



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de
Equipamentos Mecânicos

Autor

Paulo André Baptista Martinho

Orientadores

Professora Doutora Maria de Fátima Paulino

**Professora Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira
Malça**



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, maio de 2025

*Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e
Redimensionamento da Estrutura que o suporta*

RESUMO

Com o aumento da competitividade industrial é indubitável que a capacidade e eficiência de resposta dos equipamentos no processo produtivo é absolutamente determinante para conquistar a confiança dos clientes e, conseqüentemente, os mercados. Como tal, períodos de manutenção devidamente planeados que conduzam a intervenções de manutenção mais curtas contribuindo para perdas de produtividade cada vez menores são determinantes no cumprimento dos prazos de entrega dos produtos. Neste sentido, o presente projeto pretende dar uma resposta efetiva ao procedimento de reparação de um ciclone, pela seleção adequada de materiais, bem como à necessidade de redimensionamento da estrutura que o suporta. Este equipamento - ciclone - integra a linha de produção de uma cimenteira que, estando submetido a elevadas cargas térmicas, sofre um considerável desgaste, requerendo, conseqüentemente, intervenções de reparação não só do revestimento cerâmico, como também da carcaça metálica que o reveste. Tais reparações acrescentam massa à estrutura que suporta o ciclone sendo, como tal, necessário proceder ao seu redimensionamento. Este relatório apresenta o processo inerente a esse processo de redimensionamento, sendo identificadas diferentes possíveis soluções e as vantagens e desvantagens a elas associadas.

Palavras-chave: Dimensionamento estrutural; Massa estrutural; Reparação do ciclone; Ciclone industrial.

ABSTRACT

With the increase in industrial competitiveness, there is no doubt that the responsiveness and efficiency of equipment in the production process is crucial to winning the trust of customers and, consequently, the markets. As such, properly planned maintenance periods that lead to shorter maintenance interventions, contributing to lower productivity losses, are crucial to meeting product delivery deadlines. This project aims to provide an effective response to the procedure for repairing a cyclone, through the appropriate selection of materials, as well as the need to resize the structure that supports it. This piece of equipment - a cyclone - is part of a cement plant's production line and, being subjected to high thermal loads, it suffers considerable wear and tear, consequently requiring repairs not only to the ceramic coating but also to the metal casing that covers it. These repairs add mass to the structure that supports the cyclone and, as such, it is necessary to resize it. This report presents the process inherent in this resizing, identifying different solutions and the advantages and disadvantages associated with them.

Keywords: Structural design; Structural mass; Cyclone repair; Industrial cyclone.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, o meu agradecimento à Professora Doutora Fátima Paulino e à Professora Doutora Cândida Malça pela orientação, disponibilidade, apoio e conhecimento transmitido ao longo deste projeto.

Agradeço ao Centro de Produção de Souselas pela disponibilização de toda a documentação necessária para a realização deste projeto. Um especial agradecimento ao Engenheiro Ricardo Borges pela sua colaboração técnica, conhecimento e tempo disponibilizado. Agradecer também ao Engenheiro Pedro Catarino que foi quem desencadeou a escolha deste projeto.

À minha família e à minha namorada, grato por todos os conselhos e por serem um apoio excecional e constante.

Por fim, e tendo consciência que sem eles nada disto seria possível, agradeço aos meus pais, Paulo e Paula, por estarem sempre presentes em todos os momentos da minha vida, pela vossa dedicação e carinho, encorajando-me sempre em todas as etapas da minha vida.

A todos, o meu sincero obrigado!

ÍNDICE

Resumo	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	xi
Lista de siglas e acrónimos	xii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos e Metodologia.....	3
1.3 Estrutura do documento	5
1.4 A Cimpor	5
1.4.1 Processo de produção de cimento	5
2 Revisão bibliográfica.....	10
2.1 Ciclone industrial.....	10
2.1.1 Princípio de funcionamento.....	11
2.1.1.1 Entrada do ciclone	11
2.1.1.2 Cilindro do ciclone.....	12
2.1.1.3 Secção cónica do ciclone.....	12
2.1.1.4 Saída inferior do ciclone.....	12
2.1.1.5 Tubo de saída do ciclone	13
2.1.2 Constituição interna	13
2.1.2.1 Chapa externa (carcaça).....	13
2.1.2.2 Revestimento interno de proteção contra abrasão.....	13
2.1.2.3 Camada de isolamento térmico (caso necessário)	14
2.1.2.4 Revestimento anticorrosivo	14
2.2 Seleção de materiais para o encamisamento	14
2.2.1 Aço carbono de alta resistência ao desgaste.....	15
2.2.2 Aço inoxidável AISI 316 L.....	15
2.2.3 Aço inoxidável Duplex (2205)	16

2.2.4	Aço S235 JR (37-2).....	16
2.2.5	Aço S355 JR.....	16
2.2.6	Análise comparativa dos materiais	16
2.3	Processos de fabrico	17
2.3.1	Calandragem a frio	17
2.3.2	Dobragem com prensa hidráulica	18
2.3.3	Calandragem a quente.....	19
2.4	Processos de fabrico recomendadas para cada tipo de chapa	20
2.4.1	Chapas de aço carbono de alta resistência ao desgaste.....	20
2.4.2	Chapas de Aço inoxidável AISI 316L.....	21
2.4.3	Chapas de Aço inoxidável Duplex 2205.....	21
2.4.4	Aço S355JR	22
2.4.5	Aço S235JR (St 37-2)	22
2.5	Soldabilidade.....	23
2.5.1	Processos de soldadura recomendados para cada tipo de chapa.....	24
2.5.1.1	Chapas de aço ao carbono de alta resistência ao desgaste	24
2.5.1.2	Chapas de aço inoxidável AISI 316 L.....	25
2.5.1.3	Chapas de aço inoxidável Duplex 2205	25
2.5.1.4	Chapas de aço S355JR.....	25
2.5.1.5	Chapas de aço S235JR (37-2)	26
2.5.1.6	Conclusão comparativa da análise dos materiais	26
3	Dimensionamento e Análise da Estrutura.....	28
3.1	Descrição e Modelação do ciclone.....	28
3.2	Descrição e Modelação da Estrutura Metálica	35
3.3	Modelação de Elementos Finitos.....	36
3.3.1	Análise do tamanho do elemento.....	39
3.3.2	Análise da espessura de chapa para o ciclone	40
3.3.2.1	Chapa de 8 mm sem vigas HEA180 de reforço.....	40
3.3.2.2	Chapa de 6 mm sem vigas HEA180 de reforço	42
3.3.2.3	Chapa de 4 mm sem vigas HEA180 de reforço	43
3.3.2.4	Chapa de 4 mm suportada por 4 vigas HEA180	44
3.4	Análise da Estrutura Metálica	46

*Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e
Redimensionamento da Estrutura que o suporta*

4	Resultados e Discussão	48
4.1	Variação de espessura de chapa sem vigas de reforço.....	48
4.1.1	Chapa de 8 mm.....	48
4.1.2	Chapa de 6 mm.....	51
4.1.3	Chapa de 4 mm.....	53
4.2	Chapa de 4 mm reforçada	56
4.3	Resultados da análise da estrutura metálica	60
5	Conclusão	63
6	Referências.....	65
ANEXOS		70
Anexo A – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 8 mm.....		70
Anexo B – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 6 mm.....		71
Anexo D – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 4 mm.....		73
APÊNDICES.....		77
Apêndice A – Fichas técnicas do betão refratário e do betão isolante		77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de aplicação de reforços.....	2
Figura 1.2 – Interior de ciclone.....	2
Figura 1.3 – Figuras do exterior do ciclone.....	4
Figura 1.4 – Diagrama do processo de produção de cimento (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023).....	6
Figura 1.5 – Pedreira do CPS.....	6
Figura 1.6 – Pré-homogeneização do material.....	7
Figura 1.7 – Torre de ciclones	8
Figura 1.8 - Forno.....	8
Figura 1.9 – Britador do arrefecedor.....	9
Figura 1.10 – a) Pacotão; b) Paletização	9
Figura 2.1 – Exemplo de um ciclone industrial; adaptado (Webbusterz, s.d.).....	11
Figura 2.2 – Calandragem a frio (Caldeiraria, 2010).....	18
Figura 2.3 - Dobragem com prensa hidráulica (Freepik, 2009).	19
Figura 2.4 - Calandragem a quente (Casarini, 2007).....	20
Figura 2.5 - Soldadura MIG/MAG (Aventa, 2016).....	23
Figura 2.6 - Soldadura TIG (Ronch, 2024).	24
Figura 2.7 - Soldadura elétrodo revestido (Novotecnica, 2016).....	24
Figura 3.1 – Ciclone original sem encamisamento	29
Figura 3.2 – Acelerador de partículas.....	30
Figura 3.3 – Estrutura de suporte durante a intervenção	30
Figura 3.4 - Ciclone completo. 1 - Acelerador de partículas; 2 - Corpo do ciclone; 3 - Anel de suporte; 4 - Cone de saída.	31
Figura 3.5 – Alterações a realizar em corte.	32
Figura 3.6 - Encamisamento da gola do acelerador de partículas em corte.	32
Figura 3.7 - Vista em corte das várias camadas constituintes do ciclone.	33
Figura 3.8 – Betão isolante em corte.....	34
Figura 3.9 – Modelo da estrutura metálica.	35
Figura 3.10 - Secção estrutural para instalação do ciclone.	35

*Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e
Redimensionamento da Estrutura que o suporta*

Figura 3.11 - Componentes em estudo em vista explodida.	36
Figura 3.12 – Encastramento do anel de suporte.....	36
Figura 3.13 - Representação de carga no acelerador de partículas.	37
Figura 3.14 - Representação da carga da chapa e refratário no interior.	37
Figura 3.15 - Contacto global ‘Bonded’.....	38
Figura 3.16 – Encastramento da base da estrutura.	38
Figura 3.17 - Aplicação de força referente ao ciclone.....	39
Figura 3.18 - a) Chapa 8 mm sem vigas: Malha com tamanho máximo 40 mm; b) Chapa 8 mm sem vigas: Malha com tamanho máximo 300 mm.....	39
Figura 3.19 - Convergência do tamanho de malha.....	40
Figura 3.20 - Encamisamento 8 mm sem vigas de suporte.....	41
Figura 3.21 – Valores dos deslocamentos em função dos elementos (8 mm chapa).	41
Figura 3.22 - Análise chapa 6 mm sem viga (malha 100 mm).	42
Figura 3.23 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (6 mm chapa).	42
Figura 3.24 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (4 mm chapa).	43
Figura 3.25 - Análise chapa 4 mm sem viga (malha 100mm).	44
Figura 3.26 - Estudo encamisamento chapa de 4 mm com vigas de suporte HEA180.	44
Figura 3.27 - Base de suporte do ciclone: malha com tamanho máximo de elemento de 100 mm.....	45
Figura 3.28 - Viga de sustentação: malha gerada com tamanho máximo de elemento de 100 mm.....	45
Figura 3.29 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (4 mm chapa com vigas).....	45
Figura 3.30 - Estrutura metálica (Malha de 40 mm).....	46
Figura 4.1 - Tensão na base de apoio do ciclone (estudo chapa de 8 mm sem vigas).	48
Figura 4.2 - Deslocamento resultante: Chapa 8 mm sem vigas.	49
Figura 4.3 - Deslocamento máximo no eixo YY (Chapa 8 mm sem vigas).	49

Figura 4.4 - Deslocamento máximo no eixo XX (Chapa 8 mm sem vigas).....	50
Figura 4.5 - Tensão na base de apoio do ciclone (Chapa de 6 mm sem vigas).....	51
Figura 4.6 – Deslocamento resultante (Chapa 6 mm sem vigas).....	51
Figura 4.7 - Deslocamento eixo YY (análise chapa 6 mm sem vigas).	52
Figura 4.8 - Deslocamento eixo XX (Chapa 6 mm sem vigas).....	52
Figura 4.9 - Tensão von Mises na base de apoio do ciclone (Chapa de 4 mm sem vigas).....	53
Figura 4.10 - Deslocamento resultante no encamisamento (Chapa de 4 mm sem vigas).....	54
Figura 4.11 - Deslocamento máximo eixo YY (Chapa 4 mm sem vigas).....	55
Figura 4.12 - Deslocamento máximo eixo XX (Chapa 4 mm sem vigas).	55
Figura 4.13 - Deslocamentos obtidos em função da espessura das chapas.	56
Figura 4.14 - Tensão máxima no anel de suporte (Chapa 4 mm reforçada).....	56
Figura 4.15 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX (Ampliado).	57
Figura 4.16 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX (Chapa de 4 mm reforçada).....	58
Figura 4.17 - Deslocamento na chapa do ciclone, eixo YY (Chapa de 4 mm reforçada).....	58
Figura 4.18 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo YY (Ampliado).	59
Figura 4.19 - Tensão máxima no ponto crítico da estrutura.....	60
Figura 4.20 - Deslocamento resultante na análise da estrutura metálica.	61
Figura 4.21 - Deslocamento máximo no eixo YY na análise da estrutura metálica.	61
Figura 4.22 - Deslocamento máximo no eixo XX na análise da estrutura metálica.	62
Figura 4.23 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (estrutura metálica).	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Análise sintetizada dos materiais.	17
Tabela 2.2 – Processos de conformação plástica.....	23
Tabela 3.1 - Massa estimada por componente.....	34
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do material AISI S235JR.	41
Tabela 3.3 - Resultados da análise da estrutura metálica.	46
Tabela 4.1 - Resultados da análise, de 6 mm sem vigas HEA180 de reforço.	53
Tabela 4.2 - Resultados da terceira análise, de 4 mm sem vigas HEA180 de reforço.	56
Tabela 4.3 - Resultados da análise para uma chapa de 4 mm suportada por 4 vigas.	59
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do aço S355JR.....	60

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CPS	Centro de Produção de Souselas
MEF	Método de Elementos Finitos
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

O presente projeto de mestrado foi realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, ramo de Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, e foi desenvolvido na Cimpor – Cimentos de Portugal, em particular no Centro de Produção de Souselas, Coimbra (CPS).

Este capítulo apresenta uma breve contextualização do tema, os objetivos, a metodologia, a organização do projeto, bem como, a empresa Cimpor e o seu processo de produção de cimento.

1.1 Enquadramento do tema

A Cimpor é uma das principais empresas do setor cimenteiro em Portugal e uma referência no mercado internacional. Fundada em 1976, a Cimpor desenvolveu-se ao longo dos anos, posicionando-se como líder na produção de cimento, concreto e agregados. A fábrica da Cimpor, localizada estrategicamente perto de recursos naturais essenciais para a produção de cimento, desempenha um papel crucial na economia regional e nacional, não só pela sua capacidade de produção, mas também pelo impacto que tem nas indústrias de construção e infraestrutura (Cimpor, Quem somos, 2023).

A capacidade instalada de produção de cimento na Cimpor tem sido continuamente otimizada, com a implementação de tecnologias modernas que visam aumentar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental. A empresa tem investido significativamente em soluções para a sustentabilidade, como a substituição parcial de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, contribuindo para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Cimpor, Neutralidade Carbónica, 2023).

A produção de cimento é um processo industrial complexo que envolve uma série de etapas interligadas, cada uma com exigências técnicas e operacionais específicas. Uma das etapas mais crítica do processo de fabrico de cimento é o pré-aquecimento da farinha na torre de ciclones. Os ciclones, devido à natureza agressiva do ambiente em que operam, estão expostos a elevados níveis de desgaste, sendo a corrosão um dos principais problemas que afeta a sua integridade estrutural. De facto, ao longo do tempo, o contacto constante com gases corrosivos, partículas abrasivas e temperaturas elevadas contribui para a degradação do betão refratário que constitui o interior do corpo dos ciclones. Com a degradação do betão refratário, os gases corrosivos do processo começaram a penetrar a chapa exterior, levando à sua oxidação e posterior deterioração.

Com a perda de resistência da estrutura e redução das espessuras da chapa o ciclone começou a apresentar “barrigas” nas zonas onde a fissuração era visível.

Para resolver temporariamente estas expansões e fissuras coloram-se reforços e chapa nova em aço St37.2, como representado na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Exemplo de aplicação de reforços.

A Figura 1.2 ilustra o interior do ciclone poente do CPS.



Figura 1.2 – Interior de cyclone.

Foram aplicados reforços ao longo de todo o corpo do ciclone, fixados com cordões de soldadura descontínuos, permitindo assim movimento do corpo do ciclone durante as dilatações e contrações, tornando as fixações menos rígidas.

Este processo de deterioração pode comprometer tanto a eficiência como a segurança da torre de ciclones, resultando na necessidade de intervenções corretivas para assegurar a sua operação contínua, segura e eficiente.

A torre de ciclones apresenta um nível avançado de degradação, causado predominantemente por corrosão. Assim, torna-se imperativo substituir toda a chapa envolvente dos ciclones, selecionando, para tal, um material que ofereça uma maior resistência à corrosão a altas temperaturas, bem como a outros agentes agressivos envolvidos no processo de aquecimento da farinha. Além disso, o peso associado ao novo material implica a necessidade de criar uma estrutura de reforço adicional, capaz de suportar adequadamente as novas cargas impostas resultantes do tal reforço estrutural. Neste sentido, o dimensionamento adequado dos ciclones e a análise da estrutura que os suporta são essenciais para garantir um desempenho ótimo e uma longa vida útil do equipamento.

O presente projeto envolve dois desafios principais: i) a seleção de um material adequado para a nova chapa e ii) o design de uma estrutura de reforço que suporte o peso adicional. A seleção do material deve ser fundamentada nas propriedades mecânica e físicas do material, e.g., a resistência à corrosão em ambientes que operam a elevadas temperaturas e a durabilidade associada aos mecanismos de desgaste por abrasão típicos deste tipo de aplicação. Por outro lado, a estrutura de reforço deve ser projetada com base numa análise rigorosa de cargas, de modo a garantir que o ciclone, após a intervenção de reforço (encamisamento), mantenha a sua funcionalidade e segurança estrutural.

1.2 Objetivos e Metodologia

O presente projeto tem como principais objetivos a seleção da chapa (espessura e material) que permitirá o reforço das paredes dos ciclones visivelmente fragilizadas, como ilustrado na imagem da Figura 1.3 e, conseqüentemente, avaliar a integridade da estrutura existente onde assenta o ciclone em questão, garantindo, adicionalmente que esta suporta estruturalmente o acréscimo de massa resultante do encamisamento das paredes do ciclone. Assim, primeiramente, procedeu-se à avaliação da estrutura existente, nomeadamente, foi verificado o estado de degradação da chapa e da estrutura de suporte. Através de testes não destrutivos, como medições de espessuras da chapa, determinaram-se espessuras de 1,5 mm. Em segundo lugar, seguirá à seleção do material para a nova chapa.

Este material deverá ser resistente a altas temperaturas, corrosão e desgaste, dado o meio ambiente a que estará sujeito. Será importante estudar as suas propriedades mecânicas e compará-las com os requisitos do processo. Além disso, a espessura da chapa deverá ser analisada, pois qualquer alteração neste parâmetro afetará diretamente o peso e, conseqüentemente, a carga sobre a estrutura existente.



Figura 1.3 – Figuras do exterior do ciclone.

Em terceiro lugar, pretende-se analisar a capacidade da estrutura existente para suportar o peso adicional da nova chapa. Para isso, usou-se *software* de simulação estrutural, o SolidWorks®, permitindo avaliar o comportamento da estrutura após alterações. A simulação de diferentes tipos de carga, especialmente durante a remoção da chapa antiga, permitirá prever como a estrutura reagirá nessas condições, identificando possíveis deformações e tensões adicionais que podem agravar os danos. A estabilidade de toda a estrutura pode ser comprometida, com risco de colapso, se os suportes de reforço não forem adequadamente dimensionados.

Durante o processo de remoção e substituição da chapa existente nas paredes dos ciclones, pode ser necessário garantir um reforço temporário da estrutura. Para tal, deverá ser estudada a viabilidade dos suportes temporários ou estruturas adicionais que possam sustentar o ciclone e a nova chapa durante o processo de substituição.

É crucial analisar o revestimento em betão refratário, pois está danificado em algumas áreas, permitindo que os gases entrem em contacto com a chapa, o que causa corrosão. Depois de remover completamente a chapa existente, será necessário substituir todo o betão refratário, garantindo que as dimensões originais do ciclone não sejam alteradas.

O Método de Elementos Finitos (MEF) será a melhor forma de compreender os esforços e prever o comportamento da estrutura, tanto com a nova chapa instalada quanto durante a remoção da antiga.

1.3 Estrutura do documento

O presente relatório de projeto encontra-se organizado em 5 capítulos. O capítulo 1, é dedicado ao enquadramento, definição de objetivos e metodologia de desenvolvimento do tema.

No capítulo 2, expõe-se a literatura considerada fundamental para a realização deste trabalho. A pesquisa abrange o conceito de ciclone industrial, a sua constituição e princípio de funcionamento. São referenciados materiais que podem constituir uma solução para o encamisamento do ciclone e os processos de fabrico inerentes.

Capítulo 3, apresenta-se a análise das estruturas submetidas a diferentes carregamentos e constrangimentos através do Método de Elementos Finitos.

No capítulo 4, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no Capítulo 3.

E no capítulo 5 referem-se as principais conclusões deste trabalho.

1.4 A Cimpor

A empresa Cimpor foi fundada em 1976 e possui sede em Lisboa. Está presente em Portugal, Cabo Verde, Turquia e Costa de Marfim. A sua principal atividade é a produção de cimento, betão, agregados, argamassas e a sua comercialização (Cimpor, Quem somos, 2023). A nível nacional é detentora de 3 Centros de Produção - Alhandra, Loulé e Souselas destinados à produção de clínquer e cimento (Cimpor, Quem somos, 2023).

O Centro de Produção de Souselas integra 135 trabalhadores, tem uma produção anual de 2,4 milhões de toneladas de clínquer e 3,5 milhões de toneladas de cimento (Cimpor, Quem somos, 2023).

A escolha do local para a instalação desta nova fábrica obedeceu a dois pressupostos:

i) aproximação tanto quanto possível do mercado do norte do país; ii) localização na vizinhança de jazidas de matérias calcárias e argilosas de composição adequada ao fabrico de cimento. O interesse da indústria cimenteira na área geográfica de Souselas–Brasfemes resultou da qualidade apresentada pela pedra que a fábrica de cal começara a extrair, em 1969, da serra do Alhastro.

1.4.1 Processo de produção de cimento

A Figura 1.4 ilustra, de forma esquemática, o circuito das várias etapas que integram o processo de produção de cimento (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023).

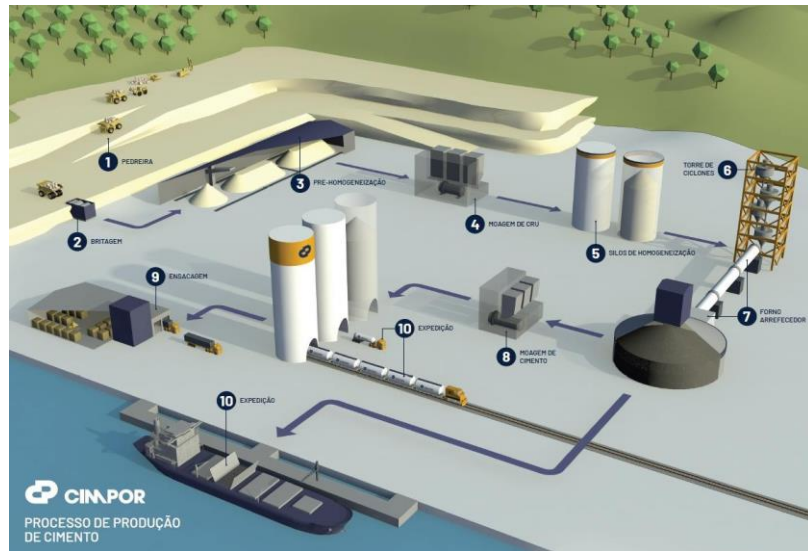


Figura 1.4 – Diagrama do processo de produção de cimento (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023).

O processo de produção do cimento inicia-se na pedreira (Figura 1.5), onde são extraídas as matérias-primas necessárias, nomeadamente o calcário pobre. Este processo é realizado através da perfuração e “desmonte” da pedra com a utilização de explosivos (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023).



Figura 1.5 – Pedreira do CPS.

Após a extração, o material é apresentado em blocos com dimensões próximas de 1 metro cúbico (m^3). Em seguida, esses blocos passam por um processo de redução de tamanho, resultando em pedaços com dimensões inferiores, em torno de 40 milímetros (mm), no Britador de Martelos. Esse processo é chamado de britagem

#2 (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023). A etapa que se segue consiste na pré-homogeneização #3 do material britado, representado na Figura 1.6.

Na pré-homogeneização, estes materiais são depositados em camadas longitudinais, originando pilhas com 10 mil a 30 mil toneladas (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023). A retoma da pilha é feita por secções verticais, o que aumenta o grau de homogeneização da mistura que vai ser transportada.



Figura 1.6 – Pré-homogeneização do material.

Após a pré-homogeneização, o material entra numa segunda fase de diminuição de granulometria e começa um processo de desidratação, no qual é retirada uma percentagem elevada de humidade existente nas matérias-primas. Esta fase ocorre na moagem de cru #4, e é realizada num moinho vertical de galgas. O moinho vertical apresenta melhor eficiência energética e maior capacidade, tendo, no entanto, como desvantagens o custo de aquisição inicial, bem como o custo de manutenção, que são superiores, comparativamente aos moinhos horizontais (Figueiredo, 2018).

De modo a promover a maior homogeneização possível do cru obtido no moinho, este segue para os silos com fluidificadores #5 que uniformizam o material e o tornam menos denso. O material que se obtém após este tratamento designa-se de farinha (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023). Dos silos de homogeneização, a farinha é introduzida no forno, passando antes pela fase de decarbonatação #6. O objetivo da torre de ciclones (Figura 1.7) é pré-aquecer, desumidificar e decarbonatar a farinha de forma eficiente. A torre consiste numa sequência de ciclones posicionados uns por cima dos outros, que põe em contacto a farinha e o gás efluente do forno rotativo, em contracorrente.

Os ciclones possibilitam um contacto eficiente entre a farinha e o gás para promover a transferência de calor, uma vez que a farinha fica suspensa no gás, seguido de uma separação eficiente, que possibilita que o processo seja em contracorrente. Na linha 3 existem 4 estágios de ciclones (Salvador, 2015).



Figura 1.7 – Torre de ciclones.

Nesta etapa, os pré-calcinadores aproveitam o calor proveniente do forno e promovem o aquecimento inicial do material. Em seguida, inicia-se o processo de cozedura. A farinha passa pelo forno #7 que opera a uma temperatura até 1450°C (graus Celsius), resultando em clínquer.

O forno (Figura 1.8) é revestido no interior por tijolos refratários que servem de isolamento para evitar perdas de calor e proteger a ‘virola’, a chapa exterior do forno, de temperaturas elevadas. Serve também como isolamento uma crosta que se forma com o material alimentado ao forno, e a composição do tijolo deve ser tal que promova a aderência do clínquer. Para evitar a degradação da virola, a temperatura desta é monitorizada em contínuo, em diversos pontos ao longo do seu comprimento. Caso ocorra uma descolagem da crosta ou até dos tijolos refratários, a virola é arrefecida por ventiladores enquanto a crosta não se regenera (Salvador, 2015).



Figura 1.8 – Forno.

O clínquer, constituinte nobre do cimento, apresenta uma granulometria entre os 3 a 4 centímetros (cm) de diâmetro e uma cor cinza-escuro.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

É arrefecido até à saída do arrefecedor de grelhas (100-200°C) e encaminhado para silos ou stocks polares, onde fica armazenado. O clínquer que sai dos fornos é arrefecido pelos arrefecedores, passando de seguida por um britador existente no final dos arrefecedores, representado na Figura 1.9 (Figueiredo, 2018).



Figura 1.9 – Britador do arrefecedor.

O objetivo do arrefecedor é causar o arrefecimento rápido do clínquer de modo a evitar a degradação das estruturas minerais do clínquer, e aproveitar o calor do mesmo para pré-aquecer o ar que será introduzido no forno. Este rápido arrefecimento do clínquer também torna mais fácil a sua posterior moagem, tornando-o mais reativo e com menor expansibilidade. Após ser extraído dos silos ou do stock polar, o clínquer é transportado até às tremonhas das moagens de Cimento #8, aí é doseado juntamente com aditivos de filler, gesso, calcário, cinzas volantes, escórias, pozolanas que lhe conferirão as propriedades requeridas pelo consumidor final (Cimpor, Processo de produção de cimento, 2023). Por fim, o cimento resultante é ensacado em sacos de 25 e 50 quilogramas (kg) #9 que, posteriormente, são distribuídos por paletes ou embalados em forma de pacotão, tal como mencionado na Figura 1.10. O cimento pode ser expedido por via ferroviária, marítima ou rodoviária #10.



a)



b)

Figura 1.10 – a) Pacotão; b) Paletização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão de literatura efetuada, nomeadamente a atinente ao conceito de ciclone industrial, a sua constituição e o seu princípio de funcionamento. São apresentados vários materiais que podem constituir uma solução para o encamisamento de um ciclone, os processos de fabrico inerentes aos mesmos, bem como, os tipos de processos de soldadura recomendados para cada material.

2.1 Ciclone industrial

No processo de produção de cimento, a torre de ciclones desempenha um papel fundamental na etapa de pré-aquecimento da matéria-prima, vulgarmente designada por farinha crua. Esta estrutura é composta por uma série de ciclones dispostos em estágios, normalmente entre quatro a seis, cuja principal função é promover a transferência de calor entre os gases quentes provenientes do forno rotativo e a farinha crua que será posteriormente calcinada. (Cement, 2024).

O funcionamento do ciclone baseia-se na separação das partículas sólidas contidas nos gases, recorrendo à força centrífuga. Os gases quentes entram tangencialmente no ciclone, gerando um movimento em espiral ascendente. Este movimento provoca a separação das partículas sólidas – neste caso, a farinha crua – que, devido à sua maior densidade, são projetadas contra as paredes internas do ciclone, descendo por gravidade até ao estágio seguinte. Simultaneamente, os gases mais limpos seguem o seu percurso ascendente até ao próximo ciclone da torre ou, no final do processo, para o sistema de filtração ou para a chaminé (Cement, 2024). Este sistema permite que a farinha crua seja progressivamente pré-aquecida ao longo da torre, aproveitando de forma eficiente o calor dos gases do forno. Como resultado, a matéria-prima entra no forno rotativo a uma temperatura mais elevada, o que reduz significativamente o consumo energético necessário para alcançar as temperaturas de clinquerização (Bashir, 2024).

As dimensões do ciclone, nomeadamente a altura, o diâmetro e o formato das entradas e saídas de gases, têm um impacto direto na sua eficiência. nomeadamente a temperatura e a humidade dos gases, influenciam também o desempenho dos ciclones. Temperaturas elevadas tendem a favorecer a separação das partículas, mas a presença de humidade pode originar a aglomeração de material e a formação de incrustações nas paredes internas, dificultando o escoamento dos gases e das partículas sólidas (McLanahan, 2024).

2.1.1 Princípio de funcionamento

A Figura 2.1 ilustra um exemplo de um ciclone industrial, a entrada do material (“farinha”), a saída do gás quente proveniente do forno e a saída das partículas sólidas. Tal como ilustrado na Figura 2.1, o ciclone consiste numa câmara cilíndrica acoplada a uma secção cónica, com uma abertura na base para a descarga dos sólidos recolhidos, conhecida como orifício de *underflow*.

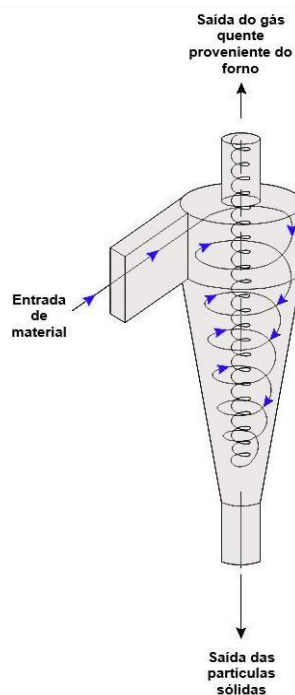


Figura 2.1 – Exemplo de um ciclone industrial; adaptado (Webbusterz, s.d.).

2.1.1.1 Entrada do ciclone

A entrada do ciclone foi projetada para permitir que a farinha entre tangencialmente, através de um tubo cuja secção transversal é geralmente retangular, embora em algumas aplicações possa ser circular, originando um movimento de rotação ao longo das paredes internas do ciclone. Este padrão em espiral é essencial, pois é responsável por criar a força centrífuga requerida para a separação das partículas sólidas (PowderProcess, 2015). Para assegurar que o ciclone suporta abrasão e pressão da mistura da farinha e dos gases provenientes do forno, geralmente são empregues materiais como o aço carbono ou o aço inoxidável. Em setores com desgaste acentuado, como a indústria cimenteira, essa área crítica pode receber camadas extras de material para aumentar sua resistência (PowderProcess, 2015).

O formato tangencial da entrada é essencial para aumentar a eficiência da separação, assegurando a rápida e consistente remoção de partículas do fluxo de gás, melhorando o funcionamento geral do sistema (PowderProcess, 2015).

2.1.1.2 Cilindro do ciclone

O cilindro do ciclone é a região onde o gás rotativo se estabiliza, fazendo com que as partículas mais pesadas sejam impulsionadas para as paredes devido à força centrífuga. A função principal desta estrutura em forma de cilindro é garantir a rotação em espiral do gás, essencial para direcionar as partículas sólidas para as paredes e posteriormente levá-las até a parte inferior do ciclone, onde são coletadas. Comumente, o corpo é produzido em aço carbono, porém ao lidar com materiais abrasivos é usual usar revestimento de cerâmica ou outro material mais resistente ao desgaste, visando prolongar a vida útil do equipamento, como betão refratário. Em suma, o corpo cilíndrico cria o vórtice que é necessário para separar bem as partículas, garantindo que o gás faz o movimento certo (Carvalho, 2008).

2.1.1.3 Secção cónica do ciclone

A secção cónica do ciclone, localizada abaixo do corpo cilíndrico, é fundamental para aumentar a eficácia da separação no processo. Quando o gás quente se move em direção ao cone, ocorre um estreitamento do fluxo, levando ao aumento da velocidade e consequentemente intensificando a força centrífuga. Esta força extra ajuda a empurrar as partículas para as paredes internas do ciclone, facilitando a sua descida até à parte inferior do equipamento (Carvalho, 2008). Devido ao impacto constante das partículas nas paredes do cone, esta área do ciclone é também revestida com materiais refratários para evitar o desgaste precoce.

2.1.1.4 Saída inferior do ciclone

A saída inferior, também designada de descarga de partículas, é uma abertura na base do cone que permite que as partículas separadas possam ser recolhidas ou removidas do sistema. Esta saída é importante para evitar que as partículas, depois de separadas, voltem a misturar-se com o fluxo de gás limpo. Normalmente, o material usado nesta parte é aço carbono, revestido internamente, uma vez que a descarga concentra muitas partículas sólidas em movimento. A geometria da saída inferior impede que as partículas regressem para a parte superior do ciclone, garantindo assim, a eficiência do processo de separação (Carvalho, 2008).

2.1.1.5 Tubo de saída do ciclone

Após a separação das partículas, a mistura ascende pelo centro do ciclone e é expelida pelo tubo de saída.

É comum utilizar aço inoxidável neste tubo para suportar a constante libertação do gás. A geometria e a posição do tubo são cuidadosamente projetadas para otimizar o fluxo do gás limpo e evitar a fuga de partículas na saída (Carvalho, 2008).

2.1.2 Constituição interna

O ciclone é constituído por várias camadas e revestimentos internos que são essenciais para seu funcionamento eficaz e para a sua durabilidade. As várias camadas e componentes que compõem um ciclone serão de seguida descritos em detalhe.

2.1.2.1 Chapa externa (carcaça)

A chapa externa do ciclone é fabricada com materiais como aço-carbono ou aço inoxidável. Este componente constitui a estrutura visível e fornece o suporte estrutural essencial para o funcionamento do ciclone. A escolha do material e a espessura da chapa variam de acordo com as condições de operação, como temperatura e desgaste. A estrutura deve ser suficientemente robusta para garantir a estabilidade e a integridade estrutural do equipamento. Assim, materiais como o aço-carbono e o aço inoxidável são frequentemente preferidos devido às suas características mecânicas naturais (Pais, 2022).

2.1.2.2 Revestimento interno de proteção contra abrasão

O revestimento interno de proteção contra o desgaste é crucial para aumentar a durabilidade do ciclone. Este revestimento é feito de materiais altamente resistentes ao desgaste, como cerâmicos, borracha vulcanizada ou polímeros especiais. O objetivo principal deste revestimento é proteger a estrutura interna do desgaste causado pelo fluxo de partículas em alta velocidade. As partículas, ao colidirem com as superfícies internas do ciclone, causam desgaste por abrasão, o que pode comprometer a integridade estrutural se não houver proteção. Portanto, o revestimento interno reduz esse impacto abrasivo, garantindo uma operação mais segura e duradoura (Soluções Industriais, 2014).

2.1.2.3 Camada de isolamento térmico (caso necessário)

Em operações que envolvem temperaturas extremamente elevadas, é essencial uma camada de isolamento térmico para proteger a carcaça externa do ciclone e minimizar a transferência de calor para o ambiente. Este isolamento é geralmente feito de materiais como lã de vidro ou cerâmicos, conhecidos pelas suas excelentes propriedades de isolamento térmico. A principal função do isolamento térmico é manter a eficiência térmica do sistema, protegendo a carcaça contra o calor excessivo e prevenindo possíveis deformações estruturais causadas pelas altas temperaturas.

Assim, o isolamento garante uma operação segura e eficiente do ciclone em condições adversas (WEIR, 2023).

2.1.2.4 Revestimento anticorrosivo

Quando um ciclone é usado em ambientes com gases ou partículas corrosivas, é crucial aplicar um revestimento interno anticorrosivo. Este revestimento, normalmente feito de resinas epóxi ou outros materiais resistentes à corrosão química, tem a função de proteger a estrutura interna do ciclone contra danos químicos causados por substâncias corrosivas no fluxo de gases. Assim, o revestimento anticorrosivo garante a integridade estrutural do ciclone, mesmo em ambientes quimicamente agressivos. Essas camadas e revestimentos internos são essenciais para assegurar que o ciclone não apenas suporte as condições operacionais, mas também funcione de maneira eficiente e com pouca necessidade de manutenção. A carcaça externa é apenas a "casca" que mantém todo o sistema, mas o desempenho real do ciclone depende dos revestimentos e proteções internas que fazem parte de sua construção (Freitas, 2022).

2.2 Seleção de materiais para o encamisamento

A integridade estrutural dos ciclones constitui um elemento essencial para assegurar a eficiência operacional e a segurança das instalações industriais. O encamisamento externo apresenta-se como uma solução eficaz para a reparação de danos estruturais, permitindo prolongar a vida útil dos ciclones. Neste contexto, a seleção criteriosa dos materiais a utilizar revela-se determinante para o sucesso da intervenção e para o cumprimento dos objetivos operacionais e de durabilidade.

A seleção de materiais para o encamisamento de ciclones deve considerar diversos fatores operacionais e ambientais, tais como:

- **Resistência à corrosão:** A exposição contínua a gases potencialmente corrosivos exige materiais que resistam a ambientes hostis, evitando a degradação precoce.

- Resistência térmica: A temperatura operacional elevada dos ciclones requer materiais que mantenham suas propriedades mecânicas a elevadas temperaturas.
- Resistência mecânica: O material deve suportar as cargas estruturais e pressões internas, como indicado em normas industriais de resistência ao impacto e à compressão.
- Compatibilidade com o betão refratário interno: A compatibilidade térmica entre o encamisamento externo e o betão refratário é essencial para evitar problemas de dilatação que comprometam a integridade do ciclone.

Para a substituição da chapa do ciclone, há várias opções que podem ser consideradas em função das condições de operação, incluindo a resistência ao desgaste, corrosão, temperatura e o custo envolvido. Como a aplicação em apreço envolve um desgaste significativo por abrasão e também a presença de altas temperaturas (300-400 °C), de seguida são apresentadas algumas alternativas de materiais que podem ser considerados para a chapa com a qual se fará o encamisamento do ciclone.

2.2.1 Aço carbono de alta resistência ao desgaste

O aço carbono de alta resistência ao desgaste, como o Hardox 400, 450 e 500, é indicado para operar em ambientes caracterizados por um acelerado desgaste. Este tipo de material constitui uma boa opção para o desgaste por abrasão e se o custo económico for uma condicionante. É considerado uma escolha equilibrada em termos de custo-benefício onde a resistência ao desgaste é imperativa (Sulcromo, 2005). A elevada resistência à abrasão deste aço resulta do tratamento específico a que é submetido, tornando-o particularmente adequado para ambientes industriais, como a indústria cimenteira, onde a resistência ao desgaste é fundamental. Todavia, o aço carbono de alta resistência ao desgaste apresenta uma resistência à corrosão moderada, sendo, como tal, necessário providenciar uma proteção adicional em ambientes onde há gases corrosivos, de modo a evitar danos estruturais provocados por fenómenos de corrosão química (Sulcromo, 2005).

2.2.2 Aço inoxidável AISI 316 L

O aço inoxidável é uma alternativa adequada quando a resistência à corrosão é uma preocupação importante. O aço inoxidável AISI 316L destaca-se pela sua boa resistência à corrosão, sendo adequado para ambientes em que há a presença de gases corrosivos, como o dióxido de enxofre (SO₂) e o cloreto de hidrogénio (HCl). Este tipo de aço apresenta excelente durabilidade, garantindo a integridade estrutural mesmo em condições adversas. Contudo, o aço inoxidável 316L é mais caro do que o aço carbono e apresenta uma resistência ao desgaste inferior, pelo que pode ser

necessário assegurar a existência de um revestimento adicional para proteger as zonas preferencialmente sujeitas a desgaste por abrasão (Sulcromo, 2005).

2.2.3 Aço inoxidável Duplex (2205)

O aço Duplex (AISI 2205) combina uma excelente resistência à corrosão e ao desgaste. Este material é particularmente vantajoso devido à sua elevada resistência mecânica e à sua capacidade de suportar temperaturas moderadas, até cerca de 280-

300°C. Contudo, tal como o aço inoxidável 316L, o aço duplex é mais caro, sendo a sua utilização justificada apenas em ambientes severos que requeiram, cumulativamente, elevada resistência química e mecânica (Sulcromo, 2005).

2.2.4 Aço S235 JR (37-2)

O aço S235JR é um aço estrutural de uso geral, pertencente à categoria dos aços não ligados e amplamente utilizado na construção civil, na execução de estruturas metálicas e em outras aplicações industriais (Steel, 2015). Este material caracteriza-se pelas suas boas propriedades de soldabilidade, ductilidade e tenacidade, além de uma resistência adequada para várias aplicações estruturais. É ideal para aplicações que não exigem elevadas resistências mecânicas, mas que requerem um equilíbrio entre custo, desempenho e facilidade de fabrico (Steel, 2015). Após a soldadura, o aço S235JR tende a manter boas propriedades mecânicas. No entanto, o calor produzido pela soldadura pode causar uma redução local na resistência, nomeadamente na região afetada pelo calor (Steel, 2015). Apresenta o limite de elasticidade mínimo de 235 MPa (Octal, 2024).

2.2.5 Aço S355 JR

O aço S355JR é um aço estrutural não ligado de média resistência mecânica. Proporciona uma excelente resistência mecânica. É utilizado no fabrico de produtos laminados a quente que são posteriormente utilizados na produção de aços para construção. Apresenta o limite de elasticidade mínimo de 355 MPa (Octal, 2024).

2.2.6 Análise comparative dos materiais

A Tabela 2.1 apresenta, de forma resumida, uma comparação entre as principais características apresentadas pelos materiais anteriormente mencionados.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Tabela 2.1 – Análise sintetizada dos materiais.

Material	Resistência ao Desgaste	Resistência à Corrosão	Temperatura Máxima (°C)	Soldabilidade/Fabrico
Aço Carbono de Alta Resistência (Hardox 450)	Muito Alta	Moderada	450-500	Boa, mas exige pré-aquecimento.
Aço Inoxidável (AISI 316L / Duplex)	Moderada a Alta	Muito Alta	280-600	Boa para 316L, média para Duplex.
Aço S235JR (St 37-2)	Baixa a Moderada	Baixa	250 - 300	Excelente; sem necessidade de pré-aquecimento
Aço S355JR	Moderada	Moderada	600	Boa soldabilidade

2.3 Processos de fabrico

Neste subcapítulo serão descritos os processos utilizados para conformação de chapas metálicas, nomeadamente de chapas com 6 mm de espessura, com ênfase nos cuidados necessários a cada material. Estes processos são fundamentais para conformar chapas em formas curvas ou cilíndricas, garantindo a integridade do material e assegurando que as especificações geométricas desejadas sejam cumpridas. A seleção adequada do processo depende das propriedades mecânicas de cada material, como dureza, ductilidade e resistência ao desgaste.

2.3.1 Calandragem a frio

A calandragem a frio (Figura 2.2) consiste na passagem da chapa metálica entre rolos para adquirir a forma curva ou cilíndrica pretendida. Este processo é realizado sem o aquecimento prévio do material, o que o torna particularmente indicado para chapas que possuem boa ductilidade à temperatura ambiente. A calandragem é feita numa máquina conhecida como calandra, que pode ser equipada com três ou quatro rolos.

As calandras de quatro rolos são preferidas quando se deseja obter maior precisão e controlo sobre o material, enquanto as de três rolos são mais utilizadas em aplicações industriais onde o controlo absoluto não é tão crítico (Gforgings, 2022)

No processo de calandragem, a chapa é inicialmente posicionada entre os rolos. O rolo superior aplica uma pressão constante sobre a chapa, enquanto os rolos inferiores garantem a tração necessária para a conformação. A chapa é passada repetidamente entre os rolos até se alcançar a curvatura especificada. Este processo é comumente utilizado em aços carbono de alta resistência, como o HARDOX 450, e em aços inoxidáveis como o AISI 316L. Contudo, devido à dureza elevada de alguns materiais, é necessário garantir que o raio de curvatura seja suficientemente grande, de modo a evitar fissuração ou deformações plásticas indesejadas. O controlo da velocidade da calandragem é também fundamental para assegurar um acabamento uniforme e evitar a sobrecarga dos rolos (Gforgings, 2022).



Figura 2.2 – Calandragem a frio (Caldeiraria, 2010).

2.3.2 Dobragem com prensa hidráulica

A dobragem com prensa hidráulica (Figura 2.3) é um método em que uma prensa equipada com uma punção e uma matriz aplica uma força sobre a chapa metálica para alcançar uma determinada curvatura ou ângulo. Este processo pode ser realizado tanto a frio como a quente, dependendo da ductilidade do material e do ângulo de dobra necessário. O sistema hidráulico da prensa fornece a força necessária para a deformação, sendo a punção responsável por pressionar a chapa contra a matriz, que é geralmente em forma de "V", neste caso, visto tratar-se de uma forma cilíndrica, a forma teria de ter outro formato (MachineMFG, 2024).



Figura 2.3 - Dobragem com prensa hidráulica (Freepik, 2009).

A chapa metálica é colocada sobre a matriz, o punção empurra a chapa para baixo, dobrando-a ao ângulo desejado. Após a dobragem, o punção retorna à sua posição inicial e a chapa conformada é removida. Este processo é particularmente adequado para materiais como o aço inoxidável e o aço carbono, desde que se faça o controle adequado da velocidade de aplicação da força e do raio de dobragem. Materiais mais frágeis ou de elevada dureza, como os aços de ferramenta, requerem um controle rigoroso destes parâmetros para evitar a formação de fissuras. Para materiais de elevada ductilidade, como o aço inoxidável, recomenda-se a utilização de lubrificantes para evitar marcas indesejadas na chapa (MachineMFG, 2024).

2.3.3 Calandragem a quente

A calandragem a quente (Figura 2.4) é um processo semelhante à calandragem a frio, mas que envolve o aquecimento prévio da chapa metálica para facilitar a conformação. Este processo é particularmente indicado para materiais que apresentam elevada resistência mecânica e que, por isso, são difíceis de conformar a frio. O aquecimento prévio reduz a resistência à deformação, aumentando a ductilidade e permitindo a conformação da chapa sem risco de fissuração (LeadRP, 2024). No processo de calandragem a quente, a chapa é aquecida a temperaturas entre 300 °C e 500 °C, tornando-se mais maleável e, assim, mais fácil de ser conformada. Posteriormente, a chapa é passada entre os rolos da calandra para adquirir a forma desejada. Uma das particularidades deste processo é a necessidade de realizar um arrefecimento controlado após a conformação, para evitar a formação de tensões residuais que possam comprometer a integridade estrutural da peça (GlobalSpec, 2014).



Figura 2.4 - Calandragem a quente (Casarini, 2007).

A análise do processo de fabrico de cada material e os custos relacionados são fundamentais na indústria, pois esses aspetos determinam não só a viabilidade técnica, mas também a rentabilidade do projeto. Cada material apresenta características específicas que influenciam a maneira como pode ser moldado, dobrado ou soldado, e esses processos impactam diretamente o custo de produção. Optar pelo processo mais adequado diminui os riscos de falhas, reduz os custos de manutenção e aumenta o tempo de vida útil do equipamento, enquanto uma escolha errada pode afetar negativamente a qualidade, aumentar os custos económicos e as falhas prematuras.

Os processos de fabrico para a moldagem de chapas metálicas são fundamentais, especialmente no contexto da construção de um ciclone, em que as chapas precisam ser moldadas para criar a geometria cilíndrica da estrutura. Cada material mencionado no subcapítulo 2.2.1 possui características próprias que influenciam o seu método de conformação. No subcapítulo seguinte são apresentados os processos de fabrico adequados para os diferentes materiais de chapas anteriormente mencionados.

2.4 Processos de fabrico recomendadas para cada tipo de chapa

Neste subcapítulo serão apresentados os processos de fabrico recomendados para cada tipo de chapa.

2.4.1 Chapas de aço carbono de alta resistência ao desgaste

No processo de fabrico do aço ao carbono de alta resistência ao desgaste ‘Hardox’ 450, um dos métodos mais comuns para curvar chapas é a calandragem a frio. Este processo utiliza uma calandra de três ou quatro rolos para obter a curvatura desejada.

Dado que o ‘Hardox’ é um aço extremamente resistente ao desgaste, é necessário que a calandra possua uma potência considerável para evitar deformações indesejadas durante o processo de curvatura. Alternativamente, é possível utilizar uma prensa hidráulica, que deve estar equipada com ferramentas adequadas para evitar a formação de fissuras durante o dobramento (Solutions, 2024)

Em relação aos cuidados durante o fabrico, o raio de dobragem é um fator crucial. Como o ‘Hardox’ é suscetível à fissuração quando submetido a um raio de dobra muito pequeno, recomenda-se a utilização de um raio de curvatura maior do que aquele normalmente utilizado para chapas de aço carbono comum. Além disso, a velocidade da dobragem deve ser cuidadosamente controlada, de modo a garantir que a chapa não sofra fissuras em função da alta dureza do material (Solutions, 2024).

2.4.2 Chapas de Aço inoxidável AISI 316L

No fabrico de aço inoxidável AISI 316L, o método preferido é a calandragem a frio com uma calandra de quatro rolos. Esta técnica permite uma maior precisão e controlo sobre a peça durante o processo de curvatura. Além disso, para chapas com uma espessura de seis milímetros, pode ser utilizada uma prensa hidráulica, garantindo um controlo cuidadoso do raio de dobragem para evitar danos ao material e reduzir as tensões residuais (Fabrication, 2024) (Institute, 2022).

Os cuidados no processo incluem a escolha de um raio de curvatura controlado. No caso do aço inoxidável, especialmente do duplex, a elasticidade e resistência à deformação são maiores, sendo assim necessário escolher um raio de curvatura suficientemente grande para evitar fissuras ou deformações indesejadas. Recomenda-se também a utilização de lubrificante durante o processo de curvatura, a fim de evitar riscos ou marcas na superfície que possam comprometer a resistência à corrosão do material (Association, 2009).

2.4.3 Chapas de Aço inoxidável Duplex 2205

Para este aço, a calandra de 4 rolos é geralmente a mais indicada, especialmente para o processo de calandragem a quente. O processo mais indicado para calandragem de aço inoxidável Duplex 2205 é a calandragem a quente, seguido de calandragem a frio. O aço inoxidável Duplex 2205 é uma liga com alta resistência mecânica e boa resistência à corrosão. Devido à sua microestrutura composta por uma fase austenítica e ferrítica, ele é sensível a danos por deformação excessiva, especialmente em temperaturas elevadas. A calandragem a quente é ideal para a formação inicial do material em chapas. Neste processo, o material é aquecido a temperaturas elevadas (normalmente acima de 1000°C) para garantir que o aço se deforma com facilidade. Após o processo a quente, se for necessário um acabamento mais preciso, pode-se recorrer à calandragem a frio.

Esse processo aumenta a resistência e dureza do material, mas requer cuidados com a possibilidade de *embrittlement* (fragilização) devido à deformação excessiva.

2.4.4 Aço S355JR

O processo de calandragem do aço S355JR envolve a conformação do material através de rolos. A calandragem pode ser realizada a quente ou a frio, dependendo da espessura. A calandragem a quente é indicada para espessuras maiores, sendo realizada a temperaturas entre os 900 e os 1200°C, enquanto a calandragem a frio é usada para espessuras mais finas, com o material a temperaturas mais baixas, geralmente abaixo dos 100°C (Schmid, 2010).

A escolha dos rolos de calandragem é essencial, pois estes devem ser capazes de suportar a carga do material e resistir à deformação. O diâmetro e a resistência dos rolos devem ser dimensionados de acordo com a espessura do aço. No caso da calandragem a quente, o aço deve ser arrefecido de forma controlada para evitar tensões internas que possam afetar as suas propriedades mecânicas (Schmid, 2010).

Após a calandragem, o aço pode necessitar de tratamento térmico, como alívio de tensões, para garantir a qualidade estrutural. Além disso, podem ser realizados acabamentos adicionais, como desbaste para corrigir irregularidades ou aplicação de revestimentos para proteção contra a corrosão (Schmid, 2010).

2.4.5 Aço S235JR (St 37-2)

Como já referido, o processo mais comum para criar a forma cilíndrica é a calandragem. A calandra utilizada pode ser uma máquina de 3 ou 4 rolos. A chapa de S235JR é passada pelos rolos da calandra para criar uma curvatura uniforme até que a forma cilíndrica seja obtida. Por ser um aço de baixo teor de carbono, possui uma boa ductilidade, o que facilita a execução da curvatura sem a formação de fissuras ou problemas de fragilidade (Material, 2002).

Como a chapa em questão é de 6 mm de espessura é relativamente fácil de calandrar, e não há necessidade de pré-aquecimento devido às boas propriedades de conformação do S235JR (Material, 2002). No processo de calandragem do aço S235JR de 6 mm de espessura, é importante selecionar uma máquina de calandrar adequada e inspecionar a chapa para garantir que não tenha defeitos. A chapa deve ser alinhada corretamente e a pressão dos rolos deve ser ajustada gradualmente em múltiplas passagens para garantir uma curvatura uniforme (Material, 2002).

A Tabela 2.2 estabelece uma visão geral dos métodos recomendados para conformar diferentes tipos de chapas metálicas, especificamente para a espessura de 6 mm, considerando a variedade de materiais discutidos anteriormente.

Tabela 2.2 – Processos de conformação plástica.

Material	Processo de conformação plástica recomendado	Cuidados no processo
Aço Carbono (Hardox 450)	Calandragem a frio ou dobração com prensa.	Raio de curvatura maior, controle da velocidade.
Aço Inoxidável AISI 316L	Calandragem a frio com 4 rolos.	Raio de curvatura controlado, lubrificação adequada.
Duplex 2205	Calandragem a quente ou dobração.	Raio de curvatura maior.
Aço S355JR	Calandragem a quente com 4 rolos.	Raio de curvatura 1.5x a espessura.
Aço S235JR (St 37-2)	Calandragem a frio ou dobração com prensa.	Raio de curvatura maior.

2.5 Soldabilidade

A soldabilidade é fundamental para garantir a resistência, segurança e durabilidade de uma junta soldada. Escolher os processos de soldadura adequados e aplicar os cuidados necessários permite reduzir custos, prolongar a vida útil do equipamento e assegurar a sua eficiência operacional em ambientes severos. Por isso, uma análise criteriosa da soldabilidade é indispensável em projetos industriais para evitar falhas e garantir o sucesso da operação e manutenção das estruturas (Society, 2010).

A Figura 2.5 ilustra um exemplo do processo de soldadura MIG/MAG.

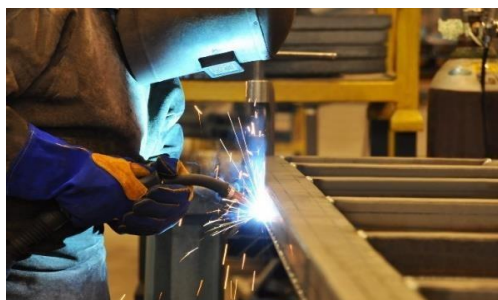


Figura 2.5 - Soldadura MIG/MAG (Aventa, 2016).

A Figura 2.6 representa um exemplo de soldadura TIG.



Figura 2.6 - Soldadura TIG (Ronch, 2024).

A Figura 2.7 representa um exemplo de soldadura com eléctrodo revestido.



Figura 2.7 - Soldadura eléctrodo revestido (Novotecnica, 2016).

2.5.1 Processos de soldadura recomendados para cada tipo de chapa

Neste subcapítulo serão abordados os processos de soldadura recomendados para cada tipo de chapa.

2.5.1.1 Chapas de aço ao carbono de alta resistência ao desgaste

O MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) é o processo de soldadura mais recomendado para aplicar ao aço Hardox 450. Este tipo de processo de soldadura é versátil e permite um bom controlo do calor, resultando numa penetração uniforme e num cordão de soldadura de boa qualidade.

O gás de proteção utilizado é geralmente uma mistura de argon e CO₂, que ajuda a estabilizar o arco elétrico e a proteger o material fundido contra a oxidação (Plate, 2013).

Como o aço Hardox é um aço de alta resistência ao desgaste, possui uma dureza elevada, o que significa que há um risco aumentado de fissuração devido a tensões térmicas. Por isso, o material deve ser pré-aquecido a temperaturas entre os 150-200°C antes de ser soldado. Este pré-aquecimento ajuda a reduzir as tensões e a prevenir fissuras na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Também é necessário um bom controlo da entrega térmica durante o processo de soldadura. Uma entrega térmica excessiva pode enfraquecer o aço, reduzindo a sua resistência ao desgaste e comprometendo o desempenho do Hardox 450 (Kumar, How to Weld Hardox 400, 450 and 700?, 2023).

2.5.1.2 Chapas de aço inoxidável AISI 316 L

O TIG (Tungsten Inert Gas) é amplamente utilizado para o aço inoxidável AISI 316L, especialmente quando se procura uma soldadura de alta qualidade, uma vez que este processo proporciona excelente controlo do arco e da penetração do metal de base. Este processo é preferido para situações em que a resistência à corrosão do cordão de soldadura é fundamental, como em ambientes industriais agressivos. Utiliza-se argon puro ou uma mistura de argon e hélio como gás de proteção para evitar a oxidação (Kumar, 316 Stainless Steel Welding Guide, 2023).

Para chapas mais espessas ou para um trabalho mais rápido, pode optar-se pela soldadura MIG (Metal Inert Gas). Este método é mais rápido e oferece uma boa penetração, sendo geralmente utilizado para aumentar a produtividade na soldadura de grandes estruturas, como referido anteriormente. Na soldadura de aços inoxidáveis é essencial proteger tanto a parte frontal quanto a raiz da soldadura para evitar a formação de óxidos de cromo, que comprometem a resistência à corrosão. Para isso, a raiz da soldadura deve ser purgada com gás de proteção (argon), garantindo que a qualidade do aço inoxidável seja mantida ao longo de toda a secção soldada (Berk, 2019).

2.5.1.3 Chapas de aço inoxidável Duplex 2205

No caso do aço inoxidável Duplex 2205, deve manter-se a temperatura entre passes de soldadura abaixo de 150 °C. Esta medida visa evitar a precipitação de fases frágeis, como a fase sigma, que pode ocorrer a temperaturas elevadas e comprometer a resistência e a ductilidade do material.

2.5.1.4 Chapas de aço S355JR

O aço S355JR, sendo um aço estrutural de baixo carbono, apresenta boa soldabilidade. Os processos recomendados para a sua soldadura incluem a soldadura por arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), ideal para ambientes externos,

com elétrodos como E7016 ou E7018. A soldadura MIG/MAG (GMAW), que oferece alta produtividade e controlo, utilizando CO₂ ou árgon e a soldadura TIG, que proporciona alta qualidade e acabamento preciso, utilizando árgon como gás de proteção. Em espessuras maiores, é recomendado realizar pré-aquecimento para evitar trincas, além de controlar a temperatura para reduzir tensões residuais (ESAB, 2024).

2.5.1.5 Chapas de aço S235JR (37-2)

No caso do aço S235JR é, geralmente, utilizado processo MIG/MAG com recurso a um gás misto de árgon e CO₂ (MAG), pois o CO₂ aumenta a penetração e proporciona um custo mais reduzido.

O aço S235JR é um aço de baixo carbono (aproximadamente 0,22% de carbono), o que significa que, em geral, tem boa soldabilidade e uma baixa tendência a fissurar. Para espessuras menores ou iguais a 10 mm, o pré-aquecimento não é normalmente necessário. No entanto, quando se soldam chapas mais espessas (acima de 25 mm) ou quando as condições ambientais são adversas (como baixas temperaturas), recomenda-se um leve pré-aquecimento para reduzir o risco de fissuras.

Cada um destes processos e cuidados são importantes para garantir a qualidade da soldadura, mantendo a integridade estrutural e as propriedades mecânicas dos materiais, especialmente em ambientes industriais como a fabricação de ciclones em fábricas de cimento, onde o desgaste, a temperatura e a abrasividade são fatores críticos.

2.5.1.6 Conclusão comparativa da análise dos materiais

Apesar das propriedades de resistência à oxidação e corrosão do aço S235JR serem inferiores às de outros materiais mais nobres, a sua seleção para o encamisamento do ciclone mantém-se válida e justificada quando considerada numa abordagem integrada de proteção e manutenção. A escolha do material foi fundamentada em vários fatores de ordem técnica e económica, devidamente adaptados às exigências e realidade do projeto em análise.

Em primeiro lugar, o aço S235JR apresenta um custo substancialmente inferior em comparação com outros materiais alternativos, como o aço inoxidável 316L ou o aço Hardox 450.

Esta vantagem económica permite alocar recursos financeiros para outras componentes críticas da instalação, nomeadamente para a melhoria do sistema de ancoragem do refratário, para o reforço das camadas isolantes, ou para a implementação de programas de inspeção e manutenção preventiva. A opção por

um material de menor custo direto viabiliza assim uma abordagem mais equilibrada do ponto de vista financeiro e operacional.

Em segundo lugar, embora seja previsível que o betão refratário venha a sofrer fissuração ao longo do tempo — permitindo o eventual contacto dos gases quentes e corrosivos com a chapa metálica — foram previstas estratégias de mitigação que minimizam este risco.

Entre estas estratégias destaca-se a possibilidade de aplicação de uma manta de isolamento cerâmico de alta densidade entre a chapa metálica e o revestimento refratário. Esta camada de isolamento reduz a transferência de calor para o aço de base e contribui para retardar os efeitos da corrosão. Adicionalmente, poderá ser realizada a aplicação de um primário anticorrosivo (de base metálica, como zinco ou alumínio) sobre toda a superfície interna do ciclone antes da colocação do refratário. Esta proteção adicional funcionará como barreira inicial contra a oxidação nas zonas expostas por eventuais fissuras. Estas medidas permitem proteger eficazmente o aço S235JR, prolongando a sua vida útil mesmo em condições de operação severas.

Outro aspeto fundamental que justifica a escolha do S235JR é a sua excelente facilidade de fabrico e de soldadura, mesmo em condições de obra. Este aço pode ser conformado com relativa facilidade em geometrias cilíndricas, característica essencial para a construção do encamisamento do ciclone. A sua soldadura é simples, não requerendo pré-aquecimento nem tratamentos térmicos pós-soldadura, e pode ser executada com técnicas correntes como MIG/MAG ou elétrodo revestido (E6013). Esta característica é particularmente relevante, uma vez que grande parte da montagem será realizada em campo, em ambiente industrial não controlado, onde a simplicidade e fiabilidade dos processos de montagem são essenciais para o sucesso do projeto.

Importa ainda salientar que a degradação por oxidação do aço S235JR, mesmo em zonas expostas por fissuração do refratário, será relativamente lenta devido à barreira térmica criada pelo sistema de revestimento. A inclusão de inspeções periódicas no plano de manutenção da instalação permitirá identificar precocemente qualquer degradação localizada, possibilitando a sua reparação ou substituição programada, evitando assim falhas críticas na estrutura do ciclone.

Em suma, a escolha do aço S235JR, embora não ideal do ponto de vista da resistência intrínseca à corrosão, revela-se plenamente justificável no contexto de uma solução global de proteção passiva e manutenção ativa. Esta abordagem integrada oferece um excelente compromisso entre custo, facilidade de execução, desempenho operacional e durabilidade controlada ao longo da vida útil prevista para o equipamento. Assim, o S235JR constitui uma solução prática, eficiente e alinhada com as exigências técnico-económicas do projeto.

3 DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DA ESTRUTURA

O objetivo deste trabalho é realizar o encamisamento do ciclone numa primeira fase e numa segunda fase retirar o seu interior, ou seja, a chapa deteriorada e o betão refratário fissurado. A análise estrutural é essencial na engenharia para prever o comportamento de estruturas submetidas a diferentes carregamentos e constrangimentos. Uma das ferramentas mais eficazes para executar esta análise é o Método dos Elementos Finitos (MEF) (Indústria, 2008).

O MEF permite dividir um problema complexo em partes menores e mais simples, designadas de elementos finitos. Estes elementos são interligados por pontos chamados nós. A ideia principal é simular um problema contínuo (como uma estrutura inteira) num conjunto de problemas independentes que são mais fáceis de resolver (Rodríguez, 2011).

O MEF destaca-se pela sua capacidade de lidar com geometrias complexas e diversas condições fronteira. O processo de análise por elementos finitos envolve três etapas principais: i) a modelação, ii) a aplicação das forças envolvidas e condições fronteira, e iii) a solução numérica, seguidas pela interpretação dos resultados para avaliar tensões e deslocamentos.

No caso do ciclone foi utilizado o *software* SolidWorks® para criar um modelo tridimensional (3D) da estrutura e realizar uma análise estática, avaliando os campos da distribuição de tensões e deslocamentos para a aplicação de forma a replicar as solicitações que ocorrem em serviço.

3.1 Descrição e Modelação do ciclone

Na realização do projeto, foi necessário realizar a modelação do ciclone no SolidWorks®. Este processo foi fundamental para a compreensão detalhada sobre o comportamento da estrutura, sendo assim possível a simulação da massa que será aplicada ao realizar este processo de encamisamento. Estas novas cargas representam a nova chapa aplicada ao encamisamento do ciclone. No entanto, algumas situações evidenciaram a necessidade de pequenos ajustes no seu processo de encamisamento.

A Figura 3.1 representa o ciclone original sem o encamisamento.

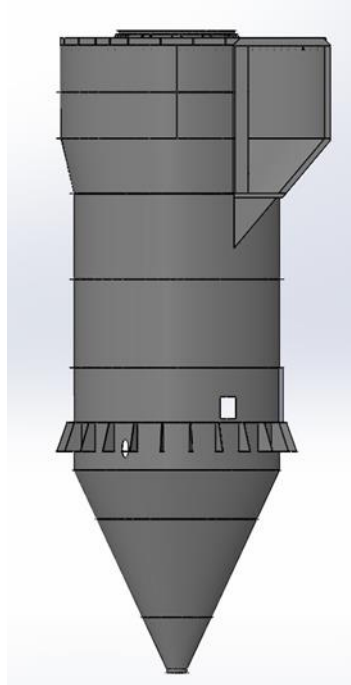


Figura 3.1 – Ciclone original sem encamisamento.

Dado que o objetivo principal deste projeto assentou na reparação do ciclone através do seu exterior, em determinada fase, após instalação da nova chapa pelo exterior, a chapa existente no interior bem como o seu revestimento refratário terão de ser removidos. Esta fase da intervenção vai deixar o ciclone sem sustentação na zona do acelerador de partículas (parte superior/topo), então pretende-se avaliar a necessidade de sustentação do ciclone garantindo que a estrutura não entra em rutura nesta fase de intervenção.

A Figura 3.2, representa o acelerador de partículas (secção superior do ciclone), este não será intervencionado sendo necessário garantir a sua integridade quando a intervenção ocorrer abaixo deste.

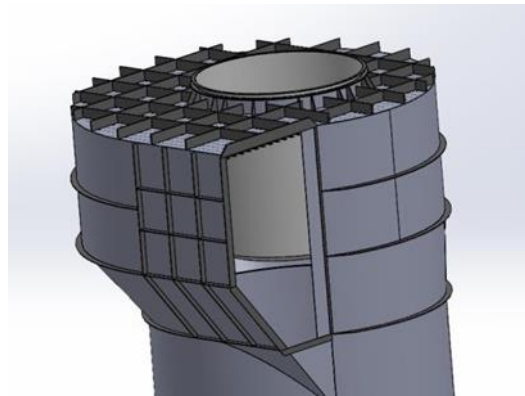


Figura 3.2 – Acelerador de partículas.

Numa primeira fase do projeto irá ser apenas colocada nova chapa à sua volta. O passo seguinte será proceder à remoção de todo o material que se encontra no interior. O material a remover inclui: a chapa oxidada e fissurada e o tijolo refratário deteriorado. Durante este processo de remoção, o acelerador de partículas, apresentado na Figura 3.2, ficará apenas sustentado pela nova chapa aplicada no encamisamento.

A fim de sustentar de forma segura toda a secção do acelerador de partículas será implementada uma estrutura de reforço, representada na Figura 3.3 – as vigas de apoio.

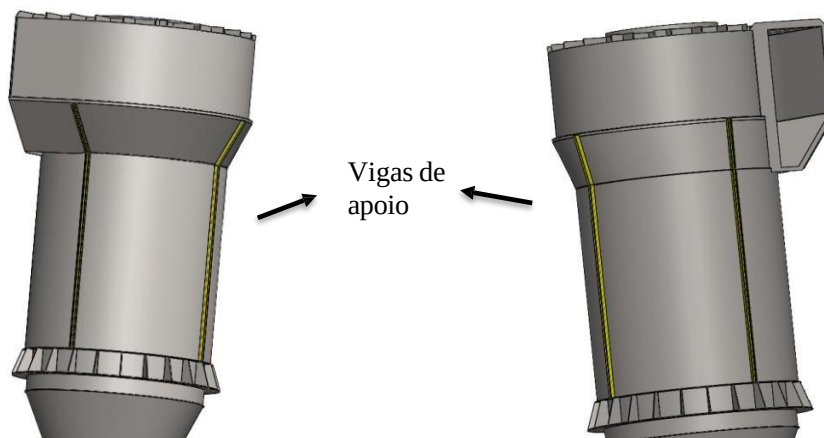


Figura 3.3 – Estrutura de suporte durante a intervenção.

As vigas de apoio (Figura 3.3) são do mesmo material escolhido para o encamisamento do ciclone, para que ambos contraíam e dilatem de forma igual. No projeto, a modelação tridimensional foi uma etapa crítica para simular o comportamento do ciclone quando sobrecarregado com novas cargas, não alterando o formato geométrico do ciclone nem perturbando o seu rendimento, com o objetivo de não causar qualquer transtorno na eficiência de separação.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Para o ciclone funcionar da forma mais eficiente o seu diâmetro interno não poderá sofrer alterações. Para isso, o volume que se acrescentou ao ciclone com o encamisamento terá de ser reposto a partir do seu interior, neste caso, com betão isolante, considerando a sua baixa densidade e o peso insignificante que este acrescentará ao conjunto.

Primeiramente, foi desenhada a camada mais exterior do ciclone (o encamisamento), a camada constituída por chapa de 6 mm (espessura já existente) em aço S235JR.

Na Figura 3.4 observa-se o ciclone completo, nomeadamente, o acelerador de partículas, o corpo do ciclone, o anel de suporte e o cone de saída. Inicialmente usou-se esta espessura de chapa considerando as dimensões atuais, no entanto, posteriormente será realizado o estudo otimizando a espessura da chapa a aplicar.

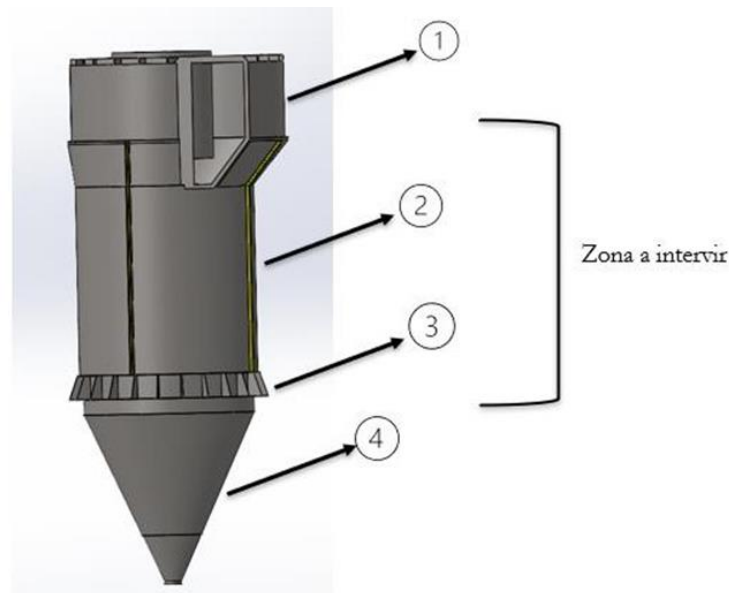


Figura 3.4 - Ciclone completo. 1 - Acelerador de partículas; 2 - Corpo do ciclone; 3 - Anel de suporte; 4 - Cone de saída.

O ciclone desenhado representa o modelo já com o encamisamento e as alterações que serão aprofundadas seguidamente.

A Figura 3.5 apresenta as alterações que se pretendem realizar, em corte.

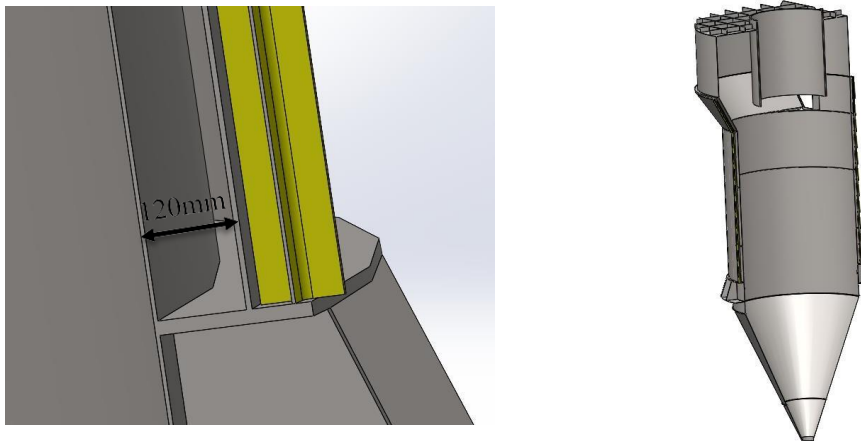


Figura 3.5 – Alterações a realizar em corte.

As alterações contempladas neste projeto são somente acima do anel de suporte, ou seja, a zona do cone não sofrerá alterações. A nova chapa foi instalada a uma distância de aproximadamente 120 mm (Figura 3.5), garantindo o espaço suficiente para trabalhar nas soldaduras a efetuar no encamisamento, bem como para a remoção da chapa interior, de modo a evitar danos na nova chapa já colocada. As áreas a serem intervencionadas (devido à corrosão acentuada) são o corpo cilíndrico do ciclone e a zona imediatamente abaixo do acelerador de partículas. A Figura 3.6 ilustra o encamisamento da gola do acelerador de partículas.

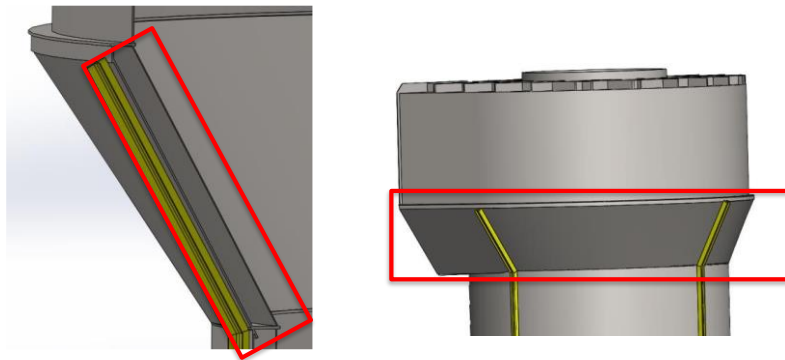


Figura 3.6 - Encamisamento da gola do acelerador de partículas em corte.

Em 2020, foi realizada a reparação interna do acelerador de partículas através da remoção do antigo tijolo refratário e aplicação de um novo revestimento de betão refratário, o que torna desnecessária a execução de um encamisamento adicional nesta área. Contudo, foi imperativo considerar as "zonas de transição", nomeadamente entre o acelerador de partículas e o corpo cilíndrico.

Nesta região foi necessário prolongar a chapa, de modo a garantir que, durante a aplicação do revestimento refratário pelo interior, fosse possível nivelar as descontinuidades existentes entre as chapas antiga e nova. Este procedimento assegura que o espaço resultante seja adequadamente preenchido pelo material refratário, dado que é fundamental manter inalteradas todas as características geométricas do ciclone, especialmente o diâmetro interno. O diâmetro do corpo influencia a magnitude da força centrífuga. Ciclones menores geram forças centrífugas mais altas, proporcionando uma separação mais eficiente de partículas finas, enquanto os ciclones maiores têm uma maior capacidade de processamento, mas com menor eficiência para partículas muito pequenas.

Para além da chapa exterior, o ciclone é também constituído por duas camadas de betão no seu interior (Figura 3.7). Uma camada de betão isolante (CALDE CAST LW MIX 124 C/G E) com cerca de 40 mm de espessura e outra de betão refratário (CALDE CAST F 48 E) com cerca de 100 mm de espessura.

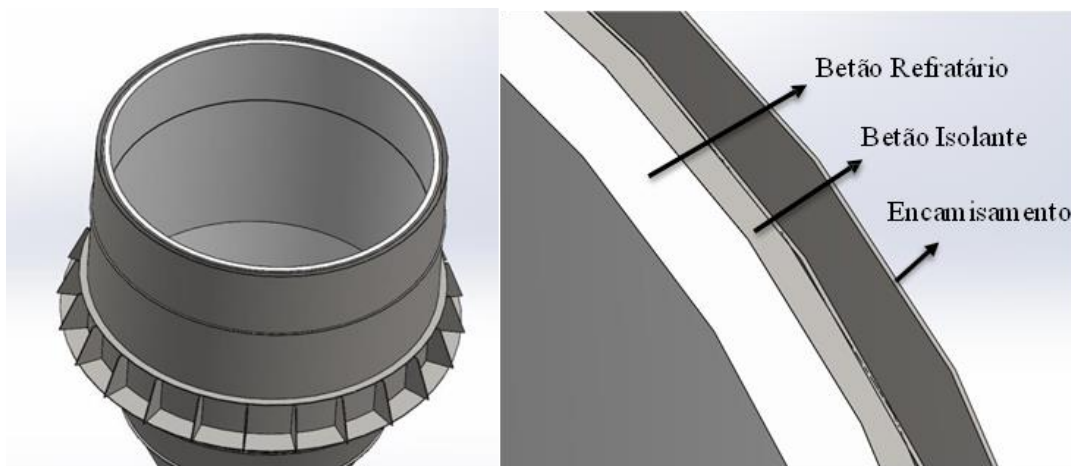


Figura 3.7 - Vista em corte das várias camadas constituintes do ciclone.

A fim de avaliar corretamente o peso exercido pela totalidade do ciclone, estas camadas de betão, foram igualmente consideradas para o cálculo do peso que a estrutura terá de suportar.

A Figura 3.8 representa o betão isolante em corte.

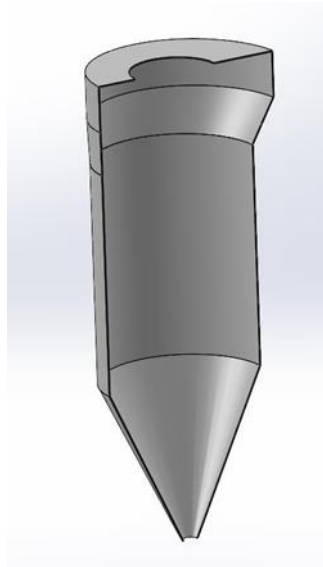


Figura 3.8 – Betão isolante em corte.

Com base na ficha técnica do betão isolante, em anexo, foi possível identificar a sua densidade, e calculou-se o peso do material, obtendo uma massa total 25 toneladas. O betão refratário, devido à sua densidade superior, apresentou uma massa de 69 toneladas, os resumos destes dados de projeto encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Massa estimada por componente.

Chapa actual	Chapa nova(encamisamento)	Betão refratário	Betão isolante	Acelerador de partículas(chapa+betão)
28 ton	7,3 ton	69 ton	25 ton	60 ton

De modo a avaliar os esforços que podem ocorrer na estrutura realizaram-se alguns estudos de forma a otimizar as diversas dimensões estruturais evitando fenómenos de rotura e minimizando custos. Para estes estudos através do modelo tridimensional preparou-se um modelo recorrendo aos elementos finitos que permite simular as condições de trabalho do ciclone.

3.2 Descrição e Modelação da Estrutura Metálica

Realizou-se um esboço tridimensional (3D) da estrutura metálica que suporta ambos os ciclones do 1º estágio (poente e nascente).

Consideraram-se todas as vigas existentes na estrutura original. Nesta estrutura estão presentes as seguintes vigas: HE400B, HE500B, HE900B, HE1000B, I 1100x300 e I 1600x300. As vigas de contraventamento são de DN220x8.

Finalizando o desenho, recorreu-se à função “Structural members” no Solidworks® para representar cada uma das vigas (Figura 3.9).

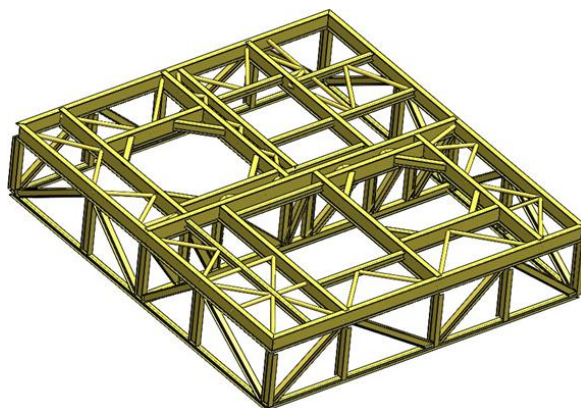


Figura 3.9 – Modelo da estrutura metálica.

No estudo simulou-se o que seria o novo ciclone instalado sobre esta estrutura. Para isso considerou-se uma carga de $1,86 \times 10^6 \text{ N}$, equivalente ao peso atual do ciclone nas vigas onde assenta o anel de suporte do mesmo.

A Figura 3.10 representa a secção estrutural para instalação do ciclone.

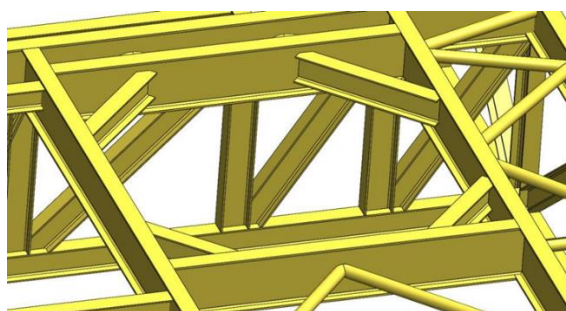


Figura 3.10 - Secção estrutural para instalação do ciclone.

3.3 Modelação de Elementos Finitos

O modelo de elementos finitos deve reproduzir as condições reais de operação. Neste caso as superfícies do ciclone são essencialmente cilíndricas, logo o tamanho do elemento deve ser otimizado garantindo a correta definição e precisão da geometria.

O modelo a estudar está representado na Figura 3.11 onde se observam todos os componentes em vista explodida.

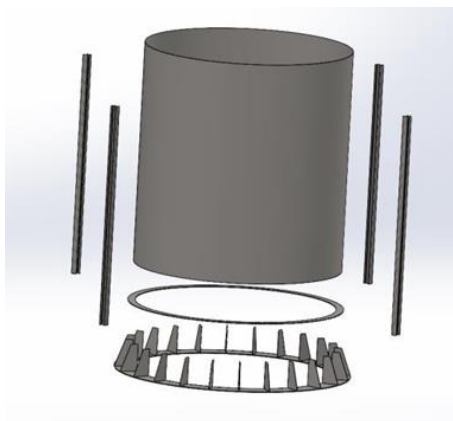


Figura 3.11 - Componentes em estudo em vista explodida.

Considerou-se que o anel que suporta o ciclone está encastrado (Figura 3.12), visto não haver qualquer movimento nesta superfície. A estrutura é fixa com a opção “fixed geometry”, disponível no SolidWorks® Simulation. Na Figura 3.12 pode observar-se esta funcionalidade que restringe os movimentos da superfície nas três direções.

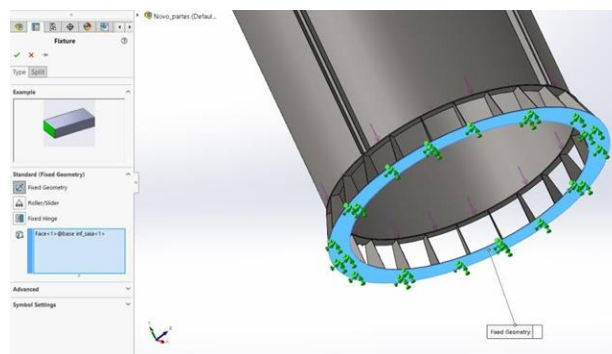


Figura 3.12 – Encastramento do anel de suporte.

O contacto global entre as diversas peças foi considerado como “bonded”. Significa que os componentes em contacto atuam como se fossem um só (colados-bonded).

O peso combinado do acelerador de partículas (chapa 6 mm e betão refratário e betão isolante) é de cerca de 60 toneladas.

Foi aplicada uma carga distribuída de $6,86 \times 10^5$ N na zona onde assenta o acelerador de partículas do ciclone, representando assim o seu peso real e a força que este exerce sobre o resto do ciclone.

A Figura 3.13 representa a carga aplicada no acelerador de partículas.

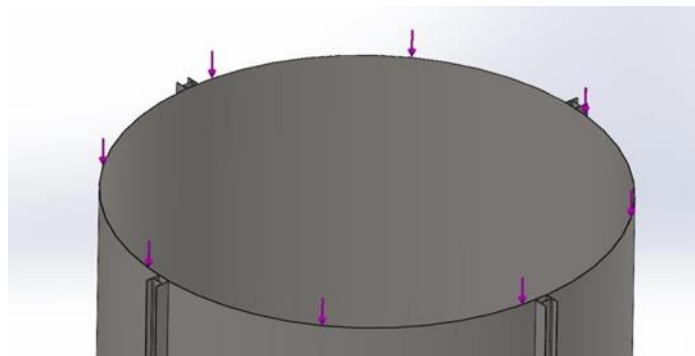


Figura 3.13 - Representação de carga no acelerador de partículas.

Na zona inferior do ciclone, através de uma representação de cargas simplificada, aplicaram-se $9,80 \times 10^5$ N que representam o peso da chapa e do refratário existentes no interior do ciclone (aproximadamente 100 toneladas) que serão, numa fase mais avançada do projeto, removidos.

A Figura 3.14 representa a carga da chapa e refratário no interior do ciclone.

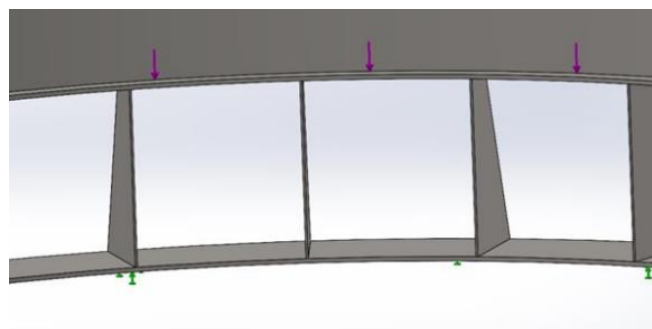


Figura 3.14 - Representação da carga da chapa e refratário no interior.

O contacto global do conjunto foi considerado como “bonded” (Figura 3.15), como descrito anteriormente.

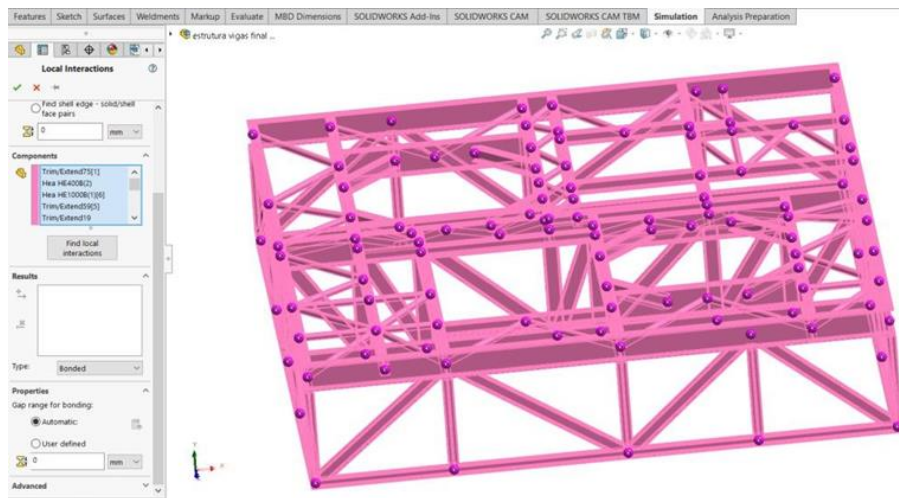


Figura 3.15 - Contacto global 'Bonded'.

Considerou-se a base da estrutura como encastrada, com a função “fixed geometry” simulando assim o seu contacto com o betão da restante estrutura da torre de ciclones (Figura 3.16).

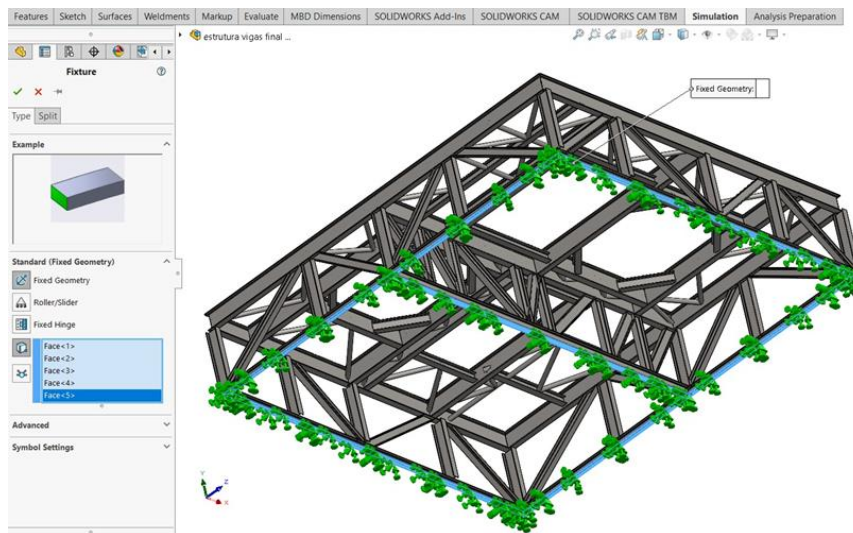


Figura 3.16 – Encastramento da base da estrutura.

Aplicou-se uma força de $1,86 \times 10^6 \text{ N}$ na zona onde fica o ciclone suportado (Figura 3.17).

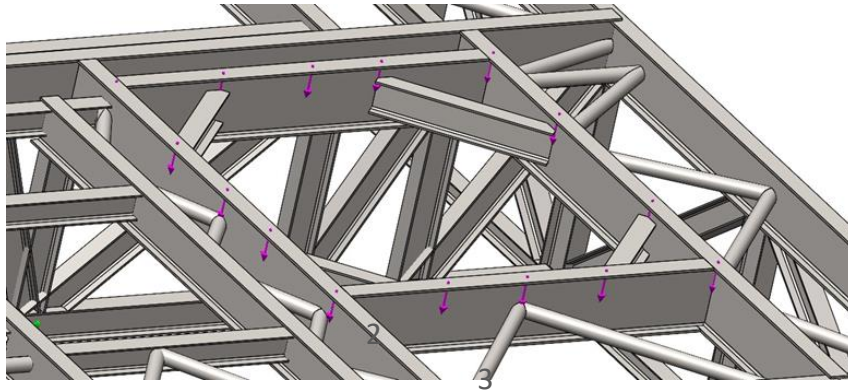


Figura 3.17 - Aplicação de força referente ao ciclone.

3.3.1 Análise do tamanho do elemento

A precisão do MEF depende do tamanho dos elementos e da quantidade de nós na malha. À medida que a malha é refinada, os elementos ficam menores e o número de nós aumenta, aproximando os resultados da solução exata. Simplificando, quanto menor o tamanho da malha, maior a precisão dos resultados, promovendo a convergência para a solução correta.

Inicialmente foi analisado qual o tamanho de elemento ideal a usar neste estudo obtendo resultados confiáveis otimizando o tempo de calculo assim como os recursos usados.

Procedeu-se a uma análise dos deslocamentos existentes na chapa de 8 mm.

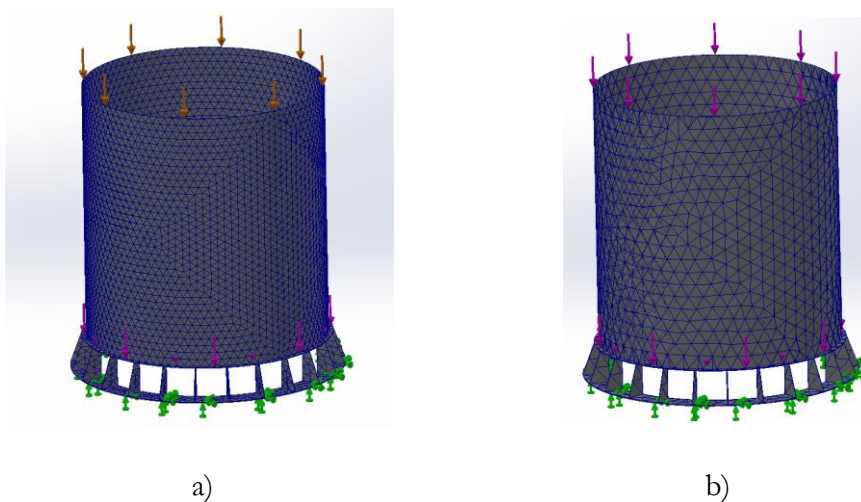


Figura 3.18 - a) Chapa 8 mm sem vigas: Malha com tamanho máximo 40 mm; b) Chapa 8 mm sem vigas: Malha com tamanho máximo 300 mm.

Realizou-se um estudo de convergência de malha para uma chapa de 8 mm. Neste estudo considerou-se a dimensão do elemento entre 300 mm e 40 mm. Como é possível verificar na figura 36, a partir da dimensão de elemento de 100 mm o deslocamento não apresenta alterações, sendo o seu erro de 0% e por isso entre o tamanho de elemento de 100 mm e a de 40 mm verifica-se convergência de malha relativamente à dimensão do elemento a usar. Por uma questão de capacidade computacional e tempo de cálculo seleccionou-se a malha de 100 mm como sendo a malha otimizada e por isso a usada nas restantes análises realizadas.

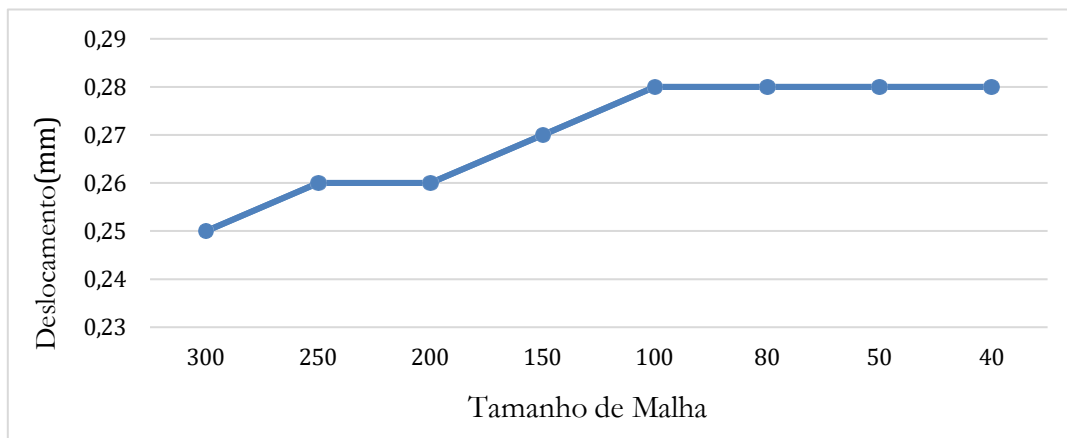


Figura 3.19 - Convergência do tamanho de malha.

3.3.2.1 Chapa de 8 mm sem vigas HEA180 de reforço

Ao simular a aplicação das cargas sem qualquer tipo de apoio à volta do ciclone, verifica-se que há a necessidade de aplicação de reforço estrutural. Futuramente, aquando da remoção da chapa deteriorada (que ficará por dentro) juntamente com o betão no seu interior, o único componente a suportar todo o acelerador de partículas será a chapa aplicada no encamisamento. Neste estudo, considera-se a aplicação de uma chapa de 8 mm de espessura em aço S235JR, tal como representado na Figura 3.20.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

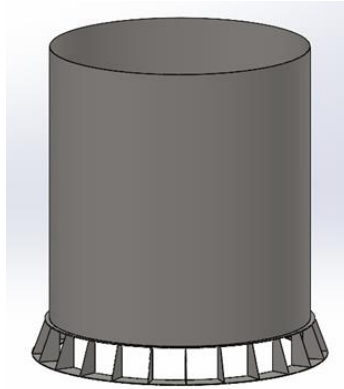


Figura 3.20 - Encamisamento 8 mm sem vigas de suporte.

O material utilizado é o mesmo do ciclone existente, o AISI S235JR cujas propriedades mecânicas são presentes na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do material AISI S235JR.

Propriedade	Valor
Densidade	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Tensão de Cedência	235 MPa
Limite de Resistência à Tração	360-510 MPa

O gráfico da Figura 3.21 representa os valores dos deslocamentos em função dos elementos.

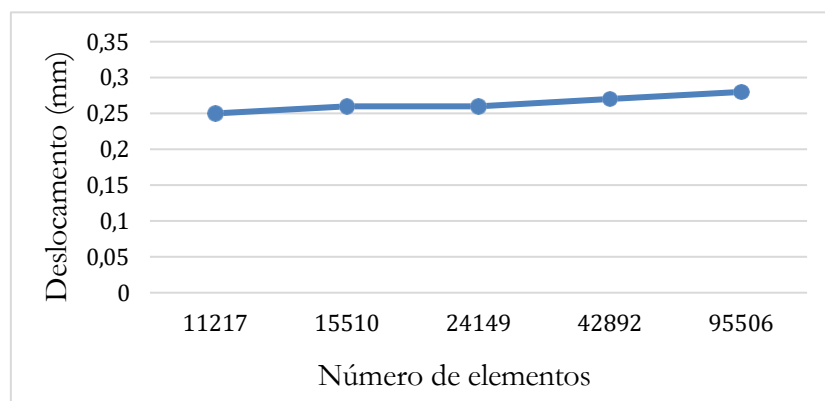


Figura 3.21 – Valores dos deslocamentos em função dos elementos (8 mm chapa).

Como é possível constatar pela Figura 3.21, não há uma variação significativa do valor do deslocamento, tendo-se conseguido a otimização da malha e a convergência da mesma.

O erro nos deslocamentos é aproximadamente zero o que permite verificar que se conseguiu atingir a convergência do tamanho da malha.

Na simulação foi gerada uma malha com tamanho de elemento de 100mm, anteriormente selecionado.

3.3.2.2 Chapa de 6 mm sem vigas HEA180 de reforço

A fim de tornar mais económico e também reduzir o peso que se está a introduzir na estrutura, realizou-se um segundo estudo, no qual se diminuiu a espessura da chapa em questão, mantendo o mesmo material. No estudo que se segue considerou-se uma chapa de 6 mm em aço S235JR (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Análise chapa 6 mm sem viga (malha 100 mm).

O gráfico da Figura 3.23 representa os valores dos deslocamentos em função dos elementos.

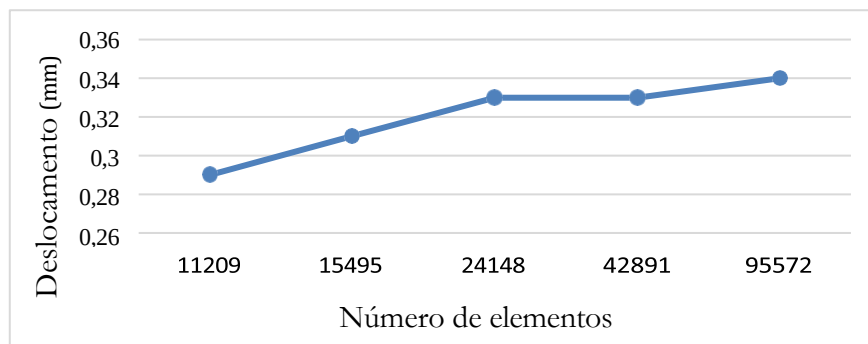


Figura 3.23 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (6 mm chapa).

Como é possível constatar pela Figura 3.23 há uma variação significativa do valor do deslocamento. Nos 3 últimos pontos os valores do deslocamento mantêm-se nos 0,3mm tendo convergido o valor obtido.

Os resultados obtidos com esta alteração de espessura da chapa serão apresentados mais à frente. A malha foi gerada considerando o tamanho do elemento de 100 mm.

3.3.2.3 Chapa de 4 mm sem vigas HEA180 de reforço

Realizou-se um terceiro estudo, no qual se diminuiu a espessura da chapa, mantendo mais uma vez o mesmo material, passando para uma chapa de 4 mm.

O gráfico da Figura 3.24 representa os valores dos deslocamentos resultantes em função dos elementos.

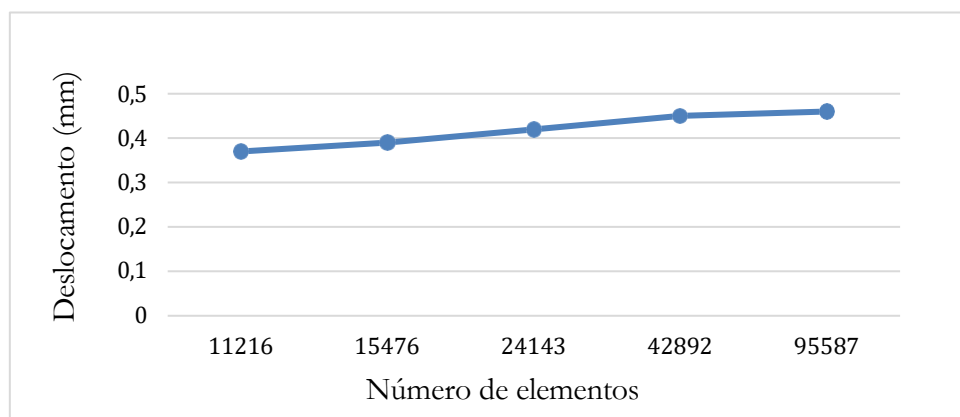


Figura 3.24 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (4 mm chapa).

Como é possível constatar pela Figura 3.24 há uma variação insignificante do valor do deslocamento. A variação é mínima sendo o erro do deslocamento de 1%.

No estudo que se segue considerou-se uma chapa de 4 mm em aço S235JR (Figura 3.25), considerando na construção da malha o tamanho do elemento de 100 mm.



Figura 3.25 - Análise chapa 4 mm sem viga (malha 100mm).

3.3.2.4 Chapa de 4 mm suportada por 4 vigas HEA180

A Figura 3.26 representa o estudo do encamisamento com chapa de 4 mm com quatro vigas de suporte HEA180.

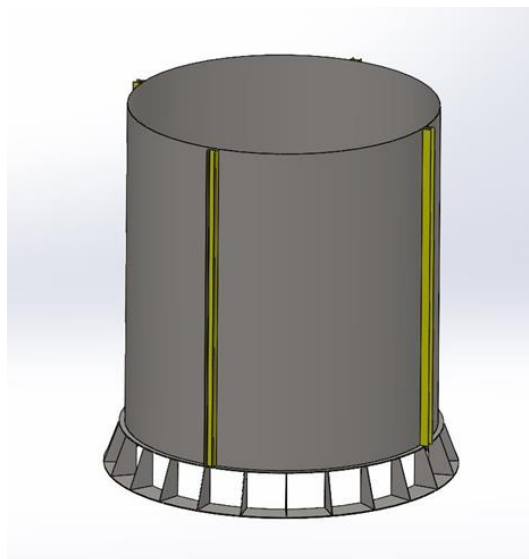


Figura 3.26 - Estudo encamisamento chapa de 4 mm com vigas de suporte HEA180.

Para este estudo, foi considerado que o ciclone está encamisado com uma chapa em S235JR de 4 mm.

A Figura 3.27 representa a base de suporte do ciclone: malha gerada com tamanho de elemento de 100 mm.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

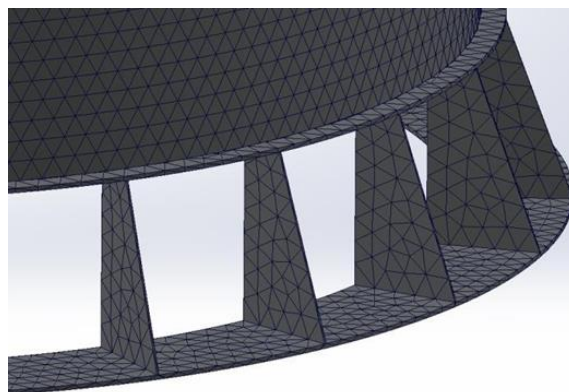


Figura 3.27 - Base de suporte do ciclone: malha com tamanho máximo de elemento de 100 mm.

De modo a obterem-se resultados precisos foi ajustado o tamanho de malha considerando que o elemento de maior dimensão tem 100 mm, conforme ilustra a Figura 3.28.

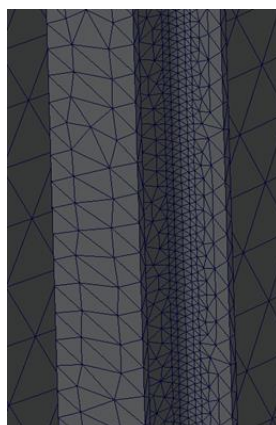


Figura 3.28 - Viga de sustentação: malha gerada com tamanho máximo de elemento de 100 mm.

O gráfico da Figura 3.29 representa os valores dos deslocamentos em função dos elementos.

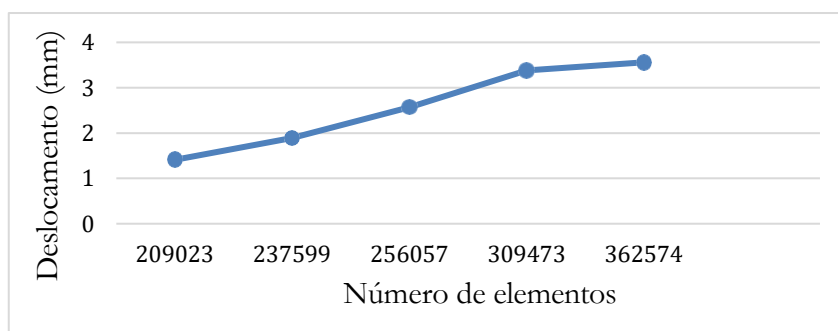


Figura 3.29 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (4 mm chapa com vigas).

Como é possível verificar na Figura 3.29 há uma variação significativa do valor do deslocamento. Apesar da variação, o erro do deslocamento é inferior a 5% para uma malha de 100 mm.

3.4 Análise da Estrutura Metálica

Realizou-se um estudo de convergência de malha, variando a dimensão do elemento entre 40 mm e 10 mm. A Figura 3.30 mostra uma imagem da malha para uma das situações consideradas.

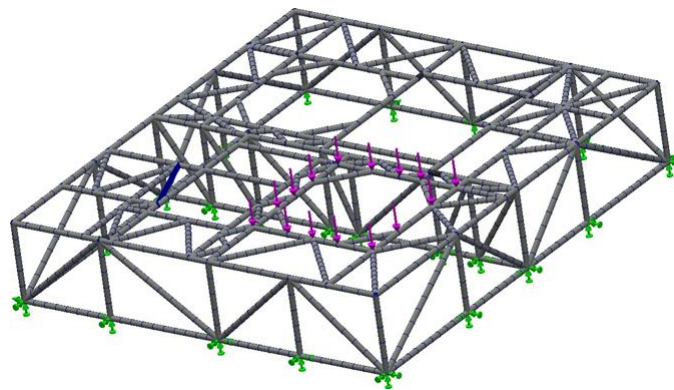


Figura 3.30 - Estrutura metálica (Malha de 40 mm).

A Tabela 3.3 apresenta para cada uma das situações o valor do deslocamento máximo resultante e o erro relativamente ao valor anterior. Expõe-se também o valor da tensão máxima de von Mises para cada uma das situações. Verificou-se que não ocorreu qualquer variação no valor do deslocamento máximo nem da tensão, por isso observa-se a convergência de malha.

Tabela 3.3 - Resultados da análise da estrutura metálica.

Dimensão do elemento (mm)	Número nós	Número elementos	Tensão von Mises (MPa)	Deslocamento (mm)	Erro tensões (%)	Erro deslocamentos (%)
40	20264	10610	322	33	0,00%	0,00%
30	37216	19058	322	33	0,00%	0,00%
100	727982	466807	322	33		

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Ao visualizar a Tabela 3.3 verifica-se que não há oscilação de resultados, e consequentemente os erros associados às tensões e aos deslocamentos são nulos. É possível observar que as tensões de von Mises calculadas pelo MEF estão muito perto da tensão de cedência do material (322 MPa). Assim sendo, verifica-se a convergência de resultados para os estudos realizados para esta estrutura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das diversas simulações e comentados os valores considerando uma otimização da solução final.

4.1 Variação de espessura de chapa sem vigas de reforço

4.1.1 Chapa de 8 mm

A Figura 4.1 representa a tensão na base de apoio do ciclone.

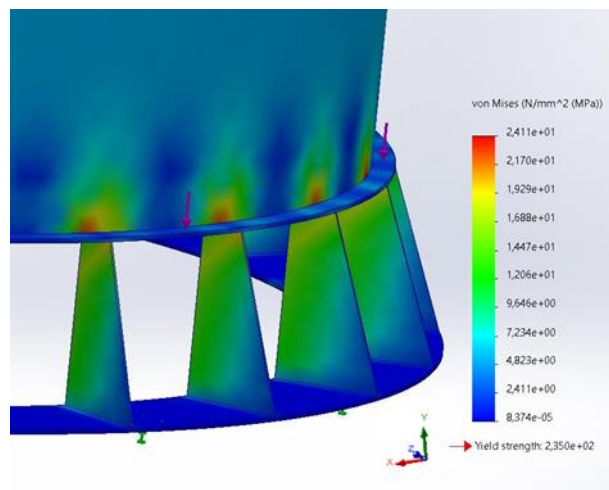


Figura 4.1 - Tensão na base de apoio do ciclone (estudo chapa de 8 mm sem vigas).

A tensão máxima (56 MPa) ocorre junto à base que serve de apoio ao ciclone, conforme visível na Figura 4.1. O valor máximo de tensão de von Mises observado é pouco expressivo visto o valor da tensão de cedência do material ser 235 MPa. Os deslocamentos apresentados são pouco significativos, sendo o deslocamento máximo de 0,23 mm, o que pode ser considerado desprezável.

A Figura 4.2 representa o deslocamento resultante para uma chapa de 8 mm sem vigas, sendo o deslocamento máximo de aproximadamente 0,23 mm.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

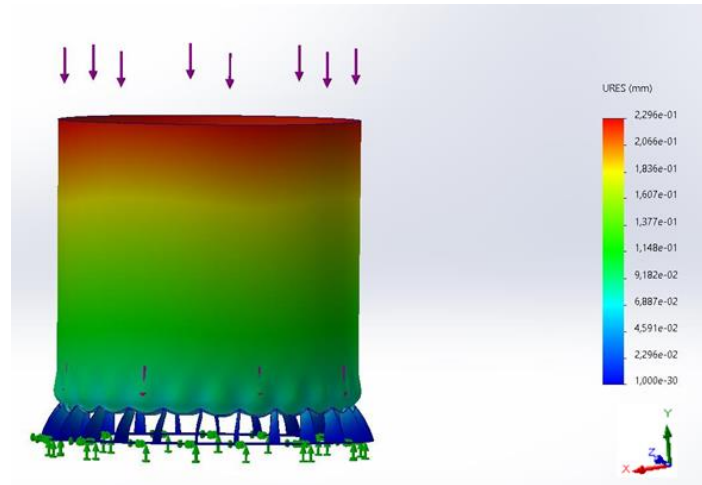


Figura 4.2 - Deslocamento resultante: Chapa 8 mm sem vigas.

Após análise dos deslocamentos nas três direções conclui-se que somente o deslocamento que ocorre no eixo dos YY e XX é relevante para a análise da estrutura. A Figura 4.3 representa o deslocamento máximo no eixo YY para uma chapa de 8 mm sem vigas, obtendo um valor máximo aproximado de $6,9\text{E-}05$ mm.

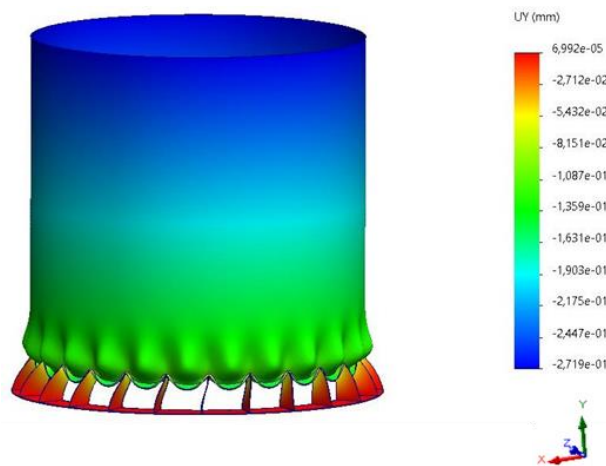


Figura 4.3 - Deslocamento máximo no eixo YY (Chapa 8 mm sem vigas).

A Figura 4.4 representa o deslocamento máximo no eixo XX para uma chapa de 8 mm sem vigas.

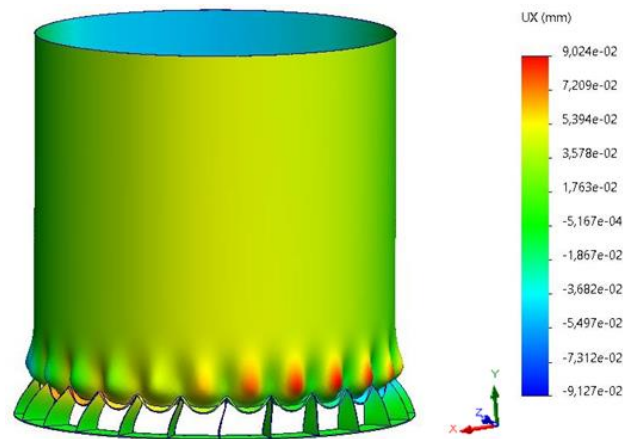


Figura 4.4 - Deslocamento máximo no eixo XX (Chapa 8 mm sem vigas).

Na Figura 4.3 é visível que neste estudo o encamisamento sofreu um deslocamento de cerca de 0,27mm em relação ao eixo YY, no topo onde é aplicada a carga que simula o peso do acelerador de partículas. Na Figura 4.4 verificou-se um deslocamento de 0,09 mm em relação ao eixo XX. Após análise conclui-se que os deslocamentos são pouco significativos considerando as dimensões do ciclone.

Após a simulação verifica-se que a tensão de cedência está muito longe de ser ultrapassada, pois a tensão de cedência do material é 235 MPa e a tensão máxima verificada foi de 56,1 MPa.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que a espessura da chapa está sobredimensionada para o projeto em questão havendo margem para alterações, assim vão ser analisadas outras espessuras de chapa de forma a otimizar este parâmetro.

4.1.2 Chapa de 6 mm

A Figura 4.5 representa a resultante das tensões de von Mises na base de apoio do ciclone.

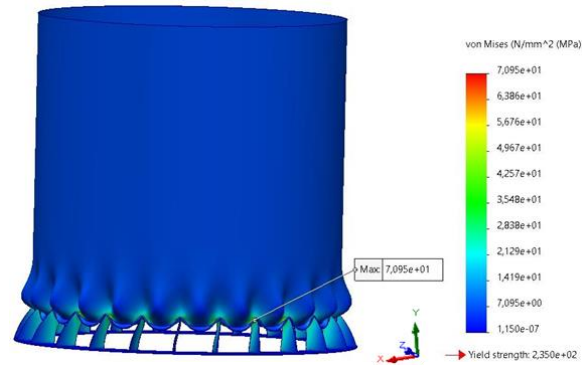


Figura 4.5 - Tensão na base de apoio do ciclone (Chapa de 6 mm sem vigas).

No estudo realizado com a chapa de 6 mm a tensão máxima de von Mises ocorreu na mesma secção da análise anterior para uma chapa de 8 mm. Verificou-se que os valores para os deslocamentos e tensões sofreram algumas alterações. A tensão máxima de von Mises aumentou relativamente ao estudo anterior, sendo este de 70,9 MPa.

A Figura 4.6 representa o deslocamento resultante para uma chapa de 8 mm sem vigas.

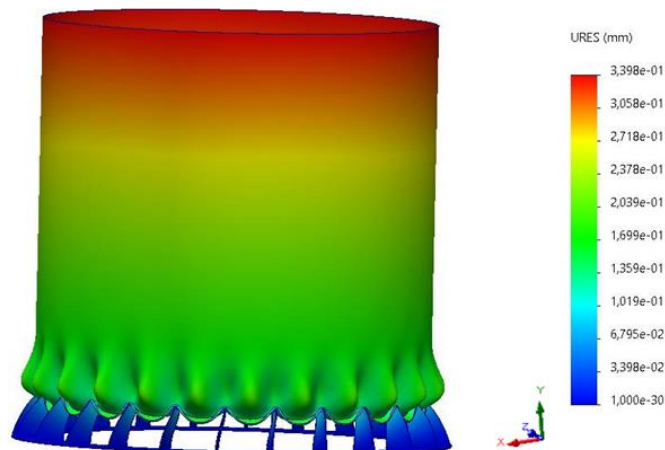


Figura 4.6 – Deslocamento resultante (Chapa 6 mm sem vigas).

A Figura 4.7 representa o deslocamento máximo no eixo YY para uma chapa de 6 mm sem vigas.

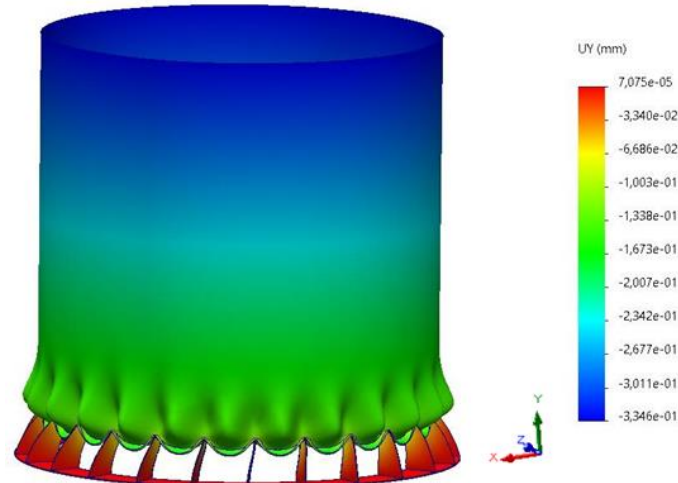


Figura 4.7 - Deslocamento eixo YY (análise chapa 6 mm sem vigas).

A Figura 4.8 representa o deslocamento máximo no eixo XX para uma chapa de 6 mm sem vigas.

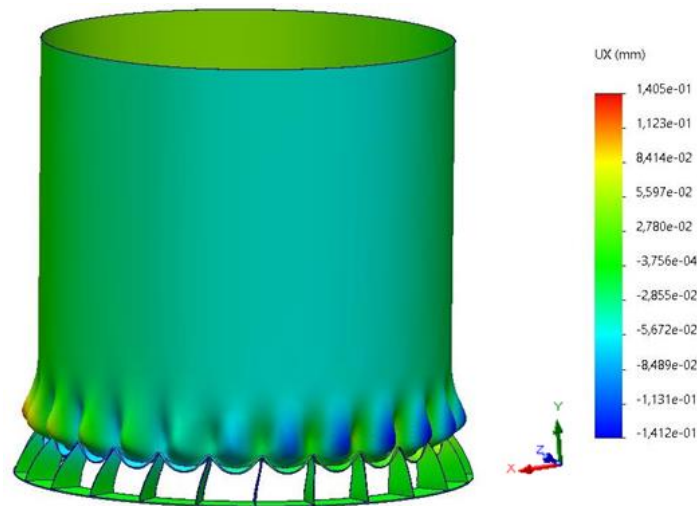


Figura 4.8 - Deslocamento eixo XX (Chapa 6 mm sem vigas).

Na simulação verificou-se um deslocamento máximo no eixo YY de 0,33 mm e no eixo XX de 0,14 mm. Estes valores de deslocamentos permitem concluir que é possível reduzir a espessura da chapa sem afetar a resistência e integridade estrutural do ciclone, não havendo qualquer fragilização da estrutura em questão.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise para uma chapa de 6 mm sem vigas HEA180 de reforço.

Tabela 4.1 - Resultados da análise, de 6 mm sem vigas HEA180 de reforço.

Tamanho do elemento	Número nós	Número elementos	Tensão von Mises (MPa)	Deslocamento (mm)
100	195457	95572	70,9	0,34

4.1.3 Chapa de 4 mm

A Figura 4.11 representa a tensão de von Mises na base de apoio do ciclone.

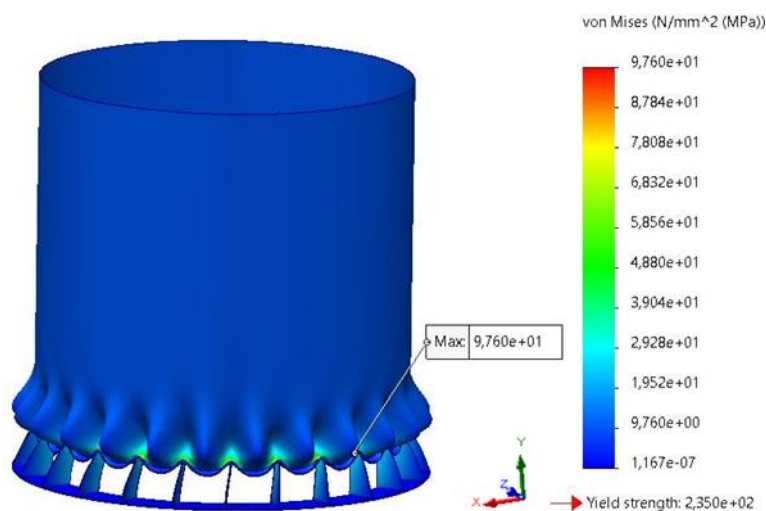


Figura 4.9 - Tensão von Mises na base de apoio do ciclone (Chapa de 4 mm sem vigas).

No estudo realizado com a chapa de 4 mm a tensão máxima de von Mises ocorreu na mesma secção avaliados nos estudos anteriores. Os valores dos deslocamentos e das tensões sofreram algumas alterações relevantes. A tensão máxima de von Mises verificada foi de 97,6 MPa, apesar de superior às anteriores continua longe da tensão

de cedência (235 MPa) e por isso é seguro aplicar uma chapa de 4 mm no lugar de uma de 8 mm ou 6 mm, reduzindo assim peso e custo.

Através dos resultados obtidos verifica-se que é possível aplicar chapa em aço S235JR de 4 mm e manter a resistência da estrutura.

A Figura 4.10 representa o deslocamento no encamisamento do ciclone.

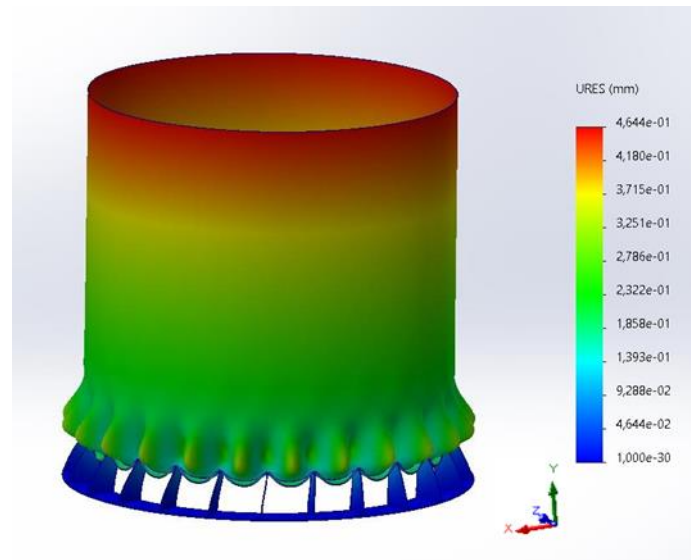


Figura 4.10 - Deslocamento resultante no encamisamento (Chapa de 4 mm sem vigas).

Neste estudo verificou-se um aumento no deslocamento resultante e das tensões aplicadas, tendo sido o deslocamento máximo de 0,46 mm e a tensão máxima de von Mises de 97,6 MPa. Apesar do aumento o valor do deslocamento continua a ser um valor bastante baixo e o valor de tensão máxima de von Mises (97,6 MPa) continua longe do valor de cedência do Aço S235JR (235 MPa).

Nas figuras 4.11 e 4.12 é possível verificar o deslocamento máximo em ambos os eixos YY e XX.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

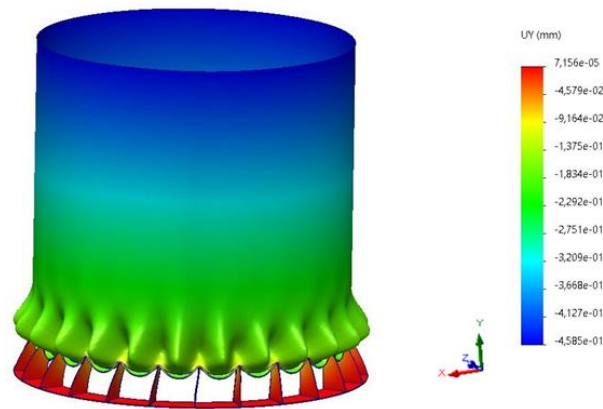


Figura 4.11 - Deslocamento máximo eixo YY (Chapa 4 mm sem vigas).

O deslocamento máximo no eixo YY é de 0,46 mm, sendo este um valor pouco significativo sendo também o deslocamento no eixo XX de 0,28 mm igualmente baixo.

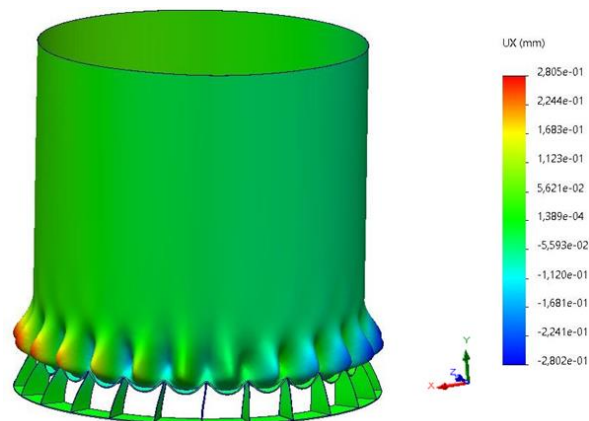


Figura 4.12 - Deslocamento máximo eixo XX (Chapa 4 mm sem vigas).

Como se verifica na Figura 4.13, é possível reduzir o tamanho da chapa até 4 mm mantendo a integridade estrutural do ciclone, não tendo sido verificados deslocamentos que representassem perigo. Ainda assim verificou-se que com a redução da espessura da chapa os deslocamentos máximos aumentam proporcionalmente. A chapa de 4 mm está quase no limite e por isso propõe-se usar as vigas de reforço.

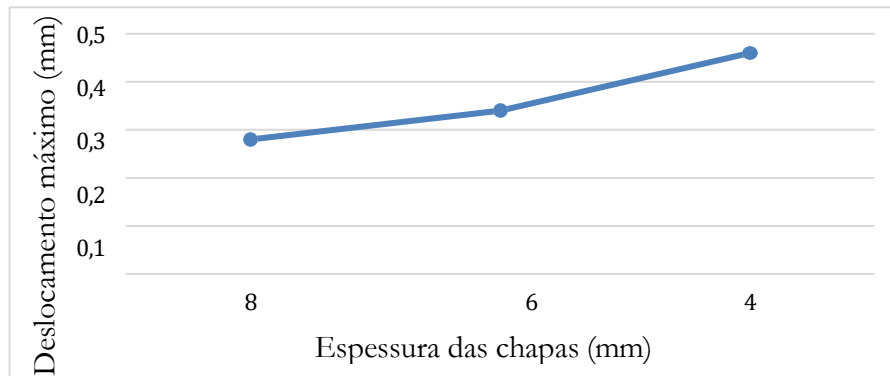


Figura 4.13 - Deslocamentos obtidos em função da espessura das chapas.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da terceira análise, de 4 mm sem vigas HEA180 de reforço.

Tabela 4.2 - Resultados da terceira análise, de 4 mm sem vigas HEA180 de reforço.

Tamanho do elemento	Número nós	Número elementos	Tensão von Mises (MPa)	Deslocamento (mm)
100	195465	95587	97,6	0,46

4.2 Chapa de 4 mm reforçada

A Figura 4.14 representa a tensão máxima de von Mises no anel de suporte.

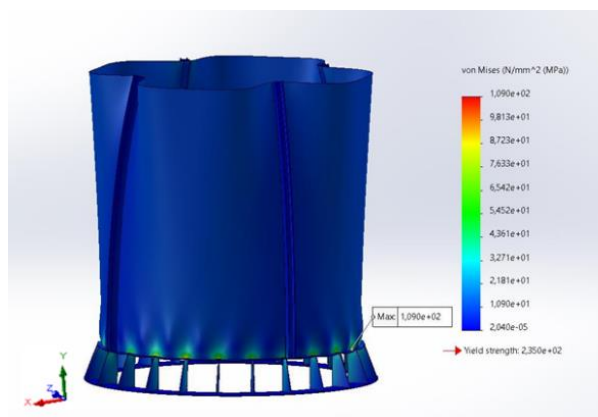


Figura 4.14 - Tensão máxima no anel de suporte (Chapa 4 mm reforçada).

A tensão máxima verificada neste estudo foi de 109 MPa, apesar de ser uma tensão mais alta que nas anteriores simulações, continua abaixo da tensão de cedência do aço S235JR (235 MPa).

A tensão máxima mais uma vez verificou-se no fundo do encamisamento, junto a anel de suporte.

A Figura 4.15 representa o deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX.

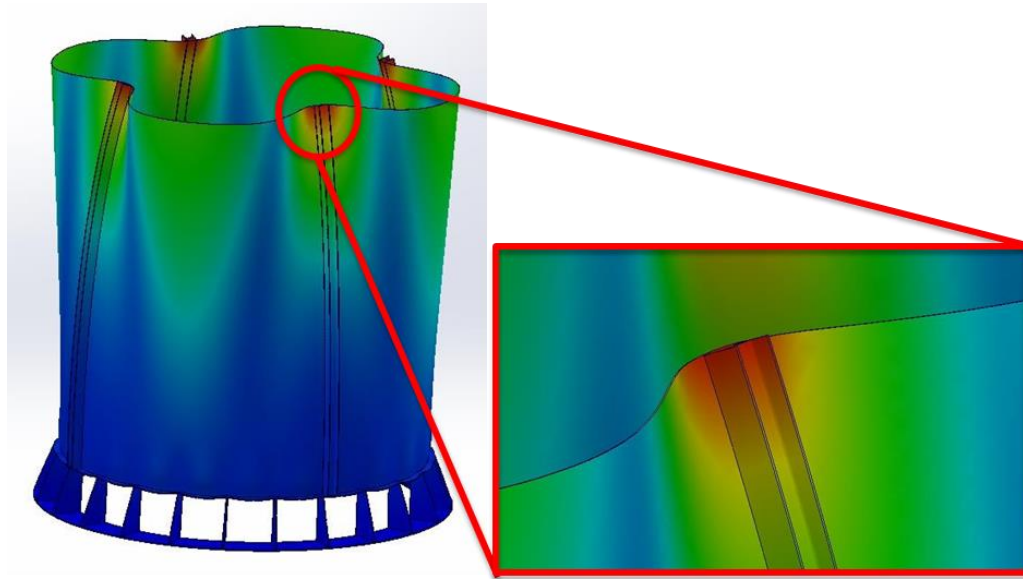


Figura 4.15 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX (Ampliado).

Avaliando os deslocamentos, o máximo verificado foi no topo da viga de reforço com 6300mm de altura. O deslocamento máximo é de 2,49 mm no eixo XX, no entanto é um valor relativamente aceitável considerando a altura do ciclone.

A Figura 4.16 representa o deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX.

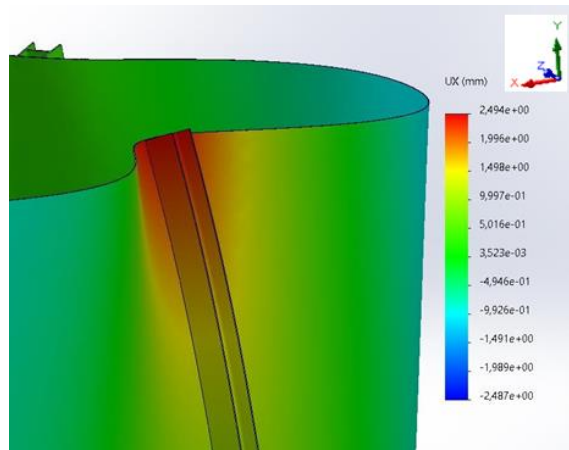


Figura 4.16 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo XX (Chapa de 4 mm reforçada).

Relativamente ao eixo YY, o deslocamento máximo foi identificado num ponto diferente. Apesar de menor e irrelevante, apenas 0,4 mm, o deslocamento máximo foi verificado na chapa do encamisamento onde é aplicada a carga.

A Figura 4.17 representa o deslocamento na chapa do ciclone, eixo YY.

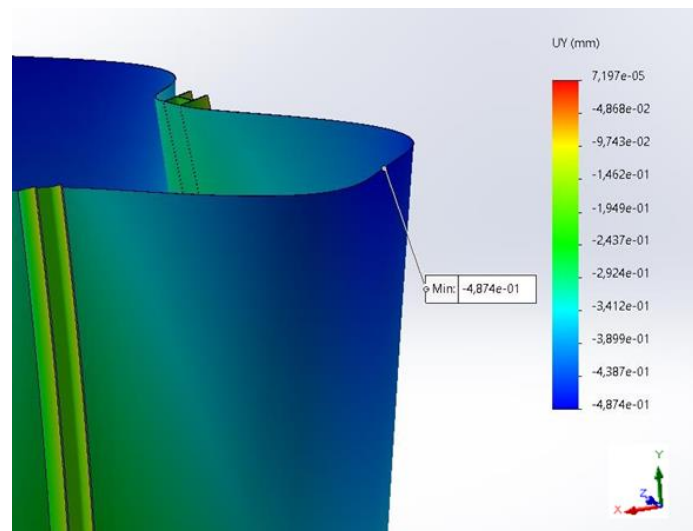


Figura 4.17 - Deslocamento na chapa do ciclone, eixo YY (Chapa de 4 mm reforçada).

A Figura 4.18 representa o deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo YY.

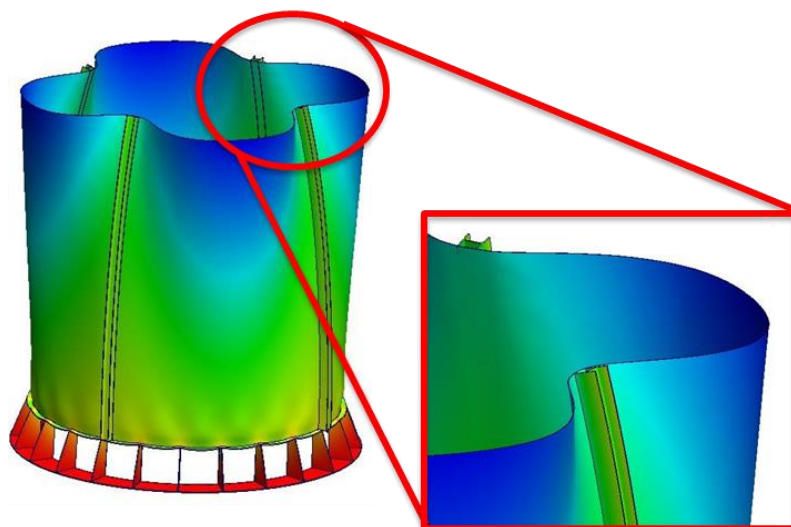


Figura 4.18 - Deslocamento na viga de apoio do ciclone, eixo YY (Ampliado).

Considerando a dimensão do ciclone e a altura da viga, os 2,49 mm retirados da simulação são insignificantes, no entanto, de forma a evitar que esta flexão ocorra, poderá optar-se por uma viga HE200A.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da quarta análise, de chapa de 4 mm suportada por 4 vigas.

Tabela 4.3 - Resultados da análise para uma chapa de 4 mm suportada por 4 vigas.

Tamanho do elemento	Número nós	Número elementos	Tensão von Mises (MPa)	Deslocamento (mm)
100	614194	309473	109	3,38

4.3 Resultados da análise da estrutura metálica

A Esta simulação serviu para testar se a estrutura atual é capaz de suportar a instalação das novas cargas inerentes ao encamisamento. O material utilizado é o AISI S355JR, no entanto nestas análises já é preciso ter em atenção as características mecânicas do mesmo. Essas propriedades mecânicas estão presentes na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do aço S355JR

Propriedade	Valor
Densidade	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Tensão de Cedência	355 MPa
Limite de Resistência à Tração	470-630 MPa

Na Figura 4.19 é possível visualizar a distribuição das tensões nas zonas mais solicitadas.

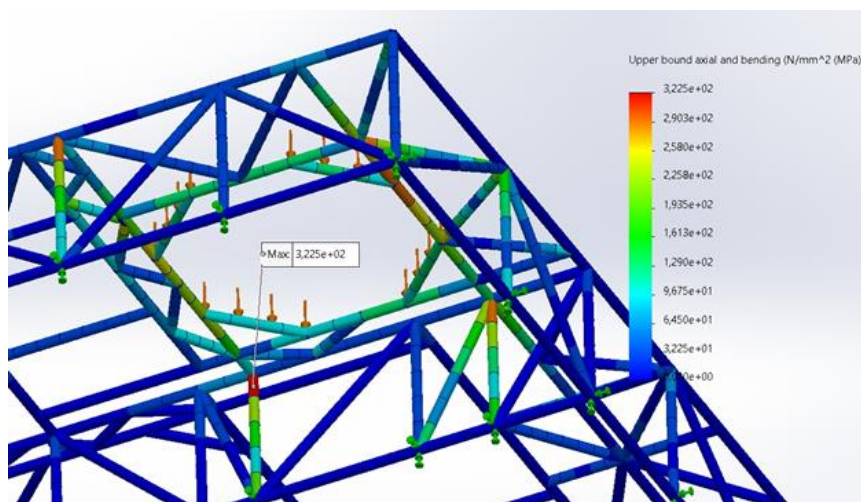


Figura 4.19 - Tensão máxima no ponto crítico da estrutura.

A tensão máxima verificada, que fica muito perto da tensão de cedência do material destas vigas (355 MPa), é de 322 MPa e esta verifica-se no topo de um dos pilares que fica diretamente abaixo do local onde é aplicada a carga em representação do

ciclone. Os restantes pilares, apresentam também valores de tensões elevadas no mesmo local do anteriormente referido.

Na Figura 4.20 é possível visualizar o deslocamento resultante máximo na análise da estrutura metálica.

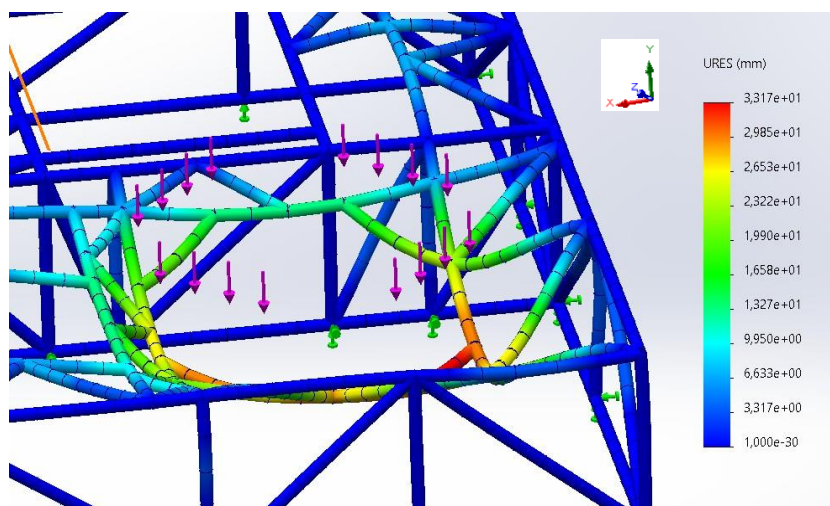


Figura 4.20 - Deslocamento resultante na análise da estrutura metálica.

O deslocamento resultante máximo verificado foi de 33 mm, o que para uma estrutura destas dimensões revela-se ser insignificante.

A deformação máxima na análise no eixo YY foi de 33 mm (Figura 4.21), e a deformação máxima na análise no eixo XX foi de 0,78 mm (Figura 4.22), havendo um erro relativo de 0% possível de verificar na Figura 4.23.

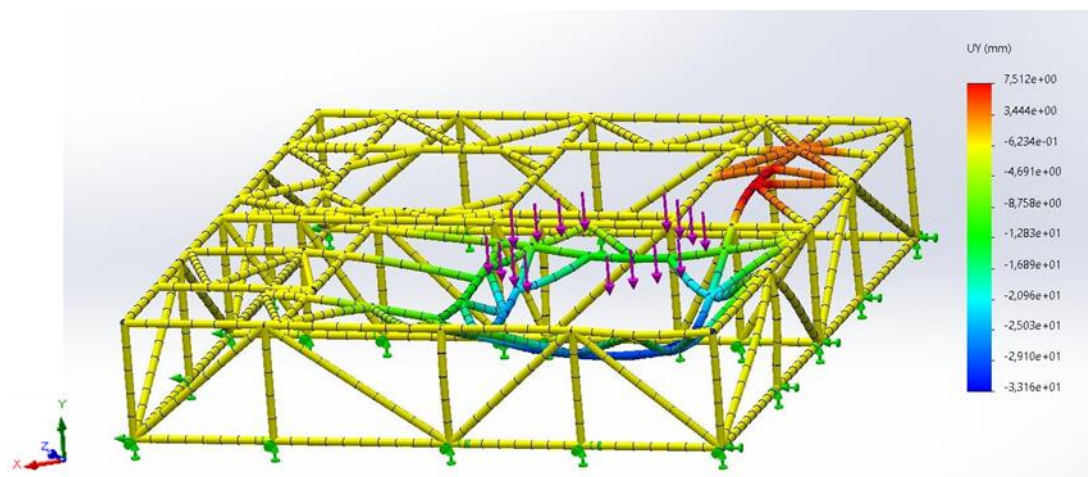


Figura 4.21 - Deslocamento máximo no eixo YY na análise da estrutura metálica.

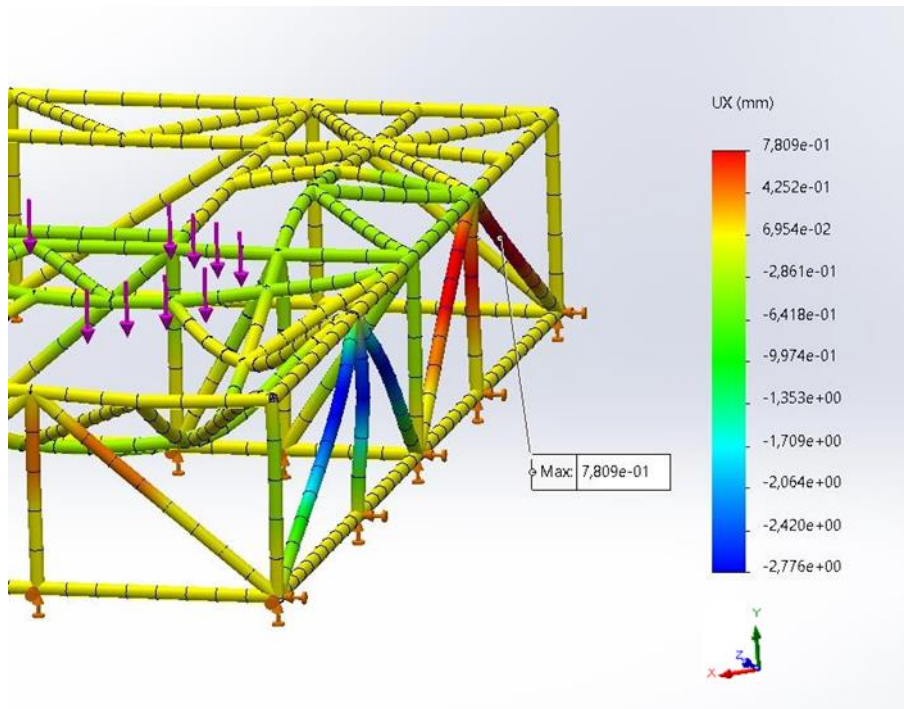


Figura 4.22 - Deslocamento máximo no eixo XX na análise da estrutura metálica.

O gráfico da Figura 4.24 permanece constante, indicando a convergência da malha, com os valores de tensão e deslocamento sendo os mais próximos possíveis da realidade.

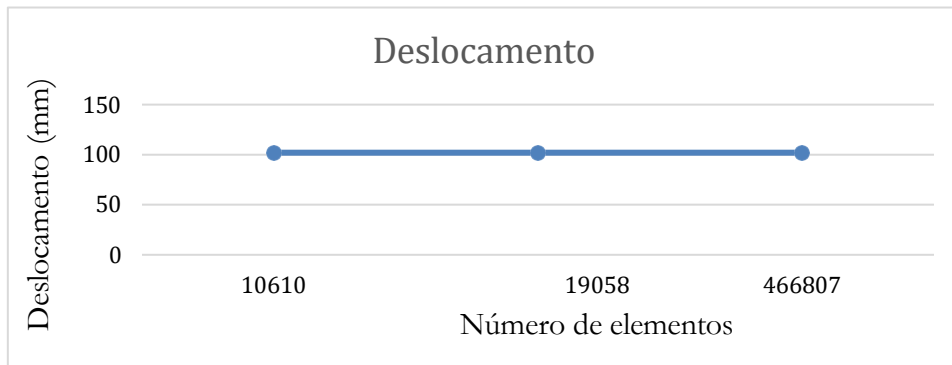


Figura 4.23 - Valores dos deslocamentos em função dos elementos (estrutura metálica).

5 CONCLUSÃO

O presente projeto abordou o desenvolvimento de uma solução otimizada para o encamisamento de um ciclone industrial e a análise da estrutura que o suporta, inserido no contexto da indústria cimenteira. O ciclone em análise desempenha um papel crítico no processo de produção de cimento, integrando a torre de ciclones responsável pela eficiência na transferência térmica e separação de partículas. No entanto, as condições operacionais severas a que está sujeito – temperaturas elevadas, presença de gases corrosivos e abrasividade do material – resultaram em desgaste acentuado e comprometimento da sua integridade estrutural.

Este projeto teve como objetivo principal garantir a operação segura e eficiente do ciclone, através da substituição da chapa externa degradada mediante um encamisamento. Simultaneamente, foi avaliada e redimensionada a estrutura de suporte, de modo a assegurar que a mesma seria capaz de suportar o peso adicional imposto pela nova camada de chapa. Este desafio foi abordado com rigor técnico, considerando fatores como a seleção de materiais, métodos de fabrico e soldadura, e análise estrutural por meio de ferramentas computacionais.

A escolha do material para o encamisamento foi realizada com base em critérios técnicos e económicos, com destaque para a resistência mecânica, resistência à corrosão, soldabilidade e custo. Foram analisados diversos materiais, incluindo aços de alta resistência ao desgaste, como o Hardox 450, e aços inoxidáveis como o AISI 316L e o Duplex 2205. Contudo, a análise demonstrou que o aço S235JR, amplamente utilizado em aplicações industriais devido à sua boa soldabilidade e custo reduzido, era a escolha mais apropriada. Apesar de não apresentar uma elevada resistência à corrosão ou ao desgaste, estas limitações são mitigadas pelo betão refratário que protege o interior do ciclone, tornando-o a solução ideal para esta aplicação.

Os processos de fabrico e de soldadura constituíram etapas críticas para a conformação da chapa de encamisamento. No que diz respeito à soldadura, o processo MIG/MAG foi identificado como o mais indicado, tanto pela sua versatilidade como pela facilidade de execução no local de instalação. A aplicação de técnicas apropriadas de soldadura foi fundamental para assegurar a integridade estrutural do encamisamento e evitar problemas como fissuração na zona termicamente afetada.

A análise estrutural, realizada através do MEF no *software* SolidWorks®, foi determinante para validar a capacidade da estrutura existente em suportar o aumento de carga decorrente do encamisamento e para otimizar as soluções de reforço. O modelo tridimensional do ciclone permitiu simular as condições reais de operação, incluindo o peso adicional da chapa e das camadas de betão refratário e isolante. Foi

analisado o carregamento, considerando variáveis como a remoção da chapa interna e do betão deteriorado, e o impacto destas operações na estabilidade estrutural. A necessidade de reforços adicionais foi confirmada e implementada através de vigas de suporte compatíveis com o material do encamisamento, garantindo uma dilatação térmica homogénea.

Embora a inclusão das vigas de reforço tivesse como objetivo a redução global das tensões na estrutura, observou-se um aumento localizado dos valores máximos de tensão em comparação com o modelo sem reforços. Este fenómeno explica-se pela concentração de tensões provocada pelo aumento localizado da rigidez estrutural nas zonas de interface entre a chapa e as vigas HEA180, efeito este conhecido em estruturas reforçadas. Ainda assim, a inclusão dos reforços resultou numa redução significativa dos deslocamentos globais e numa melhoria da estabilidade estrutural, aspetos determinantes para garantir a integridade operacional do ciclone. Assim, a solução adotada é considerada adequada, uma vez que assegura uma melhor distribuição dos esforços, minimiza a deformação e prolonga a vida útil do equipamento, apesar do aumento pontual de tensões em zonas específicas.

A avaliação de chapas com diferentes espessuras forneceu informações relevantes. A chapa de 8 mm apresentou uma tensão máxima de 56 MPa e deslocamento de 0,23 mm, enquanto a de 6 mm registou 70,9 MPa e 0,33 mm. A chapa de 4 mm, sem reforço, atingiu 97,6 MPa e 0,46 mm, demonstrando que, embora atenda aos critérios de segurança, oferece uma margem de estabilidade reduzida.

A reposição das características geométricas internas do ciclone também foi devidamente analisada. O uso de betão isolante de baixa densidade para compensar o volume perdido revelou-se uma solução eficiente para manter o diâmetro interno, parâmetro crítico para a eficiência do ciclone na separação de partículas.

Em suma, este projeto demonstra a capacidade de aplicar uma abordagem técnica e analítica para solucionar o problema apresentado. As soluções desenvolvidas asseguram a continuidade operacional do ciclone com segurança e eficiência, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo da cimenteira.

6 REFERÊNCIAS

- [1] D. Santos, “Caracterização e Otimização Energética de uma Unidade Fabril do Setor Automóvel,” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2017.
- [2] G. Makridou, K. Andriosopoulos, M. Doumpos e C. Zopounidis, “Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries,” vol. 88, pp. 573-583, Janeiro 2016.
- [3] “Energia em Números | 2021,” [Online]. Available: https://www.ffms.pt/sites/default/files/2022-07/Energia_em_numeros_vfinal_1.pdf. [Acedido em 31 Agosto 2023].
- [4] R. Pinto, “Eficiência energética e exergetica da indústria do cimento,” Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2018.
- [5] A. T. d. I. d. Cimento, “Indústria: Contributo para a Economia Circular,” [Online]. Available: <https://www.atc.pt/industria-economia-circular/>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [6] A. P. d. Ambiente, “Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050,” [Online]. Available: <https://apambiente.pt/clima/roteiro-para-neutralidade-carbonica-2050>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [7] J. R. T. d. Figueiredo, “Gestão de uma Rede de Ar Comprimido,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.
- [8] A. Silva, “Otimização do Procedimento de Monitorização de Fugas e das Perdas de Carga do Sistema de Ar Comprimido,” Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga, 2020.
- [9] A. Copco, Compressed Air Manual 7th edition, Belgium: Atlas Copco Airpower NV, 2010.
- [10] Cimpor, “Quem somos,” 2023. [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/>. [Acedido em Julho 2023].
- [11] Cimpor, “Porcesso de produção de cimento,” [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/documents/20124/373571/PROCESSO+PRODUTIVO+DE+CIMENTO+LEGENDADO.pdf/d28e9029-75db-8247-87bc-30cd299f6202?t=1645022206442>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [12] P. Training, Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido, Jacareí: Apostila M1004 BR, 2006.
- [13] A. Santos e A. Silva, Automação Pneumática: Produção, Tratamento e Distribuição de Ar Comprimido, Porto: Publindústria, 2014.
- [14] A. M. A. D. Freitas, “Eficiência energética em sistemas de ar comprimido,” Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.
- [15] ADENE, “Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido,” 2014. [Online]. Available:

- https://www.erse.pt/media/wqvjvee2/mee_sistemasarcomprimido_adene_ppec2013-2014.pdf. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [16 H. D. Olesko, “Uma proposta de eficiência energética para Sistemas de Ar Comprimido Industriais,” Monografia de Especialização, Departamento de Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [17 J. Novais, *Ar Comprimido Industrial: Produção, Tratamento e Distribuição*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1995.
- [18 E. Augusto]LN, “Compressores Industriais,” [Online]. Available: <https://engmecatonico.blogspot.com/2009/10/augusto.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [19 Ques10, “Draw neat diagram of root blower and explain its working,” [Online]. Available: <https://www.ques10.com/p/33134/draw-neat-diagram-of-root-blower-and-explain-its-1/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [20 “Compressores rotativos de palhetas deslizantes e deslizantes,” [Online]. Available: <https://www.ref-wiki.com/pt/content/view/31166/28/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [21 OMEL, “Como funciona uma Bomba de Vácuo de Anel Líquido,” [Online]. Available: <https://www.omel.com.br/artigos-tecnicos/escola-de-bombas/bombas-de-vacu-de-anel-liquido/como-funciona-uma-bomba-de-vacu-de-anel-liquido/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [22 SlidePlayer. [Online]. Available: <https://slideplayer.com.br/slide/1241963/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [23 A. Copco. [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/wiki/compressed-air-articles/tooth-compressors>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [24 “Compressor de Parafuso,” [Online]. Available: <https://www.mtibrasil.com.br/artigos/compressor-de-ar-parafuso-vs-pistao.php>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [25 P. F. d. L. Oliveira, “Análise da Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido de Baixa Pressão,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2018.
- [26 D. D. Ferreira, “Supervisão e controlo remoto da Iluminação e Ar,” Relatório de Projeto. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2019.
- [27 J. P. S. C. Aniceto, “Optimização de unidades de secagem de ar por adsorção recorrendo a técnicas de planeamento de experiências,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [28 A. Copco, “Direct Industry,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/atlas-copco-compressors/product-5575-1797881.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [29 M. d. Economia, “Decreto-Lei nº 97/2000,” [Online]. Available: <https://dre.tretas.org/dre/114953/decreto-lei-97-2000-de-25-de-maio>.

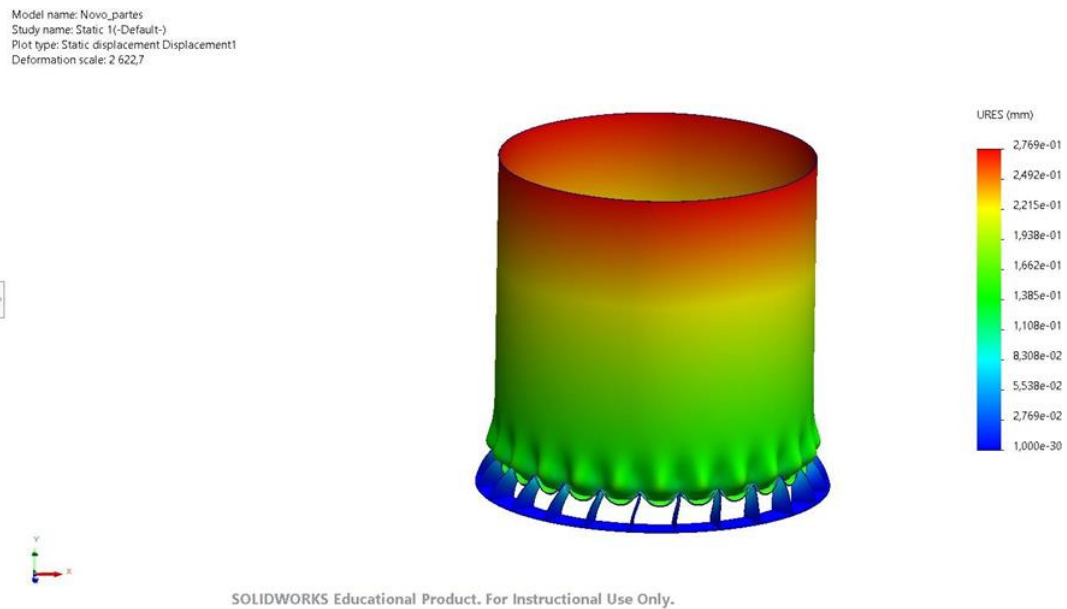
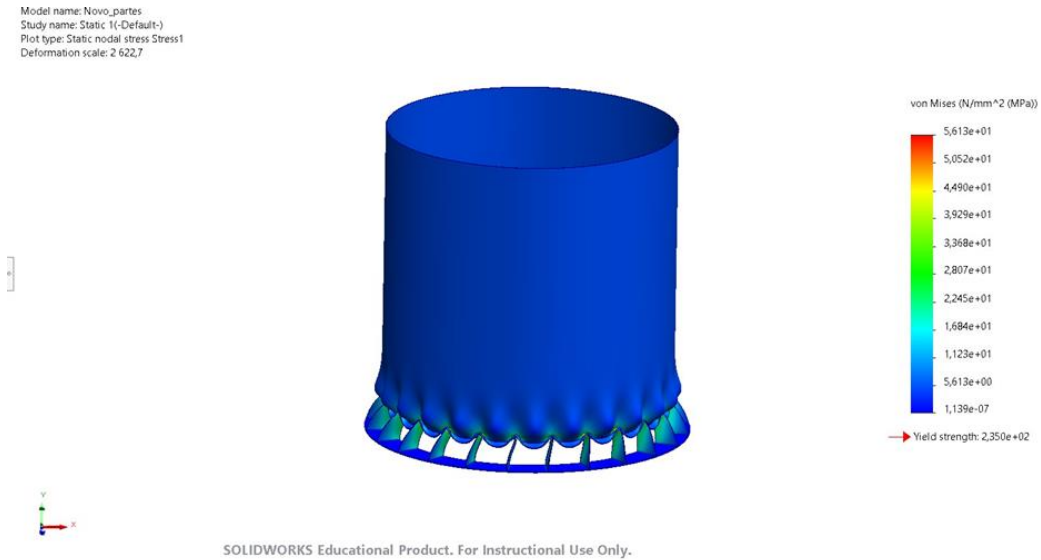
- [30] “Silo.Tips,” [Online]. Available: <https://silo.tips/download/rede-de-ar-comprimido>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [31] “Ponto do Encanador,” [Online]. Available: <https://www.pontodoencanador.com/produto/i-galv-cotovelo-mf-90-x-12.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [32] “Xintai Valve Group,” [Online]. Available: <https://www.xintaivalves.com/pt/products/cryogenic-globe-valve-2/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [33] “Truper,” [Online]. Available: <https://www.truper.com/valvulas-de-esfera-roscables-alta-presion-600-psi.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [34] “Proxira,” [Online]. Available: <https://proxira.pt/filtros-reguladores-lubrificadores/9506-filtro-lubrificador-e-desumidificador-14-com-regulador-de-pressao.html?srsId=AfmBOorot1bVp4TaKVCion3wR-QEOGwOa-SvBA49ieo01MCnVtawvvOoygc>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [35] “Ciclo Plan do act check,” [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=CICLO+Plan+do+act+check&tbm=isch&ved=2ahUKEwib_Jq_ovGCAxWHTScChEG-DzQQ2-cCegQIABAA&oeq=CICLO+Plan+do+act+check&gs_lcp=CgNpbWcQAzoKCAAQgAQQigUQQzoFCAAQgAQ6BAgAEB46BggAEAUQHjoHCAAQgAQQEzoICAAQCBAeEBM6BggAEAgQHlClCVjdI2CwJWgAcA. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [36] B. R. Munson, D. F. Young e T. H. Okiishi, Fundamentos da Mecânica dos Fluidos, Edgard Blucher, 2004.
- [37] “Cimpor-Quem somos,” [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/a-cimpor/quem-somos>. [Acedido em 31 Agosto 2023].
- [38] A. Copco, “Air Compressor Room Design: Optimal Working Conditions,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/wiki/compressed-air-articles/optimal-working-conditions-compressor-room>. [Acedido em 01 Dezembro 2023].
- [39] M. F. B. Abdullah, “Study and Design of Compressed Air System for Optimum Operation,” Dissertation of Bachelor of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, 2008.
- [40] A. Copco, “Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido,” ADENE-Agência para a Energia, 2016.
- [41] Aquatropic, “Compressores Radiais,” 2023. [Online]. Available: <https://aquatropic.com.br/produtos-geral/compressorradiar/>. [Acedido em 12 Agosto 2023].
- [42] “Compressor do motor,” Hagar MMA, [Online]. Available: <https://hangarmma.com.br/glossary/glossary-categories/compressor-do-motor/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [43] A. Copco, “Rede de ar comprimido: como dimensionar corretamente?,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/como-dimensionar-rede-ar-comprimido>. [Acedido em 28 Setembro 2023].

- [44] “Soluções eficientes em Ar Comprimido,” [Online]. Available: <http://equipoar.com.br/produto.php?i=49>. [Acedido em 05 novembro 2023].
- [45] L. J. S. Dias, “Estudo da Otimização da Produção de uma Central de Ar Comprimido de Baixa Pressão,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico do Porto, Porto, 2020.
- [46] C. PNEUMATIC, “Compressores Brasil,” [Online]. Available: <https://compressoresbrasil.com.br/produto/242>. [Acedido em 02 Dezembro 2023].
- [47] A. P. d. Ambiente, “Fator de emissão da eletricidade,” Amadora, 2022.
- [48] B. Pratas, “Otimização de Estratégias de Manutenção Industrial em Transformadores de Potência,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. , Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra , 2019.
- [49] A. C. Brasil, “Tubulação de ar comprimido: compare tipos e características,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/tubulacao-de-ar-comprimido-tipos-e-caracteristicas>. [Acedido em 15 janeiro 2024].
- [50] A. C. Brasil, “Tubulação de ar comprimido: compare tipos e características,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/tubulacao-de-ar-comprimido-tipos-e-caracteristicas>.
- [51] A. C. Portugal, “Escolha o material das tubagens para ar comprimido,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/service/parts/airnet-piping>.
- [52] T. M. S. Pires, “Proteção à corrosão de estruturas de aço,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2018.
- [53] AIRNET, “Stainless steel piping for your compressed air, vacuum and inert gasses applications,” [Online]. Available: <https://www.airnet-system.com/en/air-piping-systems/stainless-steel-compressed-air-piping-system>.
- [54] A. C. Portugal, “GA VSD^s SERIES,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-compressor/rotary-screw-compressor/ga-vsds-series>.
- [55] A. Copco, “General Catalog for Compressed Air, Gas and Vacuum Solutions,” [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/brochures/CT%20Catalogue_Full.pdf.
- [56] A. Copco, “Compressores de parafuso lubrificado a óleo GA (VSD⁺),” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-compressor/rotary-screw-compressor/ga-series>.
- [57] A. Copco, “Secadores de ar por refrigeração industrial FX,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/products/air-dryers/refrigerant-air-dryers/fx-industrial>.

- [58 B. compressores, “Borbon compressores,” [Online]. Available: <https://www.compressoresborbon.com.br/produtos/separador-de-oleo-agua-osc-35-2400-atlas-copco/>.
- [59 “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitoriza.dia/>.
- [60 B. Pratas, “Otimização de Estratégias de Manutenção Industrial em Transformadores de Potência,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra , 2019.
- [61 Amaral, Gestão da Manutenção Industrial, Lidel, 2016.

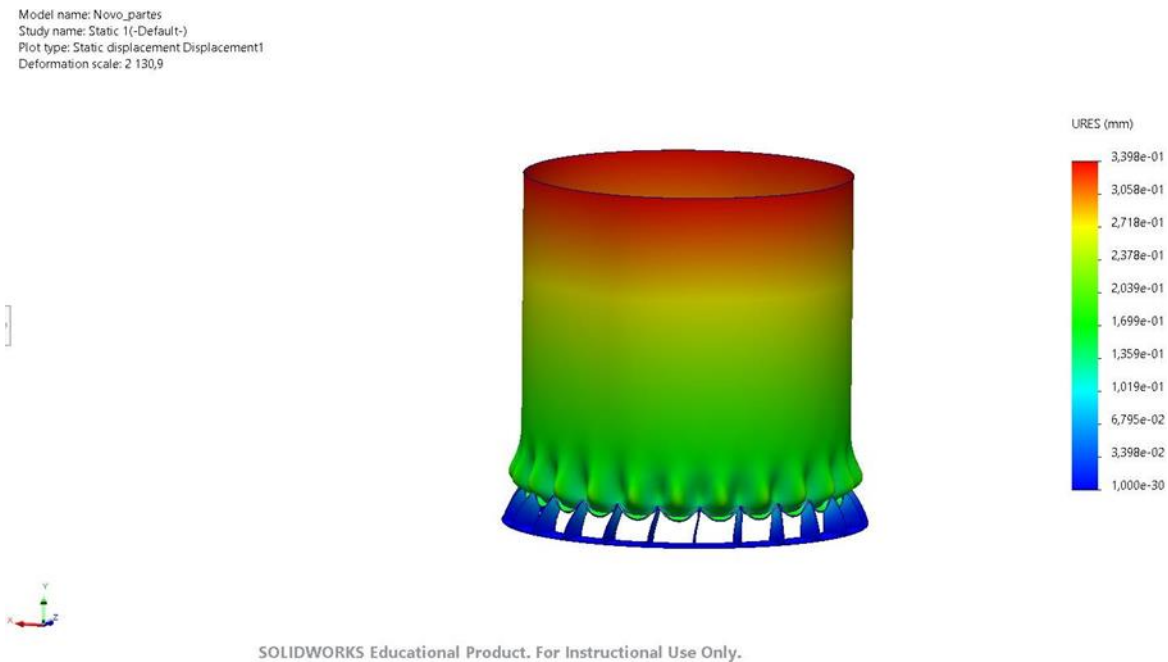
ANEXOS

Anexo A – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 8 mm



Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Anexo B – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 6 mm.

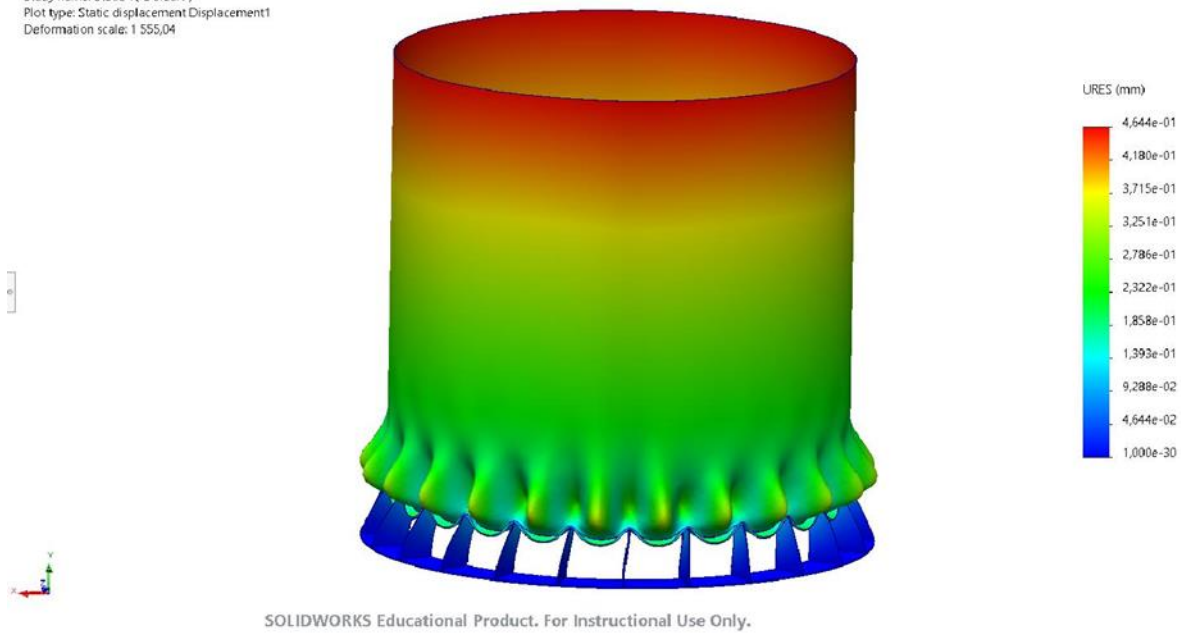


Anexo C – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 4 mm

Model name: Novo_partes
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1.555,04

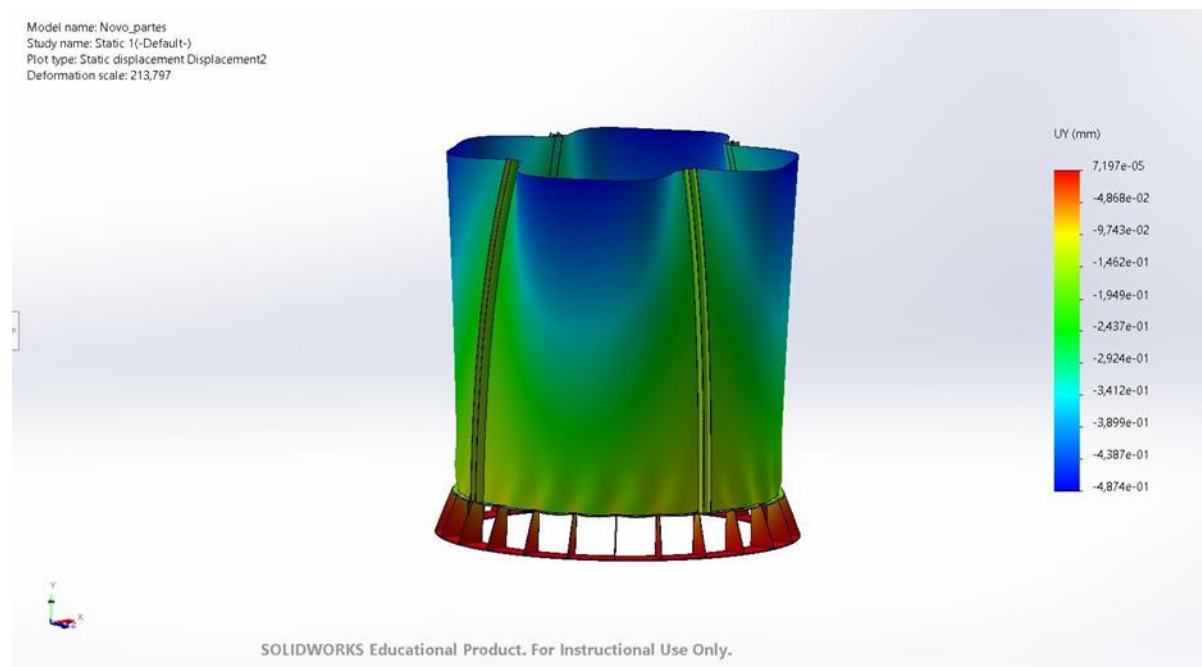


Model name: Novo_partes
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1.555,04

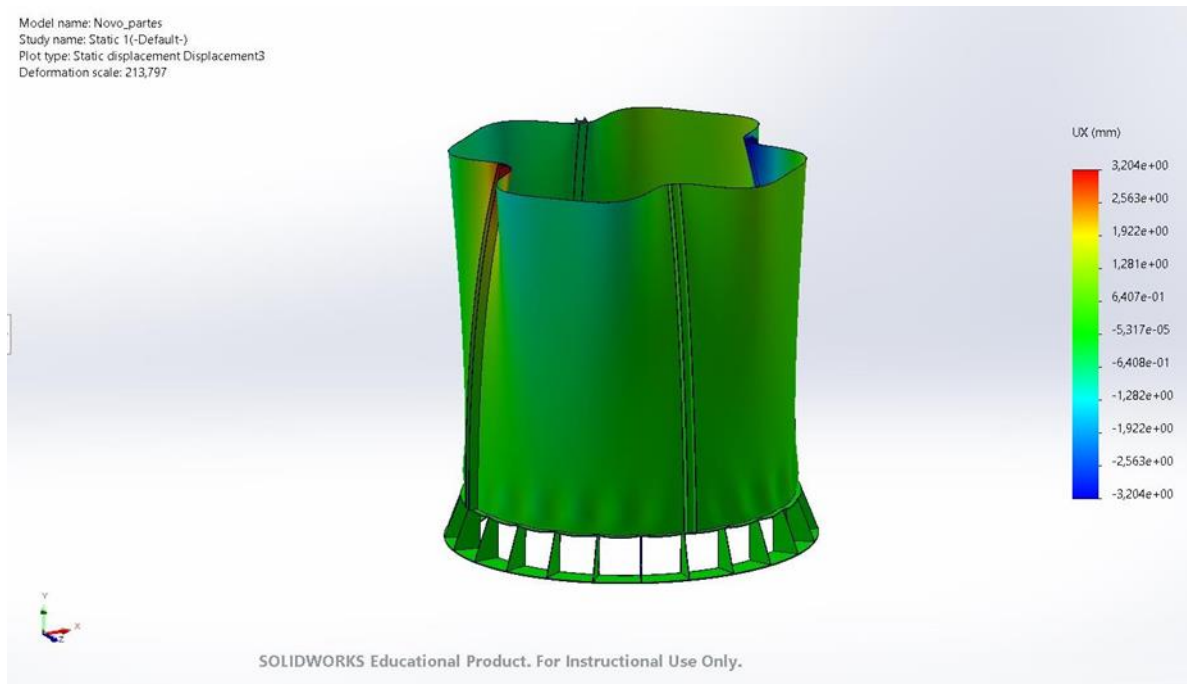


Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

Anexo D – Simulações realizadas ao ciclone com uma chapa de 4 mm.

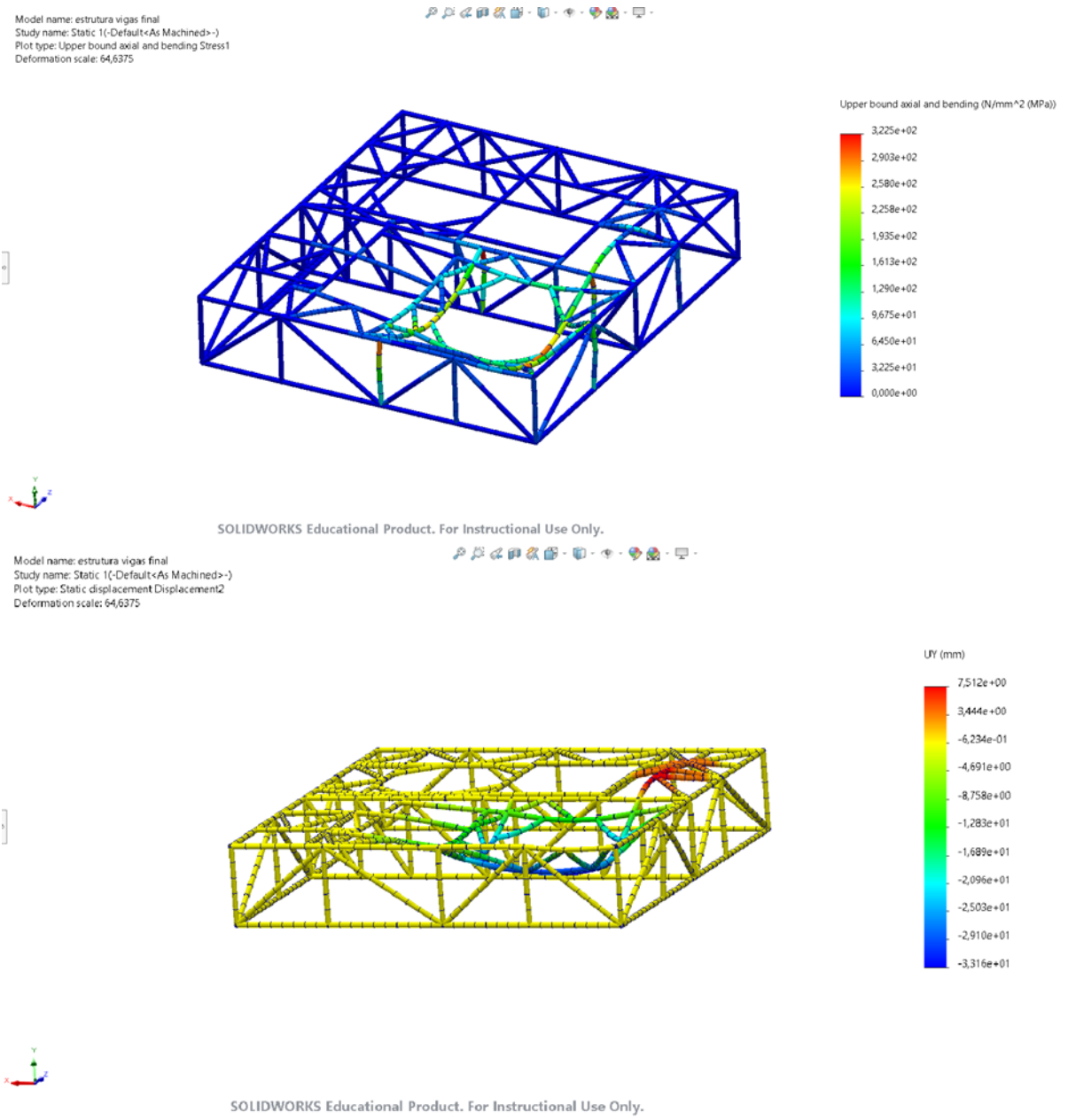


Model name: Novo_partes
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement3
Deformation scale: 213,797



Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

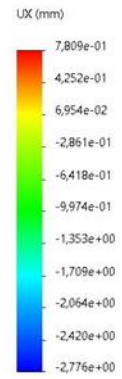
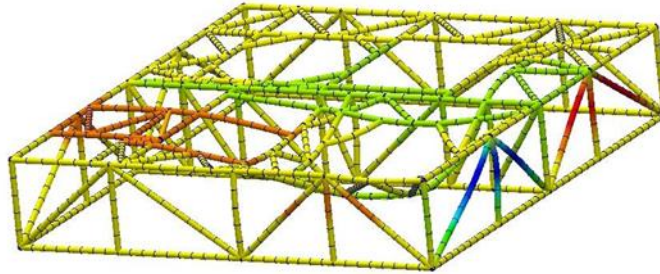
Anexo E – Simulações realizadas à estrutura metálica que suporta o ciclone



Model name: estrutura vigas final
Study name: Static 1(-Default<As Machined>-)
Plot type: Static displacement Displacement3
Deformation scale: 64,6375



1



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Desenvolvimento de uma Solução Otimizada para Encamisamento de um Ciclone e Redimensionamento da Estrutura que o suporta

APÊNDICES

Apêndice A – Fichas técnicas do betão refratário e do betão isolante



FICHA TÉCNICA CALDE™ CAST F 48 E

TIPO DE PRODUCTO:	Producto silico aluminoso
Temperatura máxima recomendada:	Hormigón regular denso 1450°C
Componente principal:	Chamota / bauxita
Tipo de ligante:	Hidráulico
Aspecto:	Seco para adición de agua
Embalaje:	Sacos
Almacenaje:	12 meses
Método de instalación:	Vibrado
Tamaño máximo de grano:	6 mm
Material requerido por m³:	2.03 T/m³
Agua potable requerida para mezclar en obra:	9/13 litros por 100 kgr. de material seco
Consejos:	Instalación Nr 5

PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS	NORMAS	VALORES MEDIOS	UNIDADES
<u>ANÁLISIS QUÍMICO</u>			
Al ₂ O ₃	EN ISO 1927-3	47	%
SiO ₂	EN ISO 1927-3	44	%
Fe ₂ O ₃	EN ISO 1937-3	1.1	%
<u>PROPIEDADES FÍSICAS</u>			
<u>Medido en muestras preparadas de acuerdo a</u>	EN ISO 1927-5	-	-
<u>Densidad aparente</u> después de cocido a 800 °C	EN ISO 1927-6	2.01	g/cm3
<u>Resistencia a la compresión en frío</u> después de secado a 110 °C	EN ISO 1927-6	42	MPa
después de secado a 800 °C	EN ISO 1927-6	23	MPa
después de cocido a 1200 °C	EN ISO 1927-6	20	MPa
<u>Deformación lineal permanente</u> después de cocido a 800 °C	EN ISO 1927-6	-0.2	%
después de cocido a 1200 °C	EN ISO 1927-6	-0.3	%
<u>Conductividad térmica</u> a una temperatura media de 500 °C	EN ISO 1927-6	0.98	W/mK
a una temperatura media de 800 °C	EN ISO 1927-6	0.99	W/mK
a una temperatura media de 1200 °C	EN ISO 1927-6	1.06	W/mK

Código comercial: 11001

Versión: 5

Fecha: 240314

Los valores indicados son valores medios de fabricación. No pueden ser considerados como límites de una especificación.



FICHA TECNICA

CALDE® CAST LW MIX 124 C/G E

TIPO DE PRODUCTO	: Producto sílico-aluminoso
Temperatura máxima recomendada	: 1140 °C
Componente principal	: Vermiculita, Agregados ligeros
Tipo de ligante	: Hidráulico
Aspecto	: Seco para adición de agua
Embalaje	: Sacos
Almacenaje	: 12 meses
Método de instalación	: Colado (Compactado con barras , mínima vibración), Gunitado
Tamaño máximo de grano	: 4 mm
Material requerido por m³	
Colado	: 0.95 t/m3
Gunitado	: 1.20 t/m3 (Incluido el rebote)
Agua requerida para mezclar en obra	
Colado	: 43.0 / 50.0 litros por 100 kgr. de material seco
Gunitado	: Añadir en la boquilla
Consejos	: Instalación Nr 9

PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS	NORMAS	VALORES MEDIAS		UNIDADES
		Vertido	Gunitado	
ANÁLISIS QUÍMICO				
SiO ₂	EN ISO 1927-3	35.0		%
Al ₂ O ₃	EN ISO 1927-3	26.0		%
CaO	EN ISO 1927-3	21.5		%
Fe ₂ O ₃	EN ISO 1927-3	8.5		%
PROPIEDADES FÍSICAS				
<u>Medido en muestras preparadas según la norma</u>	-	EN ISO 1927-5	CALD010	-
<u>Densidad aparente</u>				
después de cocido a 800 °C	EN ISO 1927-6	0.92	1.05	g/cm3
<u>Resistencia a la compresión en frío</u>				
después de secado a 110 °C	EN ISO 1927-6	1.9	2.4	MPa
después de cocido a 800 °C	EN ISO 1927-6	1.7	2.3	MPa
<u>Deformación lineal permanente</u>				
después de secado a 110 °C	EN ISO 1927-6	-0.1	-0.2	%
después de cocido a 800 °C	EN ISO 1927-6	-0.3	-0.4	%
<u>Conductividad térmica</u>				
a una temperatura media de 500 °C	EN ISO 1927-8	0.25	0.30	W/mK
a una temperatura media de 800 °C	EN ISO 1927-8	0.31	0.36	W/mK
a una temperatura media de 1000 °C	EN ISO 1927-8	0.46	0.51	W/mK
<u>Dilatación reversible después de cocido [20-1000 °C]</u>		0.55	0.55	%

código comercial : MAI20131

Versión : 10

Fecha : 15/06/2022

Los valores indicados son valores medios de fabricación. No pueden ser considerados como límites de una especificación.

