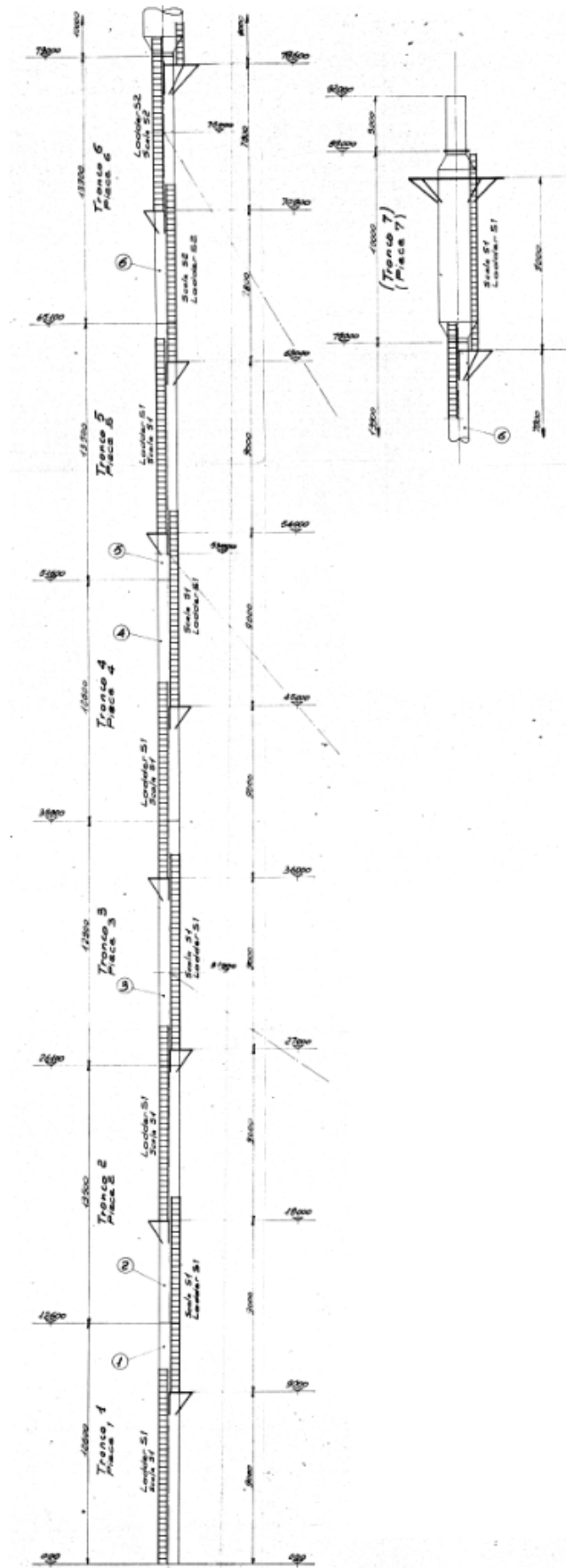


Figura 20 – Pormenor do desenho geral da flare

Para a análise estrutural procedeu-se à simplificação das fixações das espigas, situadas a um raio de 45 m do centro da *flare* (Figura 21).

Todas estas alterações salvaguardam a segurança, uma vez que se mantêm as características dos materiais, ao mesmo tempo que o equipamento simulado estima por excesso as condições reais de utilização no que concerne a deslocamentos e tensões atuantes.

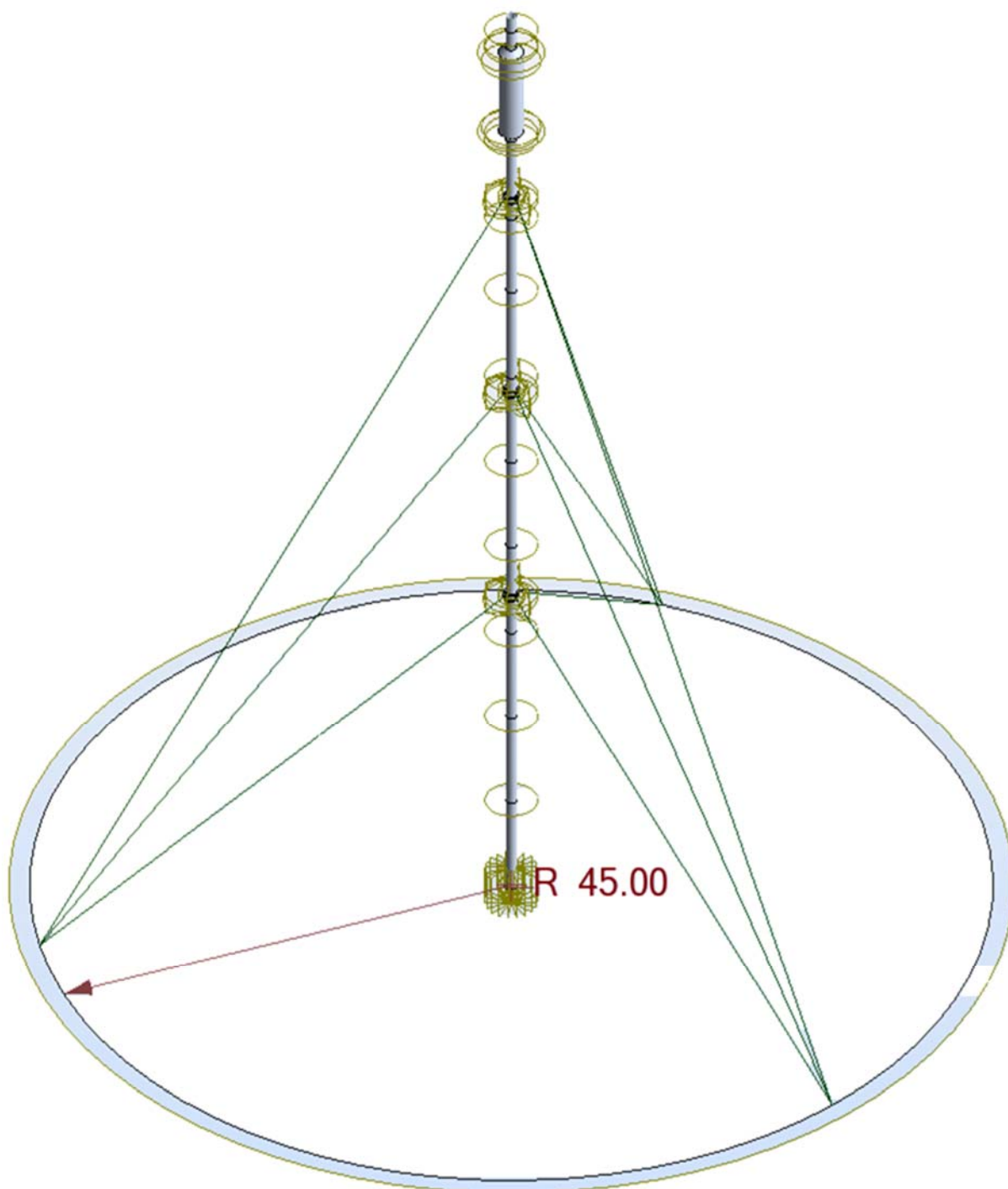


Figura 21 - Localização das espigas

Após toda a modelação e montagem dos componentes, obteve-se o modelo apresentado na Figura 22.

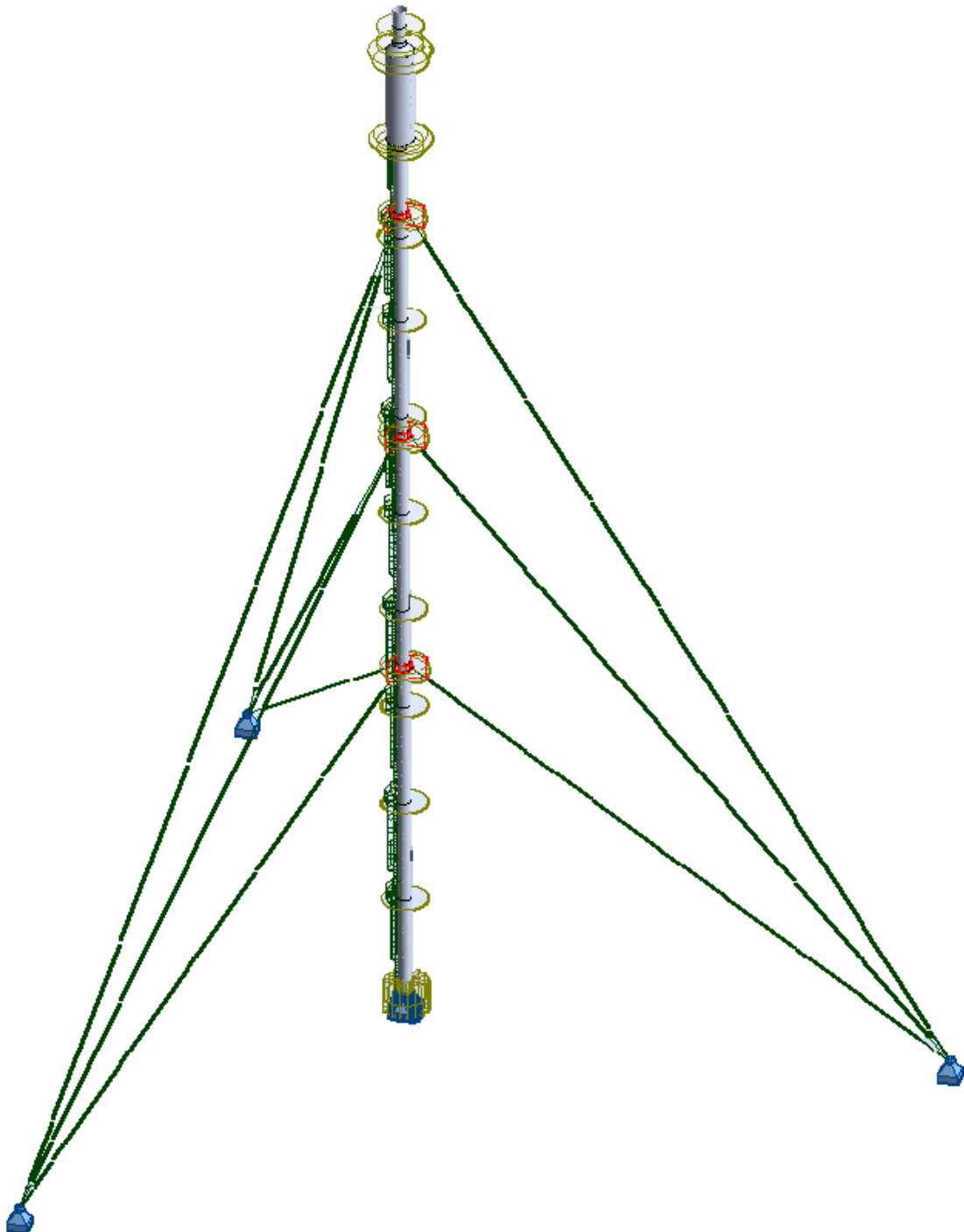


Figura 22 - Modelo da *flare*

Para o sucesso da análise e obtenção de resultados fidedignos as espessuras utilizadas no *riser* da *flare* foram as registadas durante a inspeção e não as de projeto, uma vez que foi verificada uma perda de espessura substancial.

Na Figura 23 é apresentada uma legenda com correspondência das espessuras por cores ilustradas no modelo e diâmetros de cabos.

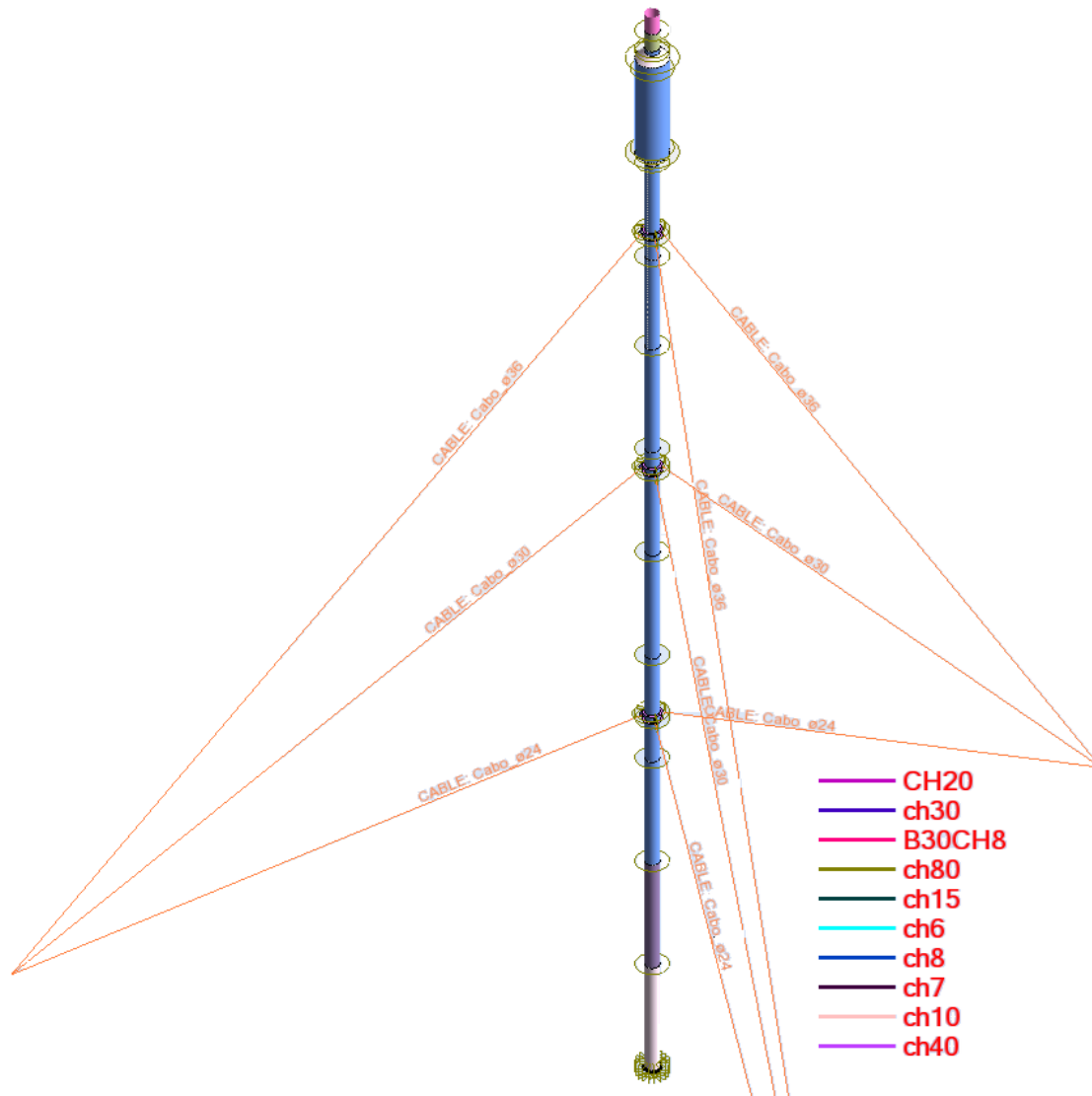


Figura 23 – Caracterização estrutural

Salienta-se que a espessura de projeto do *riser* é de 10 mm e foram registadas perdas de espessuras de 2 a 3 mm. Como tal foram considerados troços do *riser* com espessuras diferentes.

Para possível análise do modelo foi gerada uma malha com distinção do tamanho ou forma dos componentes.

Para a geração da malha foi adotado o tipo de elemento finito casca com transferência de cargas analítica.

De modo a conseguir uma maior fiabilidade na obtenção dos resultados e uma aproximação mais fiel da fronteira do domínio, na Tabela 5 são apresentadas as opções avançadas adotadas na geração de malha.

Tabela 5 - Opções de geração de malha

Método de criação de malha	Método de <i>Coons</i>
Tipo de divisão de painel	Triângulos e quadrados de contorno triangular
Elementos finitos – Tipo (Superfície)	Quadriláteros de 4 nós
Elementos finitos – Tipo (Volumetria)	Tetraedros de 4 nós
Elementos finitos – Coeficiente de força	Recomendados

O método de *Coons* gera superfícies que passam por todos os pontos de controlo.

Deste modo apresenta-se na Figura 24 e Figura 25 o refinamento da malha no corpo da *flare*.

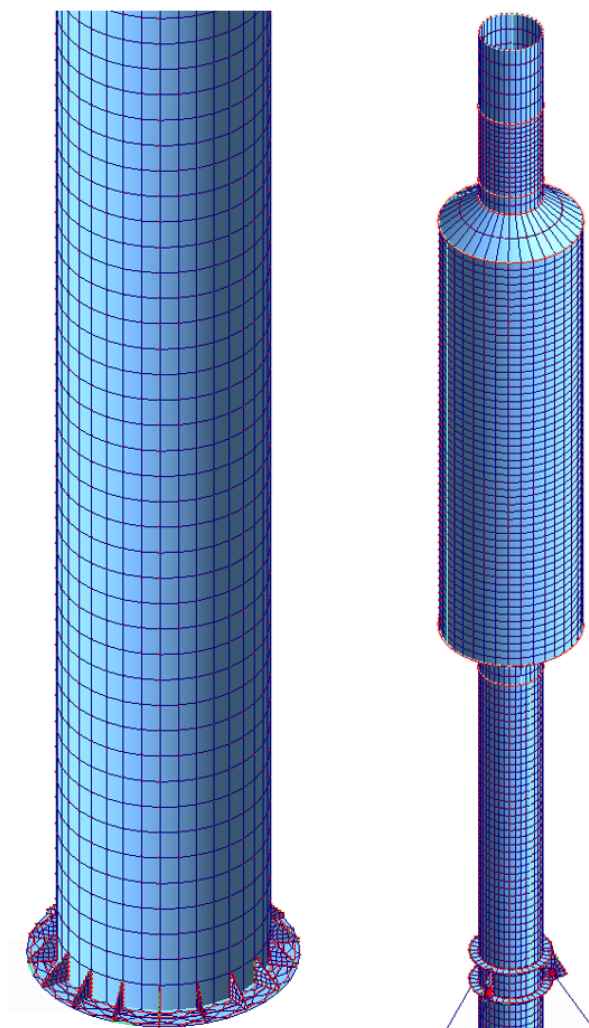


Figura 24 – Malha – Global

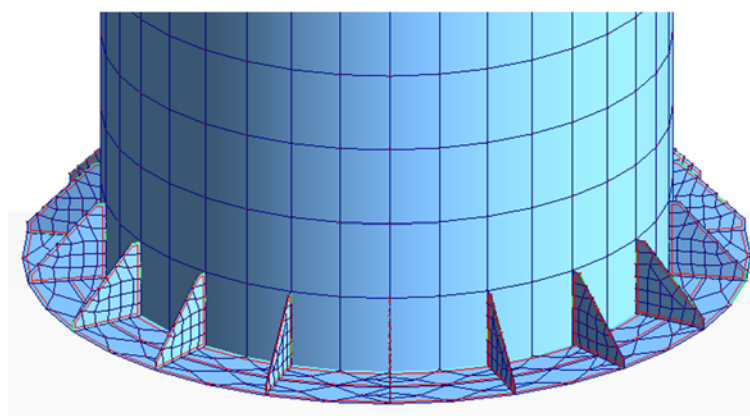


Figura 25- Refinamento da malha - Base

Para os cabos foi utilizado o tipo de elemento cabo (caraterizado pela transmissão apenas de esforços de tração), definida a secção resistente e parâmetros de montagem como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para definição dos elementos cabo

	Cabo ø 24	Cabo ø 30	Cabo ø 36
Secção Ax (cm²)	2,65	4,14	5,96
Pré-esforço (kN)	11,68	18,26	26,29

3.6.1.2 Condição fronteira do modelo

Para ser possível a análise MEF, uma vez gerada a malha, existe a necessidade de definição do tipo de ligação ou fixações do modelo ao exterior, nomeadamente restrições de deslocamento ou deformações, guiamentos, entre outros e cargas ou esforços aplicados à estrutura.

Dado à complexidade das ações atribuídas ao modelo, estas podem ser verificadas no capítulo 3.7 do presente trabalho.

A Figura 26 e Figura 27 ilustram a fixação modelo exterior, realizada por intermédio de apoios rotulados e unidirecionais.

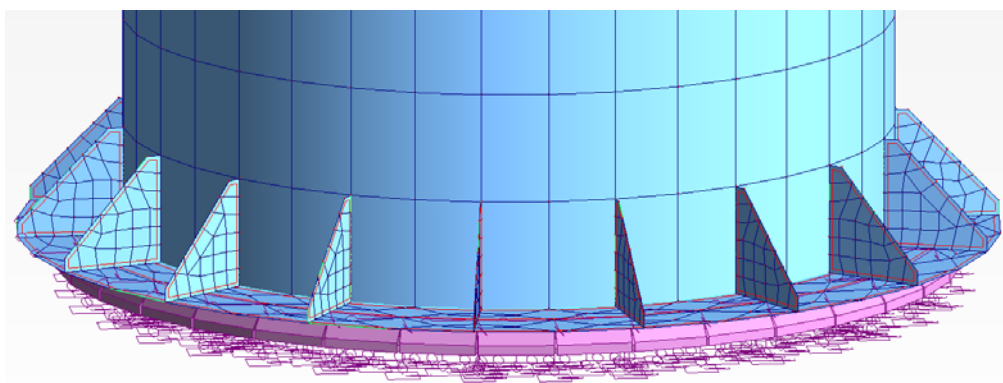


Figura 26 – Pormenor - apoios da base

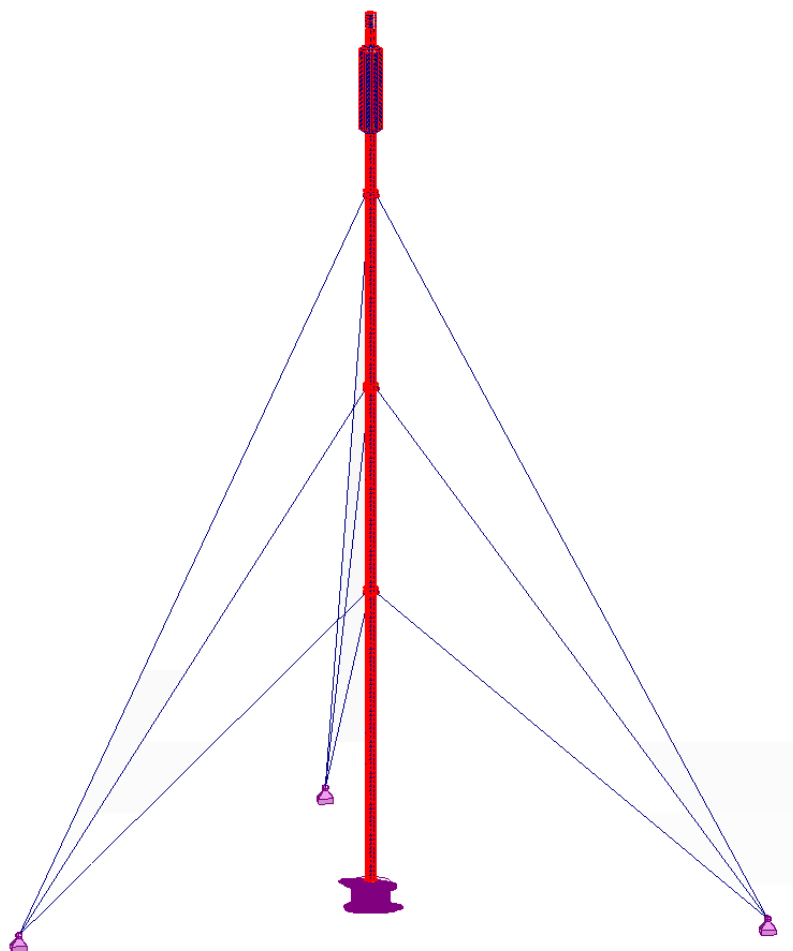


Figura 27 - Ligações ao exterior do modelo

3.6.2 Parâmetros considerados - CFD

Para a análise CFD foram considerados parâmetros de entrada relativos às condições reais de trabalho da *flare* em análise, que servirão como base para o cálculo computacional do comportamento do fluido para os diferentes cenários, que incluem a alteração de geometria do defletor.

Considerações:

- escoamento interno
- Regime variável com o tempo
- Gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$
- Tipo de escoamento: laminar e turbulento
- Rugosidade de parede: 50 microm

- Condições térmicas das paredes:
 1. Coeficiente de condutibilidade térmica: $60,5\text{W/m}^2/\text{K}$
 2. Temperatura do fluido externo: $20,05^\circ\text{C}$
- Fluido: gás butano
- Condições iniciais:
 1. Temperatura: 275°C
 2. Pressão externa: $0,101325\text{MPa}$
 3. Pressão interna: $15,8\text{ kg/cm}^2$
 4. Caudal mássico: $2,2\text{ Kg/s}$

As especificações e as condições de operação da flare encontram-se no anexo C e D.

A entrada e saída assumida para o escoamento do fluido é apresentada na Figura 28.

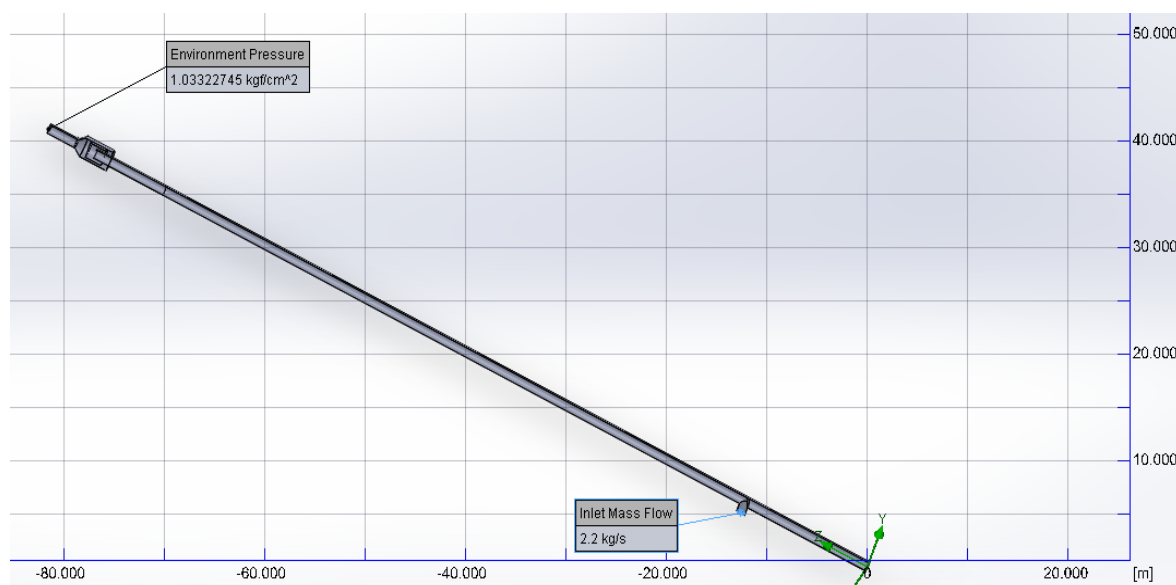


Figura 28 - Entrada e saída - flare

3.6.2.1 Modelo e criação de malha

A partir do modelo à escala real, e após definição das condições acima enumeradas, foi criada uma malha utilizando elementos tetraédricos, com um grau de refinamento Nível 3, numa escala de 1 a 5 (Figura 29 e Figura 30).



Figura 29 - Malha do fluido - geral

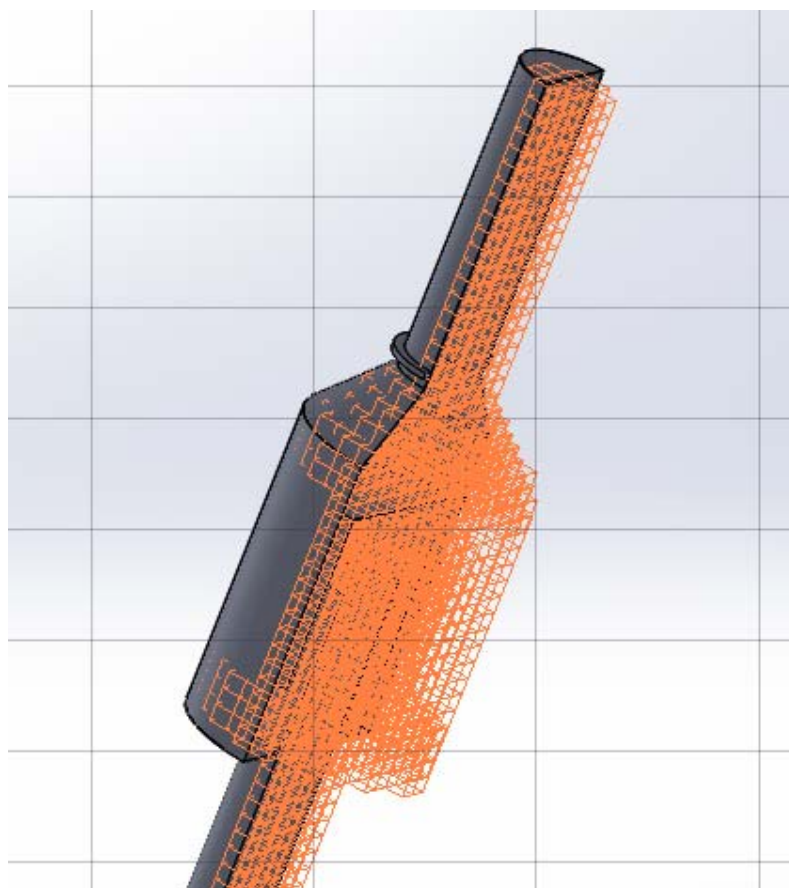


Figura 30 - Malha do fluido - pormenor

Na Tabela 7 pode-se verificar o número de células da malha apresentada acima.

Tabela 7 - N° células da malha CFD

N° de células	6471
N° de células parciais	27159

3.6.2.2 Condição fronteira do modelo

Na Figura 31 ilustra o domínio computacional definido para análise. Este corresponderá ao volume de controlo.

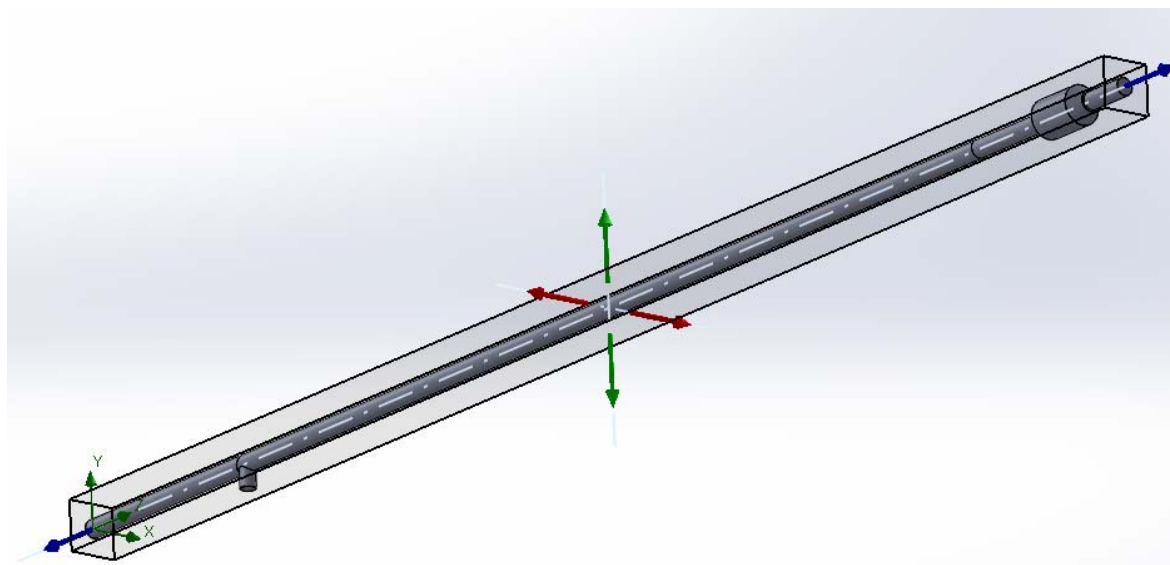


Figura 31 - Volume de controlo

Este volume de controlo tem como coordenadas limite as definidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Limites do volume de controlo

X_{\min}	-1,514 m
X_{\max}	-1,514 m
Y_{\min}	1,51 m
Y_{\max}	-1,51 m
Z_{\min}	92,08 m
Z_{\max}	-0,091 m

3.7 Ações estruturais e não estruturais

A seguinte análise de estabilidade contempla as ações recomendadas nos Eurocódigos, estando estas divididas em ações permanentes e ações variáveis, tendo sido desprezadas as ações de sobrecarga.

3.7.1 Ações permanentes

Os valores das ações resultantes do peso próprio dos elementos são calculados automaticamente pelo *software* de apoio.

Para além do peso próprio foi considerado um valor de pré-esforço nos cabos. Para evitar a possibilidade do aparecimento de vibrações, o intervalo de pré-carga nos cabos deve estar compreendida entre 7% e 10% da tensão de rotura, segundo a norma EN 1993-3-1:2006/AC:2009.

Não foram contabilizados eventuais coeficientes de minoração das capacidades resistentes dos materiais, relativos à corrosão ou deterioração dos mesmos.

3.7.2 Ações variáveis

3.7.2.1 Sobrecarga de utilização no topo

O valor relativo à sobrecarga de utilização refere-se ao peso próprio de operários, respetivos equipamentos e materiais, aquando cenários de inspeção e/ou manutenção de estrutura.

Devido ao facto de não se prever a ação de pessoas (área de exposição de 1 m²), inspeções e manutenções realizadas fora de serviço, estes efeitos não interferem na verificação de qualquer estado limite e por este motivo esta ação é desprezável.

3.7.2.2 Ações do gelo

Tendo em conta a localização do elemento a estudar, Zona Z2 do país e altitude a que se encontra (25 metros), recorreu-se à norma europeia EN ISO 12494:2001 e anexo C da norma EN 1993-3-1:2006/AC:2009 e à seguinte fórmula:

$$t(z) = \frac{1000}{9} \times C_z \times \left[1 + \left(\frac{H}{\eta} \right)^2 \right] \times e^{0.01 \times z} \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

Em que:

- $t(z)$ representa a espessura da camada de gelo em mm;
- C_z representa o valor de um coeficiente dependente da zona (igual a 0,030 para a zona Z1, 0,025 para a zona Z2 e 0,020 para a zona Z3);

- η representa o valor de um coeficiente dependente da zona (igual a 900 para a zona Z1, 950 para a zona Z2 e 1000 para a zona Z3);
- H representa o valor da altitude do terreno, em metros;
- z representa a altura da secção da estrutura em análise em relação à base do terreno, em metros.

A Figura 32 ilustra o zonamento do país para a ação gelo.

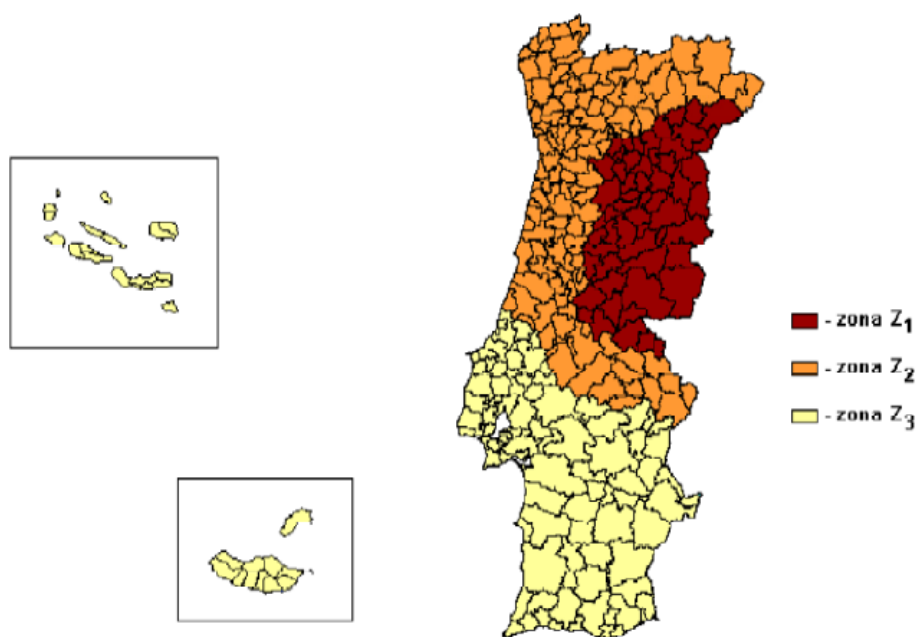


Figura 32 - Zonamento do país para a ação do gelo

Valores considerados: $C_z=0,025$; $\eta=950$; $H=25$ m; $z=92$ m.

Para os valores considerados, verificou-se que $t=6,97$ mm e como tal o valor da espessura de gelo resultante é superior a 5 mm, logo não se deve considerar nula a ação do gelo sobre a estrutura em estudo e equipamentos. No entanto, como a estrutura a estudar está sujeita a uma temperatura de serviço superior ao ponto de congelamento da água e na proximidade do mar, este efeito vai ser desprezado no cálculo quer para o corpo, quer para as espigas.

3.7.2.3 Ações térmicas

Foram calculados os valores resultantes das ações térmicas na estrutura por uma análise de MEF térmica, tendo-se considerado para as condições de entrada do fluido uma temperatura de 275°C, um caudal mássico de 2,2 kg/s e uma pressão de 15,8kg/cm² e para as condições

atmosféricas exteriores uma temperatura de 20°C a uma pressão atmosférica, em que a transferência de calor se dá por convecção e condução, sendo desprezada a transferência por radiação.

Para um processo transiente, foi considerado um escoamento interno desenvolvido, em que o coeficiente de convecção, h , é constante e calculado automaticamente pelo método numérico e considerando um coeficiente de condutibilidade para o aço $k=60,5 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ e rugosidade da superfície do aço de $50 \mu\text{m}$.

Como já referido, foi considerado um processo transiente, em que a temperatura máxima do corpo da *flare* é de aproximadamente 187,6°C, aos 7200s após o início do escoamento (Figura 33).

Os cálculos foram efetuados tendo por base a norma EN 1991-1-5:2003/AC:2009.

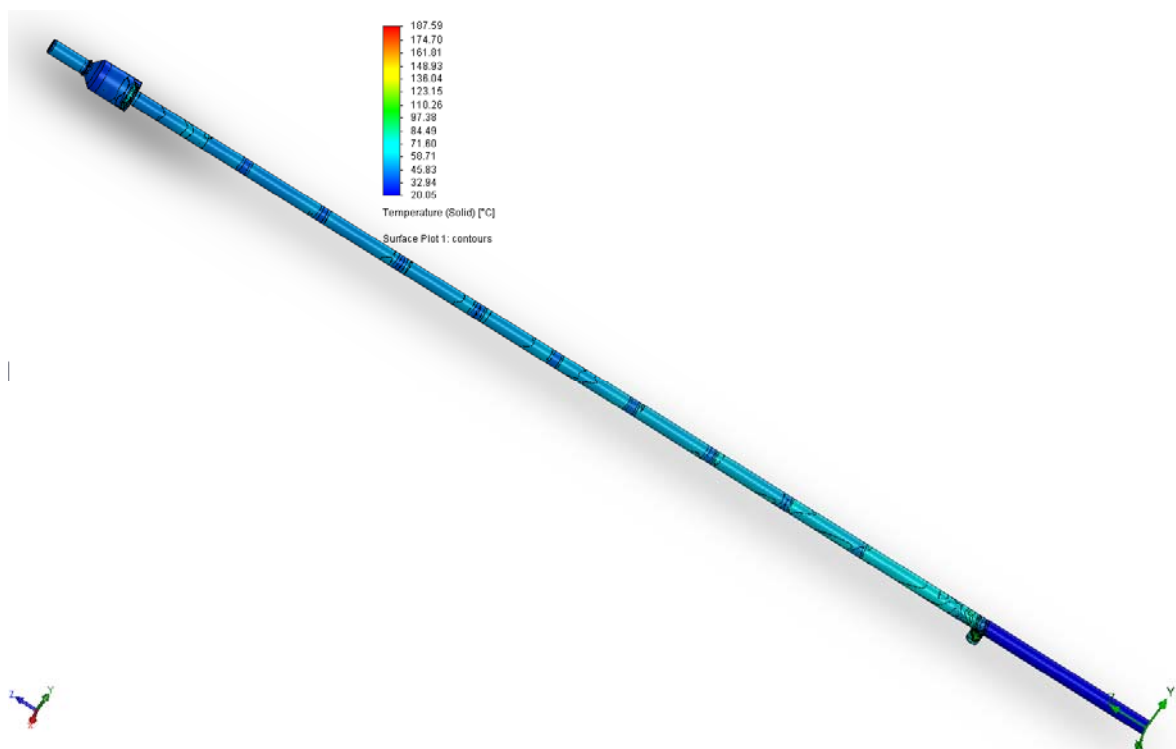


Figura 33 - Distribuição de temperatura no corpo da *flare*

Com o auxílio das isolinhas, a análise permite verificar as zonas de maior concentração de calor no corpo, localizadas na proximidade da boca de entrada do *riser* (Figura 34).

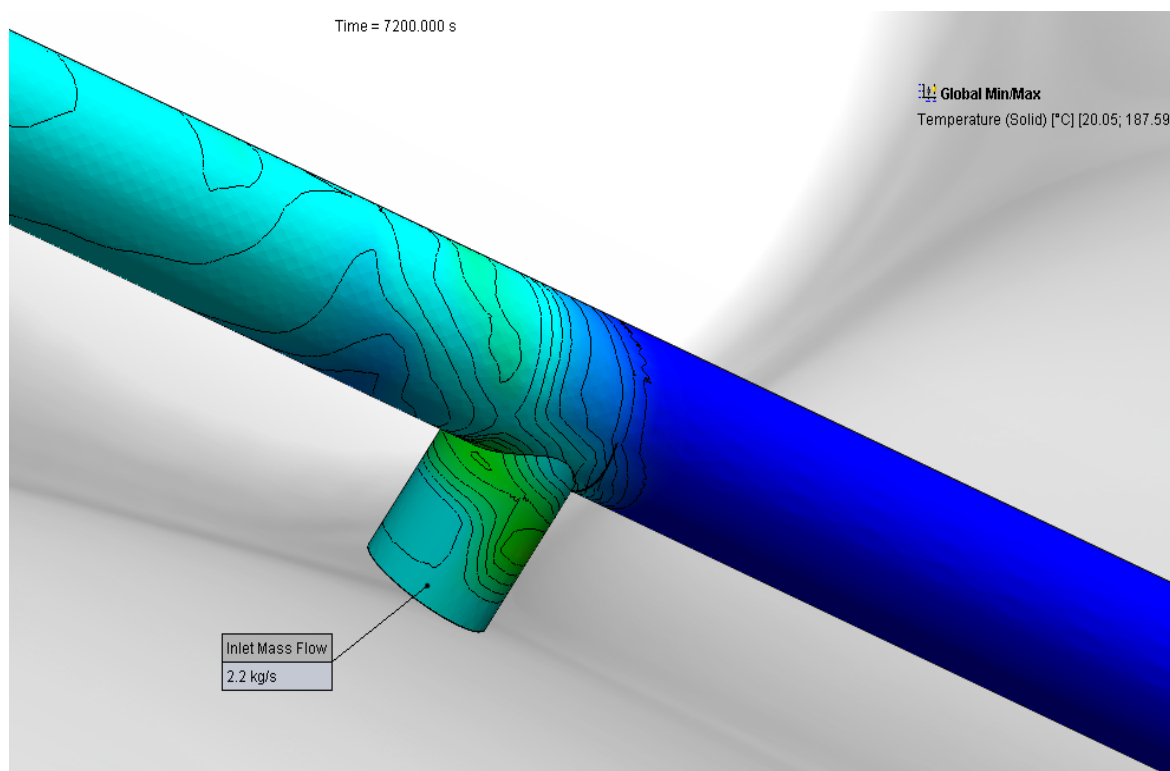


Figura 34 - Distribuição das isolinhas no corpo da *flare*

Os resultados obtidos da distribuição térmica serviram para introduzir os seus efeitos de temperaturas diferenciais no cálculo dos estados limites de serviço e estados limite últimos, com base na EN 1991-1-5:2003/AC:2009. Para além disso, serviu para perceber a variação da tensão limite de cedência do material ao longo do *riser*, como já referido anteriormente esta varia com a temperatura.

3.7.2.4 Ações devidas ao movimento das fundações

No presente caso, como o sistema estrutural é exteriormente isostático, isto é, tem apenas um elemento de fundação, sapata isolada, com uma área de implantação corrente, o risco de ocorrência de assentamentos diferenciais relevantes é residual, bem como é baixa a sensibilidade deste tipo de estruturas a eventuais assentamentos de apoio que ocorram durante o seu período de vida útil em condições normais de utilização. Tendo em conta o já referido e segundo a norma europeia EN 1997-1:2004/AC:2009, não se consideram

movimentos de fundações e deste modo são desprezadas também as possíveis ações resultantes destes.

3.7.2.5 Ações devidas a sismos

As ações dos sismos foram contempladas de acordo com o disposto no Eurocódigo 8, mais especificamente EN 1998-6:2005, para projeto de resistência ao sismo de estruturas tipo torres, mastros e chaminés.

Tendo por base a norma já indicada e sendo o presente estudo para uma chaminé com mais de 80 m de altura, o produto da aceleração pelo coeficiente do solo, $a_g \times S$, deve ser inferior a 0,25g (g é a aceleração gravítica). Caso não se verifique considera-se esta condição, para além das três componentes de translação da ação sísmica, a componente rotacional do movimento do solo.

De acordo com a EN 1998-1:2004/AC:2009, considera-se uma ação sísmica no “requisito de limitação de danos” aquela que possua uma probabilidade de excedência igual a 10% em 10 anos e um período de retorno igual a 95 anos.

Como valores caraterísticos inerentes à norma referida utilizou-se:

- 1) Zonamento sísmica Tipo 1: 1,6;
- 2) Zona sísmica: Zona D;
- 3) Coeficiente do solo, S: 1,35;
- 4) Classe de importância: IV;
- 5) Valor de cálculo da aceleração à superfície em terreno tipo A, a_g : 0,8 m/s²

Verificação:

$$a_g \times S \leq 0.25g \Leftrightarrow 1.08 \leq 0.25g \quad \text{Condição verificada} \quad (3.2)$$

Em função do resultado obtido serão consideradas apenas as três componentes de translação para a ação sísmica.

Os esforços atuantes foram combinados de modo a verificar o estado limite associado.

3.7.2.6 Ações devidas ao vento

Para o cálculo das ações do vento, com base na norma europeia EN 1991-1-4:2005/AC:2010, a *flare* foi dividida em tramos idênticos de 9 m e 7,8 m para os dois últimos tramos. Foram analisados os efeitos estáticos de arrasto do vento sobre os cabos, com base na mesma norma, incluindo desvios e efeitos de flexão perto das extremidades dos cabos. Teve-se em consideração os seguintes aspetos:

- 1) Zona B do país;
- 2) Rugosidade do solo de Tipo II;
- 3) Altura de 10 m acima do solo em terreno do tipo campo aberto: Coeficiente de direção, $C_{dir}=1$ e coeficiente de sazão, $C_{season}=1$.

O cálculo das forças exercidas pelo vento foram obtidas de forma automática pelo *software* de apoio, no entanto, estas poderiam ser obtidas através das expressões preconizadas na norma europeia EN 1991-1-4:2005/AC:2010.

Podemos visualizar na Figura 35 e Figura 36 as cargas de vento aplicadas no corpo e espigas da *flare*.

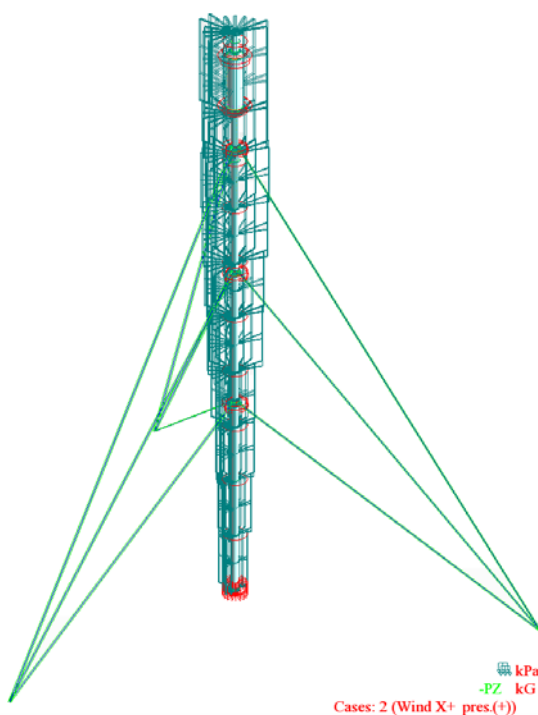


Figura 35 - Carga do vento no corpo da *flare*



Figura 36 - Carga do vento nas espigas da flare

Tendo em conta o género de estrutura em estudo, a quantificação da ação do vento em todos os elementos constituintes é expressa de um modo extremamente longo, pelo que não se apresenta no presente relatório.

3.8 Método de cálculo

Devido ao facto da estrutura não ser auto-suportada, foi abordado o método de cálculo para dimensionamento e modelação estrutural e cabos.

3.8.1 Método de cálculo, dimensionamento e modelação estrutural

As componentes das tensões atuantes na estrutura poderiam ser obtidas de acordo com as expressões apresentadas no anexo A e B da norma EN 1993-1-6:2007/AC:2009, contudo estas foram obtidas diretamente do modelo numérico, pelo MEF, embora seguindo as diretrizes preconizadas por esta norma.

A modelação da estrutura foi efetuada através de cascas, definidas de acordo com as características geométricas e mecânicas apresentadas anteriormente no capítulo 3.6.1.

Foram considerados os carregamentos estáticos e respetivas combinações, determinados posteriormente neste relatório.

As condições fronteira são simuladas ao nível da base por apoios rotulados na zona dos chumbadouros e apoios simples na restante base, os troços intermédios com a condição encastrado-encastrado e o troço superior com a condição encastrado-livre de acordo com as especificações e as cláusulas técnicas.

Salienta-se que, para efeitos de cálculo de estabilidade e respetivas verificações de segurança, é admitido que a estrutura se encontra em condições de conservação equivalentes ao estado garantido aquando a inspeção e de acordo com o relatório N° EI00000 (Inspeção em paragem - Paragem).

3.8.2 Método de cálculo, dimensionamento e modelação cabos

O cálculo dos cabos foi efetuado com base na norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009, no âmbito do projeto de estruturas com componentes de tensão que, devido às suas conexões com a estrutura, são ajustáveis e substituíveis.

Sendo os componentes em análise cabos com cordas de fios de aço dispostos em espiral, estes pertencem ao grupo B de componentes de tensão. Estes componentes devem cumprir os requisitos gerais segundo a norma EN 10264-1:2012.

3.9 Resultados obtidos na análise estrutural

3.9.1 Verificação de segurança aos estados limites últimos

3.9.1.1 Determinação da ação de base

Para determinar a ação de base, foi efetuada uma primeira análise sujeitando a *flare* às ações do vento e ações sísmicas.

Como se pode verificar em a) e b) da Figura 37, são apresentadas as tensões equivalentes de von Mises na estrutura da *flare* respeitantes aos dois tipos de ações.

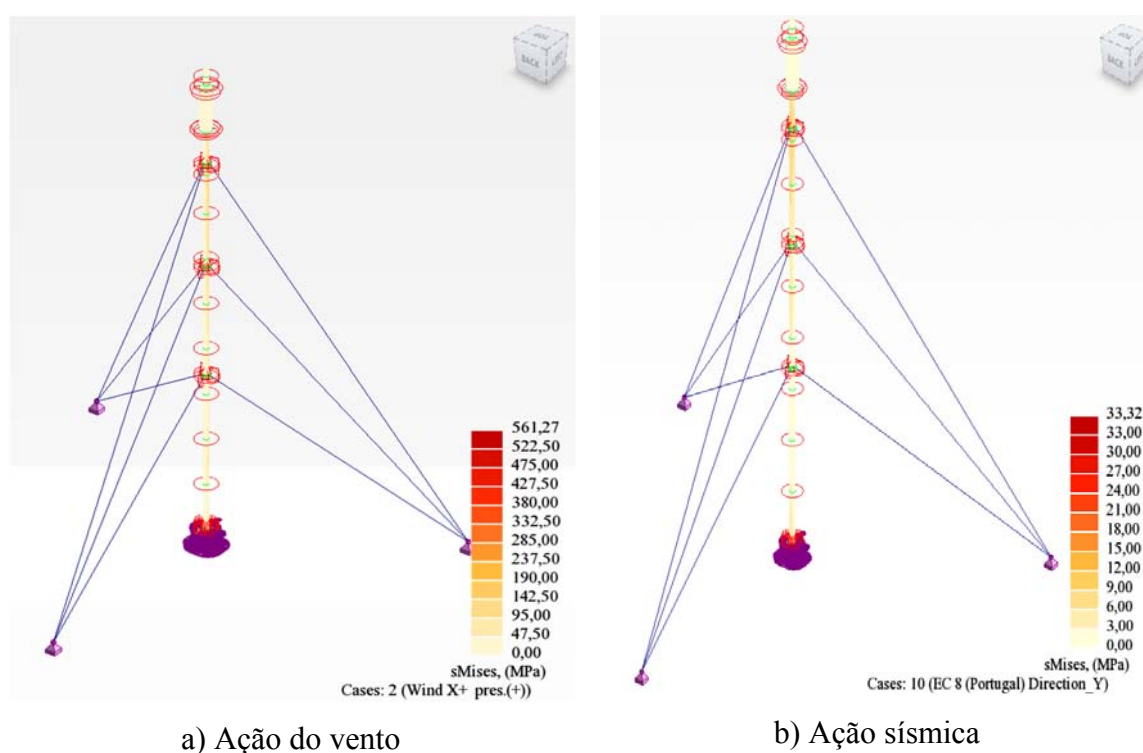


Figura 37 - Resultados da aplicação das ações do vento (a) e sísmica (b)

Analisando o resultado, após o emprego das ações, a ação variável do vento é claramente condicionante, e portanto, é tomada como a ação variável de base para a combinação de ações referente aos estados limites últimos.

Para o presente estudo foram utilizadas combinações fundamentais das ações sendo o vento a ação de base.

Para as combinações foi tido em conta o descrito na norma EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

$$\gamma_G \left| \times \sum G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{0}^{1,0} \right| \times \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (3.5)$$

Em que:

$\gamma_{G,j}$ representa o coeficiente parcial de segurança a aplicar ao valor característico da ação permanente $G_{k,j}$;

$\gamma_{Q,1}$ representa o coeficiente parcial de segurança a aplicar ao valor característico da ação variável de base da combinação $Q_{k,1}$;

$\gamma_{Q,i}$ representa o coeficiente parcial de segurança a aplicar ao valor característico da ação variável acompanhante $Q_{k,i}$;

$\psi_{0,i}$ representa o coeficiente para a determinação do valor de combinação da ação variável $Q_{k,i}$;

Os valores de $\psi_{0,i}$ são os indicados no quadro A1.1 da EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

Tendo em conta as características da análise, a combinação fundamental a aplicar neste caso traduz-se na seguinte equação:

$$S_d = 1,5 G_{p,1} + Q_{k,\Delta Tu} + 1,5 (Q_{v,1} + 0,7 Q_{s,1}) \quad (3.6)$$

Como carga permanente foi considerada a ação do peso próprio, $G_{p,1}$, a ação de temperatura uniforme, $Q_{k,\Delta Tu}$, e como ações variáveis o vento, $Q_{v,1}$ e o sismo $Q_{s,1}$.

A Figura 38 ilustra a combinação das ações empregues ao modelo de cálculo da *flare*.

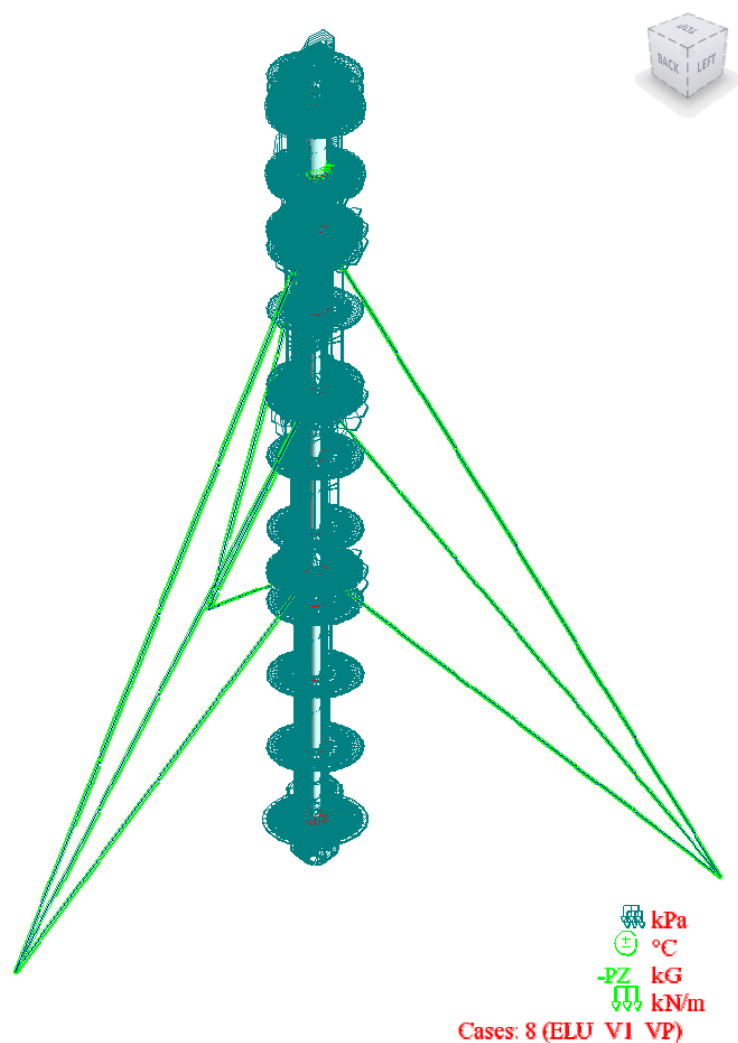


Figura 38 - Combinações fundamentais – Ação de base: vento

3.9.1.2 Verificação de segurança do corpo da flare

O estado limite representado na figura que se segue corresponde à verificação da resistência da casca da flare. Visto que se está analisar uma estrutura que é alvo de um mecanismo de degradação agressivo e que se verificam elevadas perdas de espessura, iniciou-se o processo de verificação da segurança do corpo da flare por uma combinação de acordo com a equação 3.6 do presente relatório. É de elevada importância referir também que devido às características geométricas da estrutura a classe de secção dos membros estruturais é classe 4 e como estipulado na norma EN 1993-1-6:2007/AC:2009 as componentes das tensões atuantes podem ser obtidas diretamente a partir do modelo numérico, por MEF, ou através das expressões apresentadas nos anexos A e B da mesma norma.

Podemos verificar na Figura 39 as tensões atuantes equivalentes obtidas a partir do modelo numérico, pelo critério de resistência por von Mises.

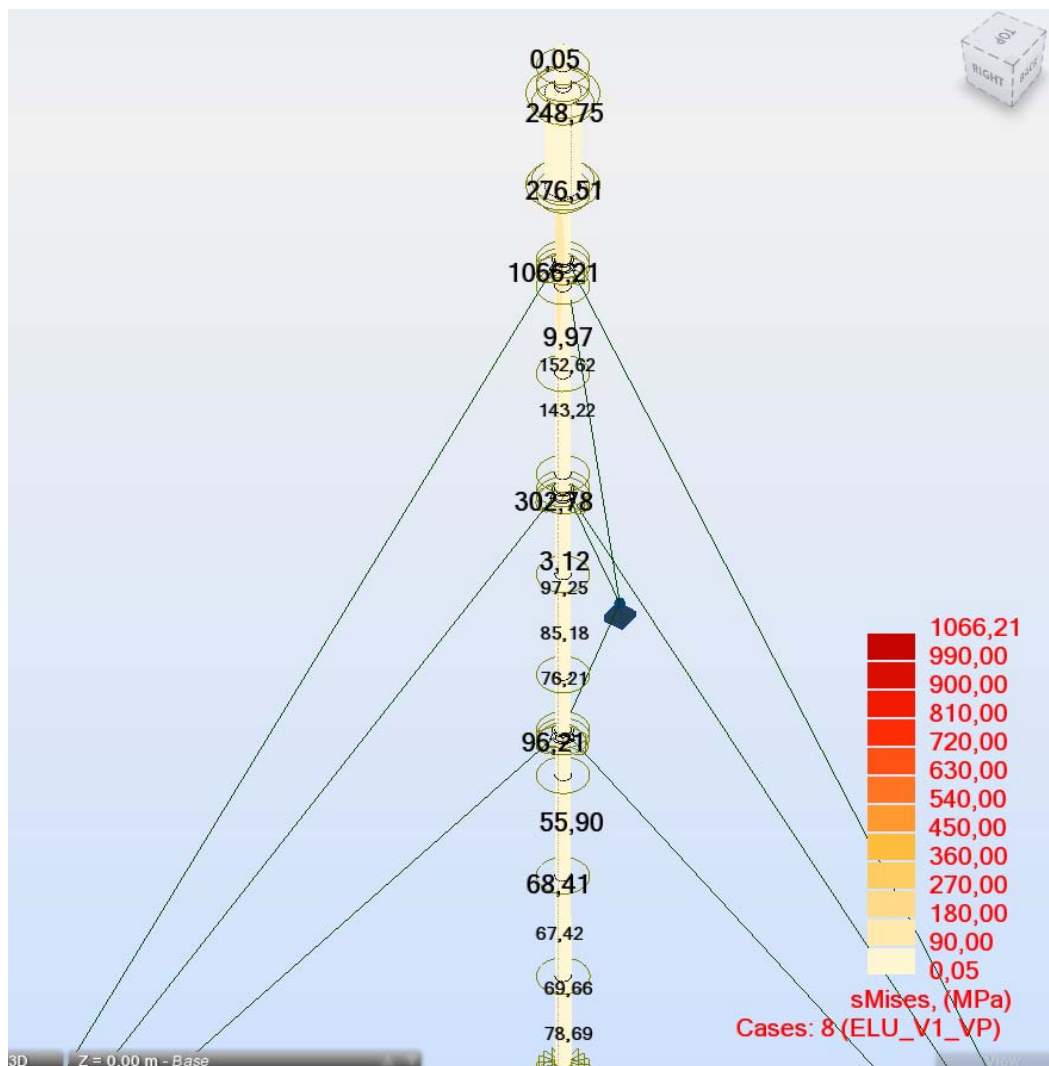


Figura 39 - Distribuição de tensões equivalentes de von Mises no corpo (MPa)

Numa primeira análise, os resultados obtidos na generalidade estão abaixo da tensão limite de cedência do material para a temperatura de funcionamento e espessuras empregues. No entanto, são visíveis três zonas em que as tensões equivalentes de von Mises são superiores às admissíveis, zona do balão de selagem e zonas dos olhais de amarração do 2º e 3º nível.

Numa avaliação mais pormenorizada, conclui-se que os resultados obtidos das tensões equivalentes de von Mises na zona do balão de selagem são desprezáveis, uma vez que estes se devem ao impedimento da expansão térmica provocado pelos elementos existentes no interior do balão não sujeitos às ações térmicas aquando a atribuição de ações.

Na Figura 40 são apresentadas em pormenor as tensões mais elevadas no corpo da *flare* obtidas no 3º Nível de espiaamento.

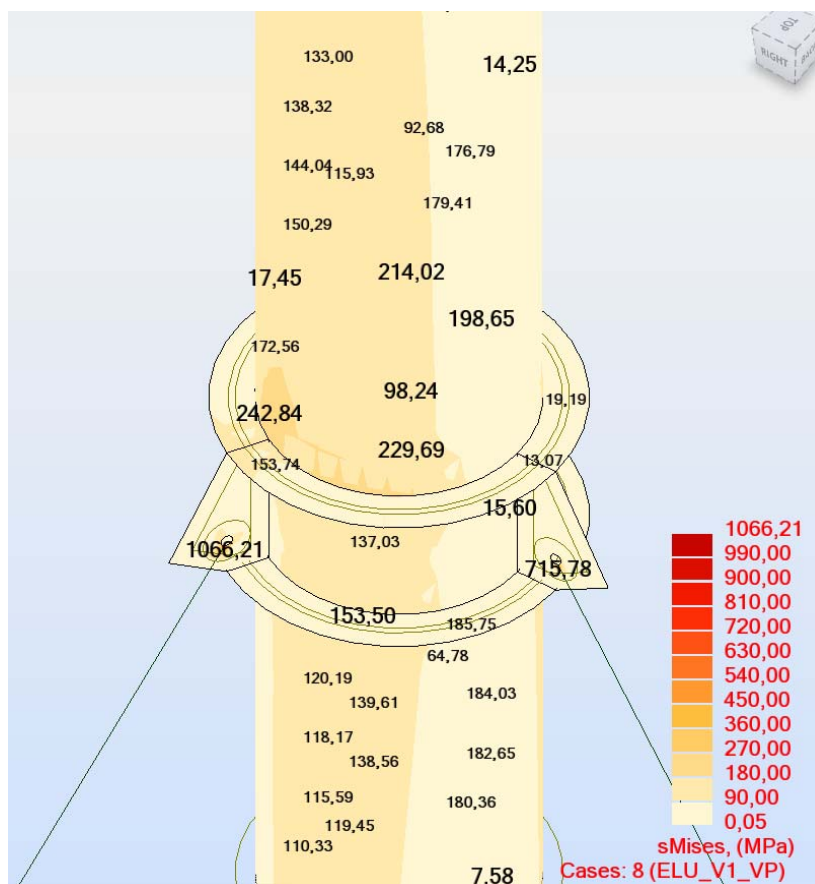


Figura 40 - Pormenor de localização das tensões equivalentes de von Mises mais elevadas (MPa)

Obtém-se que as tensões equivalentes máximas no corpo são de 242,84 MPa e as tensões equivalentes máximas nos olhais são de 1066,21 MPa.

Pelos valores apresentados das tensões atuantes constata-se que são superiores às tensões de cedência do material, $242,84 \text{ MPa} > \sigma_{\text{ced}}$ para o corpo e $1066,21 \text{ MPa} > \sigma_{\text{ced}}$ para os olhais. No entanto, estes valores podem ser desprezados uma vez que estes são resultantes de um sobre carregamento da combinação de ações para um estado limite último estando sujeitos a coeficientes de segurança elevados. Para além do já referido, a tensão equivalente de von Mises mais elevada está concentrada numa área restrita.

Na modelação por vezes não é possível fazer uma discretização com refinamento de malha suficiente em locais de variação abrupta de secção ou propícios a concentração de tensões

em modelos de elevada dimensão devido aos custos computacionais. Nestas situações é necessário subdividir a estrutura e analisar os pontos críticos em separado.

Relativamente às tensões atuantes nos olhais, estas foram resultado da aplicação dos esforços em apenas um nó da malha de MEF, o que não traduz a realidade da estrutura.

Pelas razões apresentadas no ponto 3.9.2.3 são apresentados os resultados de uma análise mais pormenorizada dos olhais de amarração do 3º Nível.

3.9.1.3 Verificação de segurança dos olhais de amarração em pormenor

Para a presente verificação, análise pormenorizada das tensões equivalentes atuantes nos olhais, foi apenas considerado uma porção do corpo da *flare*, para o 3º Nível de espionamento (técnica de sub-modelação) e considerada uma discretização com um maior refinamento da malha.

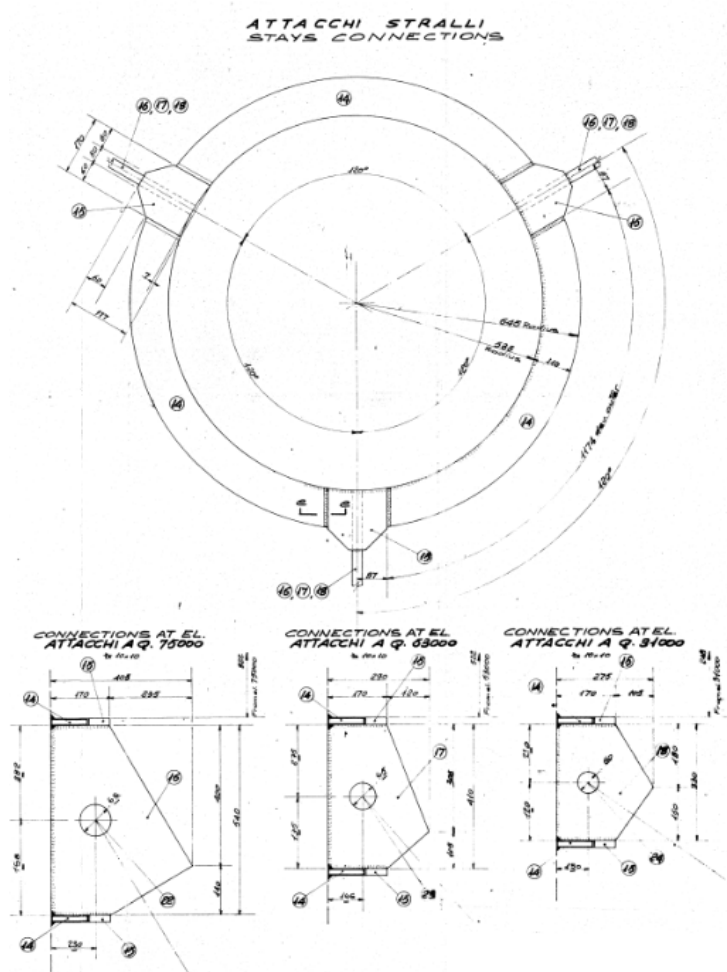


Figura 41 – Pormenor de olhais de amarração

A Figura 41 ilustra em pormenor os olhais de amarração para os três níveis que serviu de base para a modelação dos olhais.

A Figura 42 ilustra uma malha mais refinada, agora utilizando elementos sólidos para uma maior precisão, e as cargas aplicadas com a respetiva direção.

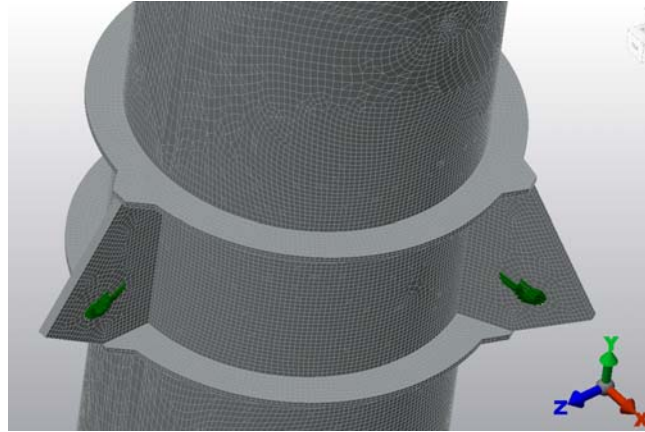


Figura 42 - Discretização mais refinada - olhal de amarração do 3º espiamento

Como condição fronteira, foi considerado que a porção do corpo da *flare* se encontrava encastrada na secção do *riser* no nível inferior para restrição do modelo.

Nesta análise foram consideradas cargas com intensidade máxima de 490 kN, obtidas nos estados limites últimos indicados no capítulo 3.9.1.4, e são direcionadas pelo vetor representativo da direção atual do 3º Nível de espiamento (cota de nível 75 m).

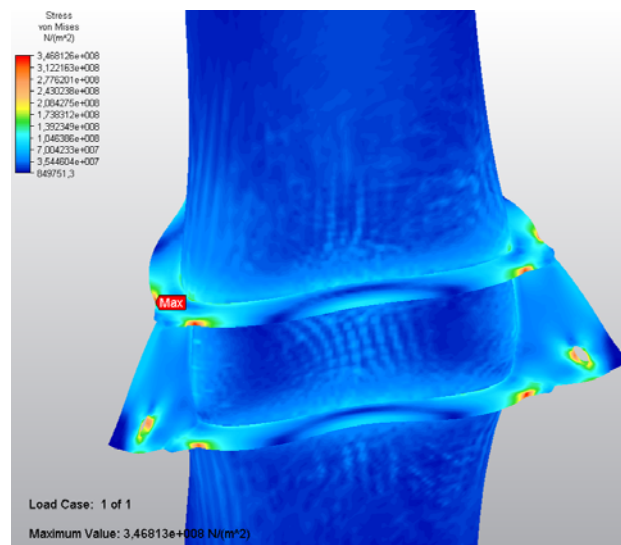


Figura 43 - Resultados gráficos das tensões nos olhais de amarração - situação atual

A Figura 43 representa o resultado da análise de tensões equivalentes de von Mises nos olhais de amarração em pormenor para o estado atual da estrutura e o comportamento à rigidez da estrutura a uma escala gráfica ampliada.

Como se pode observar na figura anterior, as tensões atuantes equivalentes continuam a ser superiores à tensão de cedência do material, conforme se tinha obtido pela análise geral com elementos de casca, embora neste caso, devido à alteração do modo de aplicação das cargas, a diferença seja inferior. De facto, obteve-se uma tensão instalada máxima de 346 MPa.

Como na análise pormenorizada as tensões atuantes continuam a ser superiores às tensões de cedência do material, tomou-se a liberdade de efetuar uma simulação para uma situação nova em que se propõe a alteração dos olhais de amarração, acrescentando reforços nas zonas mais solicitadas.

Como solução proposta acrescentaram-se reforços nas zonas críticas, conforme a Figura 44, onde se simulou um reforço 8 mm de espessura soldado sobre os anéis de rigidez do *riser* e dois anéis soldados de espessura 5 mm a cada olhal para reforço da furação.

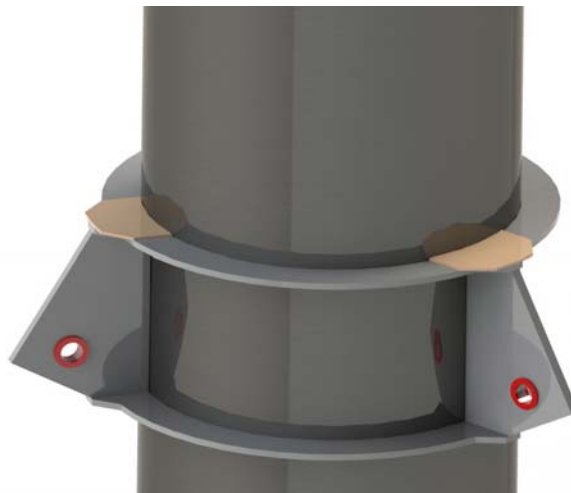


Figura 44 - Representação gráfica das soluções apresentadas

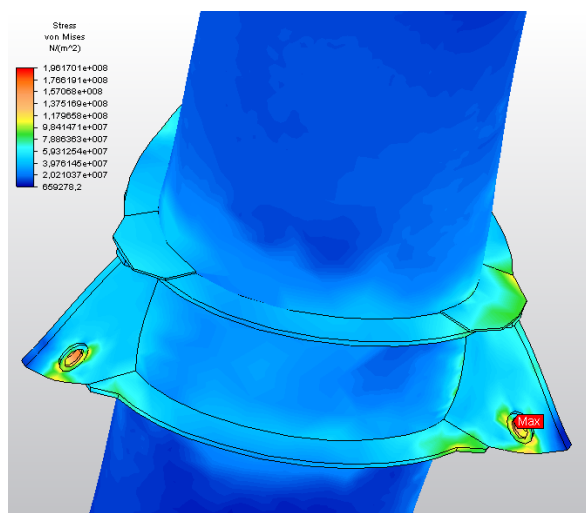


Figura 45 - Resultados gráficos das tensões nos olhais de amarração - situação proposta

A Figura 45 ilustra os resultados da análise com a presença de reforços nas zonas de amarração das espigas e da variação geométrica dos anéis de rigidez, como já referido.

Podemos observar nesta análise pormenorizada que, com a situação proposta de reforço, as tensões atuantes equivalentes são inferiores às tensões de cedência do material, $196 \text{ MPa} < \sigma_{\text{ced}}$.

3.9.1.4 Verificação de segurança dos cabos

Tendo em conta o disposto no capítulo 6 da norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009 para verificar a segurança dos cabos é necessário obedecer à seguinte condição:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} < 1 \quad (3.7)$$

Onde F_{Ed} é o valor de cálculo da força axial da corda e F_{Rd} é o valor de cálculo da resistência de tensão de tração.

Na Tabela 9 são apresentados os valores característicos da força mínima de rotura, F_{mbf} , e as forças axiais exercidas nos cabos para o caso mais desfavorável, F_{Ed} .

Tabela 9 - Valores característicos dos cabos

Nível de espiamento	Ø Cabo (mm)	F _{Ed} (kN)	F _{mbf} (kN)
1º	24	56	362
2º	30	168	567
3º	36	490	817

Os valores de F_{mbf} foram extraídos de um catálogo de um fabricante de cabos em conformidade com a norma ISO 4309:2010.

Recorrendo à norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009 e EN 10138-1:2005 tem-se que:

$$F_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{uk}}{1,5 \times \gamma_r}, \frac{F_k}{\gamma_r} \right\} \quad (3.8)$$

Onde F_{uk} é o valor característico da resistência à rotura, F_k é o valor característico da elasticidade do componente do componente de tensão e γ_R é o fator parcial.

Para os componentes do grupo B a componente F_{uk} deve ser calculada como:

$$F_{uk} = F_{\min} k_e \quad (3.9)$$

Onde F_{min} é determinada de acordo com a norma EN 12385-2:2002+A1:2008 como:

$$F_{\min} = \frac{K d^2 R_r}{1000} \quad (3.10)$$

Onde K é o fator de força mínima de rotura, d é o diâmetro nominal da corda em mm, R_r é a resistência à tração em N/mm² e k_e é o fator de perda.

Segundo a norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009 para o tipo de cabo em análise o fator de força mínima de rotura é K=0,455. Sendo a resistência à tração R_r= 1770 N/mm² os valores obtidos da força mínima para os diferentes diâmetros de cabos com base na anteriormente referida são superiores aos valores característicos da força mínima de rotura, F_{mbf}, extraídos do catálogo do fabricante. Por segurança foram adotados os de menor valor.

Para garantir que os cabos permaneceram com um comportamento elástico, quando as ações atingem o seu valor de projeto, o valor de F_k deverá:

$$F_k \geq \frac{F_{uk}}{1,50} \quad (3.11)$$

Como o valor de F_k é determinado por ensaios de tração adota-se que aquando do projeto inicial esta condição foi tida em consideração.

Assume-se que o quociente da força F_{uk} pelo produto do fator de segurança com o fator parcial é menor que o quociente da força F_k e o fator parcial (equação 3.8).

Considerando o fator parcial $\gamma_R=0,9$ e o fator de perda $k_e=0,9$, segundo tabelas 6.2 e 6.3 da norma EN 1993-1-1:2006/AC:2009, obteve-se os seguintes resultados para F_{Rd} , para os diferentes diâmetros de cabos utilizados no espiaamento do corpo da *flare* (Tabela 10):

Tabela 10 - Resultados de F_{Rd}

$F_{min}=F_{mbf}$ (kN)	K_e	γ_R	F_{uk} (kN)	F_{Rd} (kN)
816,63	0,9	0,9	734,97	544,42
567,10	0,9	0,9	510,39	378,07
362,94	0,9	0,9	326,65	241,96

Na Tabela 11 são apresentados os resultados do quociente da F_{ed} e F_{rd} :

Tabela 11 - Resultados do quociente da F_{ed} e F_{rd}

\varnothing Cabo (mm)	F_{ed} (kN)	F_{Rd} (kN)	$F_{ed}/F_{Rd}<1$
36	490	544,42	0,90
30	168	378,07	0,44
24	56	241,96	0,23

Com base na condição acima referida, podemos constatar que a segurança dos cabos se verifica.

3.9.2 Verificação de segurança aos estados limites de utilização

A verificação da segurança em relação aos estados limites de utilização deve ser efetuada, em geral, em termos dos parâmetros que definem esses estados limites e adotando, salvo indicação em contrário dos regulamentos relativos aos diferentes tipos de estruturas e de materiais, valores unitários para coeficientes de segurança respeitantes às ações (γ_f) e às propriedades dos materiais.

3.9.2.1 Verificação de segurança da flare

Optou-se por fazer a verificação dos estados limites de utilização pelo controlo da deformação no topo da flare.

Esta verificação é feita para o estado limite de utilização, empregando uma ação correspondente a uma solicitação do vento de 100 km/h com um critério de aceitação de $\theta_{\text{topo}} \leq 1^\circ$. No entanto, foi produzida a verificação para os estados limites últimos, pior cenário que salvaguarda a segurança.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados de deslocamento obtidos no topo da Flare para as condições anteriormente definidos.

Tabela 12 – Resultados de deslocamento obtidos

Verificação de Segurança		
H (m)	U (cm)	θ (°)
92	121,1	$0,754^\circ \leq 1^\circ$

Na Figura 46 são apresentados os resultados gráficos dos deslocamentos obtidos. Os resultados gráficos dos deslocamentos apresentados estão a uma escala ampliada.

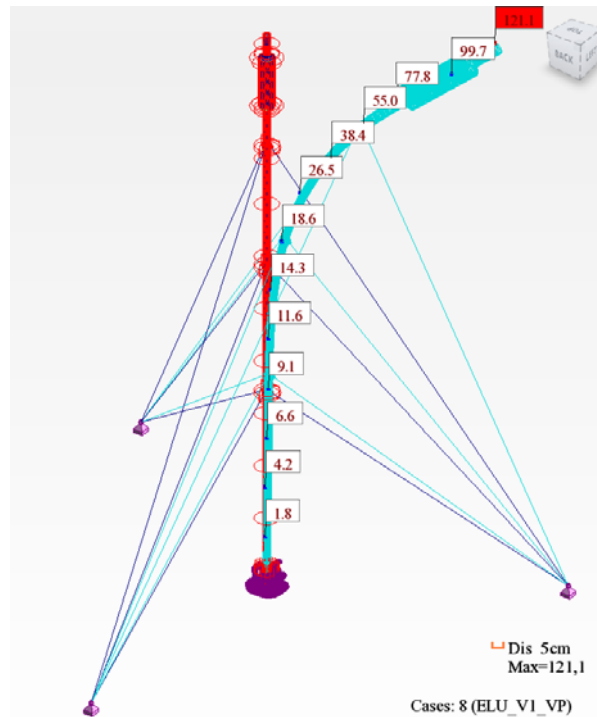


Figura 46 - Resultados gráficos da deslocação máxima no topo (resultados em cm)

Visto que, utilizando a combinação das ações do estado limite último, a estrutura cumpre com o requisito imposto, pode-se extrapolar os dados para solicitações de ventos de 100 km/h.

3.9.2.2 Verificação de segurança dos cabos

As tensões limites, σ_{uk} , devem estar relacionadas com a resistência à rotura, F_{uk} , como se segue:

$$\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m} \quad (3.12)$$

Onde a A_m é a secção transversal em mm^2 dos cabos de aço e F_{uk} é o valor característico da resistência à rotura já calculado.

A_m pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$A_m = \frac{\pi d^2}{4} f \quad (3.13)$$

Onde d é o diâmetro externo do cabo ou corda, em mm, incluindo qualquer revestimento para proteção contra a corrosão e f é o fator de preenchimento, que neste caso foi considerado $f=0,75$, segundo tabela 2.2 da norma EN 1993-1-1:2006/AC:2009.

Podemos verificar na Tabela 13 os resultados obtidos:

Tabela 13 - Resultados obtidos

d - ø Cabo (mm)	f	A_m (mm²)	F_{uk}	σ_{uk} (MPa)
36	0,75	763,02	734,97	963,24
30	0,75	529,87	510,39	963,24
24	0,75	339,12	326,65	963,24

Para verificarmos a resistência dos cabos à rotura (Tabela 14) devemos tomar em consideração a imposição da condição imposta pela seguinte equação, em que existe uma relação direta entre a capacidade resistente do cabo e a sollicitação nos estados limites últimos.

$$cs \times \frac{F_{Ed}}{A_m} \leq \frac{F_{uk}}{A_m} \quad (3.14)$$

Onde cs é o coeficiente de segurança;

Tabela 14 - Valores de coeficiente de segurança

d - ø Cabo (mm)	A_m (mm²)	F_{uk}	F_{ed} (kN)	cs
36	763,02	734,97	490	1,5
30	529,87	510,40	168	3,0
24	339,12	326,65	56	5,8

Pelos valores dos coeficientes de segurança acima obtidos, verificamos que os cabos cumprem as imposições de segurança.

3.10 Ligação ao solo

Como as condições atuais de cálculo não diferem em relação às condições aquando da elaboração do projeto inicial, a ligação ao solo não mereceu qualquer verificação extra.

Assumiu-se assim deste modo que as condições de conservação e volumetria dos maciços atuais cumprem com os requisitos.

3.10.1 Fixação

As reações do apoio da *flare* são suportadas pelos maciços da base do corpo como as dos espiaamentos.

Admite-se, para este efeito, que tenham sido cumpridas as boas práticas indicadas pelos fabricantes, todas as normas e regulamentos em vigor para todas as ligações.

3.11 Verificação da segurança à fadiga

A *flare* apresenta um sistema estrutural flexível, o que a torna suscetível a fenómenos de instabilidades por ressonância vibracional, no entanto para combater este fenómeno encontra-se espiada em 3 níveis.

Para melhor perceção do sistema foram efetuadas algumas verificações no presente capítulo.

3.11.1 Análise modal

Sendo a estrutura da *flare* do tipo consola, extremamente suscetível a vibrações, e por ser um sistema não amortecido, foi realizada uma análise modal para verificar se as frequências naturais se encontravam fora do regime induzido pelas cargas aplicadas, tendo em especial atenção à frequência do vento.

Os resultados obtidos para os dez primeiros modos de vibração foram (Tabela 15):

Tabela 15 - Resultados da análise modal

Caso/Modo	Frequência (Hz)	Período (seg)	Mas.rel.UX (%)	Mas.rel.UY (%)	Mas.rel.UZ (%)	Mas.corr.UX (%)	Mas.corr.UY (%)	Mas.corr.UZ (%)	Tot.mas.UX (kg)	Tot.mas.UY (kg)	Tot.mas.UZ (kg)
4/ 1	0,48	2,07	31,84	12,49	0,00	31,84	12,49	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 2	0,70	1,44	42,02	36,87	0,00	10,18	24,38	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 3	1,11	0,90	67,41	52,66	0,01	25,39	15,80	0,01	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 4	1,66	0,60	85,75	87,58	0,01	18,34	34,92	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 5	2,20	0,46	88,13	88,17	0,02	2,38	0,59	0,01	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 6	2,45	0,41	88,30	88,27	0,02	0,17	0,10	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 7	4,11	0,24	89,90	89,00	0,02	1,61	0,73	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 8	4,25	0,24	89,91	89,02	0,02	0,00	0,02	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 9	4,27	0,23	90,65	90,70	0,02	0,75	1,68	0,00	27748,99	27748,99	27748,99
4/ 10	6,81	0,15	92,07	91,16	0,02	1,41	0,47	0,00	27748,99	27748,99	27748,99

Como a velocidade do vento oscila de forma aleatória, a densidade espectral de energia em função do fluxo turbulento é mais relevante na gama de frequências de 0 Hz a 1 Hz. Tendo em consideração a norma EN 1991-1-4:2010 e o artigo 23º do RSAEEP, neste tipo de casos assume-se como necessário a realização de uma análise dinâmica uma vez que as frequências naturais de vibração da estrutura no 1º e 2º modo encontram-se abaixo de 1 Hz. Salienta-se que frequências do fluxo do vento maiores que 1,0 Hz são negligenciáveis.

O gráfico que se segue (Figura 47) relaciona a densidade espectral de energia com a gama frequência imposta pelo fluxo turbulento do vento [20].

Verifica-se que a frequência crítica é aproximadamente 0,05 Hz, acima da qual a densidade espectral diminui significativamente, reforçando o anteriormente referido.

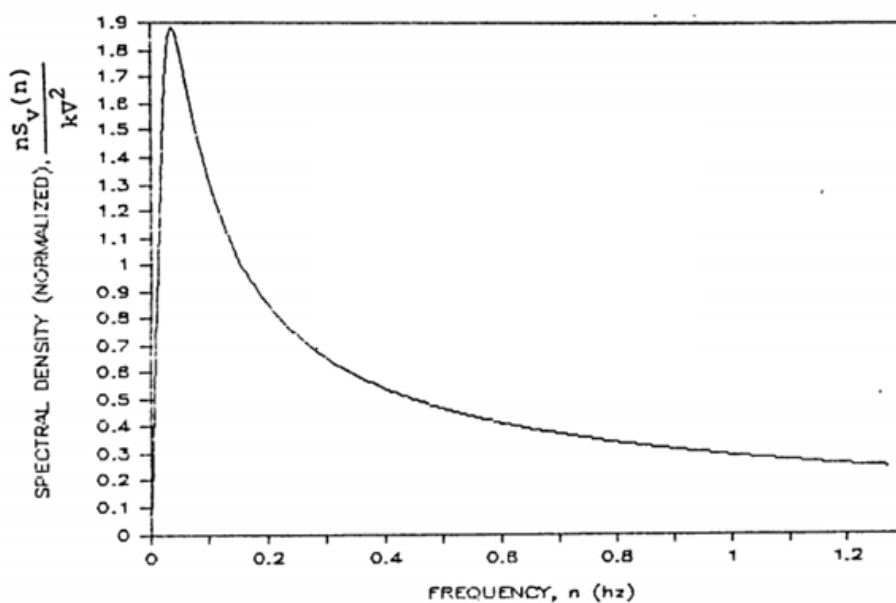


Figura 47 - Espectro de turbulência atmosférica

3.11.2 Verificação da segurança à fadiga do corpo da *flare*

Para sistemas estruturais tubulares são as ações na direção transversal à direção do vento que condicionam a verificação da resistência à fadiga.

Quando a massa de ar entra em contacto com a estrutura ocorre o desprendimento alternado de vórtices, para uma certa velocidade crítica do vento. Nestas condições, a massa de ar entra em turbulência no lado oposto da estrutura, originando uma força de intensidade variável e transversal à direção do vento. Poderão ocorrer vibrações importantes por ressonância da estrutura se a frequência de desprendimento de vórtices for igual ou próxima de uma frequência própria da estrutura.

Esta condição verifica-se quando a velocidade do vento é próxima da velocidade crítica do vento, que em geral corresponde a uma velocidade do vento observada frequentemente, pelo que, em resultado do número de ciclos de carregamento, a fadiga poderá tornar-se relevante.

Não é necessário analisar o efeito de desprendimento de vórtices se a seguinte condição for satisfeita:

$$v_{crit,i} > 1,25 \times v_m \quad (3.15)$$

$v_{crit,i}$ representa o valor da velocidade crítica do vento para o modo de vibração i , definida como a velocidade do vento à qual a frequência de desprendimento de vórtices é igual à frequência própria (modo i) da estrutura ou do elemento estrutural.

v_m representa o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos, obtido na secção 4.2.1.1, ao nível da secção transversal em que se desencadeia o desprendimento de vórtices (ver a Figura E.3 da EN 1991-1-4:2005/AC:2010).

Analisando os resultados obtidos de forma automática aquando a geração de cargas do vento pelo *software*, a velocidade crítica é inferior ao valor característico da velocidade média do vento, logo a condição anterior não foi satisfeita.

Na Figura 48 são apresentados os resultados da velocidade crítica para cada segmento da estrutura da *flare*.

Ação dinâmica do vento:	Definida automaticamente	
Tipo de estrutura:	Aço	
Período:	2,040 s	
Número de Strouhal:	0,200	
Velocidade crítica:		
T1 T1	3,309 m/s	< 25 m/s
T2 T2	2,596 m/s	< 25 m/s
T3 T3	2,596 m/s	< 25 m/s
T4 T4	4,583 m/s	< 25 m/s
T5 T5	2,596 m/s	< 25 m/s
T6 T6	4,583 m/s	< 25 m/s
T7 T7	2,596 m/s	< 25 m/s
T8 T8	2,596 m/s	< 25 m/s
T9 T9	4,583 m/s	< 25 m/s
T10 T10	5,868 m/s	< 25 m/s
Considerando a ação da força dinâmica		

Figura 48 - Resultados da velocidade critica do vento

Aquando a aplicação da ação do vento foi considerada uma carga dinâmica na verificação dos estados limites últimos, no entanto sabe-se que a verificação da resistência à fadiga devida à turbulência na direção de ação do vento não é em geral decisiva.

Tendo por base um historial do equipamento em análise e não tendo sido presenciados ou relatados quaisquer fenómenos de ressonância da estrutura, desconsiderou-se a análise da fadiga para o corpo da *flare*.

Nos casos em que seja necessário verificar explicitamente a segurança da estrutura à fadiga deve ser seguido o exposto na norma EN 1993-1-9:2005/AC:2009.

3.11.3 Verificação da segurança à fadiga dos cabos

Os valores limites de tensão f_{SLS} para as condições de serviço, considerando dimensionamento à fadiga com flexão, devem de ser inferiores a $f_{SLS}=0,45\sigma_{uk}$.

Para garantir a segurança dos cabos à fadiga deve-se verificar a seguinte condição:

$$\sigma_{Ed} \leq f_{SLS} \quad (3.16)$$

Na Tabela 16 são apresentados os resultados da verificação.

Tabela 16 - Resultados obtidos

d - ø Cabo (mm)	σ_{uk} (MPa)	F_{ed} (kN)	A_m (mm²)	$f_{SLS}=0,45 \times \sigma_{uk}$ (MPa)	σ_{Ed} (MPa)
36	963,24	326,67	763,02	433,46	428,12
30	963,24	112	529,875	433,46	211,37
24	963,24	37,33	339,12	433,46	110,08

Com base nos resultados acima apresentados podemos verificar que é garantida a segurança à fadiga para todos os cabos, independentemente do nível de espiamento.

3.11.4 Vibração nos cabos

Como os cabos estão expostos externamente, deve ser verificado o impacto das vibrações induzidas pelo vento durante e após a montagem. Como os mecanismos de excitação dinâmica ainda não podem ser modelados com precisão suficiente para fazer previsões confiáveis [21, 22], deve-se tomar medidas para limitar vibrações imprevistas.

Para cabos longos, de comprimento superior a 80 m, segundo norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009, deve ser previsto a instalação de amortecedores para garantir que a relação de amortecimento crítico seja superior a 0,5%.

No presente caso, como não foram instalados amortecedores e alguns dos cabos em análise têm um comprimento superior a 80 m, devem ser tomadas medidas para evitar a sobreposição de frequências, ou seja, situações em que o cabo fica com uma frequência de excitação, W , dentro de 20% da frequência natural da estrutura, W_n ou $2W_n$.

Com base na norma EN 1993-1-11:2006/AC:2009, para verificar a segurança, a amplitude do deslocamento do cabo deve ser limitada utilizando um critério de resposta de modo a que com uma velocidade do vento moderada, 15 m/s, a amplitude não exceda $L/500$, onde L é o comprimento do cabo.

Como já referido, a amplitude máxima de deslocamento, $A_{m\acute{a}x}$, dos cabos é dada pela seguinte equação que se resume ao resultado da divisão do comprimento máximo do cabo, $L=85,15$ m, por 500. Deste modo, o valor utilizado foi o do cabo de maior comprimento.

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{85150}{500} \cong 170 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Assim, foi verificada a amplitude máxima de vibração nos cabos quando sujeitos à velocidade do vento moderada de 15m/s. Para esta verificação foi utilizado o mesmo modelo, com as mesmas condições fronteira e malha, da verificação de segurança dos estados limite.

Relativamente às ações, foi considerada a combinação do vento a uma velocidade de 15 m/s com o peso próprio dos elementos.

Na Figura 49 pode-se verificar as cargas resultantes devidas à ação do vento e peso próprio dos elementos.

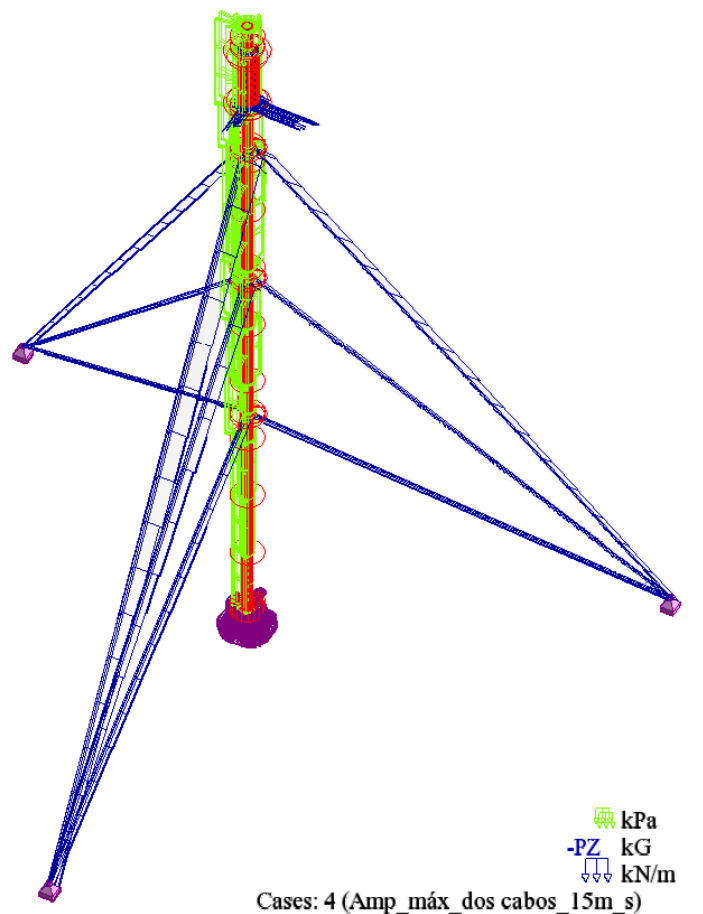


Figura 49 - Cargas devidas à ação do vento a 15m/s e peso próprio

3.12 Rotura da espia de maior solicitação

Por motivos de segurança aquando a manutenção ou rotura imprevista de uma das espias, surge a necessidade de verificar, de acordo com o anexo E da norma EN 1993-3-1:2006/AC:2009, a resistência dos restantes cabos na falta de um.

Para proceder a esta verificação, simulou-se a rotura da espia de maior solicitação.

A Figura 51 ilustra o rementamento de uma espia.

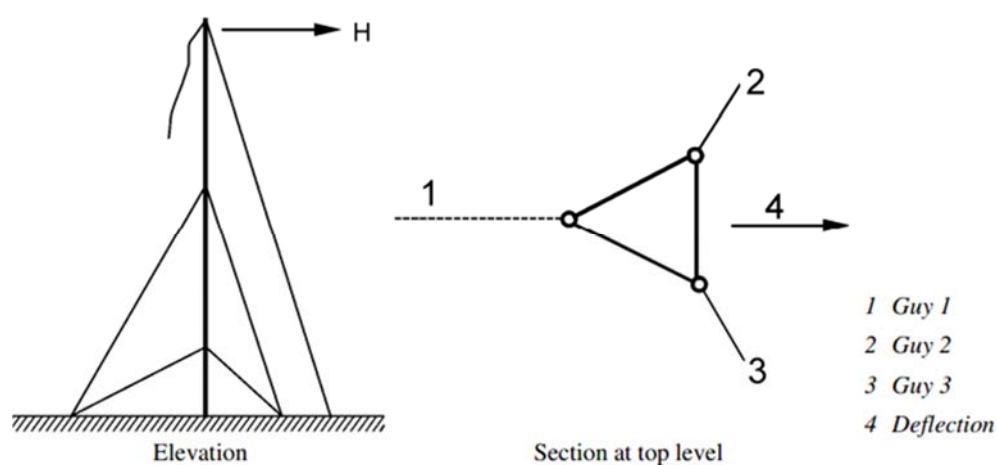


Figura 51 - Carga accidental-rotura da espia de maior solicitação

A verificação foi realizada de acordo com o disposto no anexo E da norma EN 1993-3-1:2006/AC:2009, em duas etapas:

- Análise estática desprezando o vento e o efeito de amortecimento da estrutura;
- Análise da resistência dos restantes cabos com uma ação de vento a 50% da aplicada nos estados limites últimos.

As condições do modelo de análise numérica são idênticas às usadas no capítulo 3.6.1, com remoção de uma espia.

Foi selecionada a espia de maior solicitação pelos resultados obtidos no capítulo 3.9.1. Para o presente caso a rotura da espia de maior solicitação é representada na Figura 52.

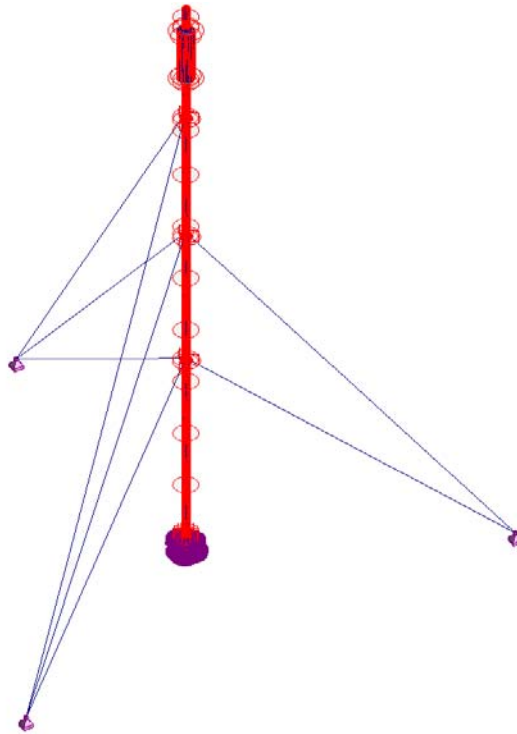


Figura 52 - Rotura da espia de maior solicitação no modelo em análise

Foi removida a espia de maior solicitação de modo a simular a rotura e após a aplicação da combinação das ações com 50% da ação do vento obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 53.

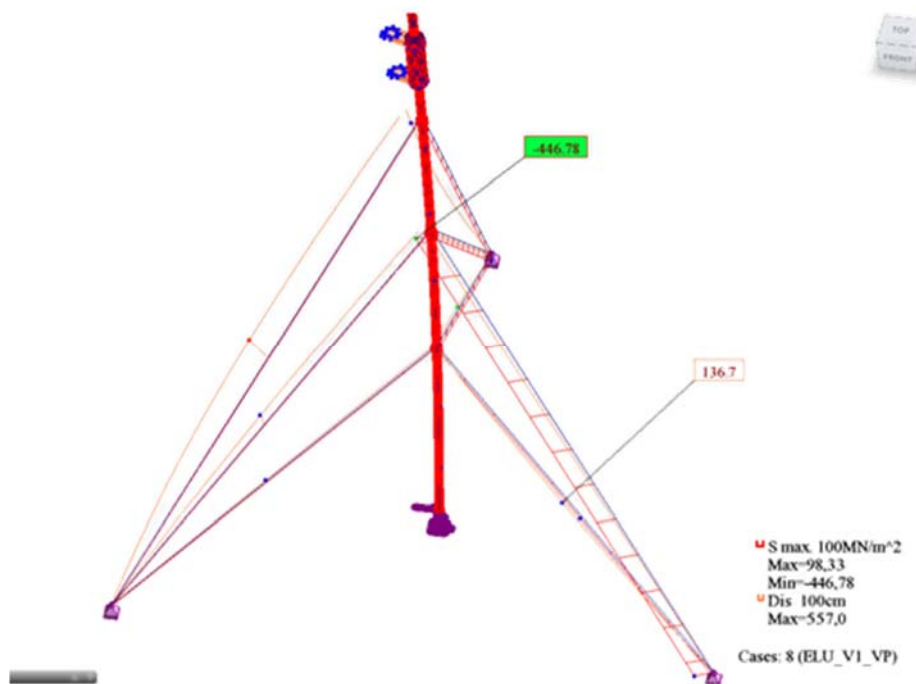


Figura 53 - Tensão máxima na espia mais solicitada após rotura

Na figura anterior é possível constatar que as restantes espias do 3º Nível ficaram frouxas e a espia com maior sollicitação é a do 2º Nível com uma tensão atuante $\sigma_A = 446,78$ MPa.

Os dados obtidos foram tratados de acordo com a tabela seguinte, de modo a determinar o coeficiente de segurança ($C_{Sobtido}$), inerente à verificação em causa, onde σ_R é a tensão resistente e σ_A é a tensão atuante.

Os valores de A_m e F_{Rd} foram obtidos no capítulo 3.9.2.1 e 3.9.1.4. A tensão resistente, σ_R , foi obtida pela seguinte expressão:

$$\sigma_R = \frac{F_{Rd}}{A_m} \quad (3.18)$$

Tabela 17 - Coeficiente de segurança

d - ø Cabo (mm)	A_m (mm²)	F_{Rd} (kN)	σ_R (MPa)	σ_A (MPa)	$C_{Sobtido}$
30,0	529,9	378,1	713,5	446,8	1,6
24,0	339,1	242,0	713,5	136,7	5,2

Na Tabela 17 não foram apresentados os resultados dos cabos do 3º Nível, uma vez que, como já referido, após a rotura da espia e sendo a direção ação aplicada na direção favorável ao tensionamento das restantes espias estas ficam frouxas. Por esse motivo a resistência das espias do 3º Nível não está em causa.

Pelos resultados obtidos verifica-se que os cabos continuam em segurança com o rebentamento da espia mais sollicitada.

4 Estudo dos mecanismos de degradação e beneficiação da estrutura

Na confrontação das espessuras atuais com as de projeto verificou-se uma elevada perda de espessura na proximidade da conexão com a tubagem proveniente do balão da *flare*. Este desgaste progressivo da parede do corpo do equipamento é condicionante para a utilização em segurança do mesmo ao longo do tempo e, como tal, foram analisados os mecanismos de corrosão associados bem como o comportamento do fluido durante o funcionamento.

4.1 Mecanismos de degradação

Analisando o relatório de inspeção elaborado em paragem programada antecedente à presente análise, empreende-se para a análise da estrutura dentro do âmbito de cálculo, que existem cavados extensos no interior do *riser* e na chapa de fundo defletora associados a fortes corrosões, efeitos estes que evidenciam uma corrosão relacionada com o escoamento dos fluidos.

A Figura 54 identifica os componentes anteriormente referidos.

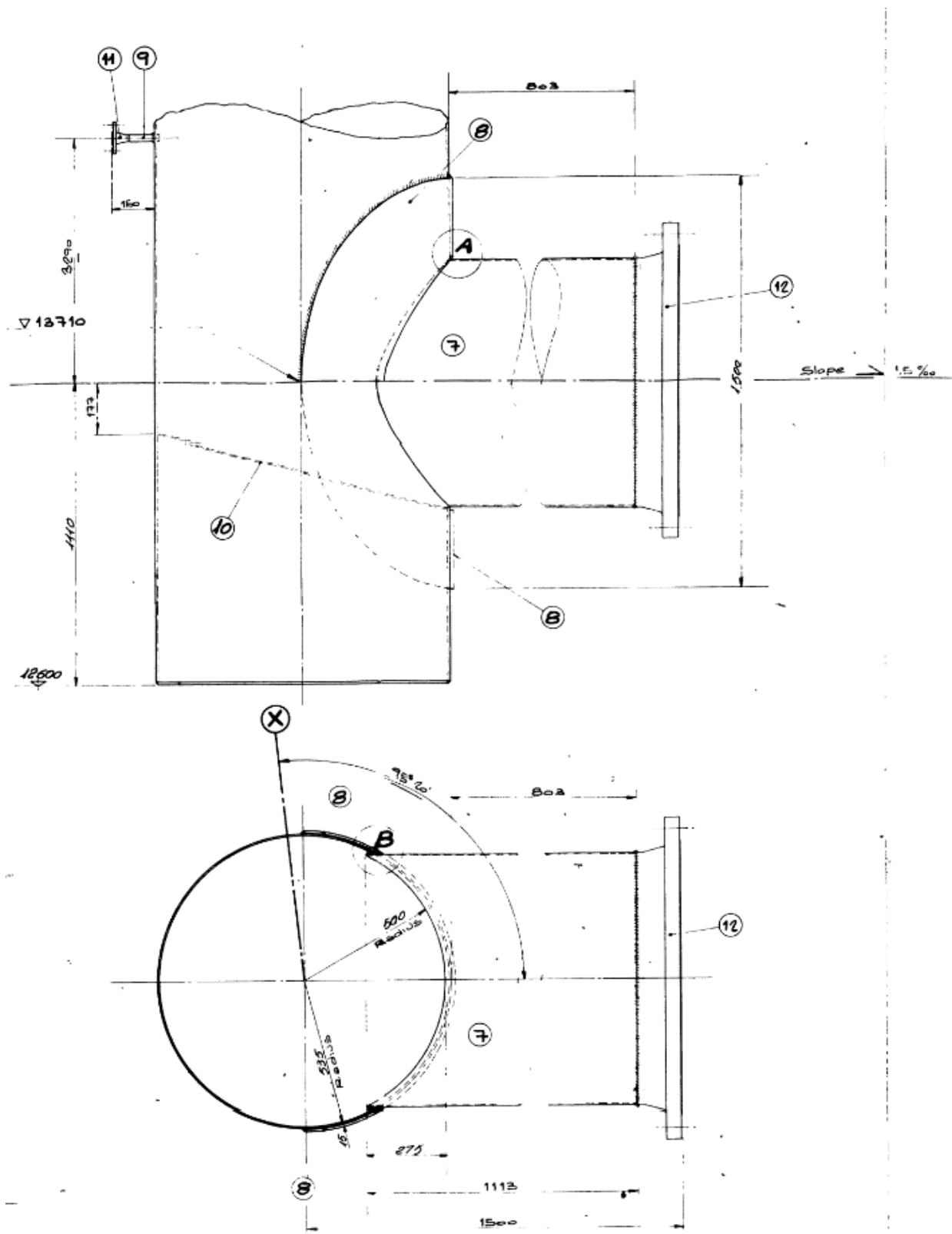


Figura 54 – Componentes do corpo da flare: riser (pos.8), chapa de fundo defletora (pos.10) e flange de entrada do fluido (pos.12)

A Figura 55 ilustra os cavados presentes na chapa de fundo defletora e riser da flare.



Figura 55 - Cavados no *riser* e chapa de fundo defletora

O recurso à simulação numérica para interpretação dos fenómenos que ocorrem dentro do equipamento é fundamental uma vez que o escoamento de fluidos induz uma aceleração nos processos corrosivos em que acresce um efeito mecânico à ação corrosiva. O fluxo dos fluidos faz com que ocorra um arrancamento dos filmes de superfície que poderiam oferecer proteção contra a corrosão. A este tipo de corrosão denomina-se habitualmente de corrosão-erosão, podendo esta ser dividida em corrosão por cavitação e corrosão por turbulência [23].

Neste caso em específico não se prevê que ocorra corrosão por cavitação, tendo sido dada especial atenção à corrosão por turbulência, fenómeno este caracterizado pela incorporação de sólidos suspensos no fluido.

Os resultados obtidos são apresentados no capítulo seguinte.

4.1.1 Análise numérica para interpretação e análise do comportamento do fluido nas condições atuais de funcionamento

A análise numérica do presente capítulo foi realizada tendo em consideração as condições atuais de funcionamento do equipamento de acordo com a geometria, dados de projeto, malha e condições fronteira de acordo com o exposto no capítulo 3.6.2.

Resumo das condições iniciais tomadas em consideração:

- 1) Pressão: 15,8 kg/cm²;
- 2) Caudal mássico: 2,2 kg/s;
- 3) Temperatura: 275°C.

De modo a perceber o comportamento do fluido ao longo de toda a *flare*, incluindo o balão de selagem molecular e o queimador, optou-se por efetuar uma análise CFD na íntegra.

Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58 é possível visualizar o comportamento da velocidade do fluido ao longo de toda a *flare*.

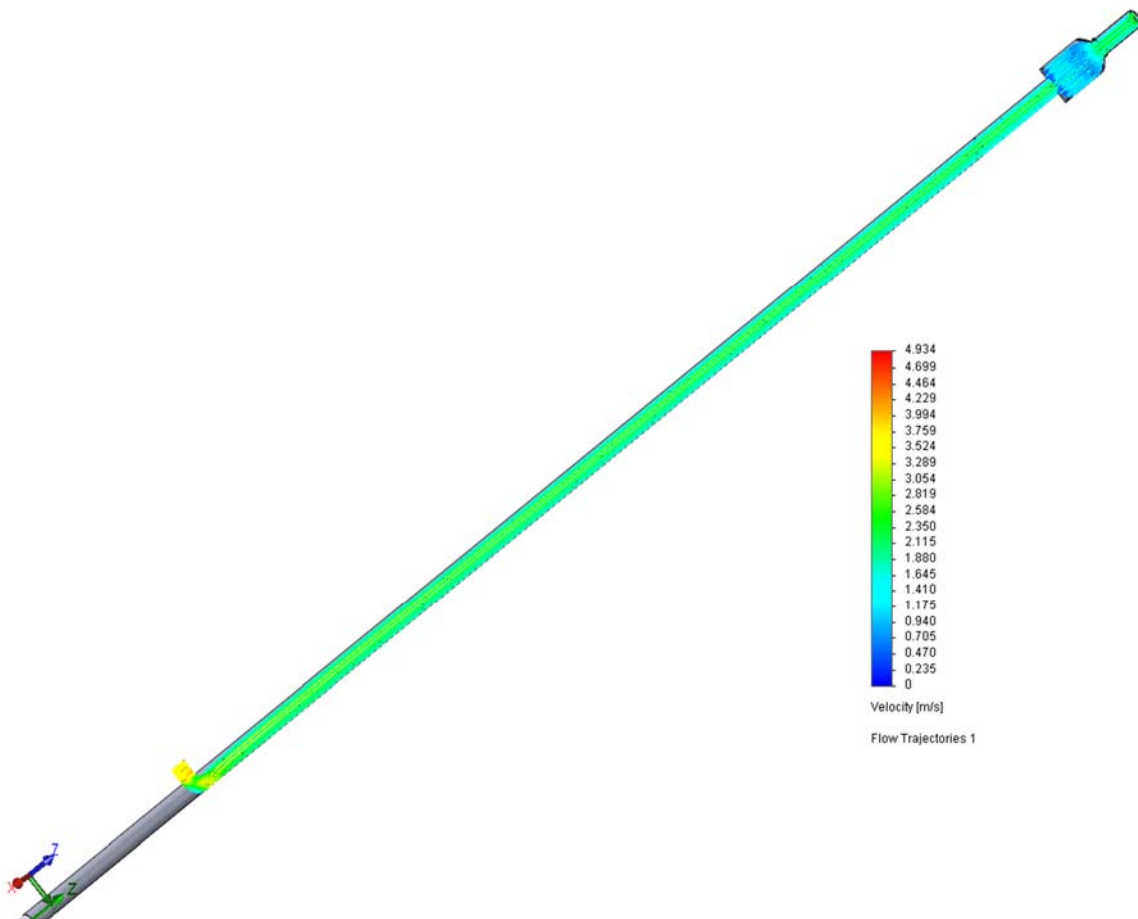


Figura 56 - Modelo de simulação do comportamento do fluido

Na figura anterior é possível verificar que para as condições de entrada e saída, assumidas, o escoamento do fluido impõe uma velocidade de entrada aproximada a 3.524 ms⁻¹.

Nas seguintes figuras pode-se observar pormenores representativos da entrada e saída do fluido no corpo da *flare*.

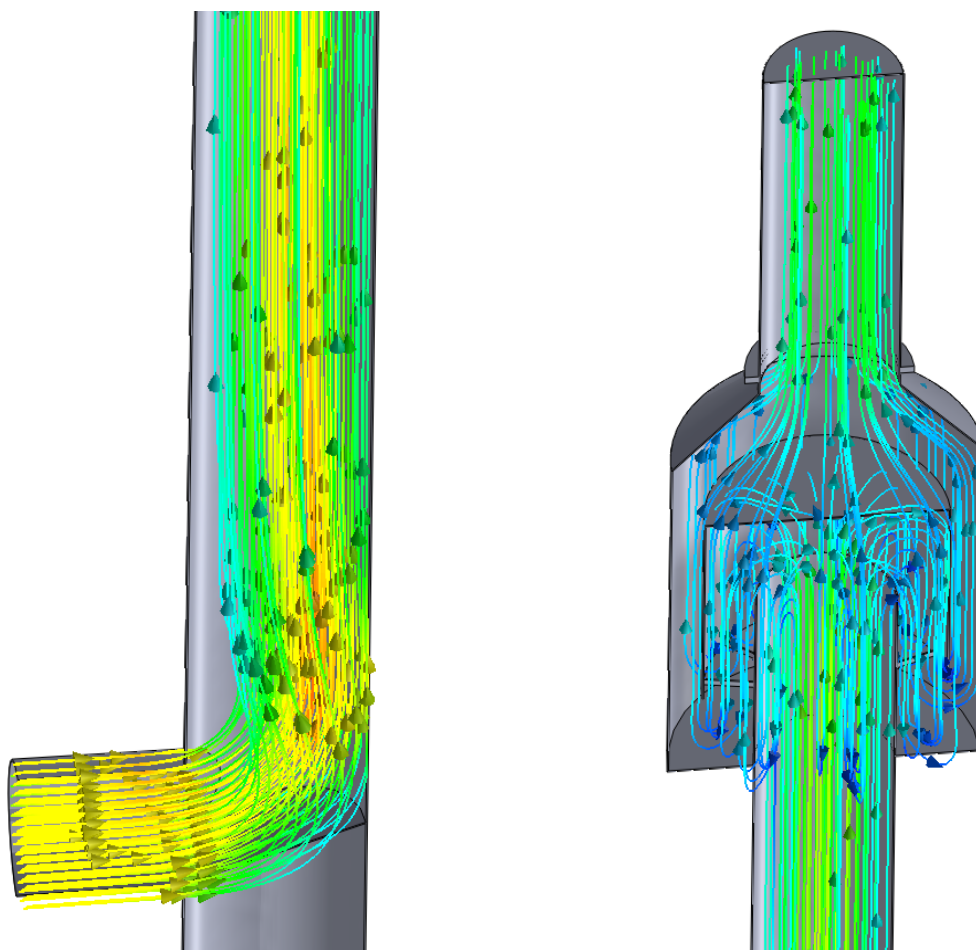


Figura 57 - Pormenores da entrada e saída do fluido no corpo da *flare*

Com as condicionantes anteriormente referidas, os resultados obtidos podem ser verificados graficamente nas seguintes figuras.

Avaliando a velocidade de fluxo, na figura que se segue, obteve-se um máximo de 4,96 m/s, velocidade superior à da entrada, na zona onde foi verificada a perda de espessura no *riser*, segundo o relatório de inspeção em paragem já referido anteriormente.

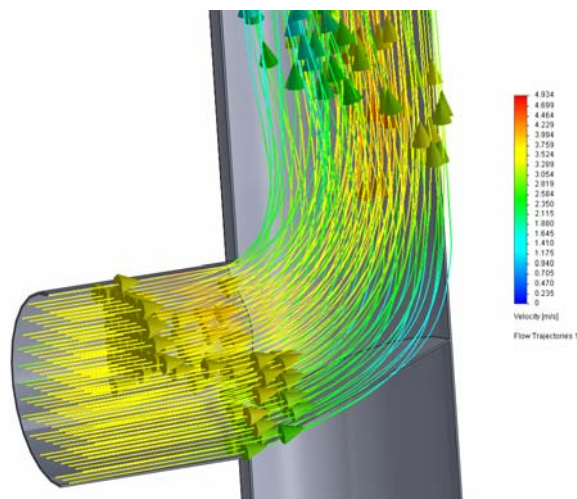


Figura 58 - Velocidade de fluido obtida à entrada da *flare*

Como vorticidade, indicação de rotação das partículas fluidas acompanhadas de alguma deformação transversal do fluido, obteve-se um valor máximo próximo de 19 1/s, ver Figura 59, nas imediações da soldadura entre a tubagem de 36” com a de 42”. Este fenómeno é originado devido às irregularidades geométricas ou acabamentos superficiais. Esta rotação de fluido carregado de partículas cria vórtices de arranque desgastando a superfície do sólido e atacando mecanicamente, de forma agressiva, a soldadura entre os elementos.

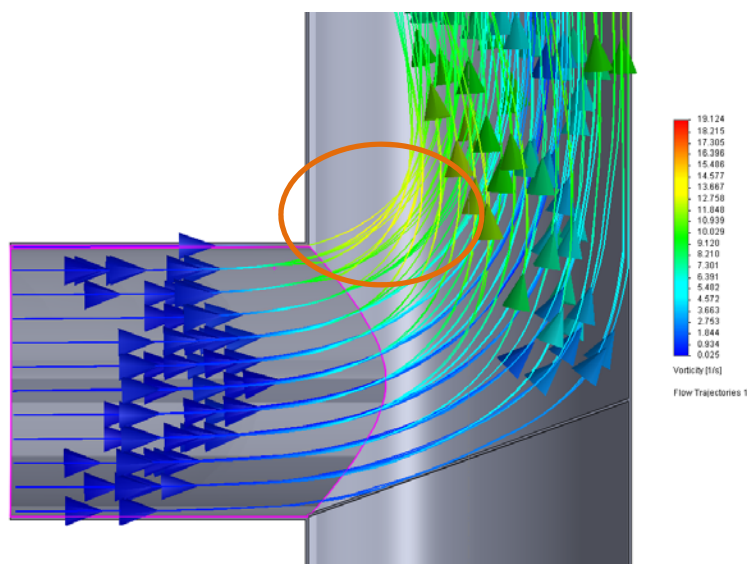


Figura 59 - Vorticidade de fluido, obtida na ligação da entrada da *flare* e o *riser*

Avaliando o comportamento das partículas contidas no fluido verifica-se um impacto quase perpendicular à superfície do *riser*, na entrada da *flare*, em conjunto com uma abrasão

verificada na zona das soldaduras e chapa de fundo defletora, provocada pela direção do fluxo (Figura 60).

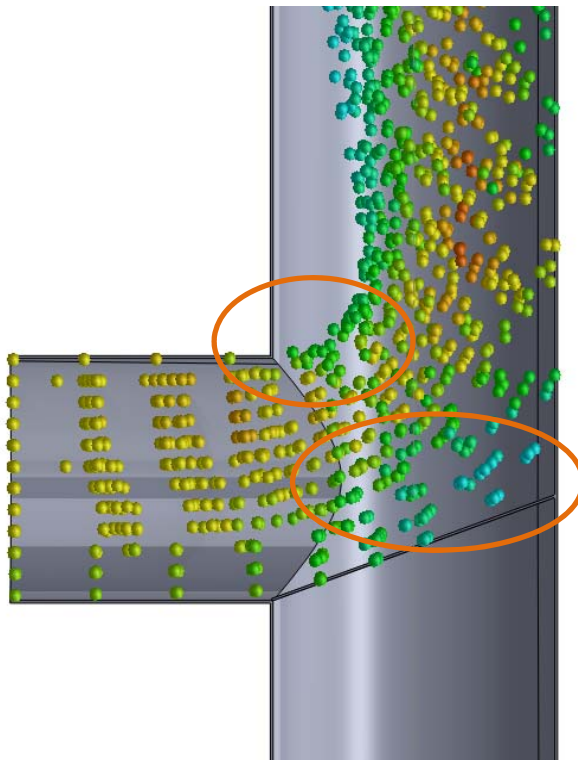


Figura 60 - Comportamento do fluido

Este fenómeno é caracterizado por uma perda de velocidade pois a energia contida nestas partículas é dissipada nos impactos com a superfície. Como anteriormente mencionado, este impacto faz com que ocorra o arrancamento dos filmes protetores e assim se justifica os cavados nas superfícies e desgaste do cordão de soldadura.

4.1.2 Análise numérica para interpretação e análise do comportamento do fluido com alterações idealizadas

Visto que os mecanismos de degradação detetados poderão pôr em causa o bom funcionamento do equipamento, agravando a perda de espessura já detetada e a degradação das soldaduras, são idealizadas possíveis alterações que promovem uma solução.

Para proteção da soldadura mais afetada pela passagem do fluido é idealizada a colocação de um defletor em forma de meia-cana, de acordo com o que se pode observar na Figura 61.



Figura 61 - Representação do defletor em meia cana

Em conjunto a este defletor, é idealizada também uma alteração da chapa de fundo defletora instalada na zona de ligação de modo a diminuir as condições de fluxo turbulento e da incidência de jato e por sua vez aumentar a amplitude dos deslizamentos, passando esta a assumir a forma côncava.

Este defletor, como mostra na Figura 62, para além das alterações ao fluido já mencionadas, serve principalmente como proteção da parede já degradada, aumentando deste modo a vida útil.

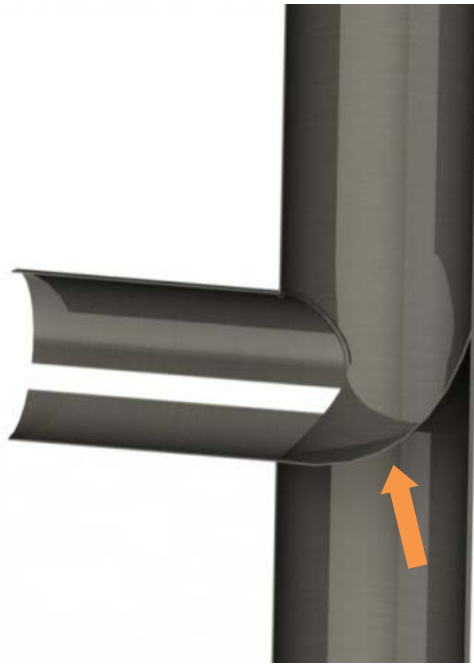


Figura 62 - Representação da chapa de fundo defletora côncava

As seguintes figuras demonstram a alteração do comportamento do fluido originado pelas alterações idealizadas.

Em termos de velocidade de escoamento do fluido obteve-se um valor máximo de 5,24 m/s, como se pode consultar graficamente na Figura 63, e como tal pode-se concluir que a alteração apresentada não põe em causa a capacidade de descarga da *flare*. De facto, aumentando a velocidade consegue-se extrair um maior caudal, pois a área da secção transversal mantém-se constante.

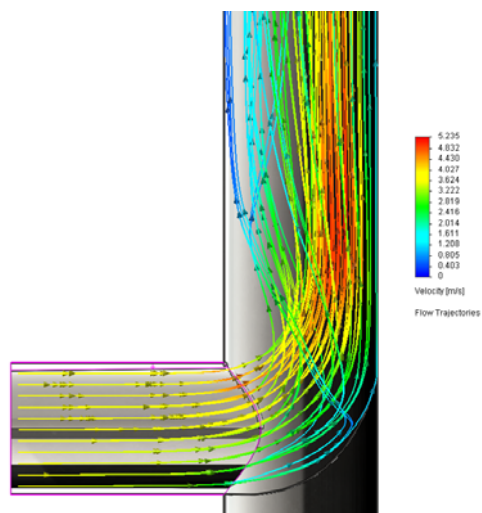


Figura 63 - Velocidade do fluido obtida com alterações idealizadas

Quanto à vorticidade do escoamento determinou-se um valor superior em relação à situação atual, fenómeno este inerente ao aumento da velocidade de escoamento e à introdução de uma geometria que quebra a fluidez de deslocamento. No entanto, os valores mais elevados são encontrados no centro da tubagem vertical, resguardando assim os locais atualmente mais afetados. A Figura 64 resume graficamente a vorticidade instalada.

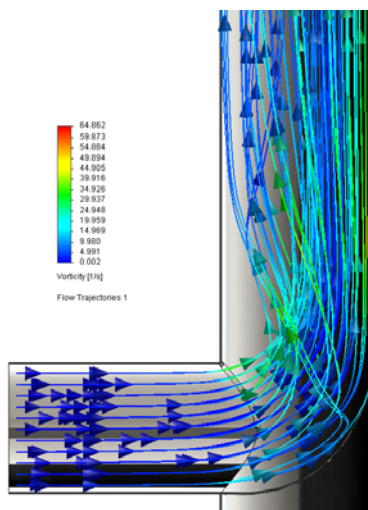


Figura 64 - Vorticidade de fluido obtida com alterações idealizadas

A solução demonstra ser a ideal pois verificou-se uma variação diminuta da pressão ao longo da parede da *flare* em caso de descarga. Esta pressão ronda os 1.03 kg/cm², como se pode verificar na Figura 65.

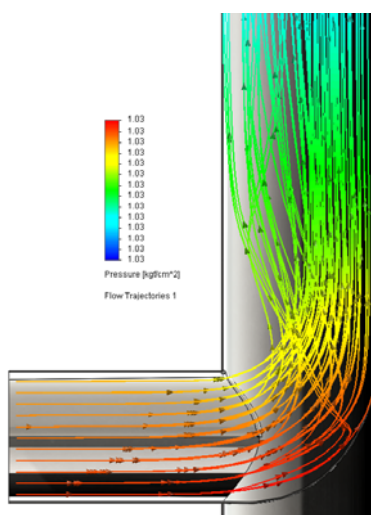


Figura 65 - Variação da pressão ao longo da parede

Averiguando o comportamento das partículas no interior do corpo com as alterações idealizadas verifica-se um deslizamento destas pela superfície do defletor côncavo. Este

acontecimento levará a um desgaste contínuo do componente e obrigará a um controlo da mesmo. Para aumentar o período útil será necessário ter em conta o material a escolher ou até recorrer à deposição de um filme fino de nitreto de titânio, por exemplo. A Figura 66 espelha o comportamento descrito.

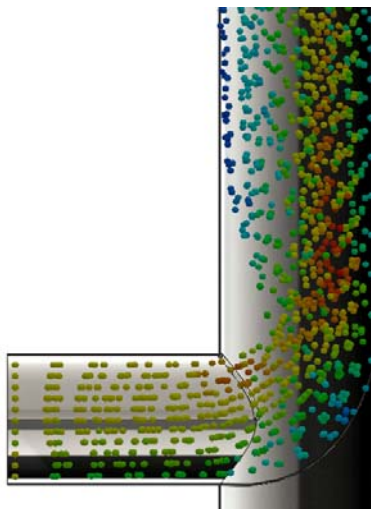


Figura 66 - Comportamento das partículas no fluido obtido com alterações idealizadas

Tendo em vista o estudo com as alterações idealizadas pode-se dizer que, em suma, estas minimizam os problemas oriundos dos mecanismos de degradação no que diz respeito à erosão por turbulência.

No caso da instalação da meia-cana a soldadura mais afetada ficará salvaguardada, pois estas servirão de defletor de sacrifício. A meia-cana deverá ser monitorizada continuamente e substituída quando necessário de modo a salvaguardar as soldaduras estruturais da *flare*.

Quanto à chapa de fundo defletora côncava, esta atua também como componente de sacrifício, desviando o fluido e diminuindo o impacto, responsável pela degradação da superfície do *riser*, da zona mais vulnerável do corpo da *flare*.

5 Conclusões e discussão dos resultados

De acordo com os resultados obtidos na análise e tendo em conta todas as imposições anteriormente descritas em conjunto com os dados fornecidos da inspeção em paragem programada e elementos de projeto e especificações, na situação atual conclui-se:

1) Olhais de amarração

a) Verificação da segurança

Para as condições simuladas estes elementos não verificam a segurança, pois os valores obtidos das tensões equivalentes atuantes são superiores aos valores da tensão de cedência do material para as condições de cálculo, e por essa razão sugere-se que seja efetuada a alteração proposta nos dois níveis superiores do espiamento.

2) Cabos de amarração

a) Valores máximos das cargas

De acordo com as condições impostas, bibliografia aplicável e os cálculos efetuados obteve-se os valores de pré-esforço que se resumem na Tabela 18 - Valores de pré-esforço:

Tabela 18 - Valores de pré-esforço

Nível	d - ø Cabo (mm)	A_m (mm²)	Pré-esforço ± 5% (kN)
1	24	339,1	11,68
2	30	529,9	18,26
3	36	763,0	26,29

Os valores obtidos dependem da dimensão e da composição da secção do cabo, material dos filamentos e da alma, do tipo de cabo e da respetiva força de rotura, cumprindo com os requisitos expostos na norma supracitada.

b) Verificação da Segurança

Em consonância com os valores indicados na tabela acima, o resultado das ações têm um coeficiente de segurança mínimo de 1,5, logo verifica-se a segurança.

c) Fadiga

Com base nos resultados apresentados podemos verificar que é garantida a segurança à fadiga para todos os cabos, independentemente do nível de espiaamento. No entanto verifica-se apenas que existe uma situação limite no terceiro espiaamento, cumprindo ainda com os requisitos.

d) Vibração

Verifica-se que existe uma amplitude de vibração nos cabos superior à amplitude máxima determinada.

Para situações em que os cabos têm um comprimento superior a 80 m, devem ser aplicados amortecedores para garantir a relação crítica de amortecimento superior a 0,5%. No entanto, esta é uma estrutura já implantada em que é assumido que o risco de ressonância paramétrica foi avaliado na fase do projeto inicial ou avaliado num período subsequente à sua instalação.

e) Verticalidade

A condição de verticalidade deve ser garantida, e para isso tem de ser respeitada a gama de valores de pré-esforço nos cabos de amarração, de modo a garantir que a posição final da linha de centro da *flare* se encontre dentro de um cone vertical da dimensão da altura da *flare* com o vértice na base e com um raio no topo de 61 mm.

3) Corpo da *flare*

a) Verificação da Segurança

Uma vez que a concentração de tensões mais significativa no corpo é resultante de um sobre carregamento da combinação de ações para um estado limite último, sujeito a coeficientes de segurança elevados, e para além do já referido relativo à discretização da malha gerada no modelo de cálculo, a tensão atuante mais elevada está concentrada numa área restrita. Desse modo este efeito é desprezado e considera-se verificada a segurança aos estados limites últimos.

A maior concentração de tensões dá-se num local próximo da terceira amarração. Por essa razão, deve-se estar atento à redução de espessuras junto a esse local e esta não deverá ser inferior a 7 mm. Até à dimensão apresentada, a segurança está garantida.

Como existe um processo de corrosão acelerado próximo da entrada do fluido no corpo da *flare*, embora preocupante mas não tão crítico para as condições atuais (pois não se verifica nesta zona uma elevada concentração de tensões e também está presente um reforço colocado *à posteriori*) esta zona deve estar sob vigilância e aconselha-se a realização das alterações propostas de modo a não promover mais perdas substanciais de espessura.

Relativamente aos estados de serviço foi verificada a condição imposta, considerando-se assim deste modo atestada a segurança neste estado limite.

4) Rotura da espia

Foram verificados os critérios impostos tendo em conta a rotura da espia mais solicitada obtendo um coeficiente de segurança mínimo de 1,6.

5) Em geral

Em geral, não é possível afirmar que uma estrutura que não verifique os requisitos de um código, não reúne as condições de segurança necessárias e suficientes para cumprir a sua finalidade. O facto de os códigos serem documentos de aplicação para a generalidade dos projetos novos, e de o grau de incerteza existente na fase de projeto ser, em princípio, superior ao existente na fase de exploração, leva a adoção de hipóteses de dimensionamento do lado da segurança, por vezes demasiado conservativas.

Como fecho e conclusão do presente trabalho, podemos provar que a conjugação de vários métodos de análise computacional são fundamentais e imprescindíveis à Engenharia nas mais diversas abordagens, tais como análises avançadas, que pelo método CFD permitiram determinar a causa e pelo método MEF proceder à verificação estrutural e avaliações altamente especializadas de apoio à decisão.

O MEF permitiu ilustrar graficamente o comportamento fluido-estrutural, identificar problemas, delinear abordagens alternativas ao mesmo problema, tomar decisões assertivas com segurança e certezas, testar rapidamente diversos cenários e conjugar ações, independentemente do tipo de material, forma e tipologia da estrutura, entre outras.

Podemos concluir que a presente avaliação foi realizada com sucesso e os resultados serão a base para as alterações inerentes, tais como reforço estrutural, alteração da geometria do defletor, ajuste no tensionamento dos cabos e controlo da espessura mínima, de modo a alargar o período de vida útil da *flare* com segurança.

6 Referências documentais

- [1] *Guide for Pressure-Relieving and Depressurizing Systems*, Refining Department, API Recommended Practice 521, Second Edition, September 1982.
- [2] Kalcevic, V. (IT Enviroscience), “Control Device Evaluation Flares and the Use of Emissions as Fuels”, *Organic Chemical Manufacturing Volume 4; Combustion Control Devices*, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, Publication no. EPA-450/3-80-026, Report 4, December 1980.
- [3] Letter from David Shore (Flaregas Corp., Spring Valley, NY) to William M. Vataavuk (U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC), October 1990.
- [4] U.S. EPA Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS), Parameters for Properly Designed and Operated Flares, Report for Flare Review Panel, April 2012.
- [5] EPA/452/B-02-001, Section 3.0: VOC Controls, Section 3.2: VOC Destruction Controls, Chapter 1: Flares. (A U.S. Environmental Protection Agency report, September 2000.
- [6] Coker, A. Kayode, Ludwig's Applied Process Design for Chemical And Petrochemical Plants, Volume 1 (4th ed ed.). Gulf Professional Publishing, 2007.
- [7] Mannan, S., Lee's Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control, Volume 1 (3rd ed ed.), 2005.
- [8] Lees, F. P., Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control, Volume 1, 1980.
- [9] API RP 521, Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems, fourth edition, Washington, 1999.
- [10] Antaki, G. A., Fitness-For-Service and Integrity of Piping, Vessels, And Tanks: Asme Code Simplified, McGraw-Hill, 2007.
- [11] Liu, Y., Lecture notes: Introduction to the Finite Element Method, University of Cincinnati, 2003.
- [12] Mentor Graphics – FloEFD, Technical Reference, edição de autor, E.U.A.,2008.

- [13] Wendt, J. F., Computational Fluid Dynamics, An introduction, 3^a edição, Belgium, 2009.
- [14] Staehle RW., Lifetime Prediction of Materials in Environments, In: Revie RW, ed. Uhlig's Corrosion Handbook, New York: Wiley-Interscience, 2000.
- [15] Liss VM., Preventing Corrosion under Insulation, Chemical Engineering, 1987.
- [16] Roberge PR., Handbook of Corrosion Engineering, New York: McGraw-Hill, 2000.
- [17] Chexal B, Horowitz J, Dooley B, Millett P, Wood C, and Jones R. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants- Revision 1, EPRI TR-106611-R1, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute, 1998.
- [18] ArcelorMittal South Africa, Plate for pressure vessel applications, Carbon manganese pressure vessel steel plate, Data sheet: A6.4, March 2012.
- [19] TLM cables, Technique de levage et de manutention, Câbles, Catalogue 1, 2014.
- [20] Nirmal K. DAS, B.C.E., M.S. in C.E “Safety analysis of steel building frames under dynamic wind loading”.
- [21] Feyrer, K., Wire Ropes, Tension, Endurance, Reliability. Springer, Stuttgart, 2007.
- [22] Castillo, E. and Fernandez-Canteli, A.: Statistical models for fatigue analysis of long elements. Introductory Lectures of the IABSE- Workshop, “Length Effect on the Fatigue of Wires and Strands”. Madrid, Sept. 1992.
- [23] Roberge, Pierre R., Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1999.
- [24] Raul Campilho: Método de Elementos Finitos, Publindustria Porto, 2012.
- [25] Jimin He, Zhi-Fang Fu, Modal Analysis, 2001.
- [26] Francisco, Javier Sayas: A gentle introduction to the Finite Element Method, 2008.

Anexo A. Desenho geral da flare

Anexo B. Condições de operação da flare



FOSTER WHEELER C.E.E.
92, quai de Bercy - 75597 Paris Cédex 12

JOB N° : PRC E 900 PAGE : 1/1

CLIENT : PETROGAL

**PROCESS SPECIFICATION FOR
FLARE**

SITE : PORTO

UNIT : FUEL PLANT

ITEM N° : FL-7201

SERVICE : FLARE

NB REQUIRED : 1

REV.	1
	2
	3
	4
	5
	6
	7
	8
	9
	10
	11
	12
	13
	14
	15
	16
	17
	18
	19
	20
	21
	22
	23
	24
	25
	26
	27
	28
	29
	30
	31
	32
	33
	34
	35
	36
	37
	38
	39
	40
	41
	42
	43
	44
	45
	46
	47
	48
	49
	50
	51
	52

ITEM N° : FL-7201

SERVICE : FLARE

DESCRIPTION

The flare is treating the gaseous effluents from fuel plant
(units 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600)
Existing 42" flare tip have to be replaced due to its corrosion
Size to de confirmed by vendor with new conditions

OPERATING CONDITIONS

PRODUCT HANDLED : HC + H2

MOLECULAR WEIGHT : 79.3
Cp/Cv : 1.15

FLOWRATE (t/hr) : 615

INLET TEMPERATURE (°C) : 194

INLET PRESSURE (barg) : 0.2

PCI (Kcal/kg) : 11000

RADIATION

WIND SPEED (m/s) : 9

RADIATION at grade : vendor should advise the required safety distance
according to API recommendations
Existing flare total height of 92m is preferred to
remain unchanged.

MECHANICAL REQUIREMENTS

DESIGN PRESSURE : by vendor

DESIGN TEMPERATURE : by vendor

MATERIAL OF CONSTRUCTION : by vendor

FLARE TYPE : smokeless

FLARE HEIGHT : 92 m

FLARE STACK DIAMETER : 42"

UTILITY CONSUMPTIONS

Fuel Gas : by vendor

Steam : by vendor

Water : by vendor

Instrument air : by vendor

REVISION	0	1	2	3	4	5	6	7
DATE	16/11/98							
MADE BY	JAP							
CHECKED BY	JAP							

Anexo C. Especificações da flare

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	A	2	13/2/74

Customer :

PAGES

REVISION INDEX

A	0 - 1
B	0
1	0
2	0 - 1
3	0 - 1
4	0 - 1
5	0 - 2
6	0 - 1 - 2
7	0 - 1
8	0 - 1 - 2
9	0 - 1 - 2
10	0 - 1

Revision 0 : 22/06/73

Revision 1 : 12/10/73

Revision 2 : 13/02/74

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	B	0	22/6/73

S U M M A R Y

	<u>Pages</u>
PURPOSE	1
1.00 - SCOPE OF SUPPLY	2
1.01 - The supply for the main flare, dia. 42" includes	
1.02 - The supply for the flare, dia. 6", includes	
1.03 - For both flares, the supply and services also include	
2.00 - EXCLUDED FROM SUPPLY	3
2.01 - Foundation blocks ...	
2.02 - Utility supply piping	
2.03 - Connection piping ...	
2.04 - Utility supply piping	
2.05 - Flare headers and their connection	
2.06 - Spare parts	
2.07 - Utilities on the jobsite, water, electricity	
2.08 - Aircraft warning paint	
3.00 - CALCULATION CONDITIONS	3
3.01 - General conditions	
3.02 - The following maximum pressure drops ...	
3.03 - Stability of the construction	
4.00 - FLARE DESCRIPTION	4
4.01 - Flare tip	
4.02 - Molecular seals	
4.03 - Flare stack	
4.04 - Connection piping	
4.05 - Ignition panel with flame front	
4.06 - Platforms and ladders	
4.07 - Painting	
5.00 - CONSUMPTIONS	
6.00 - WEIGHT OF SUPPLY	
7.00 - APPROVAL	
8.00 - GUARANTEES	
9.00 - UTILITIES	

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N°	2/10	1	12/10/73

I.00 - SCOPE OF SUPPLY

1.01 - The supply for the main flare, diameter 42", includes :

1.01.1 - Flare tip with flange for connection to flare stack

1.01.2 - Pilots, igniters and accessories

1.01.3 - Complete steam injection device at flare tip

1.01.4 - Complete flare stack, dia. 42", delivered in bevelled sections for connection on the site to a 36" flange at the inlet

1.01.5 - Molecular seal with flange for connection to tip and bevel on stack side.

1.01.6 - Radiography of welds as indicated in TECHNIP Job Specification N° 5276-0200-1.

1.01.7 - TECHNIP and manufacturer identification plates.

1.02 - The supply for the flare, diameter 6", (sour gas) includes :

1.02.1 - Flare tip with flange for connection to stack and a pilot

1.02.2 - Complete 6" flare line delivered in bevelled sections for connection on site to a flange at the inlet.

1.02.3 - Accessories for securing the flare line to the main flare stack

1.02.4 - Radiography of welds per TP Job Specification N° 5276-0200-1

1.03 - For both flares, the supply and services also include :

1.03.1 - The ties required for staying

1.03.2 - Supporting of flares by staying

1.03.3 - Access ladders and platforms and their attachments to the main flare stack as well as the retractable davit for tip hoisting.

1.03.4 - External sand-blasting, type SA-2 1/2, of carbon steel components and a coat of paint type R2 in accordance with TECHNIP Job Specification RP 5276.00.2300 1.

(1)

1.03.5 - Pilot and burner supply piping as well as steam supply piping up to a height of 20 to 30 m determined in agreement with TECHNIP.

(1)

(1)

1.03.6 - Complete ignition panel including valves, control instruments, ignition transformer, igniter, push-button, sight-glass and three pressure reducers.

(1)

1.03.7 - Heat-insulation of 4" and 3/4" steam lines.

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	3/0	1	12/10/73

1.03.8 - Complete file of drawings (overall and detail) allowing the job to be followed up by TECHNIP inspector in suppliers work-shops and instructions for erection intended for TECHNIP jobsite.

1.03.9 - Erection supervision and assistance by a supplier supervisor.

1.03.10 - Test erection of stack and platform components in workshops for presentation and approval.

2.00 - EXCLUDED FROM SUPPLY

(1)

2.01 - Foundation blocks, anchor bolts

2.02 - Utility supply piping (air, fuel - gas, electricity) up to the ignition panel.

2.03 - Connection piping between the ignition panel and the limit of supply at flare bottom.

2.04 - Utility supply piping (fuel-gas, steam, electricity) at bottom of flare and on the ignition panel.

2.05 - Flare headers and their connection

2.06 - Spare parts

2.07 - Utilities on the jobsite, water, electricity

2.08 - Aircraft warning paint

3.00 - CALCULATION CONDITIONS

3.01 - General conditions

See UOP Specification N° 9771-935

3.02 - The following maximum pressure drops are guaranteed by the Manufacturer within the limits of his supply :

42" flare : 905 mm WC

6" flare : 402 mm WC

3.03 - Stability of the construction - calculation of loads

Wind loads are determined according to the requirements of :

a) SACOR Project Specification N° PRE 40 A1 - Wind loading.

b) TECHNIP Job Specification N° RP 5276-1700-1 - Concrete foundations and structures (design).

./...

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	4/10	1	12/10/73

Calculations are made as follows :

- stacks and stays at ambient temperature for determination of the maximum moment at the base (in case of embedding)
- stacks and stays at maximum temperature for determination of maximum load at grade and tensile stresses on anchors
- with the moment of torsion due to the asymmetry of the two flares, piping and ladders

(1)

The allowable stresses for calculation of stacks and stays are :

- a) those given by SACOR Project Specification PRE 46 A 1 - structural steel
- b) the maximum allowable stress : yield strength of the material used with load increasing factor for calculation under normal wind and load increasing factor = 1 for calculation under extreme wind.

4.00 - FLARE DESCRIPTION

Flares shall be adjacent as provided for in UOP Project Specification n° 9771-935.

The sour gas flare is adjacent to the main flare. The attachments are provided to allow for free differential expansion.

Both flares rest on the ground and expansion movements take place upwards.

The total height of the construction is 92 m. in relation to grade.

./...

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
SP	ELEVATED FLARE ITEM N ° FL	5/10	2	13/02/74

4.01 - Flare tip

	42" flare	6" flare (H2S)
- mark	SAMIA	SAMIA
(2) - diameter x height x thickness	42 " x 3000 x 8	6" x 3000 x 6
- material	TP 310 (25 Cr - 20 Ni)	TP 310 and TP 316
- lining . type	42% Al ₂ O ₃ concrete	nil
. dimensions	thickn. 30mm h = 1,5 m	
- number and characteristics of pilots	3 x Ø 2" - TP 310/ TP 316	1 x Ø 2" - TP 310/ TP 316
- steam header diameter and material	4" TP 316	nil
. nozzle material	TP 316	-
. nozzle tip material	TP 310	-
(2) - connections . stack	Ø 42" - 150 [#] RF-SO	Ø 6" - 150 [#] RF-WN
(2) . steam	Ø 4" - 300 [#] RF-WN	nil
(2) . pilots	3 x Ø 2"	1 x Ø 2"
. manifold	Ø 1½" 300 [#] RF-WN	→
(2) . igniters	3 venturi tubes 3 x Ø 1"- 300 [#] RF-WN	1 venturi tube 1 x Ø 1" - 300 [#] RF-WN
. materials	A 105	A 105

4.02 - Molecular seals

		42" flare	6" flare
(2)	- diameter x height x thickness	2 100 x 10 000 x 8	356 x 2 000 x 6,35
(2)	- material	DIN H II	DIN H II and TP 316
	- connections		
	. to tip	42" flange	6" flange
(2)	. to stack	150 RF-SO bevelled for welding	150 RF-SO bevelled for welding
	. material	A 105	A 105
	- drain diameter and material.	2" - carbon steel	1"-TP 316 and carbon steel
(2)	- inspection hole	8" - flange + companion flange of carbon steel	4" - flange + companion flange of TP 316.

4.03 - Flare stack

	- nom. dia. x min. total thickness/corrosion allowance	42" x 10 mm/1,5
(2)	- material	DIN H II
	- section assembly	by welding bevel according to ANSI B16-25
	- embedded base	
	. diameter	about 1 200
	. thickness	30
	- flare line connection	
(1)	. diameter	36" - flange 150 lb RF
	. thickness	9,52 mm
	. reinforcement	for a stress = 1 500 kg
(1)	. height	13,710 m from base line
	. accessories	- inclined welded plate for discharge of condensate to drum
(1)	- steam connection (class Bb)	- flange 3/4" 300 # RF
(1)	- staying	3 sets of 3 stays with fixed ends

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N ° FL	7/10	1	12/10/73

4.04 - Connection piping

- sour gas flare (class Aw)
 - . diameter x thickness 6" x 5,56 mm
 - . material API 5L gr B
 - . connections flange 150 lb RF
- (1)
- (1)
- steam (class Bb)
 - . diameter x thickness 4" x sch. 40
 - . material API 5L gr B
 - . connections flange 300 lb RF of A 105
 - . insulation provided
- (1)
- ignition (class Ac)
 - . diameter x thickness 1" x sch. 80
 - . number 4 lines
 - . material A 106 gr B
 - . connections flanges 300 lb RF of A 105
- (1)
- continuous pilots (class Ac)
 - . diameter x thickness 1 1/2" x sch. 80
 - . material API 5L gr B
 - . connections flange 300 lb RF of A 105
- (1)
- (1)
- drains (class Aw)
 - . 42" seal dia. 2" x sch 40
 - . material API 5L gr B
 - . 6" seal dia. 1" x sch 80
 - . material A 106 gr B
 - . connections to molecular seals 2" flange 150 lb RF
 - . evacuation 1" flange 300 lb RF
 - by trap on the 2 drains
- (1)
- (1)

Piping having a fixed point towards the top of the flare and expanding freely downwards must be guided in order not to be distorted under the stresses which it undergoes.

(1)

./...

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	8/10	2	15/02/74

4.05 - Ignition panel with flame front

This panel shall be entirely prefabricated and painted. It shall be constructed to be anchored at grade.

It includes the following :

- 1 mixer
- 1 ignition chamber with electric plug
- 1 220 V / 10 000 V transformer with its high voltage cable, the control push-button, signal lights and a switch.
- (1) - 4 pressure reducers
- (1) - 4 pressure gages, 0 - 2,5 kg/cm²
- the 3-way valves for pilot selection
- required valves, fittings and piping

The electric equipment shall be mounted in explosion-proof enclosures, class 1, group D, division 2, NEC standard.

Connections

(1)	1 air inlet	class Lm	flange 1"	300 lb RF
(1)	1 gas inlet	" Ac	" 1 1/2"	300 lb RF
(1)	1 pilot gas outlet	" Ac	" 1 1/2"	300 lb RF
(1)	4 outlets to igniters	" Ac	flanges 1"	300 lb RF
(1)	1 seal gas outlet	" Ac	flange 1"	300 lb RF
(1)	1 seal gas outlet	" Ac	" 1/2"	300 lb RF

4.06 - Platforms and ladders

Accesses shall be designed in accordance with SACOR and TECHNIP specifications mentioned in the requisition.

They consist of :

- a peripheral platform at 360° located at the base of the flare tip. Its reinforcements are sufficient to support the load due to lifting the tip during disassembly by means of the handling arm. This arm is provided to be retractable.
- a set of cage ladders from level 0 to the top with 90° half-landings every 9 m approximately.
- (2) The plating of landings and platforms consists of checkered plates or gratings.

4.07 - Painting

- (1) All carbon steel components of the actual flare, ladders and platforms are in conformity with the requirements of TECHNIP Job Specification RP 5276.00.2300.1.

They are sand-blasted (SA 2 1/2) and covered with a coat of R2 type paint. The same applies to the plates of the ignition panel.

DIRECTION INDUSTRIELLE	PARTICULAR SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
	ELEVATED FLARE ITEM N° FL	9/10	2	13/02/74

5.00 - CONSUMPTIONS

(2)	pilot gas for ignition	15 Nm ³ /hr during a short time
(2)	compressed air	150 Nm ³ /hr " " "
	pilot gas	20 "
	purge gas	42 " (42") + 5 Nm ³ /hr (6")
	steam	8.000 kg/hr
(1)	electric power	250 VA

6.00 - WEIGHT OF SUPPLY

	42" flare	6" flare
tip	4,200	0,100
molecular seal	9,000	0,300
flare stack	} 40,000	
staying		
pipng		
access and structure		
ignition panel	0,250	
	53,450	0,400
TOTAL	53,850 tons	

7.00 - APPROVAL

TECHNIP approval is only given on drawings and documents sent in sufficient number according to the requisition and bearing TECHNIP references. It only covers general and dimensional characteristics.

The approval of suppliers drawings by TECHNIP shall in no way be considered as a verification. Consequently, the manufacturer remains responsible for the design of his equipment.

DIRECTION INDUSTRIE	LEBARD N°	PARTICULAR	SPECIFICATION	PAGE	REV.	DATE
			FLARE ELEVATED FLARE ITEM N° FL	10/10	1	22/6/73

8.00 - GUARANTEES

The guarantees cover :

- proper operation of the flares in the conditions defined in paragraph 3.00
- smokeless operation of the flare at a rate of 16,5 t/hr corresponding to a steam consumption of 8 t/hr.
- compliance with the consumptions indicated in paragraph 5.00.
- pressure drops defined in paragraph 3.00.
- maintaining of pilot burner operation under 160 km/hr wind and re-ignition of the pilot burners.

The manufacturer also guarantees the flare accessories against any faulty workmanship or poor operation.

9.00 - UTILITIES

9.01 - Fuels (igniters and pilots)

	<u>Normal</u>	<u>Design</u>
Fuel gas		
Molecular weight	7,27 to 32,5	
Pressure at supply limit kg/cm ² gage	3,5	7,0
Temperature at supply limit °C	38	100

9.02 - Service air

	<u>Normal</u>	<u>Design</u>
Pressure kg/cm ² gage	5,5/7	10,0
Temperature °C	38	65

9.03 - Steam

Pressure kg/cm ² gage	15,0/15,8	17,6
Temperature °C	275	310

9.04 - Electricity

- Ignition transformer

(1) Primary system 380 V single phase 50 Hz

Anexo D. Especificações dos cabos da *flare*

Ces tuyauteries seront calorifugées avec de la laine minérale, épaisseur 50 mm, revêtues d'une tôle aluminée.

Matières :

- lignes d'allumage : API 5L Gr. B.
- ligne gaz pilote : API 5L Gr. B.
- lignes vapeur : API 5L Gr. B.
- drain : API 5L Gr. B.

Item 7 - Echelles et plates-formes

Nous prévoyons une plate-forme complète à 360° installée sous le nez de torche et une plate-forme de repos à 120° sur la partie inférieure du joint gazostatique pour accès aux trous de poing.

Ces plates-formes seront desservies par une échelle à crinoline d'une longueur de 13 m.

Matières : acier carbone E 24 galvanisé ou équivalent.

Item 8 - Système d'haubanage

Nous prévoyons :

- 3 niveaux de 3 haubans accrochés sur les corps morts à 120° situés à 45 m du pied de torche.
 - Elevation 75 m : 3 câbles diamètre 36.
 - Elevation 53 m : 3 câbles diamètre 30.
 - Elevation 31 m : 3 câbles diamètre 24.

Ces haubans seront réalisés en câble de 6 torons, 36 fils en acier galvanisé, graissés, munis à chaque extrémité d'une douille à chape.

Pour la fixation au corps morts et permettre le réglage périodique facilement de la tension, nous prévoyons des épingles ajustables (voir schéma ci-joint).

