FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo numérico do comportamento estrutural de tampas de saneamento fabricadas em EN GJS 500-7

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Numerical study of the structural behavior of manhole tops manufactured in EN GJS 500-7

Autor

Diogo Neto de Figueiredo

Orientadores

Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco
Engenheira Elsa Silva (Fucoli – Somepal)

Júri

Presidente	**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**
Orientador	**Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**
Vogais	**Professora Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira Malça** **Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra**

Colaboração Institucional

Fucoli - Somepal
FUNDIÇÃO DE FERRO, S.A.

Coimbra, setembro, 2018

"Far better it is to dare mighty things, to win glorious triumphs, even though checkered by failure, than to rank with those poor spirits who neither enjoy nor suffer much, because they live in the gray twilight that knows not victory nor defeat."

Theodore Roosevelt

À família.

Agradecimentos

Este relatório é o culminar de um percurso no qual todas as adversidades e todas as situações de stress foram ultrapassadas graças ao apoio dos que me rodeiam, dessa forma e reconhecendo não só estes, mas também todos os momentos positivos proporcionados, quero prestar o meu agradecido reconhecimento.

Aos meus pais o maior agradecimento, pela família, pelos valores, pelo apoio pleno e ilimitado, pelo sacrifício, pela vida… A eles espero conseguir um dia, retribuir de alguma forma tudo o que me proporcionaram, se a mais não for possível, com orgulho. Aos da família, pelo carinho incondicional, em especial à tia Dorinda pela criação e cuido. BEM-HAJAM!

Ao Professor Ricardo Branco, pela disponibilidade, apoio e aconselhamento, e também pela apreciação final a este relatório. Aos da Fucoli-Somepal, Eng.ª Sara Pinto, Eng.ª Sandra Perdigão, Eng. Luís Xavier, Eng. Frederico Pinto, Eng. Luís Gonzaga e Eng. Filipe Pedro, também ao colega de estágio e agora Engenheiro, Josué Reina, pelo ambiente proporcionado no contacto diário, aconselhamento e pelo estreitamento de relações, as quais retive em elevada consideração. A TODOS MUITO OBRIGADO!

Aos amigos, os de Coimbra e os de Viseu, nomeando, no entanto, aqueles que contribuíram na forma de companheirismo, apoio e interajuda para o curso, Luís Machado, Mateus Silva, Mauro Cruz, Ricardo Alves e Rui Liberal. À Daniela, que merece reconhecimento especial pela amizade próxima, dedicação incondicional, disponibilidade e por todos os momentos partilhados e pelos que virão. OBRIGADO AMIGOS!

A todos aqueles com menos interação direta no meu quotidiano, nomeadamente docentes e outros colegas, mas que, no entanto, constituíram parte fundamental da evolução deste percurso. O MEU RECONHECIMENTO SINCERO!

Resumo

A colocação no mercado de tampas de saneamento, fabricadas em ferro fundido EN GJS 500-7, passa por um processo de certificação, segundo a norma EN 124 (2015), que estabelece parâmetros e condições de construção que visam promover a segurança dos utilizadores onde estas peças venham a ser colocadas. Um dos pontos abordados pela norma estabelece uma deflexão máxima admissível, imposta por uma força aplicada ao centro da tampa, e é nesta condição que a maior parte dos protótipos falha.

As dimensões da tampa são imposições de projeto, assim o reforço possível de efetuar na tampa terá de ser aplicado nas costas da mesma. O maior desafio da conceptualização destes componentes passa por conseguir cumprir as imposições da norma com o menor peso possível, desta forma o reforço é o objeto de estudo deste relatório.

A empresa Fucoli-Somepal forneceu projetos de tampas já comercializadas, algumas delas certificadas, e o objetivo passou por comparar diferentes geometrias de reforço, e concluir acerca da influência destas nas peças, sempre de um ponto de vista comparativo. Os ficheiros cedidos foram modelados no SolydWorks™, e posteriormente analisados pelo método dos elementos finitos através do ANSYS®.

Com este relatório conclui-se que há possibilidade de serem efetuadas melhorias nas geometrias dos reforços, uma vez que os resultados evidenciaram melhores comportamentos para configurações diferentes da originalmente aplicada. Importa ainda referir, uma vez que os valores das tensões induzidas nas peças ultrapassam sempre o valor de limite elástico, que seria importante considerar um estudo aprofundado sobre o material EN GJS 500-7 de modo a tornar mais fiável toda a fase de projeto.

Palavras-chave: Tampa de saneamento, Norma EN 124 (2015), Método dos Elementos Finitos, Simulação Numérica, EN GJS 500-7.

Abstract

The commercialization of manhole tops, made of cast iron EN GJS 500-7, pass by a process of certification according to EN 124 (2015) standart, which establishes parameters and working conditions that will help to promote the security of those who will use the roads where they are placed. One of the addressed parameters established by the standard is a maximum permissible deflection on the center of manhole top imposed by a force applied also on the center, and this condition is one of the main causes of reprobation.

The dimensions of the manhole top are design impositions, so the reinforcement of the part can only be apllied on the back of the cap. The challenge in the conceptualization of these components is to be able to comply the impositions of the standard with the minimum weight possible, so the reinforcement is the object of study of this report.

Fucoli-Somepal provided projects wich are already on market, some of them certified, and the objective was to compare different reinforcement geometries, and to conclude about their influence on the pieces, always from a comparative point of view. The assigned files was modeled in SolydWorks ™, and then analyzed through the finite element method using ANSYS®.

This report concludes that there is a possible to improve the geometries of reinforcements, since the results showed better behaviors for different configurations than originally applied. It should also be noted that, since the stress values induced in the parts always exceed the elastic limit value, it would be important to consider a study of the EN GJS 500-7 material in order to make the entire design phase more reliable.

Keywords Manhole Top, EN 124 (2015) Standard, Finite Element Method, Numerical Simulation, EN GJS 500-7.

Índice

Índice de Figuras ix

Índice de Tabelas xi

Simbologia e Siglas xiii
Simbologia xiii
Siglas xiii

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Conteúdo 2

2. ENQUADRAMENTO AO ESPAÇO INDUSTRIAL, PRODUTOS E FOCO DE ESTUDO 5
2.1. A Fucoli-Somepal 5
2.2. Produtos comercializados 6
2.3. Tampas 7
2.3.1. Metodologia de Projeto 9
2.3.2. Linha de Fundição 10
2.3.3. Falhas Frequentes 12
2.4. Método dos Elementos Finitos 12
2.4.1. Teoria do MEF 13
2.4.2. Software de Elementos Finitos 14
2.4.3. Prós e Contras do MEF 15
2.4.4. ANSYS® 15

3. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS 17
3.1. Norma EN 124 17
3.1.1. Cota de passagem 17
3.1.2. Forças de prova 18
3.2. Projetos estudados 20
3.2.1. Considerações da projeção em CAD 22
3.3. Simulação numérica 22
3.3.1. Simulação estática linear 23
3.3.2. Pré-processamento 23

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS 33
4.1. RED. 60 D400 33
4.2. RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça 36
4.3. 70x70 D400 38
4.4. 807x607 D400 40

5. CONCLUSÕES 43

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47

APÊNDICE A – Testes de Convergência tampa RED. 60 D400 49

APÊNDICE B - Testes de Convergência tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça 51

APÊNDICE C - Testes de Convergência tampa 807x607 D400 53
APÊNDICE D - Testes de Convergência tampa 70X70 D400 55
APÊNDICE E - Deflexões máximas para simulação com malha refinada..... 57
APÊNDICE F -Tensões máximas equivalentes (VON-MISSES) para simulação com malha refinada..... 63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Válvula de Cunha Elástica. 6
Figura 2.2. Válvula de Borboleta. 6
Figura 2.3. Válvula de Retenção. 6
Figura 2.4. Marco de Incêndio..... 6
Figura 2.5. Tampa de saneamento. 7
Figura 2.6. Grelha. 7
Figura 2.7. Junta de Ligação. 7
Figura 2.8. Flange. 7
Figura 2.9. Esquema da aplicabilidade de algumas classes de tampas da norma EN 124. ... 8
Figura 2.10. Placa-molde superior (esq.) e inferior (dir.) da tampa 807x607 D400. 9
Figura 2.11. Pormenor da prensa de areias. 10
Figura 2.12. Pós-vazamento nas moldações. 11
Figura 2.13. Prensa elétrica. 11
Figura 2.14. Sequência de modelos (Universidade Federal do Paraná, 2018). 13
Figura 3.1. Exemplos de cota de passagem (European Commitee for Standardization, 2015). 17
Figura 3.2. Dimensões dos punções (European Commitee for Standardization, 2015). 18
Figura 3.3. Tampa+aro Red. 60 D400. 20
Figura 3.4. Geometria de reforço da tampa Red. 60 D400. 20
Figura 3.5. Tampa+aro Red. 60 D400 Eixo e Dobradiça. 21
Figura 3.6. Geometria de reforço da tampa Red. 60 D400 Eixo e Dobradiça. 21
Figura 3.7. Tampa+aro 70x70 D400. 21
Figura 3.8. Geometria de reforço da tampa 70x70 D400. 21
Figura 3.9. Tampa+aro 807x607 D400 21
Figura 3.10. Geometria de reforço da tampa 807x607 D400. 21
Figura 3.11. Esquema de comparação entre análise linear e não-linear (Dassault Systèmes, s.d.). 23
Figura 3.12. Exemplo de modelo analisado ¼ de Tampa RED. 60 D400 com reforço da Tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça. 24
Figura 3.13. Pormenor de mecanismo de abertura da Tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça. 25

Figura 3.14. Representação esquemática da zona de apoio da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça no aro. 26

Figura 3.15. Representação esquemática da zona de apoio da tampa 807x607 D400 no aro (apresentada em corte). 27

Figura 3.16. Folga entre aro e tampa 807x607 D400 em situação de fecho. 27

Figura 3.17. Representação esquemática da zona de apoio da tampa 70x70 D400 no aro. 28

Figura 3.18. Comparação entre elementos de ordem linear e quadrática (SAS IP, Inc, 2017). 30

Figura 3.19. Exemplo de elemento SOLID187 (SAS IP, Inc, 2017). 30

Figura 4.1. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto RED.60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400. 34

Figura 4.2. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto RED.60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400, tampa completa. 35

Figura 4.3. Pormenor da altura das alhetas do reforço junto à borda da tampa do projeto RED.60 D400 com reforço 807x607 D400. 36

Figura 4.4. Pormenor da altura das alhetas do reforço junto à borda da tampa do projeto RED.60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço 807x607 D400. 37

Figura 4.5. Estudo de redução de peso do projeto RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 807x607 D400 (Peso total 58.27kg). 37

Figura 4.6. Estudo de redução de peso do projeto 70x70 D400 com reforço da tampa 807x607 D400 (Peso total 52.01kg s/aro). 39

Figura 4.7. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça e aro. 39

Figura 4.8. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 807x607 D400 com reforço da tampa 70x70 D400. 41

Figura 4.9. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 807x607 D400 com reforço original. 41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Descrição das classes definidas pela norma EN 124 8
Tabela 3.1. Deflexão admissível..... 19
Tabela 3.2. Força de prova para teste de capacidade de carga. 19
Tabela 3.3. Peso dos projetos analisados [kg]. 22
Tabela 3.4. Propriedades mecânicas do ferro fundido EN GJS 500-7 25
Tabela 3.5. Comparação entre deslocamentos máximos na tampa 70x70 D400, considerando a utilização ou não utilização de aro. 29
Tabela 3.6. Cotas de passagem (CO) dos projetos em estudo. 31
Tabela 4.1. Resultados da simulação dos projetos da tampa RED.60 D400. 33
Tabela 4.2. Resultados da simulação dos projetos da tampa RED.60 D400 Eixo e Dobradiça. 36
Tabela 4.3. Resultados da simulação dos projetos da tampa 70x70 D400. 38
Tabela 4.4. Resultados da simulação dos projetos da tampa 807x607 D400. 40

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E – Modulo de elasticidade ou Modulo de Young

F_P – Força de prova para ensaio de deflexão

F_T – Força de prova para teste de capacidade de carga

G – Modulo de elasticidade ao corte

υ – Coeficiente de Poisson

ε – Deformação induzida

σ – Tensão aplicada

σ_y – Tensão limite do domínio elástico

Siglas

CNC – Comando numérico computorizado

CAD – *Computer aided design*

CAE – *Computer aided engineering*

MDF – *Medium density fiberboard*

MEF – Método dos elementos finitos

CO – Cota de passagem

1. INTRODUÇÃO

A evolução industrial conduziu-nos a uma realidade que contrasta muito com a forma de inventar e produzir dos nossos ancestrais, fatores como a filosofia consumista, normas de segurança apertadas e a necessidade constante de apresentar produtos inovadores e diferenciados culminam num estado de carência de perfeição na conceção destes. Esta perfeição é imposta maioritariamente por grandes níveis de concorrência comercial, e para produzir com lucro as empresas têm que apostar forte na eliminação de erros de conceção, corrigindo e prevendo todas essas falhas na fase da conceptualização.

O CAE (Computer Aided Engineering) é a doutrina inquestionável implementada na indústria moderna, através da qual é possível fazer análises estáticas, dinâmicas, térmicas, magnéticas, de fluidos etc., desta forma é possível reduzir a possibilidade de falha do protótipo, reduzindo assim tempos de perceção de erros e a possibilidade de produção mais acelerada de um novo produto.

A materialização da filosofia CAE está suportada em ferramentas de CAD, para a conceção do modelo tridimensional que se pretende estudar e/ou produzir, criando assim protótipos virtuais aos quais é possível definir propriedades e condições de serviço, e posteriormente, através por exemplo do método dos elementos finitos, percecionar a sua influência e resposta a essas imposições.

As tampas de saneamento são elementos construídos com o objetivo de proteger orifícios que visam a efetivação da possibilidade de acesso a válvulas e/ou condutas instaladas nos sistemas de saneamento ou abastecimento de águas, podem também ser usadas como protetores de pontos de inspeção dos sistemas enunciados como de redes de abastecimento elétrico etc.

A norma EN 124 (2015) estabelece regras de construção das tampas, que vão desde imposições de estabilidade estrutural, condições de fecho entre outros, necessárias à certificação dos produtos concebidos. Pela carência na fase de projeto de simulação numérica de novos produtos a Fucoli-Somepal incorre muitas vezes no risco de falha do protótipo na fase da certificação.

As dimensões da tampa são imposições de projeto, assim para dar resposta às solicitações severas, nomeadamente em serviço, deve-se reforçar a peça numa zona que não afete a finalidade e a envolvente para a qual foi concebida. Desta forma os reforços são sempre idealizados na parte não visível da tampa, ou seja, a que não ficará à superfície.

As geometrias dos reforços, popularmente apelidadas naquele ambiente industrial de "aranhas", são variadas, e muitas delas foram concebidas por conhecimento prático.

Partir-se-á de projetos existentes, que serão tratados em termos de modelo físico no programa SolydWorks™, focado na tecnologia CAD, e posteriormente utilizar-se-á o ANSYS®, para a análise estrutural através do método dos elementos finitos.

A abordagem que será feita neste relatório tentará dar resposta à capacidade de determinada tampa suportar uma carga estática, em domínio linear elástico, tampa esta configurada com diversas geometrias de reforço, nomeadamente algumas delas implementadas, sempre num ponto de vista comparativo. Este tipo de análise não é o mais correto a fazer-se mediante as imposições da aludida norma, que mais à frente será explanada, no entanto por se tratar de um estudo comparativo, e pela inexistência de estudos acerca do comportamento do material que constitui as tampas em regime plástico, os resultados apresentados serão viáveis.

1.1. Conteúdo

O presente relatório estará dividido em cinco capítulos, inclusive este capítulo introdutório onde foi pretensão enquadrar o leitor acerca da necessidade da realização deste estudo e dos objetivos relativos ao mesmo, e os demais abaixo descritos:

Segundo Capítulo: Focará a envolvente em que este estudo foi inserido, nomeadamente a realidade fabril associada à entidade colaboradora com o mesmo, dando enfâse à produção das tampas e às dificuldades a ela associadas. Procurará também explanar acerca do método dos elementos finitos.

Terceiro Capítulo: Elucidará sobre os procedimentos utilizados, apresentando as geometrias das tampas, abordando a norma de certificação e expondo os modelos numéricos utilizados.

Quarto Capítulo: Apresentará os resultados obtidos, bem como uma discussão crítica dos mesmos.

Quinto Capítulo: Encerrará o relatório com as conclusões do mesmo e com a exposição de sugestões futuras de estudos.

2. ENQUADRAMENTO AO ESPAÇO INDUSTRIAL, PRODUTOS E FOCO DE ESTUDO

2.1. A Fucoli-Somepal

Em 29 de julho de 1946, na cidade de Coimbra, nasce a FUCOLI – Fundição Conimbricense, Lda., empregava apenas 10 trabalhadores na época, e apenas em 1949 iniciou a fabricação de material para o setor de abastecimento de água e saneamento.

A SOMEPAL – Sociedade Metalúrgica da Pampilhosa, Lda., é criada em 2 de março de 1957, na vila da Pampilhosa, e tinha como objetivo comercializar válvulas de diversos tipos.

A Fucoli-Somepal – Fundição de Ferro, S.A. nasce da fusão entre as duas empresas, a FUCOLI – Fundição Conimbricense, LDA e a SOMEPAL – Sociedade Metalúrgica da Pampilhosa, LDA, em 1998, depois de a primeira ter adquirido o capital social da segunda oito anos antes, até então operavam como entidades independentes. Esta operação permitiu reforçar a confiança dos parceiros comerciais pela garantia de continuidade na aglomeração do património.

A ideologia industrial da Fucoli-Somepal foca-se na modernização do processo produtivo, dessa forma nas últimas duas décadas tem investido fortemente nessa realidade, a destacar a alteração do layout da sede em Coimbra com a substituição de fornos cubilote por fornos elétricos, em 2005, o aumento da área coberta e a aposta em equipamentos de precisão dimensional e acabamento, como um robot de pintura e máquinas CNC, em 2008, na filial da Pampilhosa etc. Em 2011 a empresa recebeu a certificação do seu Sistema de Gestão Ambiental, reforçando a sua imagem enquanto indústria com pretensões de desenvolvimento sustentável. A partir de 2011 tem-se vindo a desenvolver na empresa um conjunto de alterações que visam a implementação da filosofia LEAN em todo o processo de produção.

PME líder pelo quarto ano consecutivo, esta fundição não encontra em território nacional concorrência capaz de competir no mercado dos equipamentos de saneamento e abastecimento de águas, assim, uma das apostas mais lucrativas recentes da Fucoli-Somepal

é a exportação, fator também impulsionado pela crise no setor construtivo, e que faz de países com economias emergentes clientes alvo.

2.2. Produtos comercializados

Com produções anuais de cerca de 15000 toneladas, a Fucoli-Somepal apresenta soluções de peças contruídas em ferro fundido nodular. O catálogo de materiais conta com válvulas para redes de distribuição de águas e saneamento, nas suas variantes de cunha elástica (Figura 2.1), borboleta (Figura 2.2), retenção (Figura 2.3), etc., marcos de incêndio (Figura 2.4), dispositivos de fecho de câmaras de visita, nomeadamente tampas (Figura 2.5) e grelhas (Figura 2.6) e acessórios de ligação para redes de água e saneamento, como juntas de ligação (Figura 2.7), flanges (Figura 2.8), etc.

Figura 2.1. Válvula de Cunha Elástica.

Figura 2.2. Válvula de Borboleta.

Figura 2.3. Válvula de Retenção.

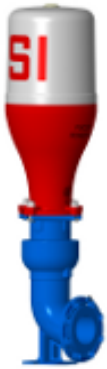

Figura 2.4. Marco de Incêndio.

Figura 2.5. Tampa de saneamento.

Figura 2.6. Grelha.

Figura 2.7. Junta de Ligação.

Figura 2.8. Flange.

2.3. Tampas

Uma tampa é um objeto destinado a selar de forma não preventiva uma caixa de visita instalada num sistema de água ou saneamento, com o objetivo de poderem ser efetuadas inspeções ou intervenções ao espaço sempre que se achar necessário.

Este ponto irá tratar sobre as tampas produzidas na Fucoli-Somepal, abordando todo o processo produtivo das mesmas e falhas frequentes na sua conceção. A norma EN 124 estabelece seis classes deste constituinte, de acordo com o espaço em que estas se destinaram a ser instaladas.

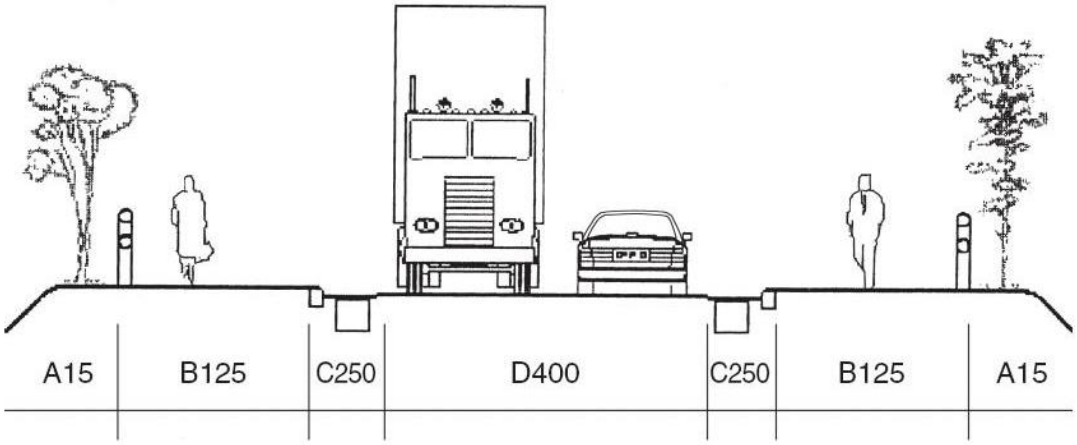

Figura 2.9. Esquema da aplicabilidade de algumas classes de tampas da norma EN 124.

A Figura 2.9 representa os espaços de aplicação das quatro primeiras classes definidas pela norma, as mais vulgares. Na Tabela 2.1 são definidas pormenorizadamente as áreas em que estes componentes podem ser instalados.

Tabela 2.1. Descrição das classes definidas pela norma EN 124

Classe	Espaço de aplicação
A15	Áreas apenas utilizadas por pedestres ou ciclistas.
B125	Espaços utilizados por pedestres ou comparáveis e parques de estacionamento de veículos ligeiros.
C250	Bermas das estradas com distâncias máximas de 0.5m da linha delimitadora da estrada e 0.2m do espaço destinado a pedestres.
D400	Estradas e parques de estacionamento para todos os tipos de veículos.
E600	Espaços submetidos a elevadas cargas no solo, como docas e aeroportos.
F900	Espaços submetidos a cargas consideravelmente elevadas, no solo, como docas e aeroportos.

Os projetos analisados apenas dizem respeito à classe D400, mais à frente far-se-á uma explicação das imposições inerentes a esta classificação, as quais são analogamente inaferíveis para as demais classes.

2.3.1. Metodologia de Projeto

A execução de novos modelos de tampas surge tipicamente após a encomenda dos mesmos, e dessa forma as dimensões como o diâmetro da tampa, ou a dimensão do aro onde esta irá encaixar, são imposições de projeto.

Todas as dimensões variáveis, ou até mesmo a geometria do reforço surge de uma de duas maneiras ou da combinação de ambas, através da experiência dos operários, desde carpinteiros a engenheiros ou técnicos, que pelo traquejo adquirido concluem sobre uma solução viável ou de uma prospeção ao mercado em relação a peças semelhantes produzidas por indústrias demarcadas a nível mundial na área.

Os projetos são tipicamente conceptualizados em CAD através do programa SolydWorks™, e posteriormente enviados para maquinação, que recorre à tecnologia CNC, onde é contruído um modelo (Figura 2.10), tipicamente em MDF, resina ou mais recentemente em alumínio, que servirá como negativo à moldação.

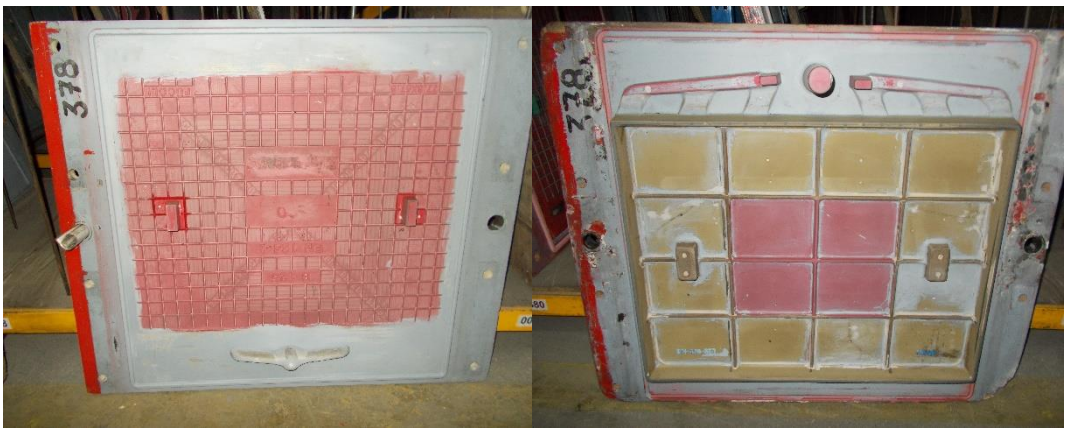

Figura 2.10. Placa-molde superior (esq.) e inferior (dir.) da tampa 807x607 D400.

Como é possível observar na Figura 2.10 também os canais de gitagem são previamente cravados na placa-molde. A gitagem é já um alvo de estudo através de simulação numérica na Fucoli-Somepal, no entanto mais frequentemente executado em placas-molde mais complexas, neste caso pelas dimensões elevadas da tampa não seria possível aglomerar mais constituintes, mas em placas de constituintes mais pequenos, como por exemplo flanges ou válvulas e a combinação de ambos, essa análise mostra-se essencial pois os fluxos de enchimentos nos canais poderão variar provocando deficiências finais nas peças.

Como já fora referido anteriormente, para as tampas, não é efetuada qualquer simulação numérica no sentido de prever o comportamento da peça em situação de serviço.

2.3.2. Linha de Fundição

A linha de fundição inicia-se na prensagem da areia verde contra as placas-molde, formando a meia moldação superior e inferior. Na Figura 2.11 é possível observar, em pormenor, uma placa-molde com alguma complexidade, constituída por vários elementos, nomeadamente uma tampa e várias uniões. Nesta fase o operador coloca as placas-molde superior e inferior numa plataforma rotativa, que permitirá, uma vez que tem dois espaços destinados à colocação destes objetos, formar a meia moldação inferior e superior sucessivamente.

Figura 2.11. Pormenor da prensa de areias.

As meias moldações seguem na linha de fundição onde posteriormente são colocadas uma sobre a outra. De seguida o metal fundido no forno é vazado na moldação, preenchendo as cavidades desta (Figura 2.12).

Figura 2.12. Pós-vazamento nas moldações.

As moldações seguem na linha até que o metal solidifique totalmente, sendo posteriormente desmanteladas. Seguidamente as tampas são pintadas, com um tratamento superficial, de forma a retardar o processo de oxidação.

Por fim é efetuado o processo de controlo de qualidade, segundo os critérios da norma EN 124, entre os quais realizam-se os ensaios de compressão (Figura 2.13), relevantes para o presente estudo. Os ensaios devem ser sempre realizados com o conjunto tampa/aro.

Figura 2.13. Prensa elétrica.

2.3.3. Falhas Frequentes

As ocorrências provocadoras de reprovação da comercialização das tampas podem ser dividas em dois grandes grupos, defeitos inerentes ao processo de fundição e/ou incumprimentos da norma, ainda que os segundos possam estar diretamente relacionados com os primeiros quando estes não produzem defeitos visíveis.

O procedimento de fundição não é o foco de estudo deste relatório, no entanto os defeitos inerentes a este processo podem ser muitas vezes motivados por falhas na conceção do *design* do produto, nomeadamente rechupes localizados, este fenómeno pode ser evitado com um correto sobredimensionamento da peça, tendo em conta a contração do material na solidificação. Outro defeito evitável é o deficiente enchimento das cavidades da moldação, para tal deve-se ter em conta que é indispensável no processo de desenho do produto evitar ângulos vivos e zonas que possam dificultar a fluidez do metal líquido, estas ocorrências podem, no entanto, ser estudadas e estimadas com recurso a software especializado. Existe ainda a possibilidade de surgirem porosidades na peça final, que comprometerão a integridade estrutural da peça quando ensaiada, este fenómeno deve-se maioritariamente à formação de óxidos, desta forma não é uma ocorrência controlável na fase de projeto.

Por outro lado, a inaptidão das tampas relacionada com a norma pode ter diversos motivos, uma vez que neste processo tem-se em consideração diversas imposições como a concavidade das grelhas, a planeza, se aplicável dimensões de rasgos, altura do aro, folga do conjunto aro/tampo etc., no entanto a medição da flecha imposta por uma força normalizada é o ponto de interesse para este estudo. O cumprimento desta deflexão normalizada é o ponto mais crítico, nomeadamente em projetos novos, uma vez que é aquele que mais imprevisibilidade traz ao processo de conceptualização das tampas, pois não interessa adicionar material inconscientemente, ainda que isso permitisse muitas vezes uma estrutura mais robusta, mas sim uma relação ideal de peso/resistência.

2.4. Método dos Elementos Finitos

A teoria dos elementos finitos é bastante antiga, mas só com o aparecimento dos primeiros computadores, na década de 50 do séc. XX, foi possível colocar em prática os fundamentos deste método, uma vez que o solucionamento das equações envolvidas em

problemas complexos inviabilizava a sua utilização. Inicialmente o MEF era apenas utilizado para problemas relacionados com a mecânica dos sólidos e em situações de carga estática, desconsiderando não-linearidades e outros obstáculos complexos, nos dias de hoje, também pelo avanço de recursos em hardware dos computadores, a aplicação e flexibilidade do método está francamente mais evoluída, inclusive suprindo problemas de outras áreas do estudo mecânico, nomeadamente fluidos.

Neste subcapítulo procurar-se-á aprofundar a temática do método dos elementos finitos, abordando as suas vantagens e aplicações, apresentar-se-á ainda um conjunto de soluções de software para os problemas a tratar e justificar-se-á a escolha do ANSYS® para a execução das simulações.

2.4.1. Teoria do MEF

A complexidade inerente ao mundo que nos rodeia dificulta bastante o trabalho de conceptualização de um determinado objeto físico, para prever o comportamento deste na realidade recorre-se muitas vezes a uma simplificação que denominamos de modelo, esta simplificação pode ser mais ou menos levada ao extremo mediante diversos fatores, como a capacidade de simulação que temos à disposição e a fiabilidade e proximidade com os fenómenos reais pretendidas. Por exemplo num estudo de análise mecânica de um material podemos suprimir os efeitos provocados por fenómenos térmicos admitindo que estes não terão influência significativa para os resultados que pretendemos.

Podemos quantificar em quatro os modelos necessários a ter em conta até se chegar ao modelo de elementos finitos de um fenómeno físico.

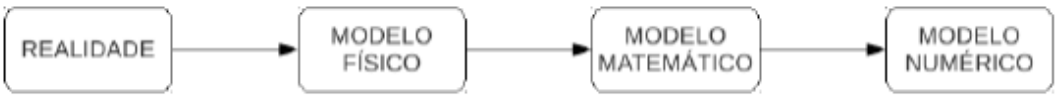

Figura 2.14. Sequência de modelos **(Universidade Federal do Paraná, 2018)**.

A sequência apresentada na Figura 2.14 representa no primeiro item, da esquerda para a direita, o estado real do objeto que tem em conta as interações com o meio, a constituição deste e a sua geometria, o segundo passo consiste na identificação das leis da física envolvidas , por conseguinte no modelo matemático através das condições de fronteira do material e das formulações obtidas nos pontos anteriores traduz-se o comportamento do

objeto através de equações, e por fim no modelo numérico através de simplificações possíveis de aplicar pelo MEF é resolvido um sistema de equações algébricas lineares que permitem obter a solução do nosso problema.

2.4.2. Software de Elementos Finitos

As considerações teóricas expostas no ponto anterior estão mascaradas ao usuário comum nos programas de simulação numérica, tipicamente na indústria não se pretende que o usuário analise todas as equações envolvidas no processo a estudar, mas sim que definindo os parâmetros de estudo obtenha uma solução confiável do fenómeno a analisar.

Desta forma o processo de simulação numérica com o recurso a software pode ser dividido em três componentes:

1. **Pré-processador:** Nesta fase procede-se à conceptualização do modelo que se pretende estudar definindo-o geometricamente. É gerada a malha, que se define como a divisão do objeto em pequenos elementos, de modo a simplificar o estudo do problema dividindo-o em pequenos problemas. Concluída esta fase o programa gera todos os ficheiros, da discretização efetuada, necessários para a simulação.
2. **Solver:** Nesta etapa o programa recorre a um algoritmo que realiza os cálculos da simulação, tendo por base a divisão efetuada no processo anterior e a definição de parâmetros inerentes à aplicabilidade real do objeto como condições de fronteira, carregamentos etc.
3. **Pós-Processador:** Por fim, dos cálculos efetuados no ponto anterior, através desta ferramenta o programa permite analisar graficamente deslocamentos, tensões, etc. em várias etapas da simulação.

As fases acima descritas podem estar total ou parcialmente integradas nos softwares dedicados a esta temática, habitualmente na indústria recorre-se a programas que forneçam o conjunto das funcionalidades, tanto por questões económicas de poupança de licenças, como por razões de prevenção de incompatibilidades de leitura de ficheiros de ambientes informáticos diferentes.

2.4.3. Prós e Contras do MEF

As vantagens do MEF traduzem-se essencialmente na capacidade teórica deste princípio de dar resposta a problemas de engenharia na fase do projeto, diminuindo as despesas inerentes à utilização de protótipos e experiências pelo método tentativa erro.

Por outro lado, importa referir que a utilização de ferramentas que utilizem esta filosofia carece de mão-de-obra especializada e de equipamento com excelentes propriedades de hardware para que sejam obtidos resultados confiáveis. Ainda assim pela complexidade e número de parâmetros associados a simulação tem sempre erros que podem ser ou não significativos mediante a sua causa ou impacto, o utilizador deve saber analisar e procurar dar resposta à minimização dessas falhas.

2.4.4. ANSYS®

Uma vez que a Fucoli-Somepal não trabalha com o software de simulação utilizado, far-se-á uma pequena introdução do mesmo.

A ANSYS, Inc. é uma empresa norte americana que se dedica ao desenvolvimento e comercialização de software informático dedicado à simulação de fenómenos de engenharia.

Jonh Swanson, enquanto engenheiro da Westinghouse Astronuclear Laboraty, propôs que se procurasse uma solução informática de modo a substituir os cálculos sobre o método dos elementos finitos, realizados até então à mão, ideia que fora rejeitada pelo empregador. Deixando a empresa em 1969, Swanson iniciou o desenvolvimento do sofware que tinha idealizado, fundou a Swanson Analysis Systems Inc. (SASI) que desenvolveu o Ansys, mais tarde a SASI viria a ser contratada como consultora da Westinghouse Astronuclear Laboratory que se viria também a tornar no primeiro usuário do software. Na década de 90 a empresa foi vendida a investidores e posteriormente tornada pública passando a denominar-se ANSYS, Inc.

O software de simulação ANSYS® é provavelmente o mais completo, em termos de recursos, disponível no mercado. Para além das inúmeras possibilidades em termos de tipo de análises disponíveis, como análise modal, térmica, estrutural estática, estrutural transiente, elétrica, etc., as opções na definição dos parâmetros da malhagem são também das mais minuciosas entre os programas de simulação.

As motivações inerentes à utilização deste software são, além das já referidas, a capacidade expedita de dar resposta aos resultados em comparação com outro software com o qual se executou o tratamento CAD das peças, o SolydWorks™, que também possui um modulo de simulação, no entanto mais limitado, mais pesado em termos de processamento e menos preciso.

3. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

3.1. Norma EN 124

Como referido anteriormente no ponto 2.3, as tampas podem ser definidas segundo a norma EN 124 em seis classes, dependentes do seu espaço de aplicação. Como este espaço, já explanado anteriormente (2.3), difere, diferem também as condições de resposta em serviço que os componentes aí aplicados devem apresentar.

A norma EN 124 define duas exigências analisáveis no contexto do presente estudo, nas quais se relaciona através de uma dimensão característica do conjunto tampa/aro, um deslocamento admissível para uma determinada força aplicada.

3.1.1. Cota de passagem

O conceito cota de passagem (CO) é definido como o diâmetro máximo de um círculo que é possível inscrever na área desobstruída do aro, que permitirá o acesso à caixa de visita, são ilustrados alguns exemplos na Figura 3.1.

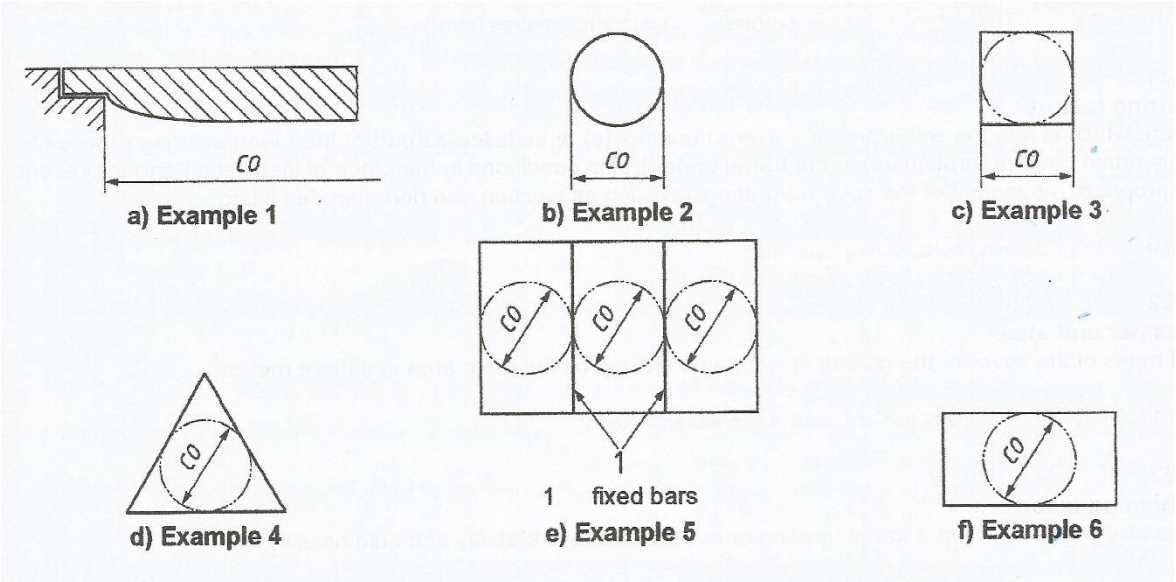

Figura 3.1. Exemplos de cota de passagem **(European Commitee for Standardization, 2015)**.

3.1.2. Forças de prova

3.1.2.1. Teste de deflexão

A força a considerar neste ensaio deve ser $F_P = \frac{2}{3}\ F_T$, com F_T dado na Tabela 3.2, do ponto seguinte (3.1.2.2), numa situação de carga descarga, esta deve ser aplicada cinco vezes sucessivas a uma velocidade de 1 kN/s a 5 kN/s.

A aplicação da força deve ser executada por uma prensa, preferencialmente hidráulica, e numa área delimitada por um punção característico (Figura 3.2), mediante as dimensões da cota de passagem (3.1.1), da dimensão e da forma geométrica projetada da tampa.

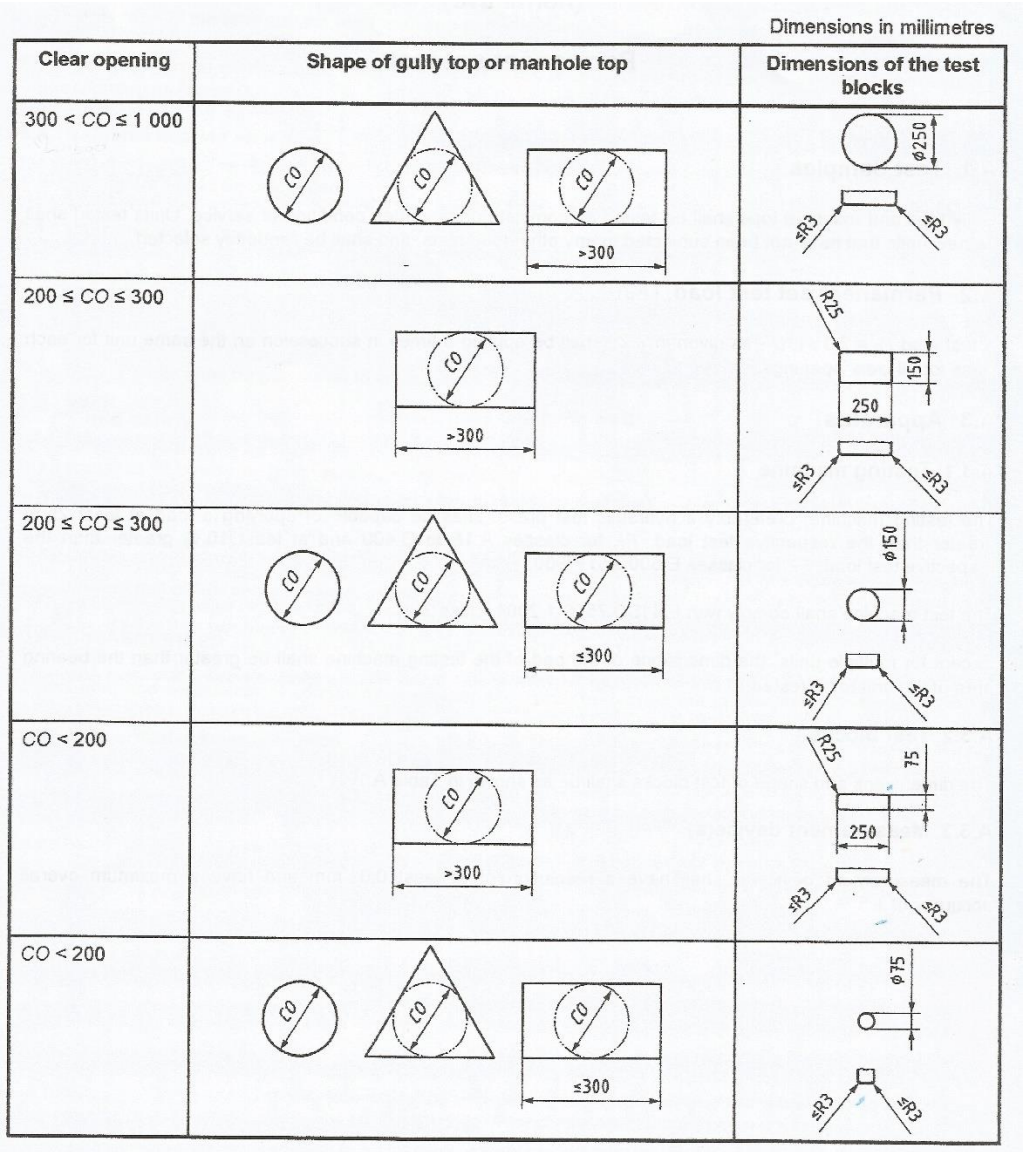

Figura 3.2. Dimensões dos punções **(European Commitee for Standardization, 2015)**.

Os punções devem ser colocados rigorosamente centrados, e com eixos de simetria coincidentes, com os conjuntos tampa/aro.

No seguimento do processo enunciado efetua-se a medição da deflexão provocada no ponto central da tampa. Uma vez que se espera que a tampa possa deformar plasticamente, existem condições de limiar de deflexão impostas que dependem uma vez mais da medida da cota de passagem (3.1.1), apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Deflexão admissível.

Classe	Deflexão admissível [mm]
A15 e B125	$\frac{\boldsymbol{CO}}{\mathbf{100}}\ (\boldsymbol{a})$
C250 até F900	$\frac{\boldsymbol{CO}}{\mathbf{500}}\ (\boldsymbol{b})$
a – CO/50 para CO < 450mm com um máximo de 6,5mm. b – 1mm para CO < 500mm.	

3.1.2.2. Teste de capacidade de carga

Este teste é realizado no seguimento do anterior, imediatamente após a medição da flecha imposta pelo ensaio de deflexão, e visa aferir a capacidade da tampa resistir à imposição de danos que possam comprometer o seu propósito em serviço, nomeadamente formação de fissuras, relevos ou rutura. A aplicação desta força é feita de acordo com as condições de velocidade do teste anterior, no entanto após a obtenção da carga máxima, correspondente a F_T, como enunciado na Tabela 3.2, esta deve ser mantida durante $30_0^{+2}s$.

Tabela 3.2. Força de prova para teste de capacidade de carga.

Classe	F_T [kN]
A15	15
B125	125
C250	250
D400	400

E600	600
F900	900

3.2. Projetos estudados

O propósito deste relatório passa por trabalhar em termos de design quatro modelos de tampas, e aplicar-lhes quatro modelos de reforços já produzidos, um dos quais o original da respetiva tampa, a partir daí depreender se é possível efetuar alterações no sentido de aumentar a resistência estrutural dos componentes.

O processo de design consiste em adaptar os projetos fornecidos, retirando-lhes o reforço originalmente projetado e desenhar o reforço a estudar, analisando o projeto respetivo desse novo reforço e adaptando-o à nova aplicação, uma vez que as geometrias projetadas das tampas diferem em dimensão e forma. Perfazendo um total de dezasseis construções, a seguir são apresentados os projetos originais que serão então posteriormente cruzados (Figura 3.3;Figura 3.4; Figura 3.5; Figura 3.6; Figura 3.7; Figura 3.8; Figura 3.9; Figura 3.10).

Figura 3.3. Tampa+aro Red. 60 D400.

Figura 3.4. Geometria de reforço da tampa Red. 60 D400.

Figura 3.5. Tampa+aro Red. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

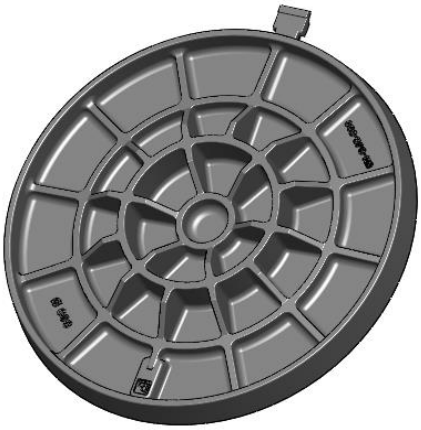

Figura 3.6. Geometria de reforço da tampa Red. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

Figura 3.7. Tampa+aro 70x70 D400.

Figura 3.8. Geometria de reforço da tampa 70x70 D400.

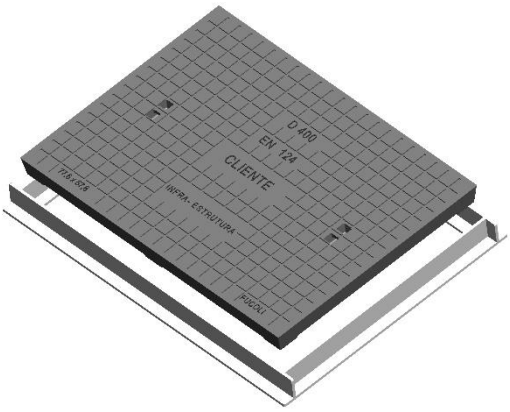

Figura 3.9. Tampa+aro 807x607 D400

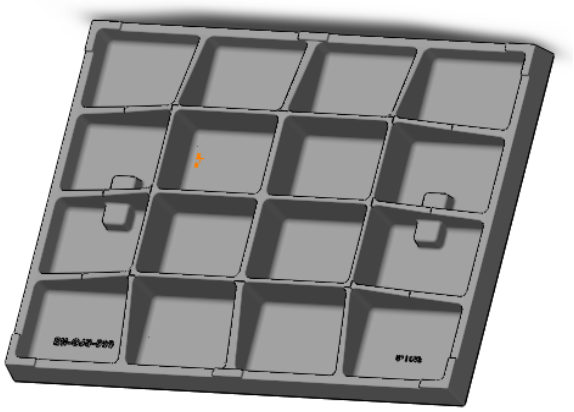

Figura 3.10. Geometria de reforço da tampa 807x607 D400.

3.2.1. Considerações da projeção em CAD

Uma vez que o principal objetivo do processo de otimização destes componentes passa pela redução de custos associada à estabilidade estrutural, como critério de semelhança tentou-se manter o peso total da tampa semelhante ao peso do projeto original, sendo que para manter a geometria de reforço o mais próxima possível da sua forma inicial nalguns casos este parâmetro foi excedido em aproximadamente 3 kg, mais à frente casos que mereçam especial atenção neste parâmetro serão debatidos. Na Tabela 3.3 são apresentados os respetivos valores do aludido parâmetro.

Tabela 3.3. Peso dos projetos analisados [kg].

Tampa / Reforço	**RED. 60 D400**	**RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça**	**70x70 D400 (s/aro)**	**807x607 D400**
RED. 60 D400	62.13	62.63	55.58	57.56
RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça	59.012	61.05	53.074	60.19
70x70 D400	58.016	58.56	53.12	56.52
807x607 D400	60.97	61.64	55.34	62.12

3.3. Simulação numérica

Apesar de as exigências da norma apontarem para um tipo de solicitação diferente, o tipo de análise que se irá executar é uma análise linear estática. As motivações para esta opção prendem-se com dois fatores: (1) não existe devidamente documentado e estudado o comportamento do material do qual as peças são construídas, assim é impossível prever com rigor cientifico mínimo a resposta do mesmo a solicitações do domínio plástico, dessa forma realizar simulações com os parâmetros variáveis no tempo conduziria a valores inconsistentes; (2) trata-se de um estudo comparativo, ou seja, para os resultados encontrados, se efetivamente se verificar uma melhoria entre determinadas soluções construtivas, é expectável que essa melhoria se estenda a outro tipo de estudo com outro tipo de análise, uma vez que o material da constituição será o mesmo.

3.3.1. Simulação estática linear

Este tipo de simulação tem em conta duas preposições básicas na sua teoria:

- **Preposição estática:** As cargas são aplicadas de forma lenta e gradual até ser atingida a sua magnitude total, após ser atingido esse estado estas permanecerão constantes. Através deste conceito são ignorados efeitos de inércia e amortecimentos.
- **Preposição de linearidade:** A relação entre as cargas aplicadas ao corpo e a respetiva resposta deste é linear, ou seja, se por exemplo a carga imposta for duplicada o valor da deformação induzida será também duas vezes maior. Desta forma a preposição impõe que os modelos estejam de acordo com a lei de Hooke ($\sigma = E\ \varepsilon$).

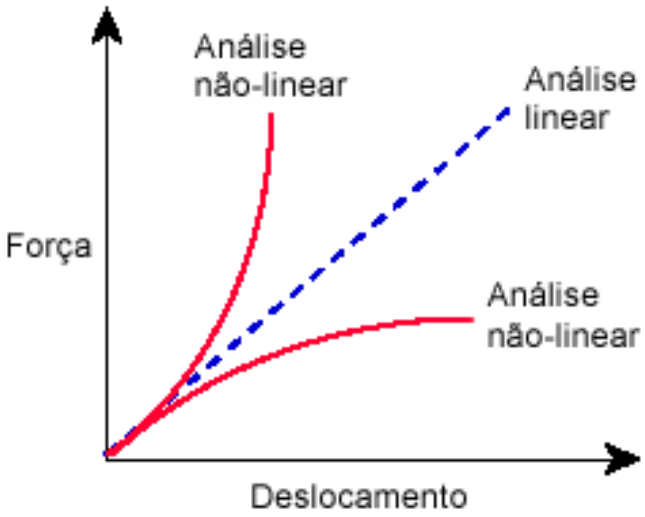

Figura 3.11. Esquema de comparação entre análise linear e não-linear **(Dassault Systèmes, s.d.)**.

3.3.2. Pré-processamento

Esta fase inicia-se com a já abordada definição da geometria das peças a analisar, de seguida procede-se à importação dos modelos trabalhados no programa CAD, o SolydWorks™, para o ANSYS®, a partir daqui deve-se definir o material que se pretende atribuir ao projeto no programa, uma vez que a biblioteca deste é bastante limitada, por conseguinte selecionar o tipo de análise pretendida e proceder à execução de todos os restantes passos relacionados com a interação simulada da peça com o ambiente que a rodeia e a discretização da mesma.

3.3.2.1. Modelo de análise

As boas práticas da utilização do MEF salientam a importância da simplificação do objeto de estudo, de tal forma que todos os pormenores ou componentes desnecessários ou substituíveis por condições de fronteira devem efetivamente ser dispensados.

No caso dos projetos trabalhados existem inúmeros constituintes que podem ser dispensados, desde logo, e uma vez que a norma estabelece que os ensaios devem ser executados pelos conjuntos tampa + aro, os aros podem ser substituídos por condições de apoio que serão abordadas à frente (3.3.2.3), outro objeto de eliminação seria também todos os relevos e inscrições cravados sobre as faces das tampas, no entanto por questões de condições de dependência entre a execução de desenho destas operações e a restante estrutura da tampa, estas poderiam causar deformações indesejadas, decidiu-se manter estas particularidades, no entanto aconselha-se que sempre que seja possível efetuar este tipo de simplificação ela seja conseguida, desta forma contribui-se para a geração de um menor número de elementos na discretização, conduzindo a tempos de simulação inferiores.

Com esta filosofia de economia de recursos, que permite aplicá-los de forma mais eficaz a um objeto simplificado, optou-se, uma vez que todas as geometrias de reforço e as respetivas tampas possuem dois eixos, perpendiculares entre si, onde é possível definir condições de simetria, analisar apenas um quarto de tampa (Figura 3.12). A generalidade dos programas de simulação oferece esta opção, definindo um plano coincidente com o eixo de simetria.

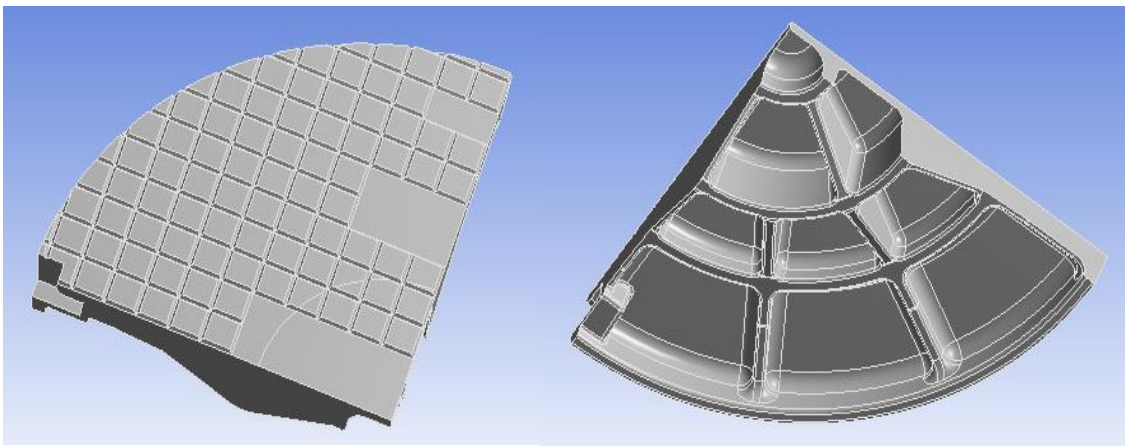

Figura 3.12. Exemplo de modelo analisado ¼ de Tampa RED. 60 D400 com reforço da Tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

Um dos projetos possui uma característica distintiva que merece atenção neste ponto, a tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça. A designação dobradiça vem da conceção

de um pequeno elemento exterior ao círculo externo da tampa que funcionará como mecanismo de apoio em situações de abertura da tampa, com necessidade de acesso à caixa de visita, com o respetivo rasgo no aro para possibilitar esta ação. Este elemento é também dispensável na simulação uma vez que na situação em que a tampa se encontra fechada não há qualquer contacto entre este e o aro (Figura 3.13).

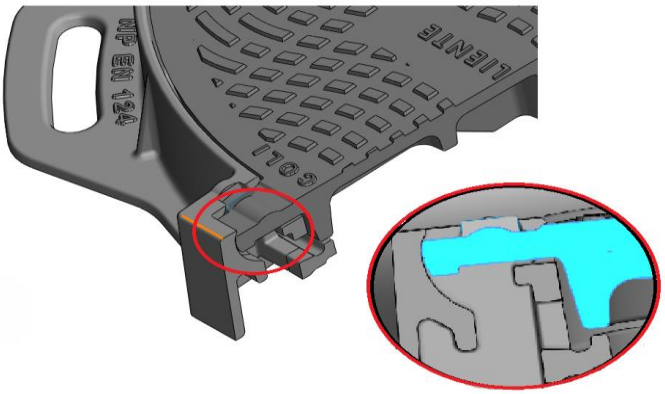

Figura 3.13. Pormenor de mecanismo de abertura da Tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

3.3.2.2. Material

Para o tipo de análise a efetuar, e considerando um material isotrópico, apenas é necessário definir dois parâmetros, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, uma vez que se desprezam efeitos de alteração por gravidade, carregamento centrifugo e térmicos (Dassault Systèmes, s.d.), o outro parâmetro necessário ao cálculo da resposta do componente é o modulo de elasticidade ao corte (G) que é automaticamente calculado segundo a expressão $G = \frac{E}{2(1+\upsilon)}$.

O material com que a Fucoli-Somepal labora, em todos os seus produtos, é o EN GJS 500-7, um ferro fundido nodular que apresenta excelentes propriedades para as aplicações pretendidas, no domínio da área de atividade da empresa. Na Tabela 3.4 são apresentados os valores necessários para o estudo.

Tabela 3.4. Propriedades mecânicas do ferro fundido EN GJS 500-7

	Módulo de Young (E) [GPa]	Coeficiente de Poisson (υ)
EN GJS 500-7	169	0.275

Este material é produzido maioritariamente através da fundição de sucata, dessa forma um dos desafios na sua obtenção é manter a composição deste continuamente estável.

Um aspeto importante a reter é que, segundo a experiência dos responsáveis da linha de fundição, como na generalidade dos materiais, a norma que estabelece a composição deste apresenta uma gama de variabilidade na composição dos seus componentes, assim pequenas variações na composição dos elementos provocaram respostas consequentemente diferentes, a este pormenor dever-se-á dar especial atenção em futuros estudos.

3.3.2.3. Apoios

Nesta temática, e tomando em consideração o que fora exposto no ponto 3.3.2.1, importa discutir a viabilidade de simulação dos projetos com ou sem a assemblagem do aro às tampas.

A singularidade inerente a cada conjunto impossibilita uma generalização da atribuição dos parâmetros de apoio, dispensando neste caso a utilização do aro no método computacional, dessa forma todos os conjuntos devem ser analisados.

Os projetos das tampas redondas (RED. 60 D400 e RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça) não apresentam dificuldades circunstanciais uma vez que possuem uma base de apoio que é uma face planar que apoia inteiramente numa face, também ela plana, do aro (Figura 3.14).

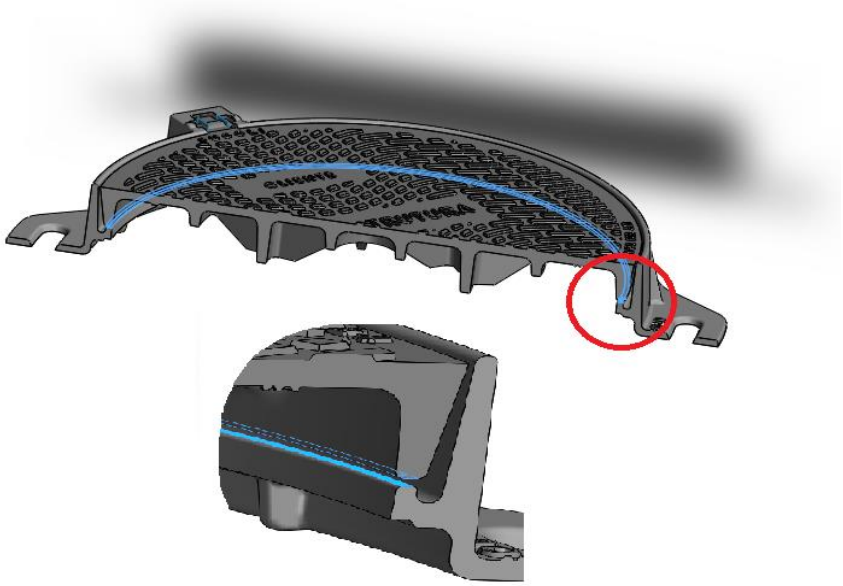

Figura 3.14. Representação esquemática da zona de apoio da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça no aro.

A tampa retangular 807x607 D400 apoia no aro através de pequenas saliências regulares colocadas na parte inferior da tampa (Figura 3.15).

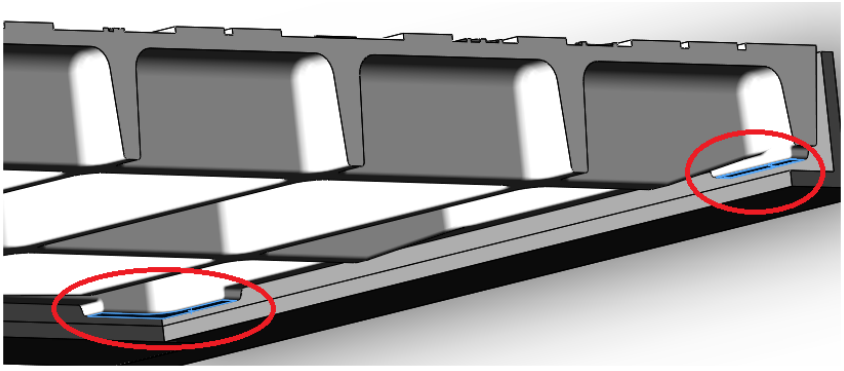

Figura 3.15. Representação esquemática da zona de apoio da tampa 807x607 D400 no aro (apresentada em corte).

Deve-se ter especial atenção para a distância entre a zona com menos profundidade (Figura 3.16), em relação às aludidas saliências, uma vez que aquando da aplicação da carga, se se efetivarem naquela zona deslocamentos superiores à folga existente, deve-se atribuir uma função de apoio que tenha em consideração essa distância, ou em alternativa, de forma mais complexa, testar o conjunto tampa + aro.

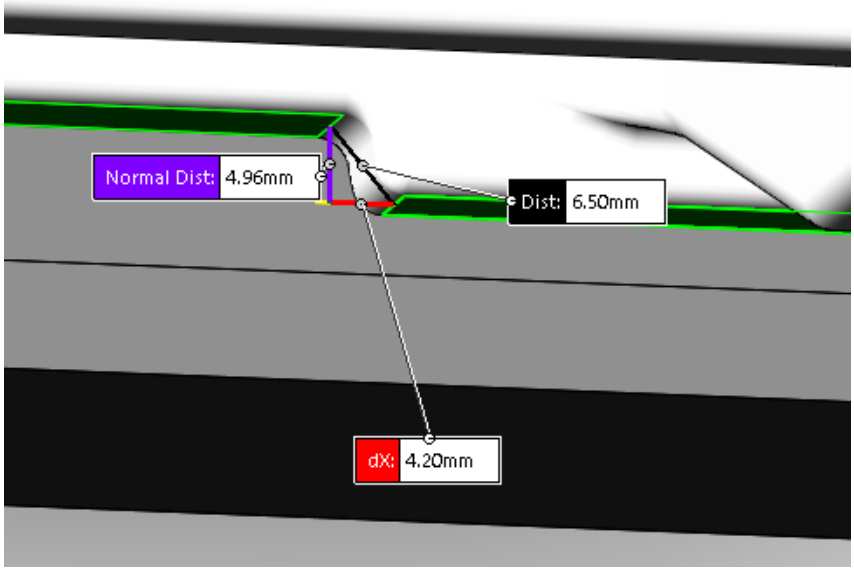

Figura 3.16. Folga entre aro e tampa 807x607 D400 em situação de fecho.

Por fim, o caso da tampa quadrada 70x70 D400 é o caso que apresenta maiores dificuldades. A zona de apoio gerada entre a tampa e o aro é circunstancialmente difícil de quantificar uma vez que ao contrário do caso aludido anteriormente, a tampa 807x607 D400, aqui os acidentes geométricos designados por saliências são desenhados no aro (Figura 3.17), e pela sua forma extremamente esbelta provocam uma elevada concentração de tensões e consequentes deformações nesta zona.

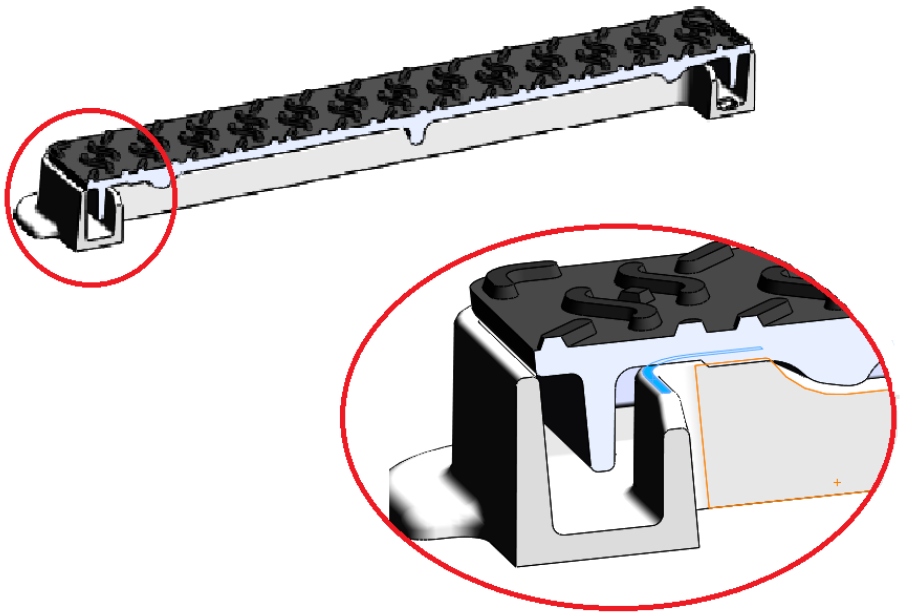

Figura 3.17. Representação esquemática da zona de apoio da tampa 70x70 D400 no aro.

Desta forma estudou-se o erro associado, ao considerarmos a área de apoio apenas a delimitação a azul na Figura 3.17, ou a simulação do conjunto com o aro, para o caso do reforço original e para o caso que apresentava piores condições sem aro (o reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça). Conclui-se que as diferenças no caso do reforço original poderiam ser desconsideráveis, ainda que essa prática fosse portadora de uma possível acumulação de erros, no entanto para o caso do reforço da tampa RED. 60 D400 as desigualdades, impulsionadas pelo facto de a folga entre a zona não apoiada da tampa e o aro ser insuficiente para ser desconsiderada neste caso, seriam consideráveis.

Os valores apresentados na Tabela 3.5 acima foram gerados considerando os mesmos parâmetros de geração de malha disponibilizados pelo ANSYS®, a comparação entre eles é válida considerando que o número de elementos gerados na peça respetiva á tampa é aproximadamente o mesmo.

Tabela 3.5. Comparação entre deslocamentos máximos na tampa 70x70 D400, considerando a utilização ou não utilização de aro.

	Deslocamento máximo [mm]	
	Com aro	**Sem aro**
Reforço original	5.38	6.27
Reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça	5.01	9.72

3.3.2.4. Parâmetros da malha

Ao ato de dividir um sólido em elementos finitos dá-se a designação de discretização, e ao conjunto de elementos finitos gerados dá-se o nome de malha. Quanto mais refinada se pretenda que seja a malha mais complexa se torna a discretização, o que acarretará custos, influenciados diretamente pela necessidade de *hardware* especializado e competente, e por tempos de simulação e geração de malha substancialmente superiores.

A complexidade inerente ao projeto que pretendemos estudar reflete-se diretamente na necessidade de utilização de parâmetros de discretização também mais sofisticados. O ANSYS® tem uma biblioteca de elementos predefinidos que vai desde cascas, vigas etc., que pode ser manipulada pelo operador ou o próprio *software* tem ferramentas de análise que lhe permitem identificar uma solução viável para o problema inserido. Confiando a escolha do elemento ao programa, as peças em análise foram todas tratadas segundo a designação interna de SOLID187.

O *software* divide em dois grandes grupos os elementos da sua livraria: (a) elementos de ordem linear e (b) elementos de ordem quadrática (Figura 3.18). Nos casos em estudo pela quantidade de pormenores e geometria irregular será aconselhável o uso de elementos quadráticos, uma vez que para a geração de resultados precisos usando elementos lineares a operação de discretização tornar-se-ia complexa.

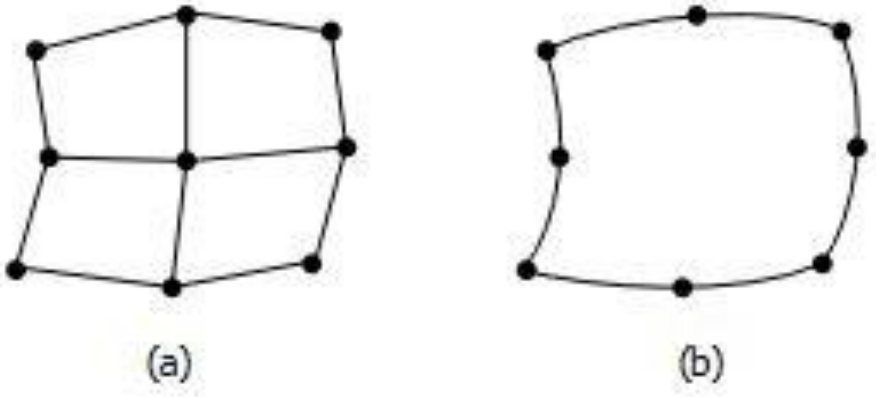

Figura 3.18. Comparação entre elementos de ordem linear e quadrática **(SAS IP, Inc, 2017)**.

SOLID187 é um elemento tetraédrico, indicado para peças 3-D, com 10 nós, ordem quadrática e adequado para modelar malhas irregulares. Cada nó possui 3 graus de liberdade: translações em x, y, z, considerando um sistema cartesiano.

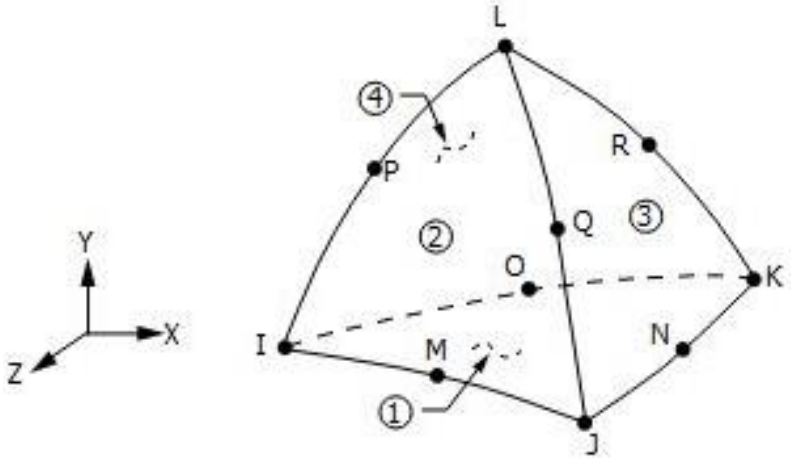

Figura 3.19. Exemplo de elemento SOLID187 **(SAS IP, Inc, 2017)**.

Pelo que já fora exposto ao longo do relatório é intuitivo perceber que malhas grosseiras, ou seja com um pequeno número de elementos, conduzirão a resultados imprecisos, assim é imprescindível analisar a convergência dos resultados pelo refinamento da malha. Concluindo esta tarefa, obtém-se uma perceção sobre o erro praticado ao considerar um menor número de elementos e pesa-se essa relevância em relação ao tempo de simulação.

A manipulação dos parâmetros de discretização do ANSYS® é bastante complexa, dado que a quantidade de opções de refinamento é extensa, desde condições de refinamento local, com diversas funções de adaptação ao sólido, e até definições a nível da utilização de recursos de hardware. No sentido de aferir a convergência da deflexão máxima

nas tampas, foram realizadas cinco simulações, para cada projeto, aumentando gradualmente o número de elementos gerados, como demonstram os gráficos expostos nos APÊNDICE A– Testes de Convergência tampa RED. 60 D400, APÊNDICE B- Testes de Convergência tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça, APÊNDICE C- Testes de Convergência tampa 807x607 D400 e APÊNDICE D- Testes de Convergência tampa 70X70 D400, em todos os casos foram obtidas convergências na ordem de 0.01 mm, que se demonstra consideravelmente aceitável, à exceção dos projetos da tampa 70x70 D400 com convergências mais alargadas, promovidas pelo acréscimo de complexidade que da análise com o aro advém.

3.3.2.5. Carga a aplicar

De acordo com o descrito previamente, nas considerações sobre a norma no ponto 3.1, e tendo em consideração que as cotas de passagem (CO) de cada um dos projetos pode ser consultado na Tabela 3.6, as tampas em estudo, pela consulta da Figura 3.2, serão todas sujeitas a um teste de integridade estrutural aplicando-lhe uma força ao centro distribuída por uma área correspondente a um círculo com 250mm de diâmetro.

Tabela 3.6. Cotas de passagem (CO) dos projetos em estudo.

	CO [mm]
RED. 60 D400	626
RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça	638
807x607 D400	530
70x70 D400	606

Como todos os projetos em estudo são da classe D400, destinada à utilização em vias públicas sujeitas ao tráfego de todo o tipo de veículos, a correspondente força para o teste de capacidade de carga é F_T=400 kN, e F_P=266 kN para o ensaio de deflexão. Como já discutido atrás (3.3) a simulação a executar não está de acordo com qualquer um dos ensaios referidos pela norma, no entanto tomar-se-á o valor de F_P=266 kN como referência para o estudo a realizar, através dele procurar-se-á advertir para a importância da continuação da exploração da temática das simulações.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo far-se-á a comparação das diversas configurações estudas, de uma forma individual respeitante a cada tampa. De forma a simplificar a perceção dos resultados e uma vez que seria desnecessário apresentar todos os dados, apenas serão estudadas as deflexões máximas e tensões respeitantes à malha mais refinada, para cada um dos casos. Como já fora referido anteriormente, para o ponto mais importante, as deflexões, procedeu-se ao estudo de convergência que pode ser consultado na lista de apêndices anexa (APÊNDICE A– Testes de Convergência tampa RED. 60 D400, APÊNDICE B- Testes de Convergência tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça, APÊNDICE C- Testes de Convergência tampa 807x607 D400 e APÊNDICE D- Testes de Convergência tampa 70X70 D400).

4.1. RED. 60 D400

Tabela 4.1. Resultados da simulação dos projetos da tampa RED.60 D400.

Geometria de reforço	Deflexão [mm]	Tensão equivalente de Von-Misses máxima (MPa)	Numero de elementos
RED. 60 D400	1.67	1071	144445
RED. 60 D400 EIXO E DOBRADIÇA	1.36	1292	312837
807X607 D400	1.21	1338	149808
70X70 D400	1.31	693	186270

A conclusão mais gritante da Tabela 4.1 são os resultados estranhamente elevados do projeto original, que apresenta os valores de deflexão mais elevados. Na realidade, este é um projeto que na prática já não é produzido com esta configuração, devido precisamente ao seu incumprimento com as imposições de segurança, serve, no entanto, esta análise para corroborar a existência de soluções francamente melhores.

Uma das soluções com resultados também eles menos expectáveis é o projeto com o reforço da tampa 807x607 D400, que apresenta a melhor solução considerável no espectro dos ensaios. Este facto assume uma perspetiva intrigante com o dado de que as novas tampas RED. 60 D400 são produzidas com o reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça, que não se afigura como a solução mais promissora. Esta análise será discutida mais profundamente no ponto 4.2.

Os valores das tensões máximas induzidas são particularmente elevados, facto que se verificará sistemático ao longo desta apresentação de resultados. A ocorrência destes valores dá-se tipicamente em zonas de acidentes geométricos, sendo de certa forma mínimos e isolados. No capítulo 6 far-se-á referência à importância de estudo deste fator, e da análise de convergência deste parâmetro, uma vez que será imprescindível para o verdadeiro conhecimento do impacto da deformação induzida nestas zonas, no entanto agora é apenas possível concluir que estas serão zonas possivelmente de criticidade estrutural e poderão sofrer elevados níveis de deformação plástica.

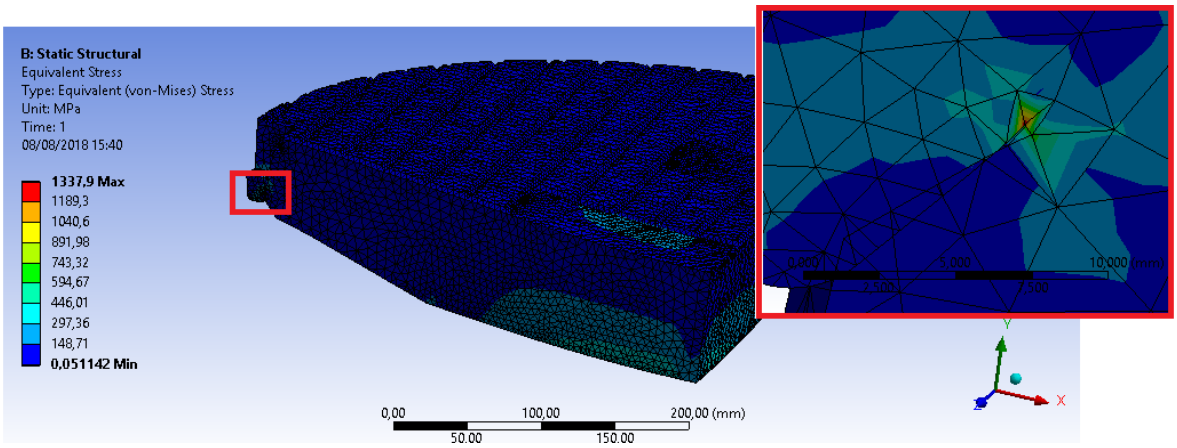

Figura 4.1. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto RED.60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400.

O esquema da zona de concentração de tensões apresentado na Figura 4.1, permite concluir que a zona onde esta ocorre é uma zona com algum impacto geométrico, nomeadamente pela existência de cavidades no projeto original da tampa, situadas um pouco acima deste elemento. No pormenor nota-se, no entanto, alguma irregularidade inexplicável na composição da malha, provavelmente motivada pela incongruente construção em CAD do reforço. Ainda assim, ao analisar todo o resto do conjunto percebe-se que maioritariamente o projeto responde de forma a não ultrapassar o limite elástico, no entanto

existem zonas nomeadamente no limiar do reforço, representadas a azul turquesa, que ultrapassam a tensão limite elástica do material (σ_y=320-370 MPa).

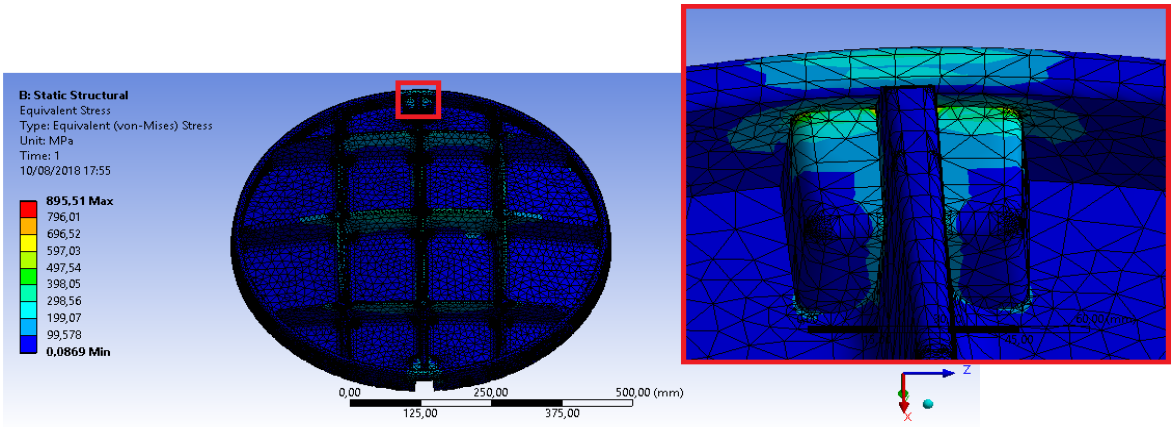

Figura 4.2. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto RED.60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400, tampa completa.

Depreende-se que a zona anteriormente referida é afetada por uma incompatibilização dos softwares informáticos, criando aí uma interface inexistente onde deveria ser um sólido homogéneo. Pela Figura 4.2, onde se efetuou o estudo com a tampa completa, a zona de concentração de tensões desaparece, ainda assim ocorrem ali tensões elevadas, ainda que mais baixas que o estudo da Figura 4.1, motivadas pelo acidente geométrico existente. A deflexão ao centro mantém o valor apresentado.

4.2. RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça

Tabela 4.2. Resultados da simulação dos projetos da tampa RED.60 D400 Eixo e Dobradiça.

Geometria de reforço	Deflexão [mm]	Tensão equivalente de Von-Misses máxima (MPa)	Numero de elementos
RED. 60 D400	1.76	804.7	167205
RED. 60 D400 EIXO E DOBRADIÇA	1.33	518.4	321205
807X607 D400	0.91	1810.3	168770
70X70 D400	1.30	449.9	208601

Assim como no projeto anterior aqui o reforço que apresenta melhores resultados é o da tampa 807x607 D400, o que é interessante do ponto de vista que a filosofia de construção de tampas na Fucoli-Somepal não comtempla este tipo de geometria para tampas redondas, usando as típicas geometrias em forma de teia de aranha, no entanto esta solução existe já no mercado. Apesar da similaridade de resultados a diferença de grandezas é elevada, ou seja, o reforço aludido responde de uma forma muito mais eficaz neste caso, enquanto que a comparação dos outros resultados é menos questionável.

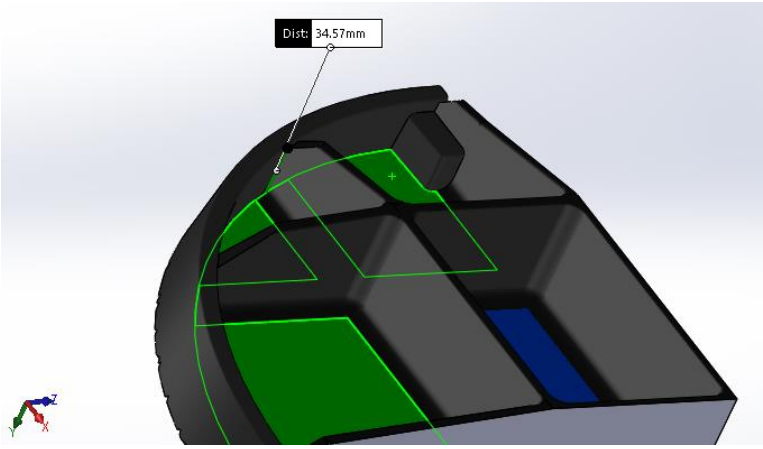

Figura 4.3. Pormenor da altura das alhetas do reforço junto à borda da tampa do projeto RED.60 D400 com reforço 807x607 D400.

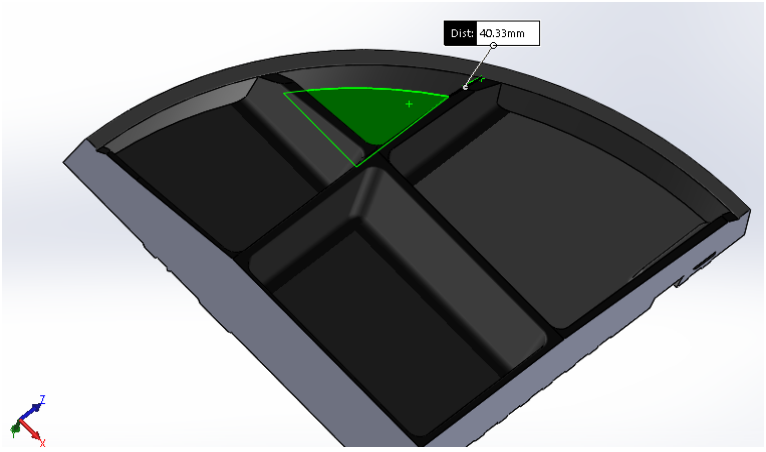

Figura 4.4. Pormenor da altura das alhetas do reforço junto à borda da tampa do projeto RED.60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço 807x607 D400.

A causa mais provável para a diferença apontada é a altura do bordo da tampa, que difere entre os projetos em cerca de 5 mm, como se pode observar nas Figura 4.3 e Figura 4.4, uma vez que este é o único reforço que varia a altura das alhetas na extremidade. Esta ideia é corroborada pelo facto de que o reforço da tampa 70x70 D400, por não ter um contacto expressivo com o bordo, devido ao acabamento desnivelado das suas alhetas, não apresenta alterações de resultado significativas.

Mais uma vez os valores das tensões são expressivamente elevados, especialmente o do reforço que apresentou melhores resultados, e também aqui os motivos e conclusões são os mesmos, enunciados no projeto anterior, na secção de apêndices podem ser consultados os diagramas de distribuição de tensões gerados pelo ANSYS®.

É deduzível que este projeto tem bastante margem de progresso e melhoria, considerando que se pretende aplicar o reforço da tampa 807x607 D400, é previsível, uma vez que a tampa com o seu reforço original corresponde às imposições da norma, que seja possível diminui-lo cerca de 3.5 kg, mantendo-o como a melhor alternativa (Figura 4.5).

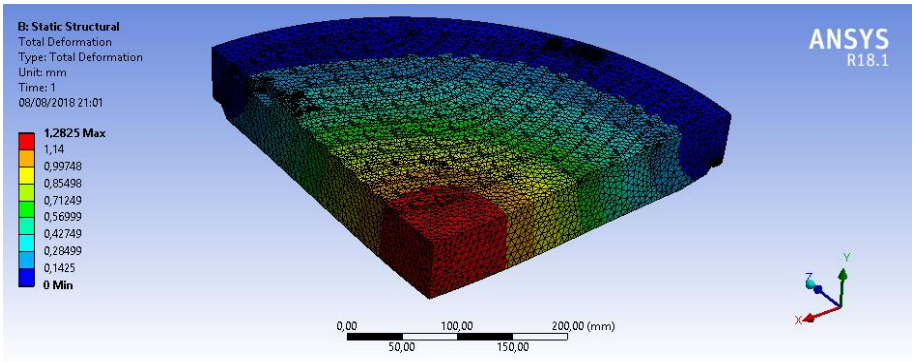

Figura 4.5. Estudo de redução de peso do projeto RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 807x607 D400 (Peso total 58.27kg).

4.3. 70x70 D400

Tabela 4.3. Resultados da simulação dos projetos da tampa 70x70 D400.

Geometria de reforço	Deflexão [mm]	Tensão equivalente de Von-Misses máxima (MPa)	Numero de elementos
RED. 60 D400	5.08	5827	595991
RED. 60 D400 EIXO E DOBRADIÇA	5.12	7327	763648
807X607 D400	2.84	4222	578904
70X70 D400	5.49	8360	591615

Para a análise dos resultados da Tabela 4.3, importa referir que a complexidade deste projeto é, como já fora previamente discutido na secção dos Apoios, acrescida, pela utilização do aro, e dessa forma a precisão dos resultados é acumulavelmente discutível, note-se, no entanto, que o acréscimo de elementos necessários para discretizar o modelo é bastante elevado quando comparado com os outros resultados apresentados. Refira-se ainda que o tempo de simulação e processamento do modelo é bastante mais considerável em relação aos demais projetos estudados.

O resultado mais impactante desta bateria de simulações é o relativo ao reforço original da tampa, que apresenta a maior deflexão, nesse sentido é inquestionável que a melhoria deste projeto é perfeitamente exequível.

Uma vez mais a geometria de reforço da tampa 807x607 é a que apresenta resultados mais satisfatórios, nesta ocorrência com uma margem extremamente superior. Refira-se, no entanto, que é a segunda solução mais pesada (Tabela 3.3), dessa forma interessa estudar, à semelhança do que fora efetuado no ponto anterior, até que ponto é possível reduzir o peso deste projeto.

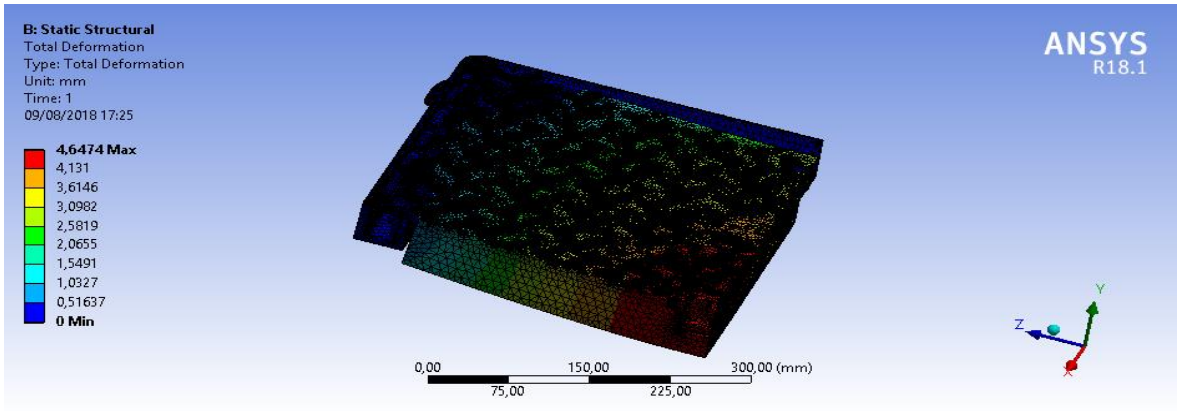

Figura 4.6. Estudo de redução de peso do projeto 70x70 D400 com reforço da tampa 807x607 D400 (Peso total 52.01kg s/aro).

Efetuado uma redução de 20mm nas alhetas do reforço consegue-se uma diminuição de cerca de 3 kg, mantendo este projeto inequivocamente mais resistente estruturalmente com uma deflexão máxima de 4.65mm. Neste caso não foi utilizado o critério da secção anterior, aproximando o resultado da deflexão a outro já testado, porque não existem dados de ensaios reias desta tampa, assim qualquer resultado apresentado pode efetivamente ser falível.

Os valores de tensões apresentados na Tabela 4.3 são absurdamente elevados, e são resultado do contacto da tampa com o aro. Nos projetos anteriores todo o contacto previsto do conjunto dava-se numa interface com considerável dimensão geométrica, aqui o apoio da tampa existe numa área bastante reduzida, contribuindo assim para um cúmulo de concentração de tensões.

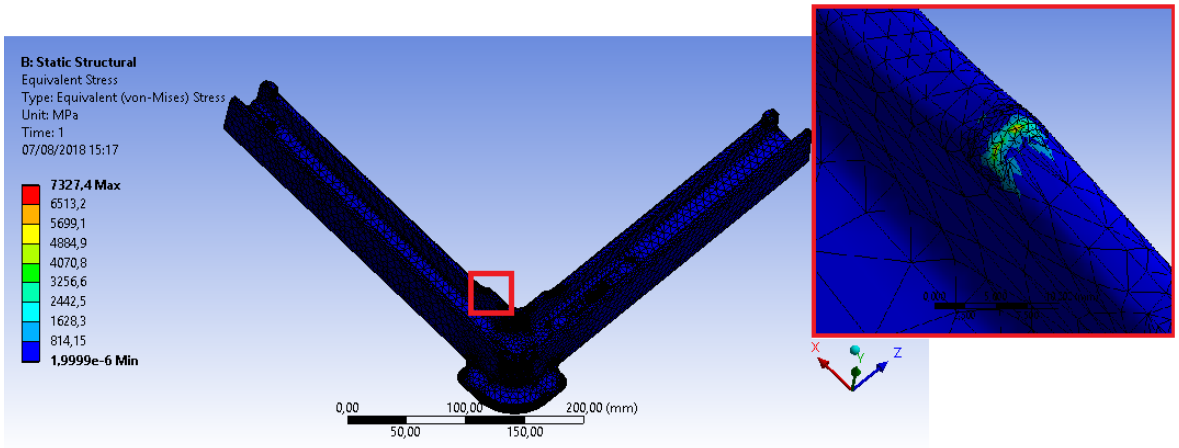

Figura 4.7. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça e aro.

Apesar de a anormalmente elevada concentração de tensões ocorrer no aro (Figura 4.7), deve-se dar especial atenção a este dado uma vez que os ensaios de robustez estrutural estabelecem a apreciação do conjunto, e caso exista falha da parte do aro este componente deve ser repensado. Na generalidade dos casos o aro não apresenta preocupações porque as interfaces de apoio são, como já referido, planas e o carregamento induzido é uniformemente distribuído por uma área considerável.

4.4. 807x607 D400

Tabela 4.4. Resultados da simulação dos projetos da tampa 807x607 D400.

Geometria de reforço	Deflexão [mm]	Tensão equivalente de Von-Misses máxima (MPa)	Numero de elementos
RED. 60 D400	3.51	4515	339707
RED. 60 D400 EIXO E DOBRADIÇA	3.68	4644	463247
807X607 D400	1.84	2355	376646
70X70 D400	3.42	5509	373312

Também nesta comparação o reforço da tampa 807x607 D400, para o caso a configuração original, apresenta o menor valor de deflexão. Este projeto é, de entre os quatro apresentados na Tabela 4.4, aquele que apresenta maior valor de massa, contudo, à semelhança do que foi feito nas secções precedentes, não se justifica a execução de um estudo sobre a redução deste parâmetro uma vez que o projeto em causa é o original e encontra-se certificado, existe no entanto espaço para melhoria do mesmo, de acordo com informações obtidas de ensaios experimentais, no entanto é impossível num estudo desta natureza, sem qualquer termo de comparação, estabelecer a quantidade de material a remover mantendo fiável o processo de produção.

Mais uma vez aqui o número de elementos gerados é comparativamente elevado, deve-se este fator às generosas dimensões dos elementos analisados.

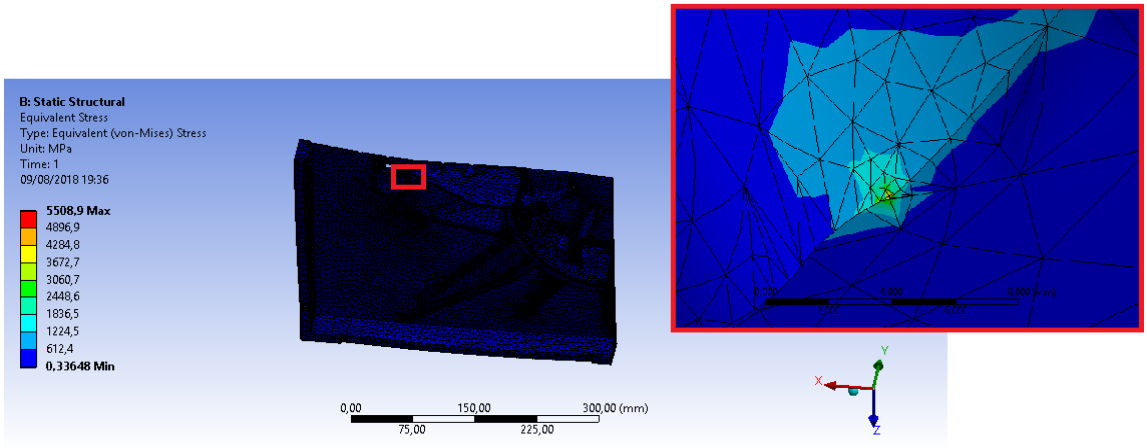

Figura 4.8. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 807x607 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

À semelhança do que sucedia na secção 4.1, também aqui a concentração de tensões pode ser devida a uma incompatibilidade entre a filosofia CAD utilizada e a correspondente importação para o ambiente de simulação, relembre-se que se utilizaram programas distintos para os aludidos fins, ou também pode dever-se ao facto de existir naquela zona um acidente geométrico devido à necessidade de existência de uma cavidade na tampa, pensada para auxiliar a possível necessária abertura, para inspeção à caixa de visita onde possa ser instalada.

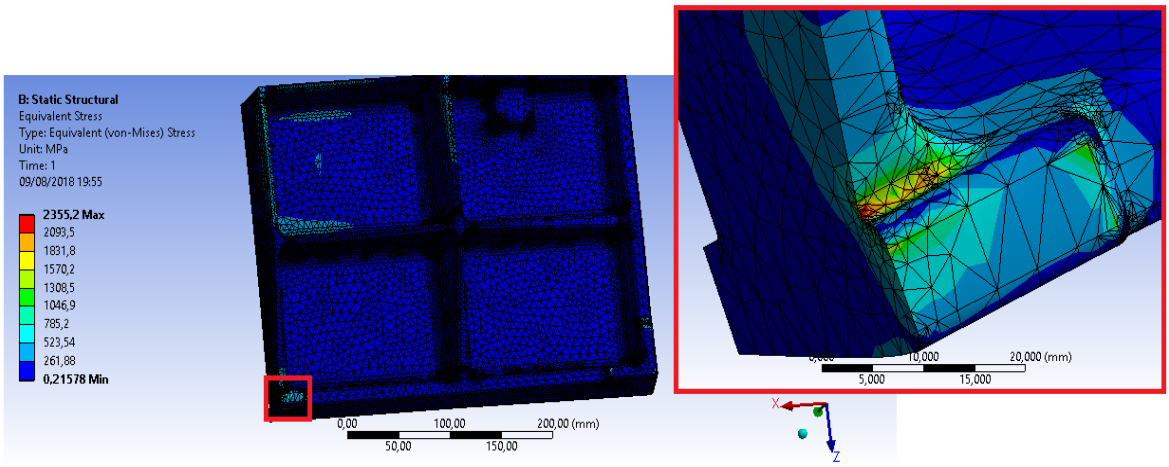

Figura 4.9. Pormenor da zona de ocorrência de tensão máxima do projeto 807x607 D400 com reforço original.

No caso apresentado na Figura 4.9 o problema da concentração de tensões na zona de reentrância na superfície da tampa não ocorre, uma vez que naquela zona a alheta desta configuração envolve toda a configuração conferindo mais resistência nesse local. No seguimento da explanação no ponto 4.3 sobre as zonas de apoio, aqui ao contrário da tampa

70x70 D400 as alhetas de apoio existem na própria tampa, e dessa forma ocorre aí a concentração de tensões. É percetível que a existência deste tipo de elementos será causa de ocorrência de fenómenos de deformação plástica aos quais se deve dar especial atenção.

5. CONCLUSÕES

Toda a envolvente ao estágio curricular foi positiva, nomeadamente no que concerne ao contato com o meio produtivo, permitindo uma elucidação, até então frágil, acerca da realidade laboral e especificamente de todo o processo de conceção dos componentes tratados e de todos os trabalhos auxiliares.

A realização deste relatório teve alguns entraves iniciais, que prejudicaram a celeridade do mesmo, nomeadamente a incompatibilidade de recursos para a finalidade pretendida. O primeiro grande obstáculo passou por encontrar uma solução em termos de software que pudesse ser operável de acordo com as condições operativas da Fucoli-Somepal, com essa necessidade testaram-se algumas soluções infrutuosas até se encontrar o ANSYS®, com esse desenvolvimento surge a impossibilidade de importar os ficheiros originais em SolydWorks™ para este novo ambiente de trabalho de forma a que fossem qualitativamente tratáveis em CAD, consequência disso, optou-se pelo o uso dos dois sistemas e encontrar meio de interação entre eles, por fim o processo de interação com o ANSYS® foi progressivo considerando que nunca tinha havido contacto com o software.

No seguimento do exposto no capitulo anterior, e com as considerações descritas sobre a norma (3.1.2.1), facilmente se percebe que as deflexões apresentadas estarão consideravelmente acima daquilo que é pretendido, à exceção do caso abordado na secção 4.2, em que o valor desse parâmetro se encontra inequivocamente abaixo de 1,25mm que é o valor de deflexão admissível para a respetiva tampa. Dessa forma, importa realçar uma vez mais que a utilização deste tipo de simulação só se torna viável uma vez que se trata de um estudo comparativo, dessa forma analisar individualmente cada resultado é completamente errado.

A utilização de diferentes softwares constituiu uma fonte de erro, para o caso desprezável, no entanto considerável para a pretensão de utilizações futuras em diferentes abordagens. Tome-se como exemplo o descrito no ponto 4.1 sobre a concentração de tensões, naquele caso após a importação do modelo, o software de simulação definiu uma divisão de superfícies, que efetivamente existe por terem sido criadas em operações distintas, no entanto no SolydWorks™ essa situação não se verifica. Esta ocorrência não é

preponderante uma vez que quando a tampa é testada no seu todo aquela zona de concentração de tensões desaparece, elucide-se que existe numa face onde ocorre um corte no sentido de simplificar o processo de simulação, mantendo-se inalterável o parâmetro preponderante ao estudo, a deflexão. Serve isto para alertar que se se vierem a efetuar estudos sobre as tensões induzidas na peça estes incidentes devem ser tomados em conta.

As ferramentas de simulação são muitas vezes vendidas como simples e de fácil utilização, no entanto importa ter alguma cautela nesses julgamentos. Todo o software de simulação necessita da projeção do elemento a estudar, para o caso sólidos tridimensionais, e apesar da relativamente baixa complexidade geométrica das operações efetuadas é um processo incontornavelmente moroso e ao qual se deve dar especial atenção uma vez que pequenas falhas de conceção conduzem a inevitáveis erros acumulativos, depois importa considerar que a modelação da peça construída, a geração da malha e o processo de simulação requerem tempo, exponencialmente afetado pela complexidade do projeto que se pretende estudar e pela qualidade de hardware disponível.

A inexistência desta filosofia de conceção de produto auxiliada por meios de simulação constitui uma oportunidade para toda a comunidade estudantil e para a Fucoli-Somepal de crescer conjuntamente beneficiando manifestamente as partes. Este estudo é uma iteração inicial, identificando necessidades e problemas, a um processo que se espera que venha a ser francamente complementado e posteriormente frutuoso, dessa forma apresentam-se a seguir as abordagens tidas como relevantes:

- Estudo de fadiga oligocíclica do material EN GJS 500 7: este deve ser o primeiro trabalho a ser considerado, uma vez que a sua elaboração vai permitir abrir todas as portas para uma maior aproximação ao tipo de ensaios previstos pela norma, conseguindo assim uma resposta mais precisa sobre o comportamento das peças uma vez que ao contrário do que fora efetuado tem-se em consideração que as peças deformam plasticamente, o que efetivamente acontece como podemos verificar pelos valores das tensões apresentados no capitulo anterior superiores à tensão limite elástica do material.
- Análise numérica das tampas certificadas: após a compatibilização do estudo proposto anteriormente com o ANSYS®, devem ser efetuadas o máximo de simulações possíveis com tampas certificadas, com a

existência respeitante de resultados experimentais, adaptando a discretização dos modelos, no sentido de atingir convergência e similaridade, este é um fator que pode tornar complexo a execução deste ponto, no entanto ele pode e deve ser dividido em vários estudos. A partir daqui ter-se-á uma consciencialização prática sobre a aproximação do método computacional.

- Análise numérica de otimização dos reforços: no seguimento das conclusões obtidas nos pontos anteriores, e com os resultados deste relatório, devem ser testados os modelos aqui descritos como solução e se possível a integração de outros, e uma vez constituído um paradigma de alternativa viável apresentar como protótipo a produzir.
- Análise de pontos críticos: considerando o critério de otimização o reforço de zonas de concentração de tensões, estudar a viabilidade para tal, tendo em conta a interação com peças que tenham sido ensaiadas promovendo uma comparação que ateste o produto deformado com o que se verifica no software.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AZEVEDO, D. F. (2016). Análise estrutural com ANSYS Workbench®.

[2] Dassault Systèmes. (s.d.). *Análise estática linear*. Obtido de Ajuda do SolydWorks: http://help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/HelpViewerDS.aspx?version=2018&prod=SolidWorks&lang=portuguese-brazilian&path=cworks%2fc_Linear_Static_Analysis.htm acedida a 27 de Julho de 2018

[3] Dassault Systèmes. (s.d.). *Entrada de dados para análise estática linear*. Obtido de Ajusa do SolydWorks: http://help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Input_for_Linear_Static_Analysis.htm acedido a 27 de Julho de 2018

[4] European Commitee for Standardization. (June de 2015). EN 124. *Gully tops and manhole tops for vehicular and pedestrian areas - Definitions, classification, generalprinciples of design, performance requirements and test methods*.

[5] Fucoli - Somepal. (s.d.). Obtido de http://www.fucoli-somepal.pt/Default.aspx acedido em 10 de julho de 2018

[6] SAS IP, Inc. (2017). ANSYS Help Viewer. *Choosing Between Linear and Higher Order Elements*.

[7] SAS IP, Inc. (2017). ANSYS Help Viewer. *Element library, SOLID187*.

[8] SHIH, R. H. (2014). *Introduction to Finite Element Analyses using Solydworks Simulation 2014.* Oregon: SDC Publications.

[9] Universidade Federal do Paraná. (19 de Julho de 2018). *Introdução ao MEF (2015).* Obtido de http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/

APÊNDICE A – TESTES DE CONVERGÊNCIA TAMPA RED. 60 D400

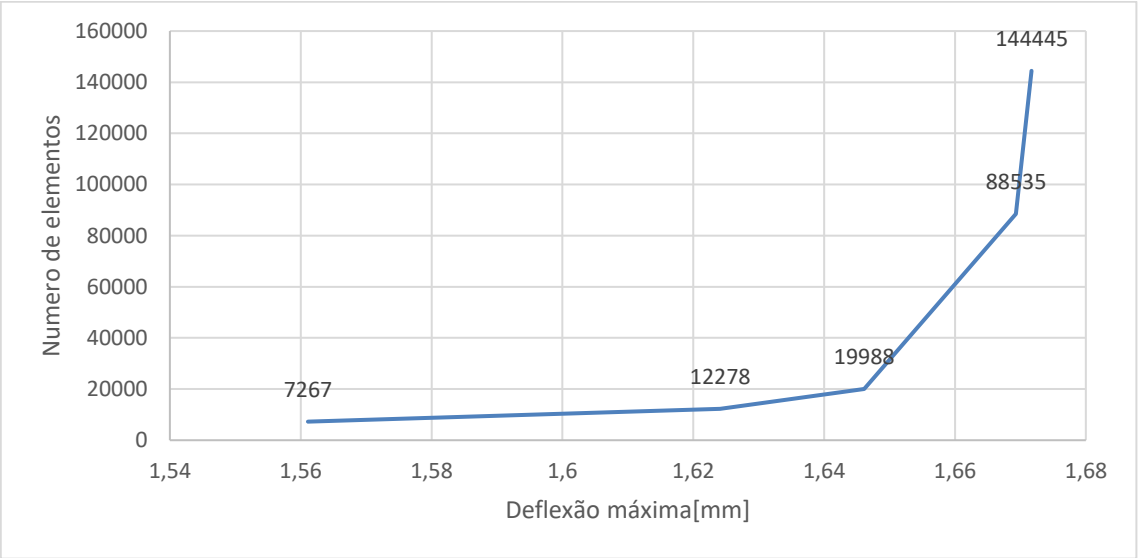

Figura A 1 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 original.

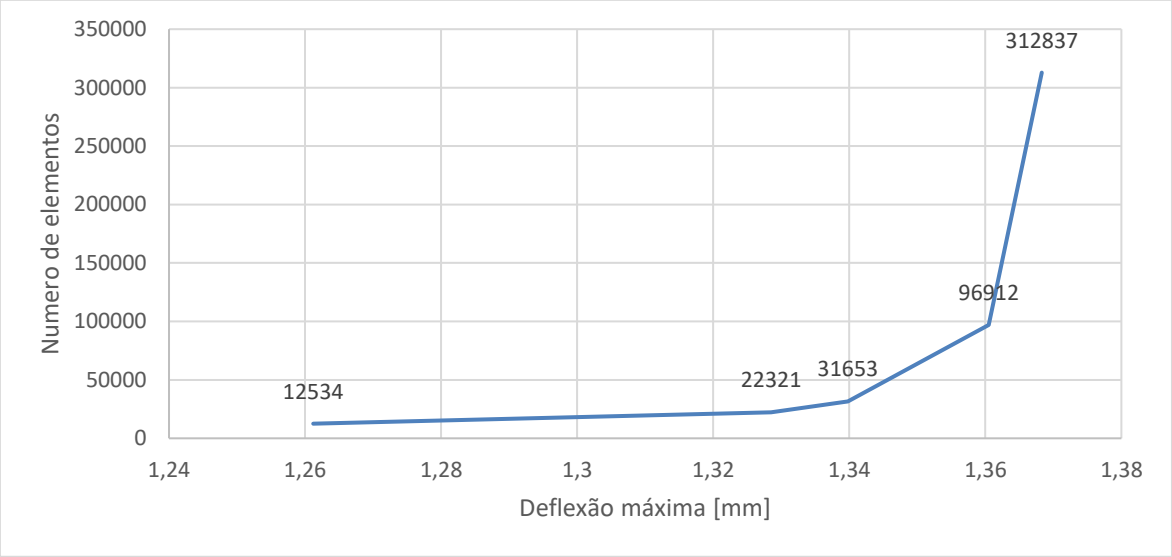

Figura A 2 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

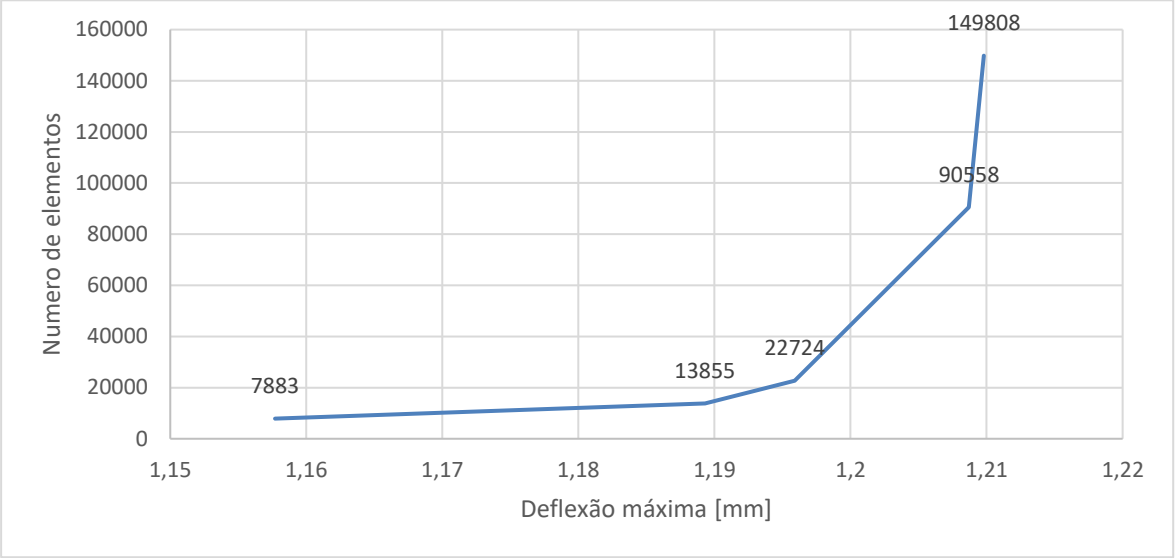

Figura A 3 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400.

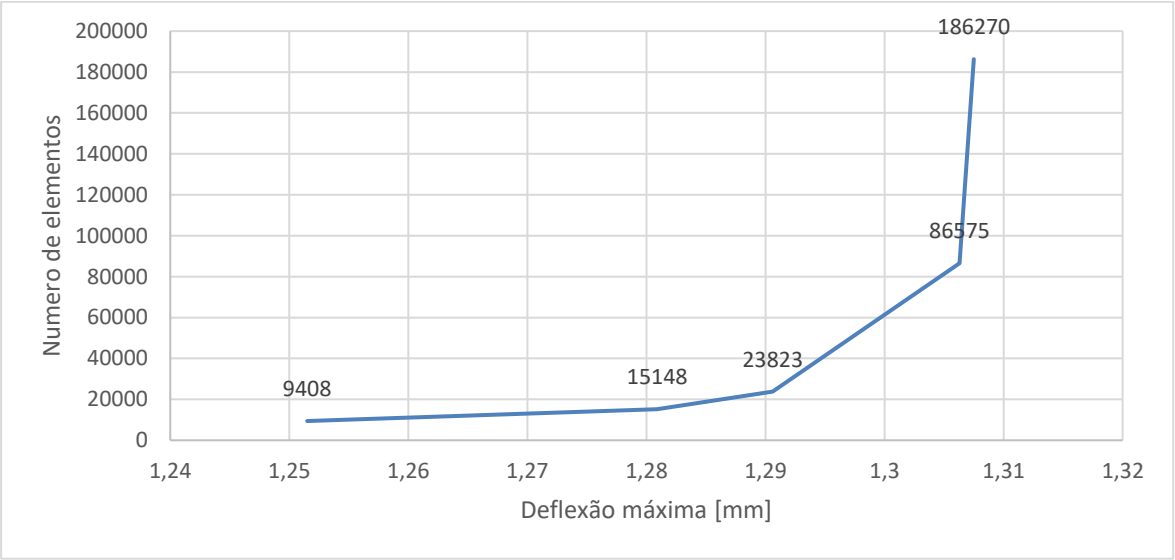

Figura A 4 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

APÊNDICE B - TESTES DE CONVERGÊNCIA TAMPA RED. 60 D400 EIXO E DOBRADIÇA

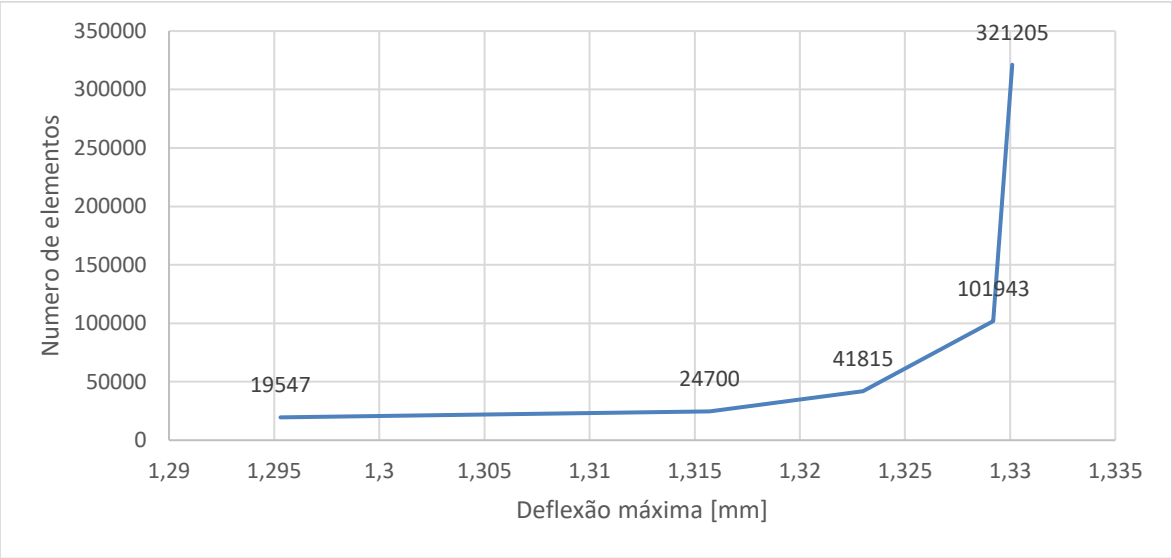

Figura B 1 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça original.

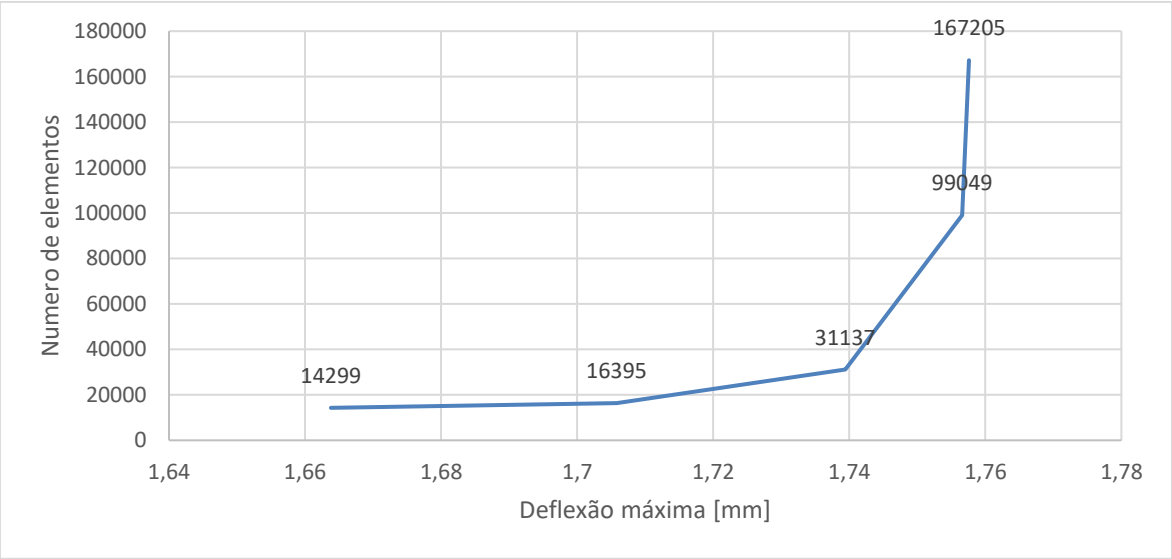

Figura B 2 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa RED. 60 D400.

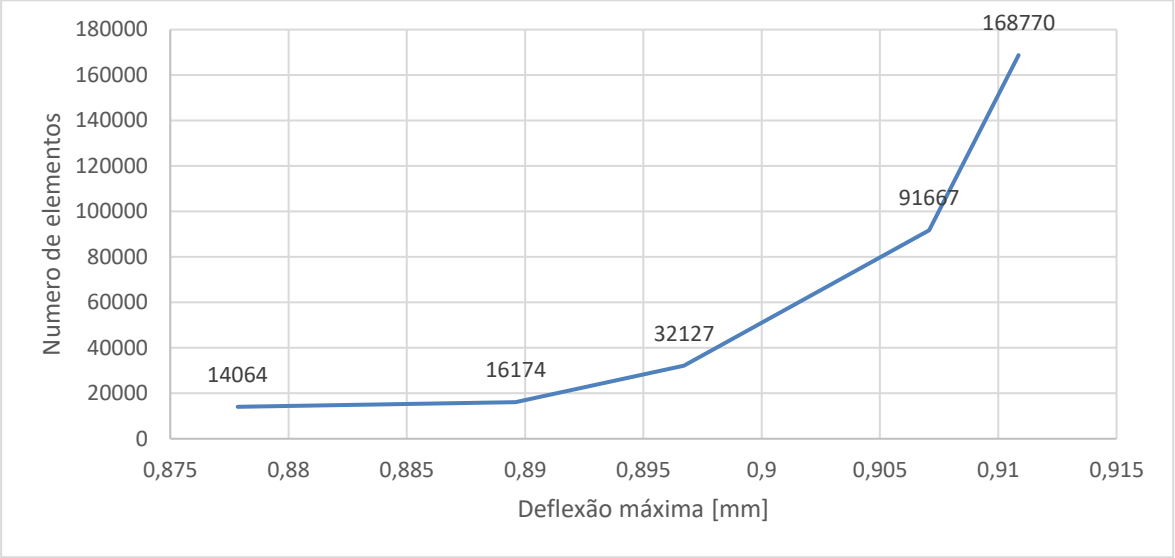

Figura B 3 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 807x607 D400.

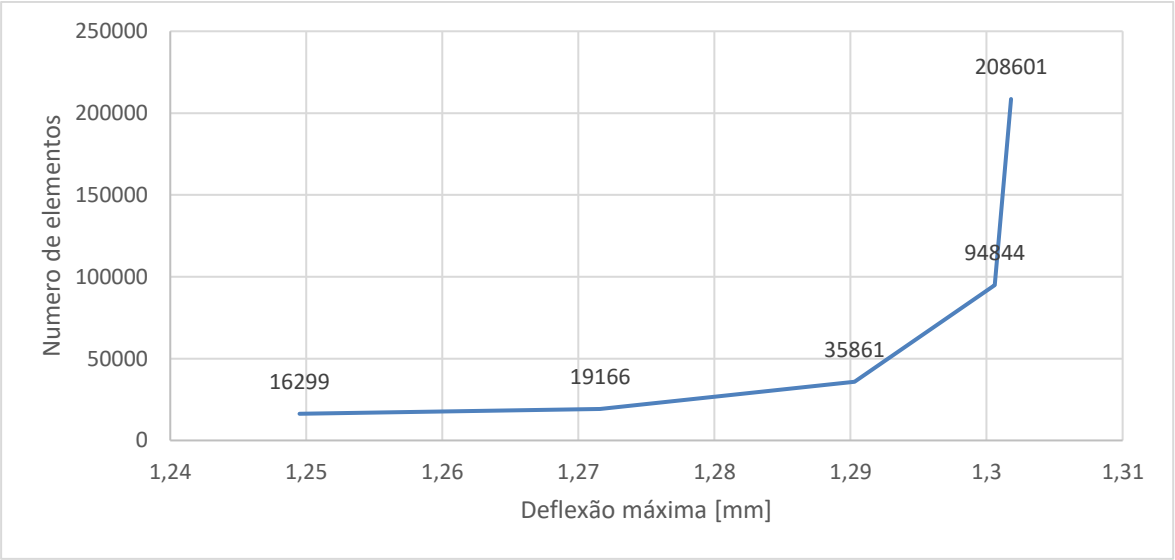

Figura B 4 - Gráfico de convergência da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 70x70 D400.

APÊNDICE C - TESTES DE CONVERGÊNCIA TAMPA 807X607 D400

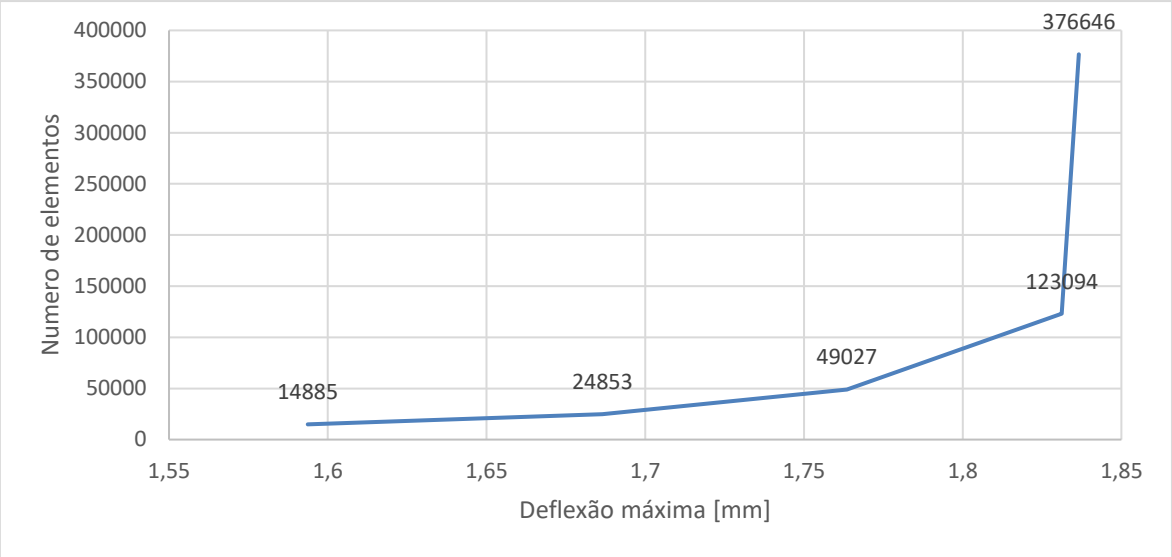

Figura C 1 - Gráfico de convergência da tampa 807x607 D400 original.

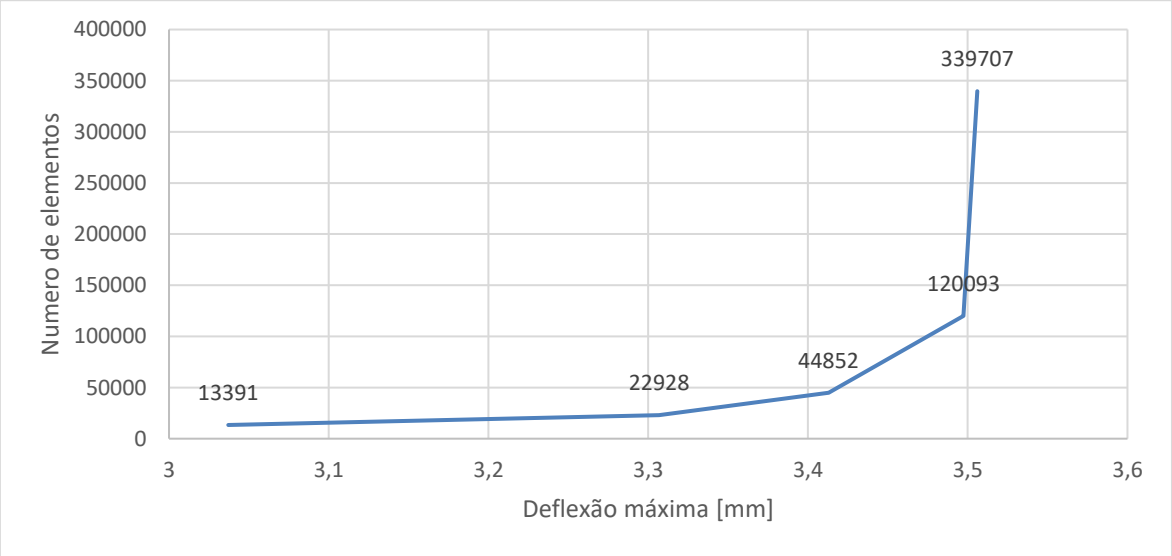

Figura C 2 - Gráfico de convergência da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400.

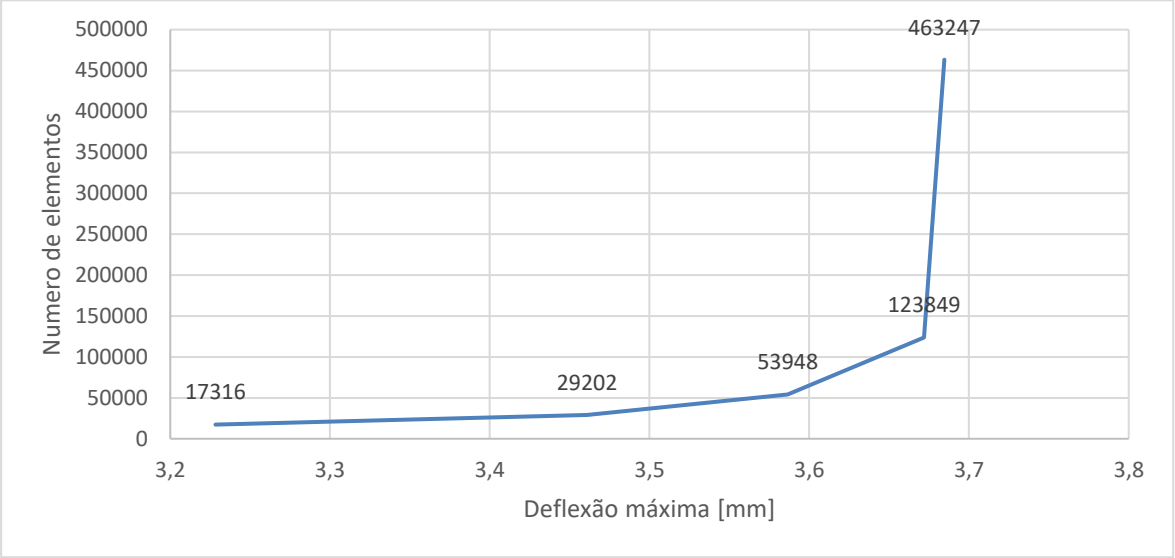

Figura C 3 - Gráfico de convergência da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

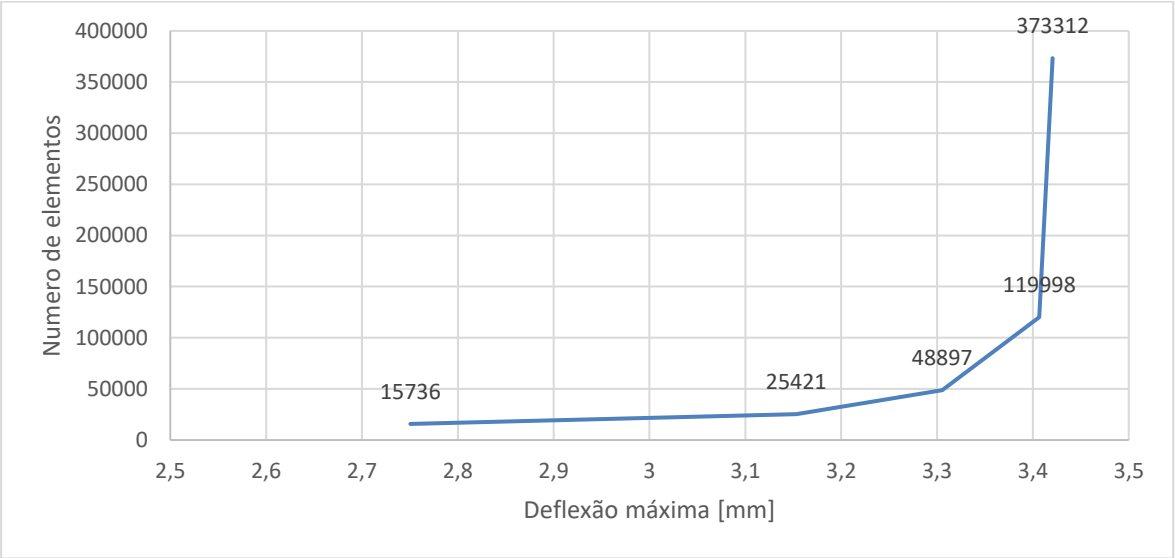

Figura C 4 - Gráfico de convergência da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

APÊNDICE D - TESTES DE CONVERGÊNCIA TAMPA 70X70 D400

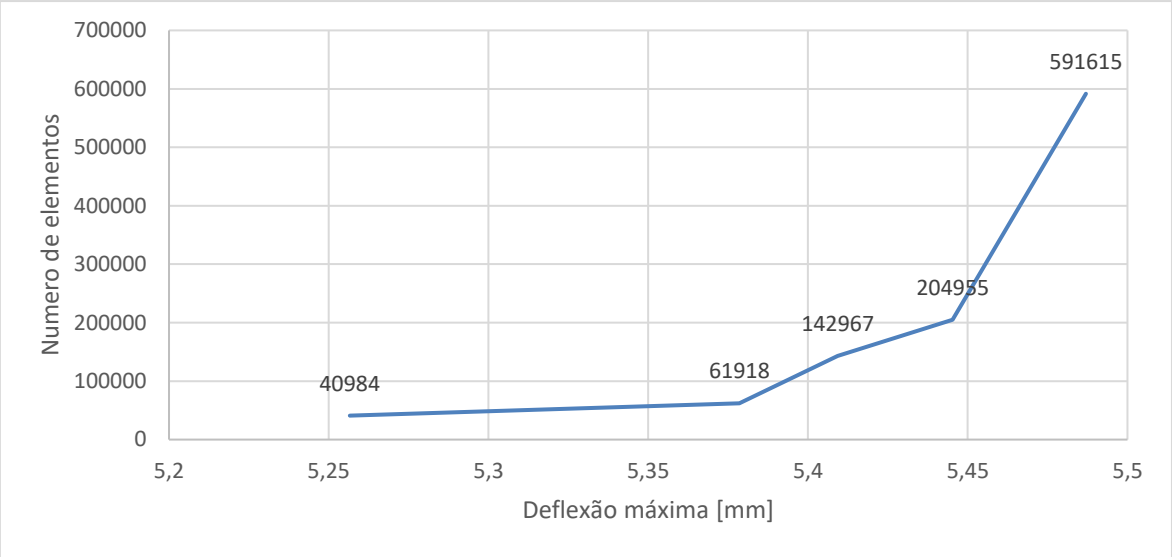

Figura D 1 - Gráfico de convergência da tampa 70x70 D400 original.

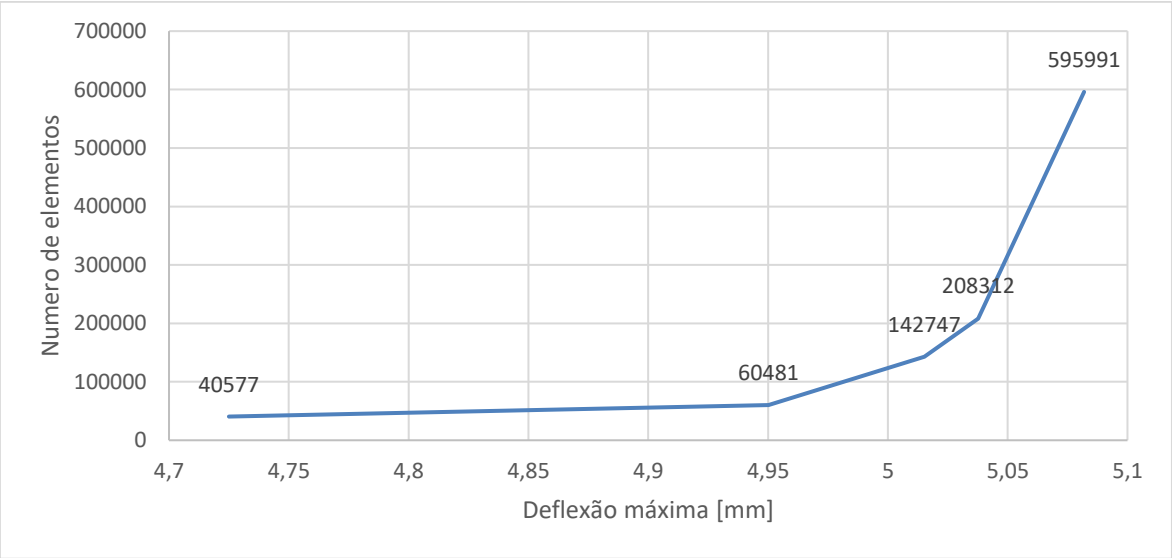

Figura D 2 - Gráfico de convergência da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400.

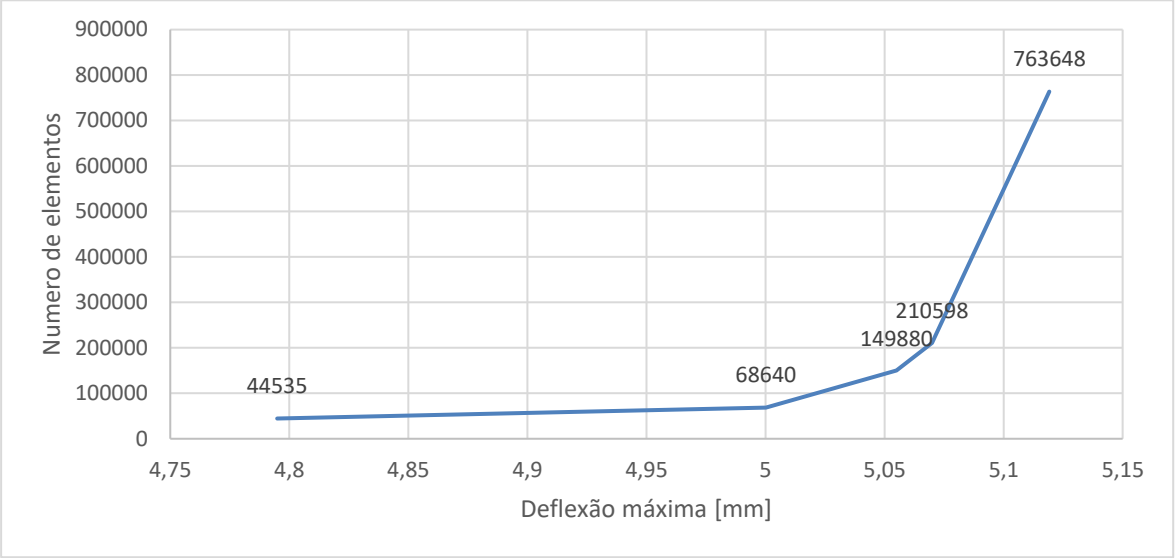

Figura D 3 - Gráfico de convergência da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

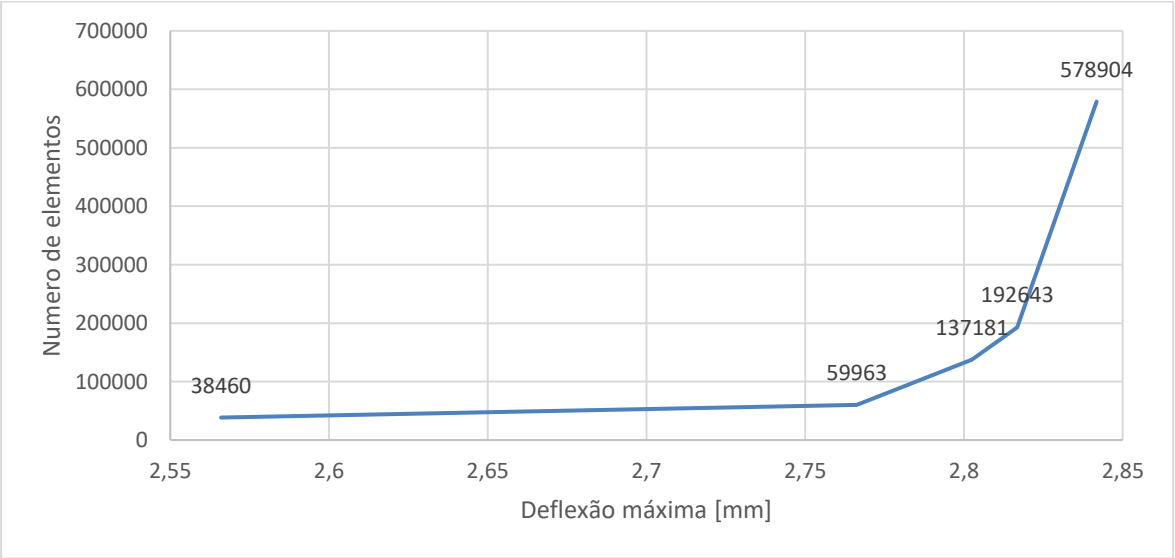

Figura D 4 - Gráfico de convergência da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa 807x607 D400.

APÊNDICE E - DEFLEXÕES MÁXIMAS PARA SIMULAÇÃO COM MALHA REFINADA

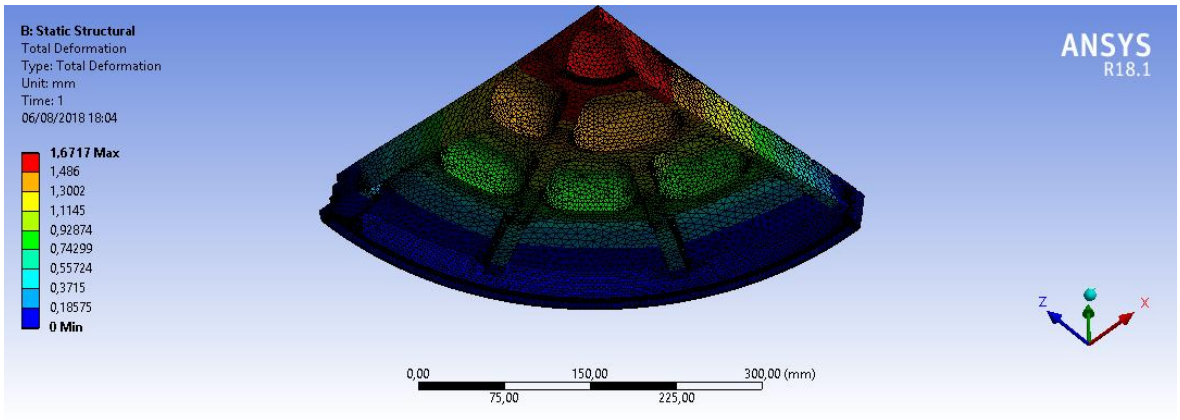

Figura E 1 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 com reforço original.

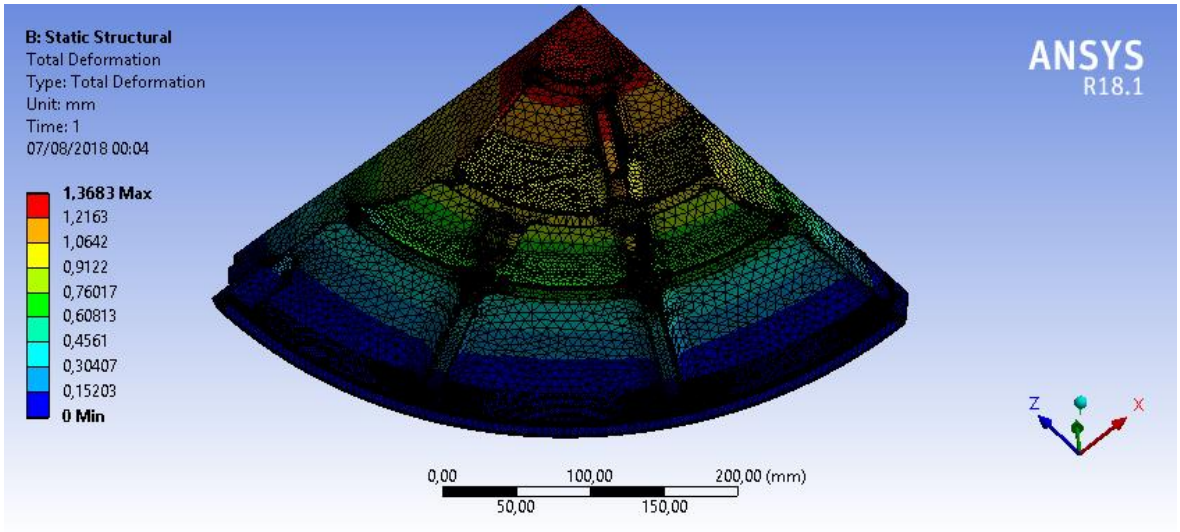

Figura E 2 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

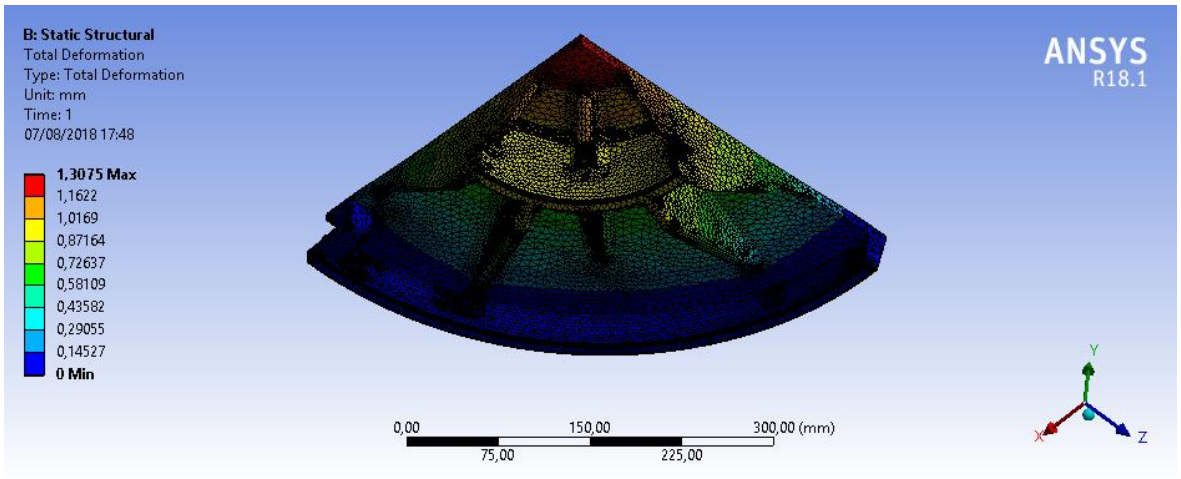

Figura E 3 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

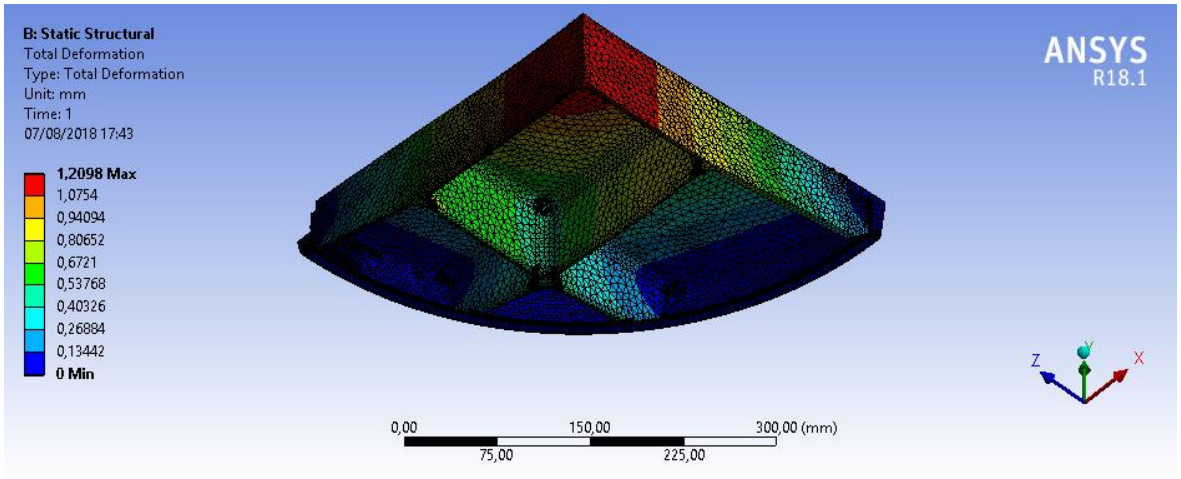

Figura E 4 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400.

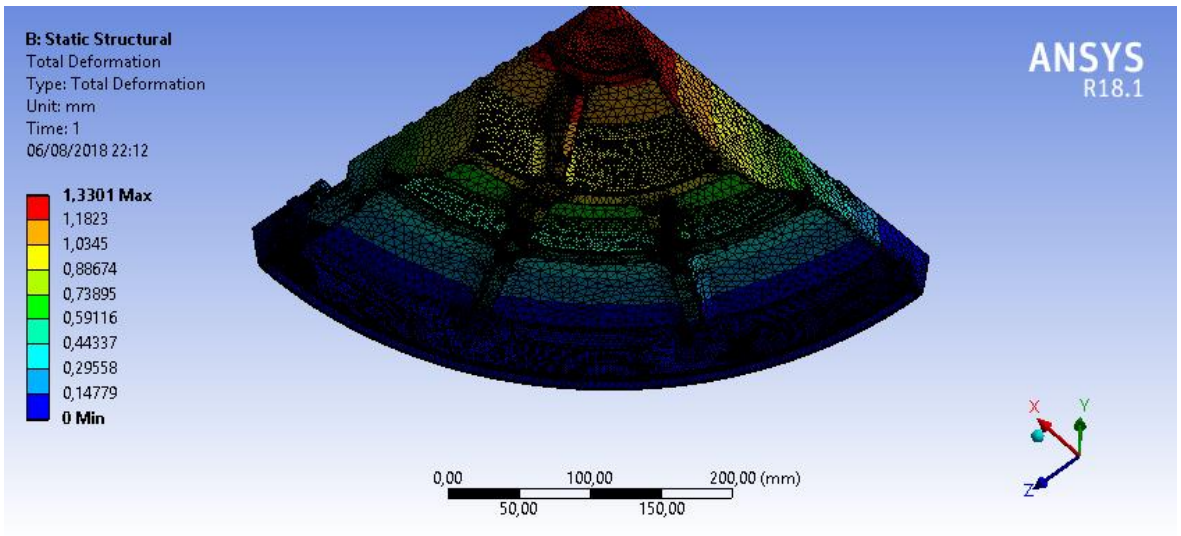

Figura E 5 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço original.

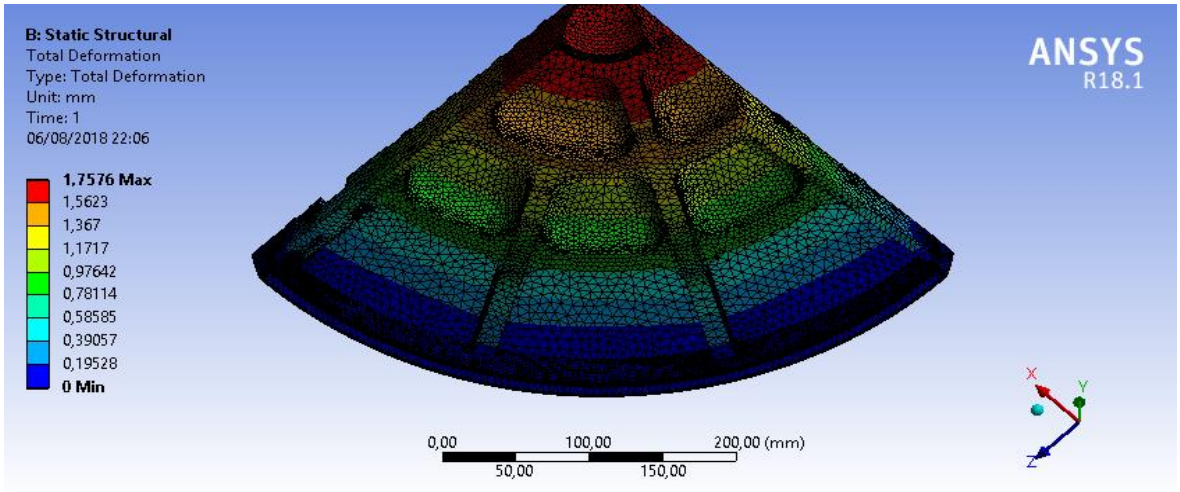

Figura E 6 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa RED.60 D400.

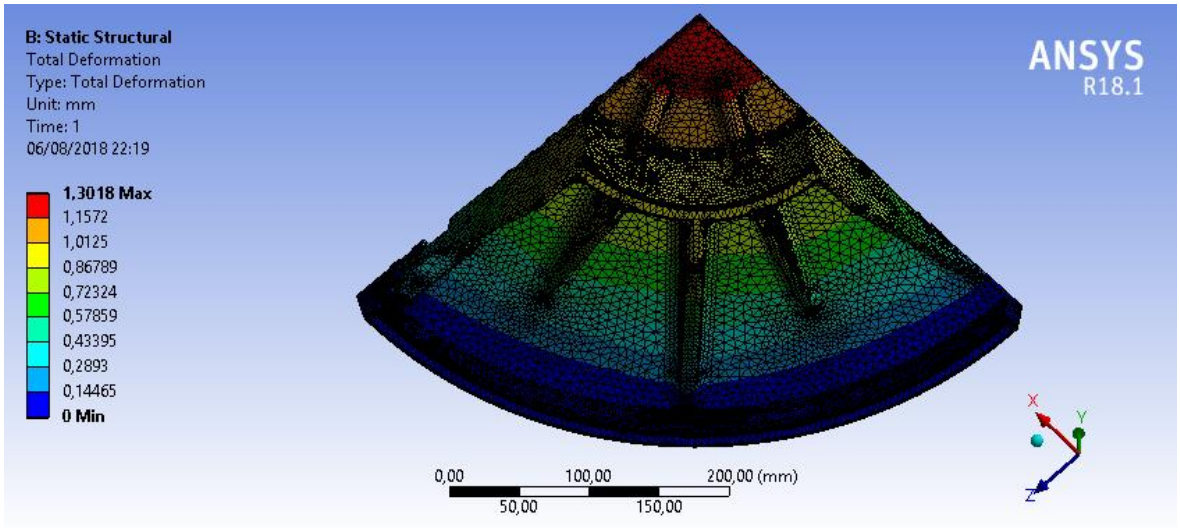

Figura E 7 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 70x70 D400.

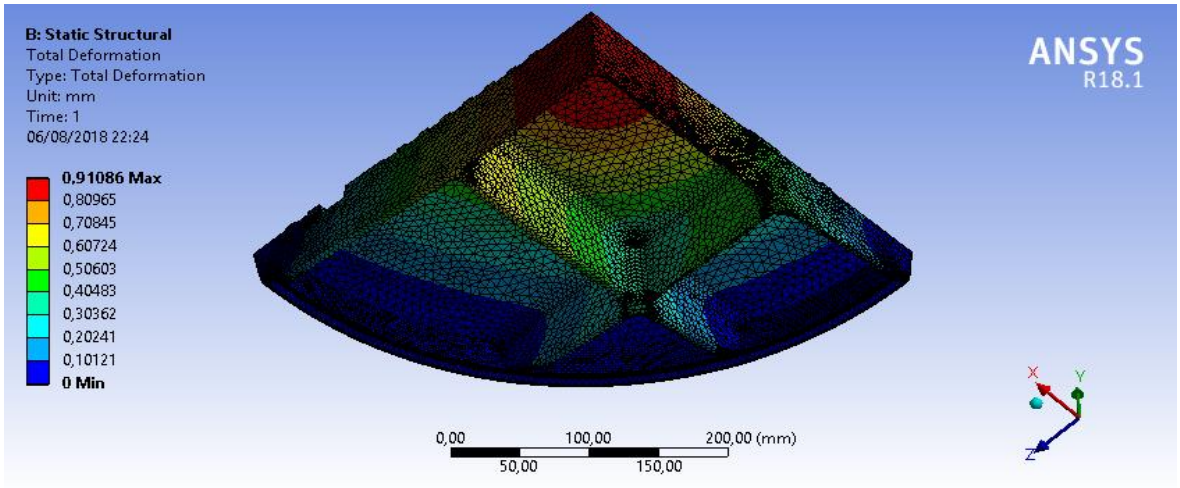

Figura E 8 – Deflexão máxima projeto tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 807x607 D400.

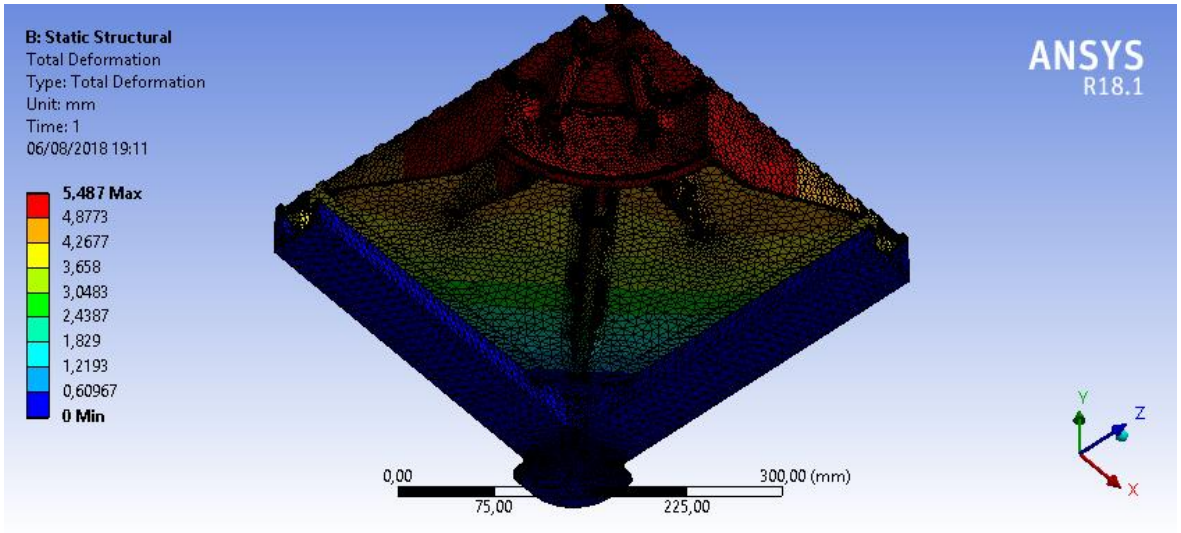

Figura E 9 – Deflexão máxima projeto tampa 70x70 D400 com reforço original e aro.

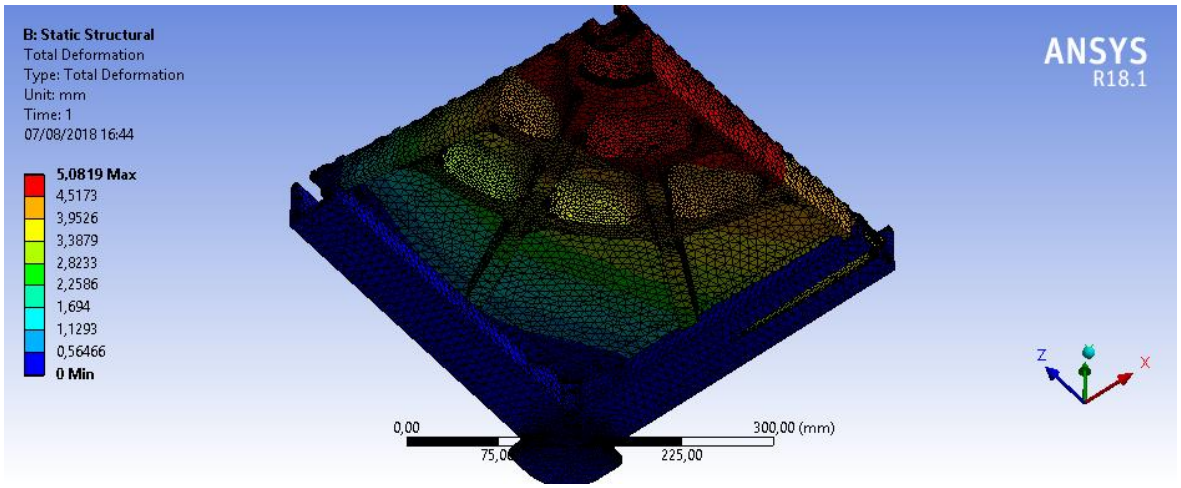

Figura E 10 – Deflexão máxima projeto tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 e aro.

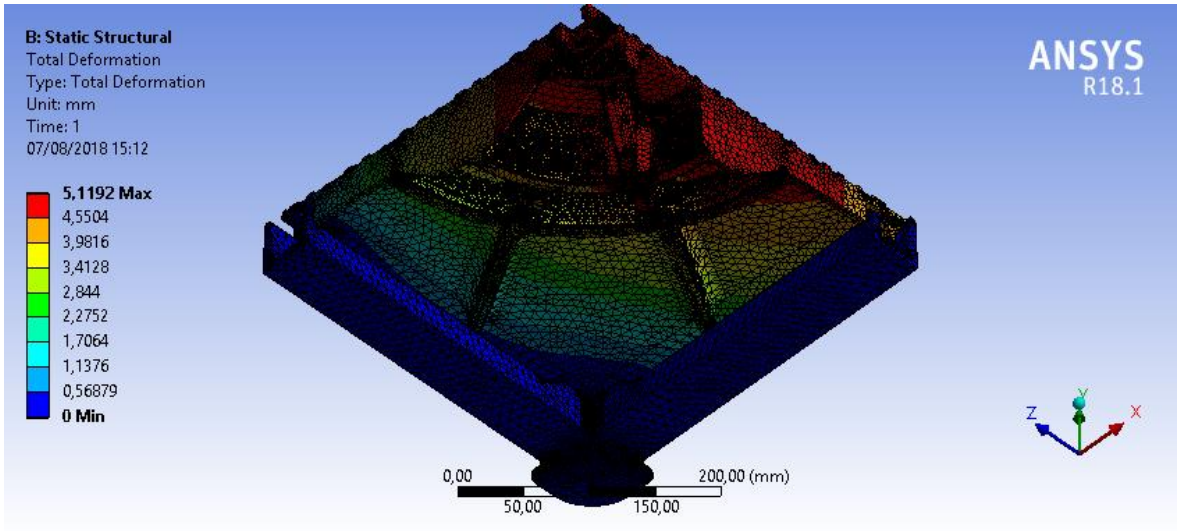

Figura E 11 – Deflexão máxima projeto tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça e aro.

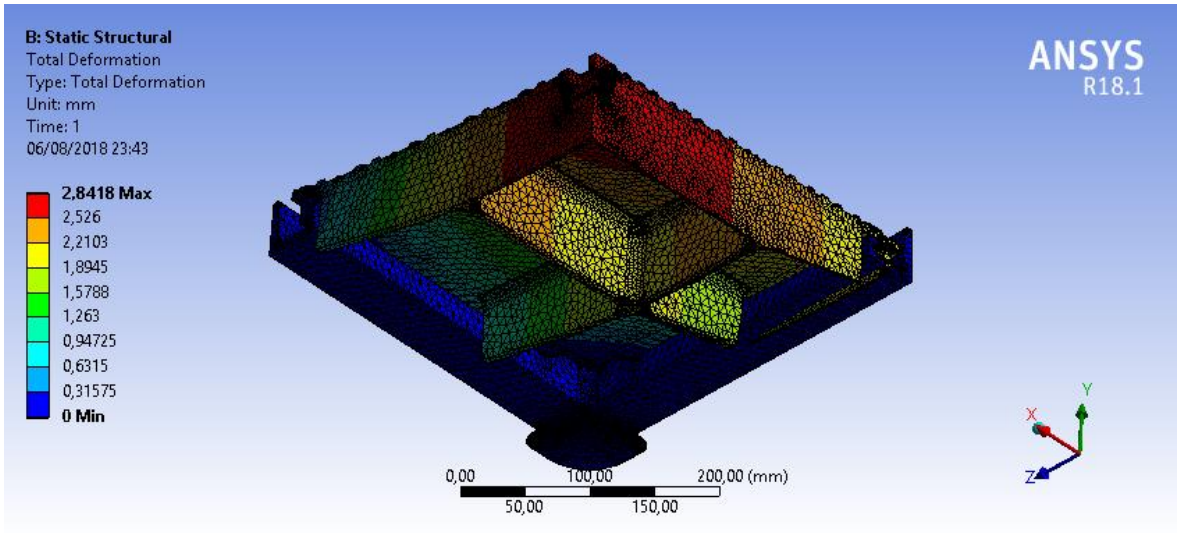

Figura E 12 – Deflexão máxima projeto tampa 70x70 D400 com reforço da tampa 807x607 D400 e aro.

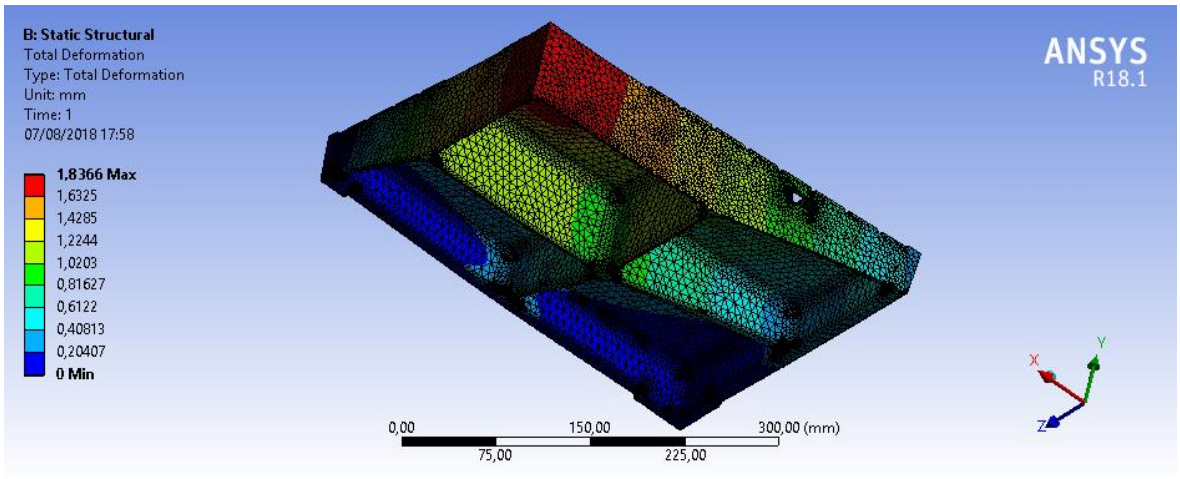

Figura E 13 – Deflexão máxima projeto tampa 807x607 D400 com reforço original.

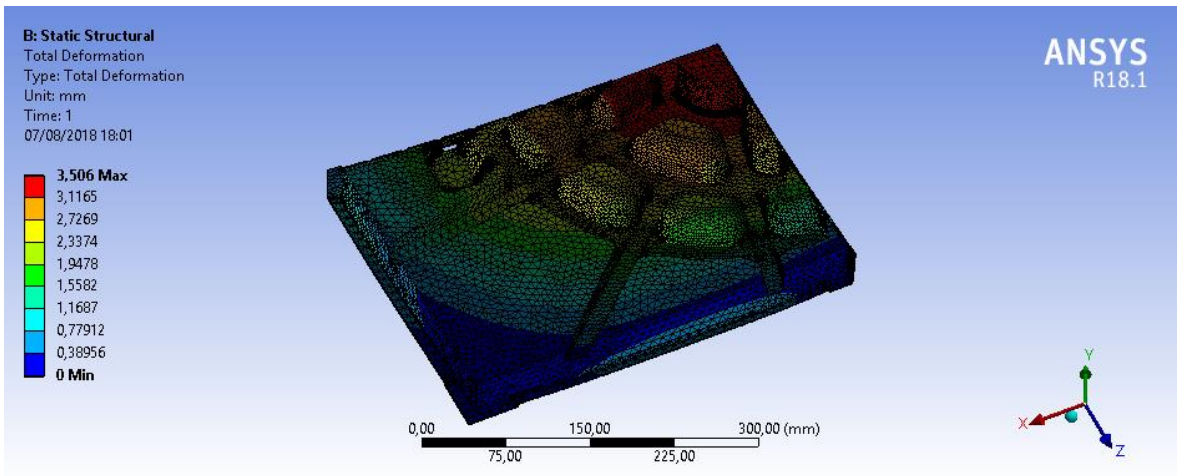

Figura E 14 – Deflexão máxima projeto tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400.

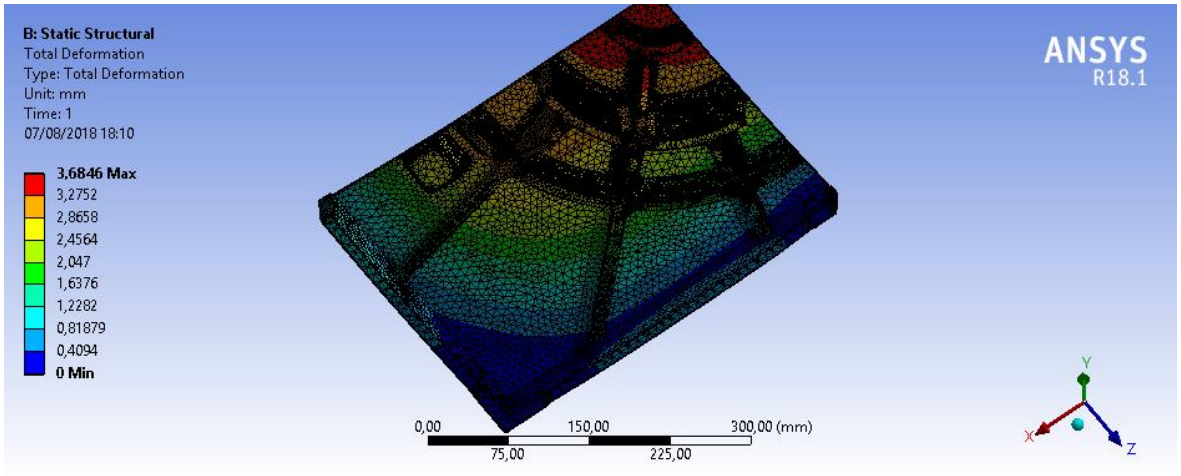

Figura E 15 – Deflexão máxima projeto tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

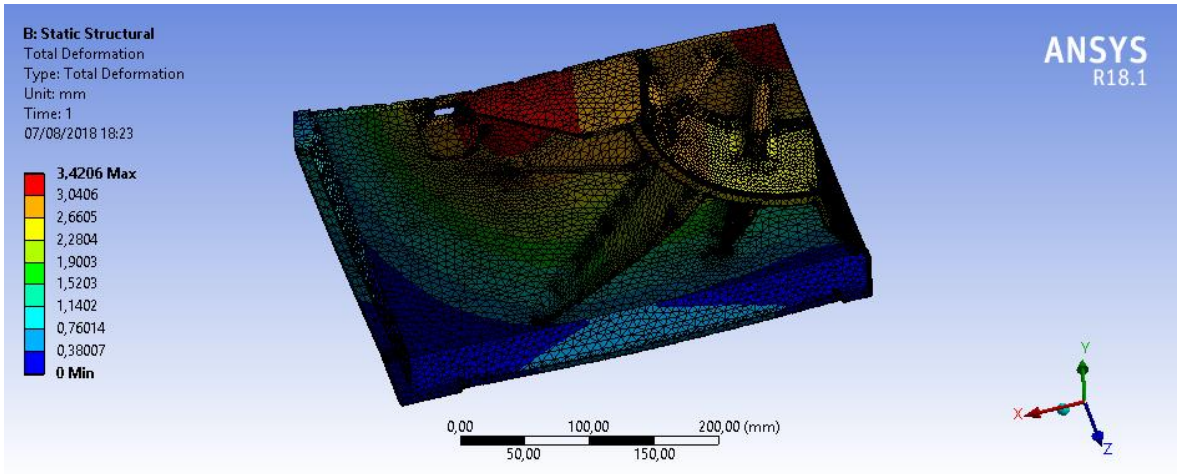

Figura E 16 – Deflexão máxima projeto tampa 807x607 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

APÊNDICE F -TENSÕES MÁXIMAS EQUIVALENTES (VON-MISSES) PARA SIMULAÇÃO COM MALHA REFINADA

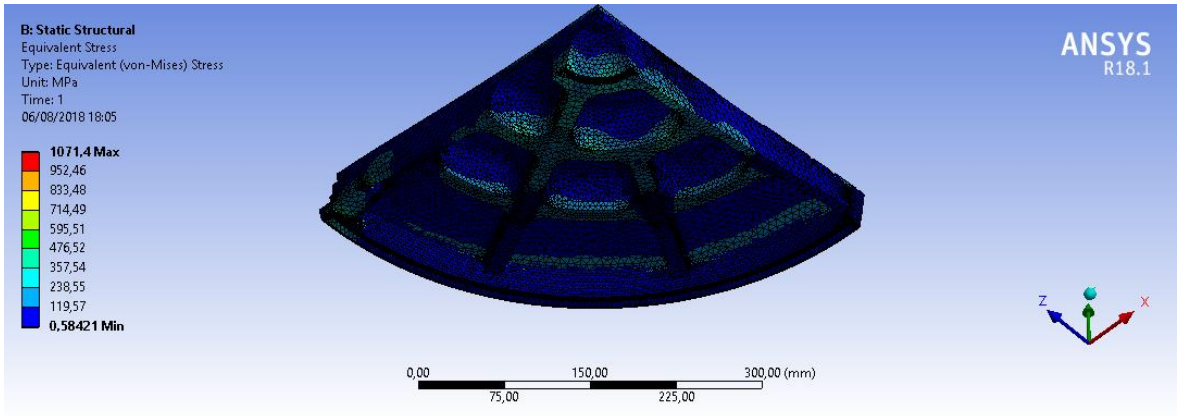

Figura F 1 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 com reforço original.

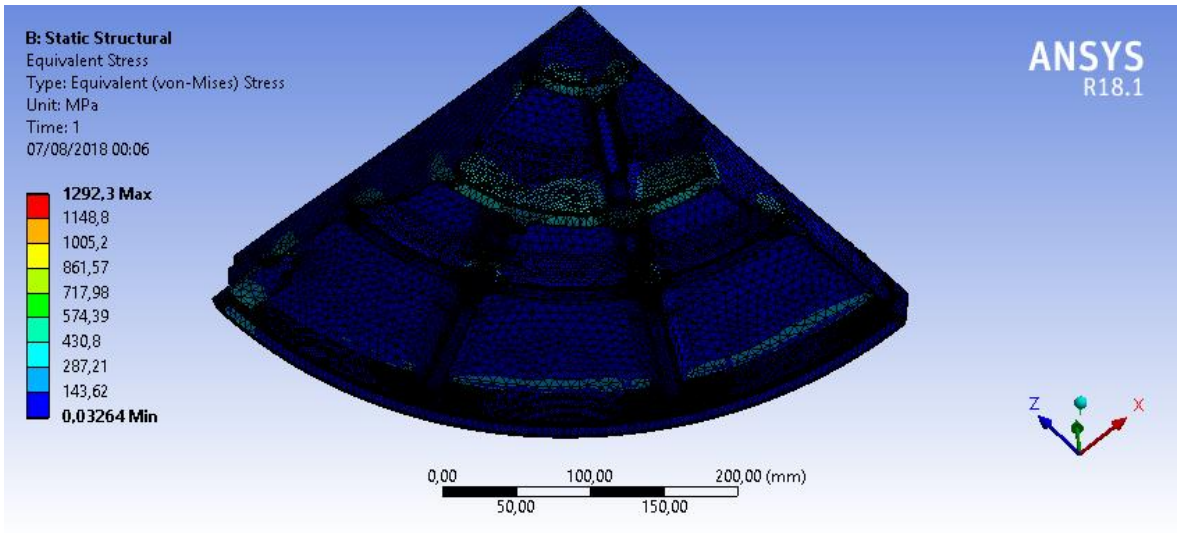

Figura F 2 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

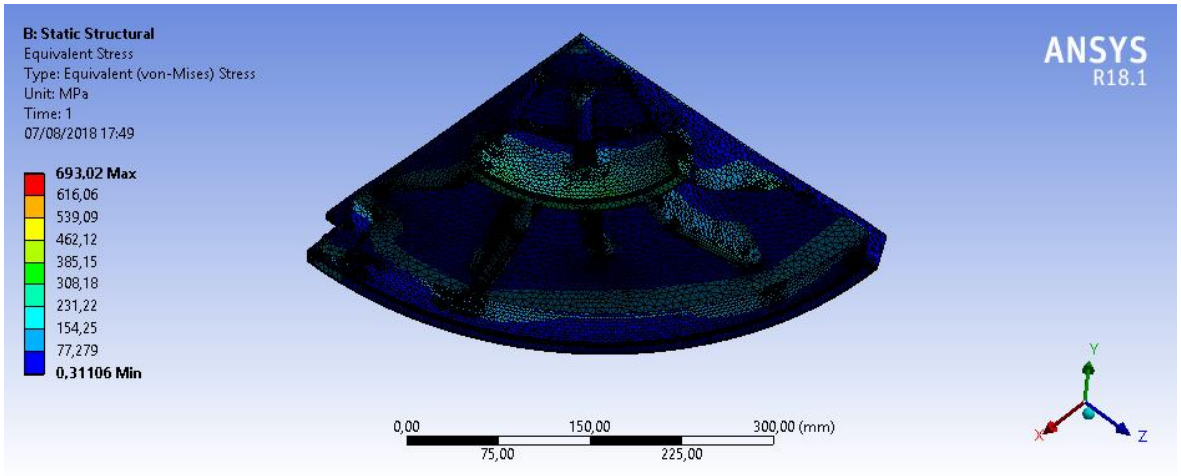

Figura F 3 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.

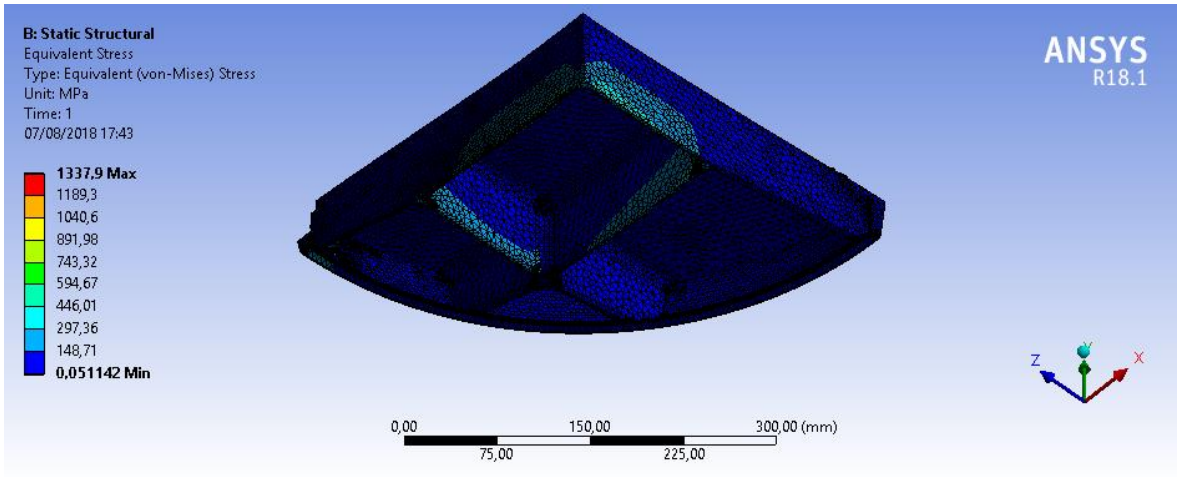

Figura F 4 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 com reforço da tampa 807x607 D400.

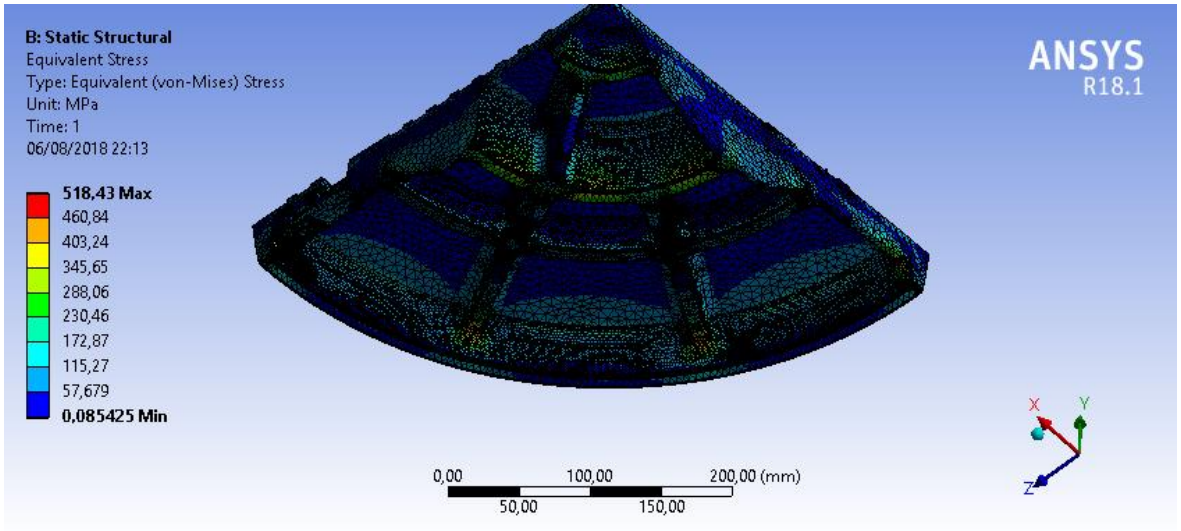

Figura F 5 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço original.

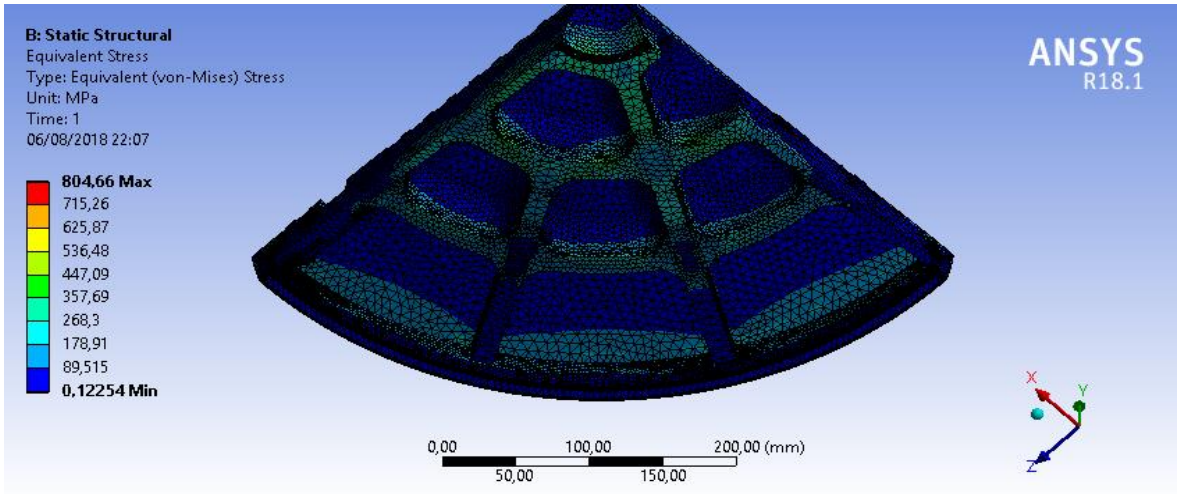

Figura F 6 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa RED. 60 D400.

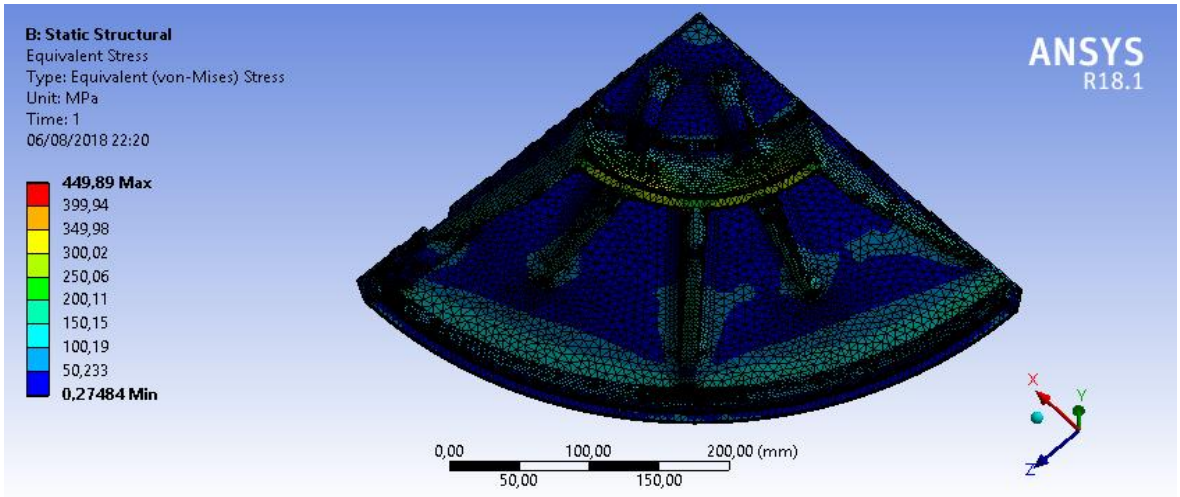

Figura F 7 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 70x70 D400.

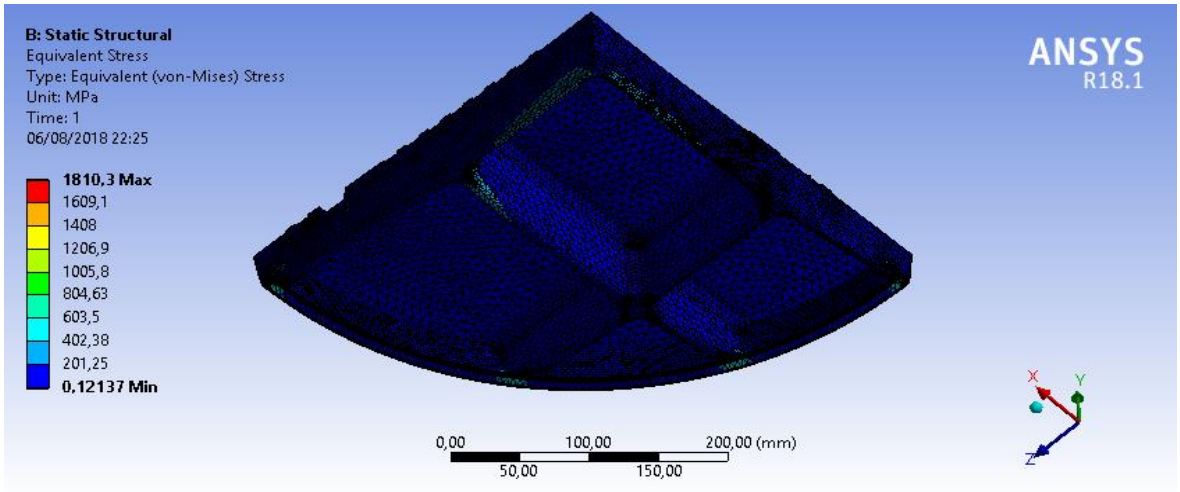

Figura F 8 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça com reforço da tampa 807x607 D400.

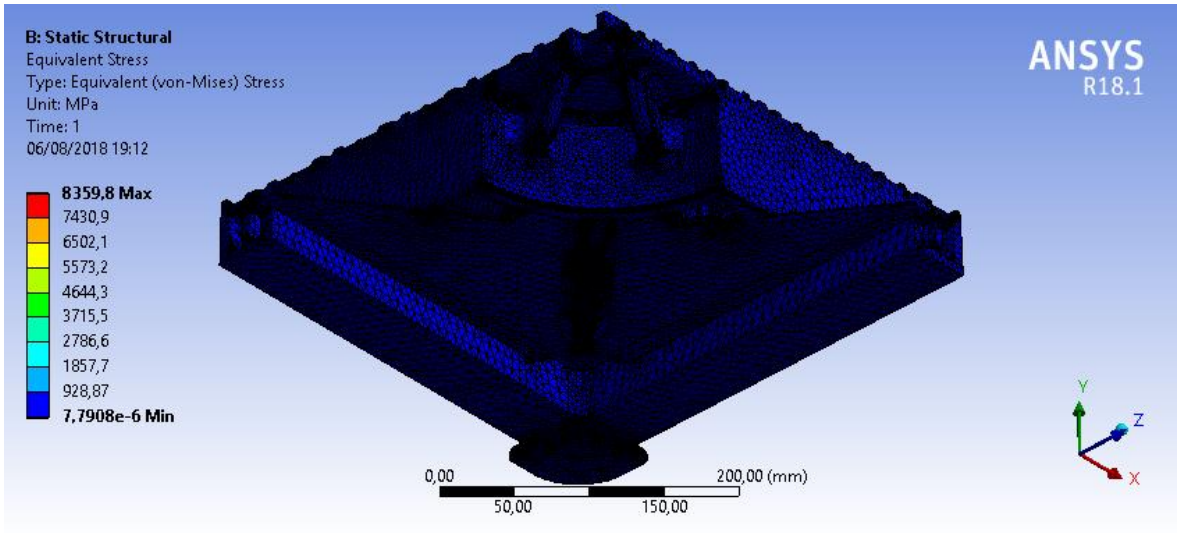

Figura F 9 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 70x70 D400 com reforço original e aro.

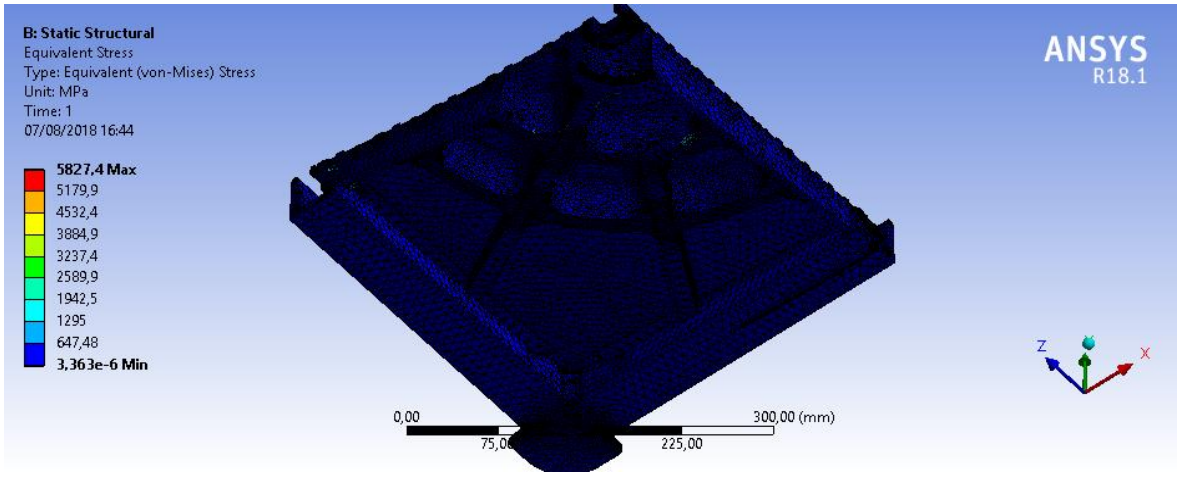

Figura F 10 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 e aro.

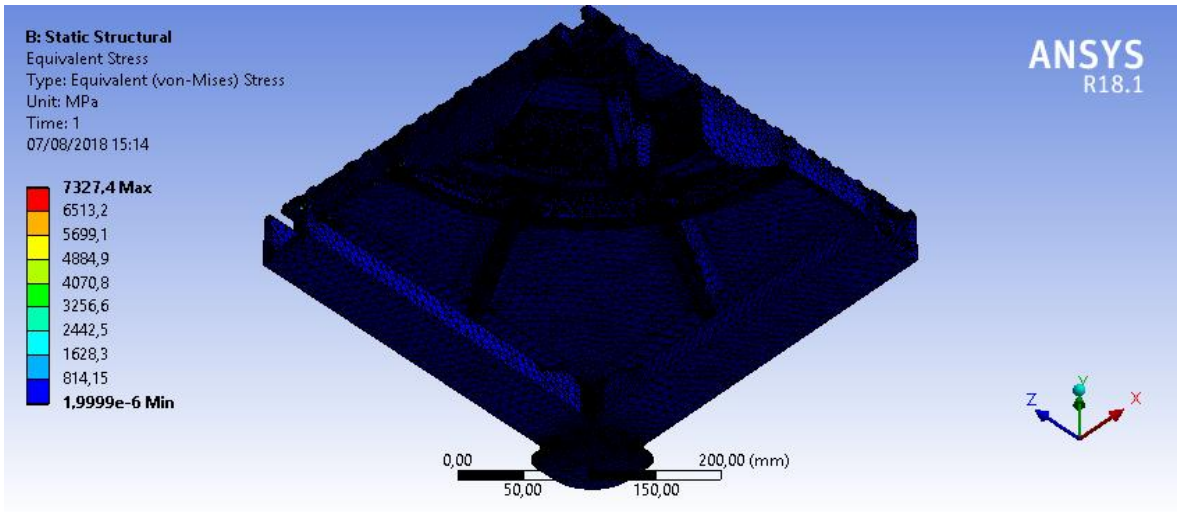

Figura F 11 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça e aro.

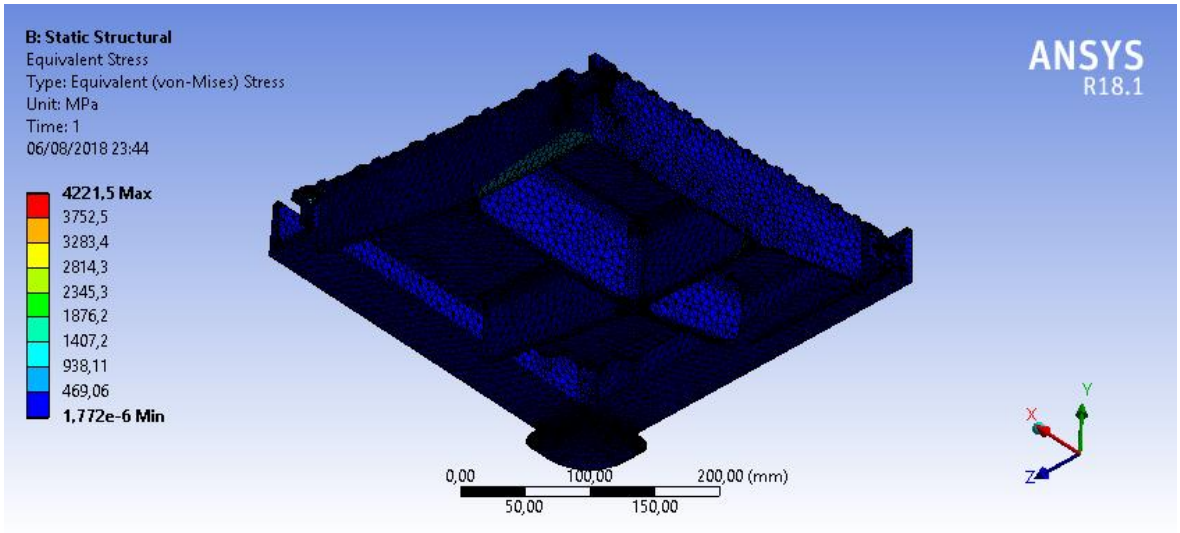

Figura F 12 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 70x70 D400 com reforço da tampa 807x607 D400 e aro.

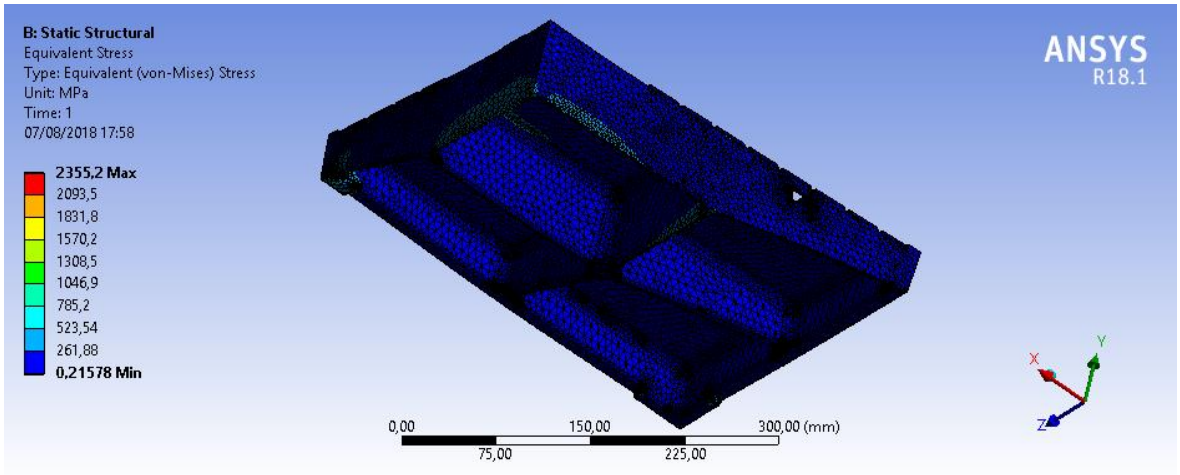

Figura F 13 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 807x607 D400 com reforço original.

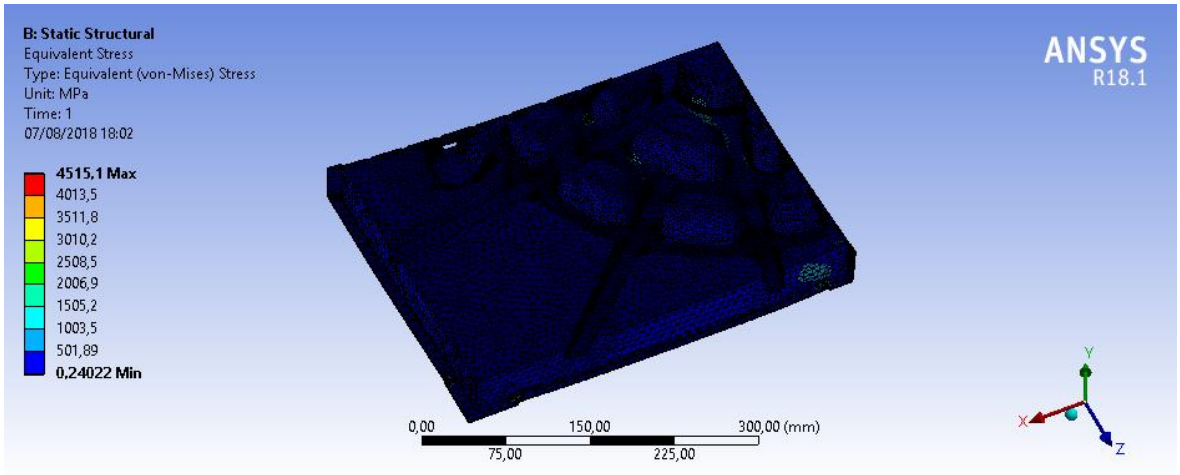

Figura F 14 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400.

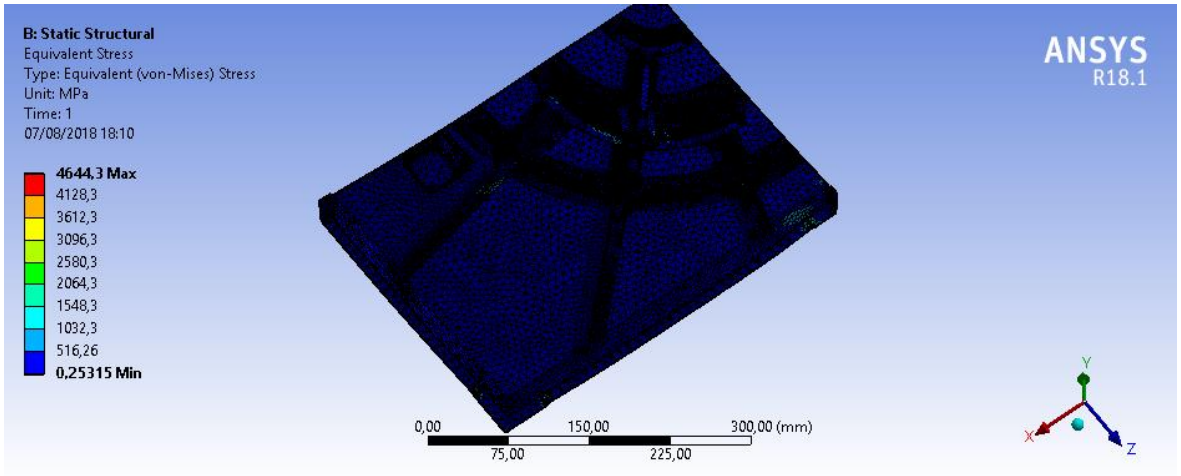

Figura F 15 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa RED. 60 D400 Eixo e Dobradiça.

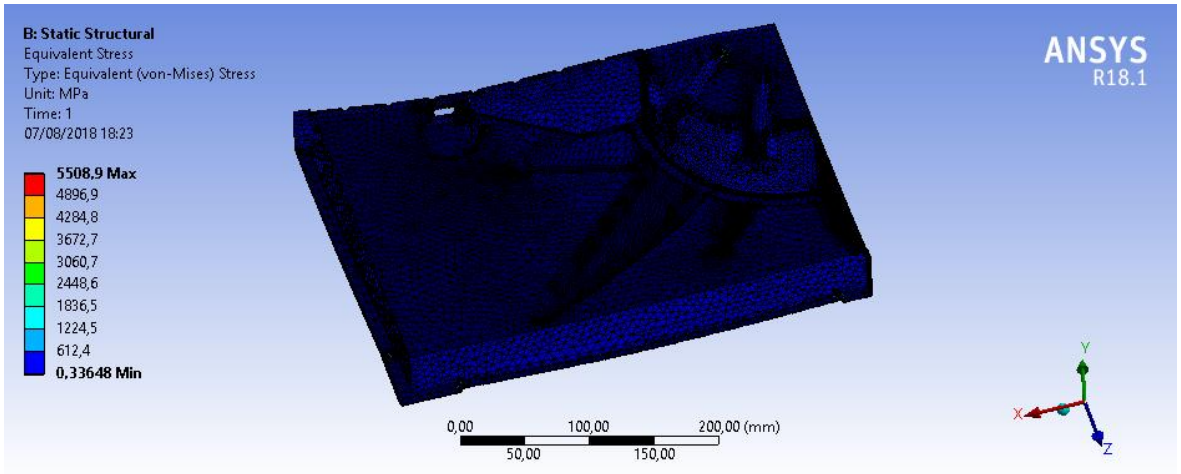

Figura F 16 – Diagrama de distribuição de tensões do projeto da tampa 807x607 D400 com reforço da tampa 70x70 D400.