



Universidade Federal do ABC

RELATÓRIO FINAL
PDPD – PESQUISANDO DESDE O PRIMEIRO DIA

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO MULTICAMADA PARA APLICAÇÃO EM
PROJETOS DE FOGUETEMODELISMO:
-TENSÕES MECÂNICAS -
REVISÃO DO ESTADO DA ARTE E ESTUDOS DE CASOS PRÁTICOS

ALUNO: Leonardo Severgnine Maioli - RA 11201920579 (BOLSISTA PDPD Edital 2019)

Leonardo Severgnine Maioli

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wallace Gusmão Ferreira

Wallace Gusmão Ferreira

Área: Engenharia de Estruturas
Sub-área: Métodos de Otimização Estrutural

Setembro de 2020

Resumo

Uma tendência no desenvolvimento e aplicação de vasos de pressão é utilizar múltiplas camadas ao longo da espessura, como pode ser observado em algumas publicações na área. Estudos comprovam que a pré-tensão de montagem por interferência produz efeitos benéficos, reduzindo as tensões de membrana e aumentando significativamente a capacidade de carga final do vaso de pressão. Há vários trabalhos na literatura envolvendo otimização de vasos de pressão multicamada, considerando diferentes espessuras e números de camadas, para um mesmo tipo de material, em geral aços. Outros trabalhos vêm estudando a melhor distribuição de espessuras em materiais compostos não metálicos para a aplicação de vasos de pressão para altas temperaturas. Entretanto, não foram encontrados trabalhos considerando diferentes materiais e diferentes espessuras em um mesmo vaso de pressão, considerando as pressões de montagem ou não. Nesse caso, observa-se que aparentemente há uma lacuna de pesquisas nessa área, de modo que o presente projeto inicia pesquisas e estudos de caso nesse tema. Para isso, foi realizado nesse trabalho um amplo levantamento bibliográfico acerca do projeto e otimização estrutural de vasos de pressão multicamada, considerando efeitos mecânicos devido à pressão interna e/ou pressões de montagem, e em sequência foram realizados estudos de casos práticos utilizando o Matlab como ferramenta para validação de formulações e otimização de modelos de vasos de pressão com múltiplas camadas compostos de diferentes materiais e com camadas de espessuras diferentes a partir de métodos numéricos e simulação computacional. Com esse estudo aplicado foi possível confirmar informações previstas pela literatura como o efeito da montagem por interferência na redução das tensões resultantes no vaso, assim como a redução não uniforme dessas tensões ao longo de cada camada e também avaliou-se a utilização de diferentes tipos de materiais nas camadas de um vaso de pressão, mostrando que materiais específicos ou a união deles podem trazer características interessantes ao vaso. Por fim, destaca-se que esses resultados possuem aplicações em potenciais projetos da equipe UFABC Rocket Design e em relatórios requeridos por competições de foguetemodelismo.

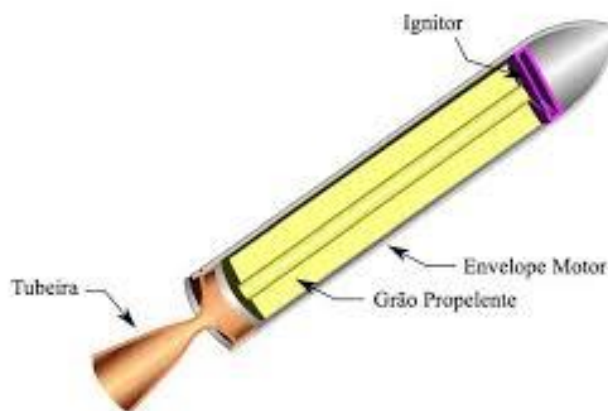
Palavras-chave: vasos de pressão multicamada, tensões mecânicas, cálculo e otimização estrutural, foguetemodelismo.

1. Introdução e Justificativas

A equipe UFABC Rocket Design trabalha com o desenvolvimento de foguetes experimentais desde seu ano de fundação, em 2010. O objetivo central é avançar o conhecimento e formar pessoas capazes de articular o setor aeroespacial com maestria e responsabilidade. Assim, desde a missão Liberty (2010) até o representante Tupã (2017), e Angra (2019) na SAC (do inglês, Spaceport America Cup) os projetos visam aliar a teoria com a prática dado determinado objetivo a ser conquistado, como participar de competições nacionais e internacionais em foguetemodelismo.

Nesse sentido, um dos principais componentes de um foguete de alta potência é o seu motor. Este é simplificado como exposto na Figura 1, composto de um cilindro denominado envelope no qual ocorre a queima do grão propelente e de uma tubeira convergente-divergente por onde os gases da combustão são acelerados para gerar o máximo impulso possível. Ainda, esta pesquisa terá como objetivo principal estudar o envelope do motor a partir de uma modelagem de vaso de pressão. Isto é importante em duas fases: na fase de desenvolvimento e construção de um projeto de foguete e na apresentação de relatórios, como os requeridos pela maior competição de foguetemodelismo mundial, a SAC.

Figura 1: Esquema de um motor-foguete e suas estruturas principais



Fonte: Mahesh et al, 2015

Ainda, segundo Telles (1996), o nome vaso de pressão remete a todo recipiente estanque, de qualquer tipo, dimensão, formato ou finalidade, capaz de conter um fluido pressurizado, podendo então armazená-lo em segurança, suportando as pressões exigidas. Dentro dessa definição, encontram-se diversos exemplos válidos de vasos de pressão, nos mais diversos setores e com diferentes finalidades. Nas Figuras 2 e 3, alguns desses exemplos são apresentados.

No meio de toda essa variedade de vasos de pressão, destacam-se aqueles utilizados em grandes indústrias com a finalidade de conter matérias-primas, insumos e produtos industriais, que de acordo com

Telles(1996), é onde surge uma necessidade de um grau maior de confiabilidade para esses equipamentos, visto que esses acabam sendo os mais importantes e custosos de certas indústrias. Dessa forma, cada vaso de pressão deve ser fabricado sob medida para atender sua finalidade seguindo as normas estabelecidas.

Figura 2: Exemplo de Vaso de Pressão utilizado em indústria química



Fonte: Site da INCASE - Indústria Mecânica de Equipamentos

Figura 3: Corpo de um motor-foguete que comporta-se como um vaso de pressão



Fonte: Ferreira, 2018

Segundo a NR-13, os vasos de pressão são classificados quanto a classe do fluido, de acordo com o tipo de fluido contido no vaso de pressão e também pelo seu potencial de risco, em função do produto “PV”, onde “P” é a pressão máxima de operação em MPa e “V” é o volume geométrico do vaso de pressão em m³. Na figura 4, encontra-se uma tabela da união dessas duas classificações.

Além disso, Telles(1996), utiliza de uma classificação que diferencia os vasos de pressão em vasos sujeitos a chama e vasos não sujeitos a chama.

Figura 4: Tabela da união das classificações dos vasos de pressão tendo como base a classe do fluido armazenado e o potencial de risco apresentado

Classe de Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V = 100	2 P.V < 100 P.V = 30	3 P.V < 30 P.V = 2,5	4 P.V < 2,5 P.V = 1	5 P.V < 1
	Categorias				
A -Fluidos inflamáveis, e fluidos combustíveis com temperatura igual ou superior a 200 °C - Tóxico com limite de tolerância = 20 ppm - Hidrogênio - Acetileno	I	I	II	III	III
B -Fluidos combustíveis com temperatura menor que 200 °C -Fluidos tóxicos com limite de tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
C - Vapor de água - Gases asfixiantes simples - Ar comprimido	I	II	III	IV	V
D - Outro fluido	II	III	IV	V	V

Fonte: Norma Regulamentadora 13

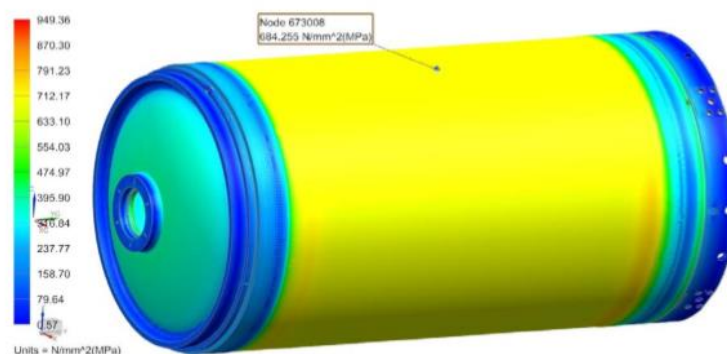
Um vaso de pressão compõe-se basicamente de um casco do vaso e dos tampos de fechamento, afirma Telles(1996). Como já citado, cada vaso de pressão deve ser fabricado sob medida, a fim de atender a sua finalidade de trabalho desejada e seguindo as normas estabelecidas para sua fabricação. Com isso, os vasos de pressões podem adquirir diferentes formatos, sendo que Telles(1996), diz que o casco dos vasos de pressão sempre vão ter o formato de uma superfície de revolução e que, com raras exceções, esses cascos basicamente vão apresentar formas cilíndricas, cônicas e esféricas ou até mesmo a combinação dessas formas. Apesar do destaque dado a esses vasos de pressão utilizados em indústrias de maior porte e que necessitam de maior grau de confiabilidade, os vasos de pressão possuem uma aplicação enorme em diversas outras indústrias, setores e tarefas. De forma geral, algumas aplicabilidades dos vasos de pressão se dão em indústrias petroquímicas, refinarias de petróleo, indústrias farmacêuticas e alimentares, extintores de incêndio, filtros de ar, botijão de gás, composição do corpo de um motor-foguete e várias outras.

O corpo de um motor-foguete comporta-se como um vaso de pressão cilíndrico de paredes finas, no qual o envelope-motor deve suportar a pressão interna dos gases originados na combustão do propelente. Dessa forma, a modelagem e a fabricação desse tipo de vaso de pressão deve ter relação direta com o tipo e características do grão propelente utilizado. O estudo e otimização dos vasos de pressão possui grande importância para a escolha dos materiais e da estrutura de um envelope-motor, contribuindo com o desempenho dos motores-foguetes. Na figura 5, observa-se uma simulação estrutural realizada em um envelope-motor.

Dessa forma, faz-se necessário um amplo levantamento bibliográfico sobre o projeto e otimização estrutural de vasos de pressão associado a realização de estudos de casos práticos com a tentativa de sistematizar uma metodologia mínima de cálculo estrutural e também estratégias de otimização aplicada ao desenvolvimento e construção de envelopes-motores contribuindo com novas possibilidades para a equipe UFABC Rocket Design em suas futuras competições.

Figura 5: Simulação estrutural de um envelope-motor feito por elementos finitos no software ANSYS

Mechanical



Fonte: Nagasaka, 2015

1.1. Projeto e Otimização de Vasos de Pressão Multicamada

Uma tendência no desenvolvimento e aplicação de vasos de pressão é utilizar múltiplas camadas ao longo da espessura, como pode ser observado em algumas publicações na área: Akçay e Kaynak (2005), Kumar et al (2011), Miraje e Patil (2011), Raparla e Seshaiiah (2012), Lohar et al (2013), Urade et al (2015), Ramakotaiah e Kumar (2017), Jegatheesan e Zakaria (2018).

Dentre as vantagens em se usar múltiplas camadas tem-se: aumento da capacidade de carga, otimização de materiais, uso em situações de altas pressões e temperaturas, especialmente envolvendo produtos tóxicos e/ou corrosivos. Na Figura 6 tem-se ilustrado um exemplo de estudo de vasos de pressão cilíndrico multicamadas, realizado por Miraje e Patil (2011), onde foi considerado um conjunto de 3 cilindros concêntricos de mesmo aço, montados por interferência mecânica/geométrica.

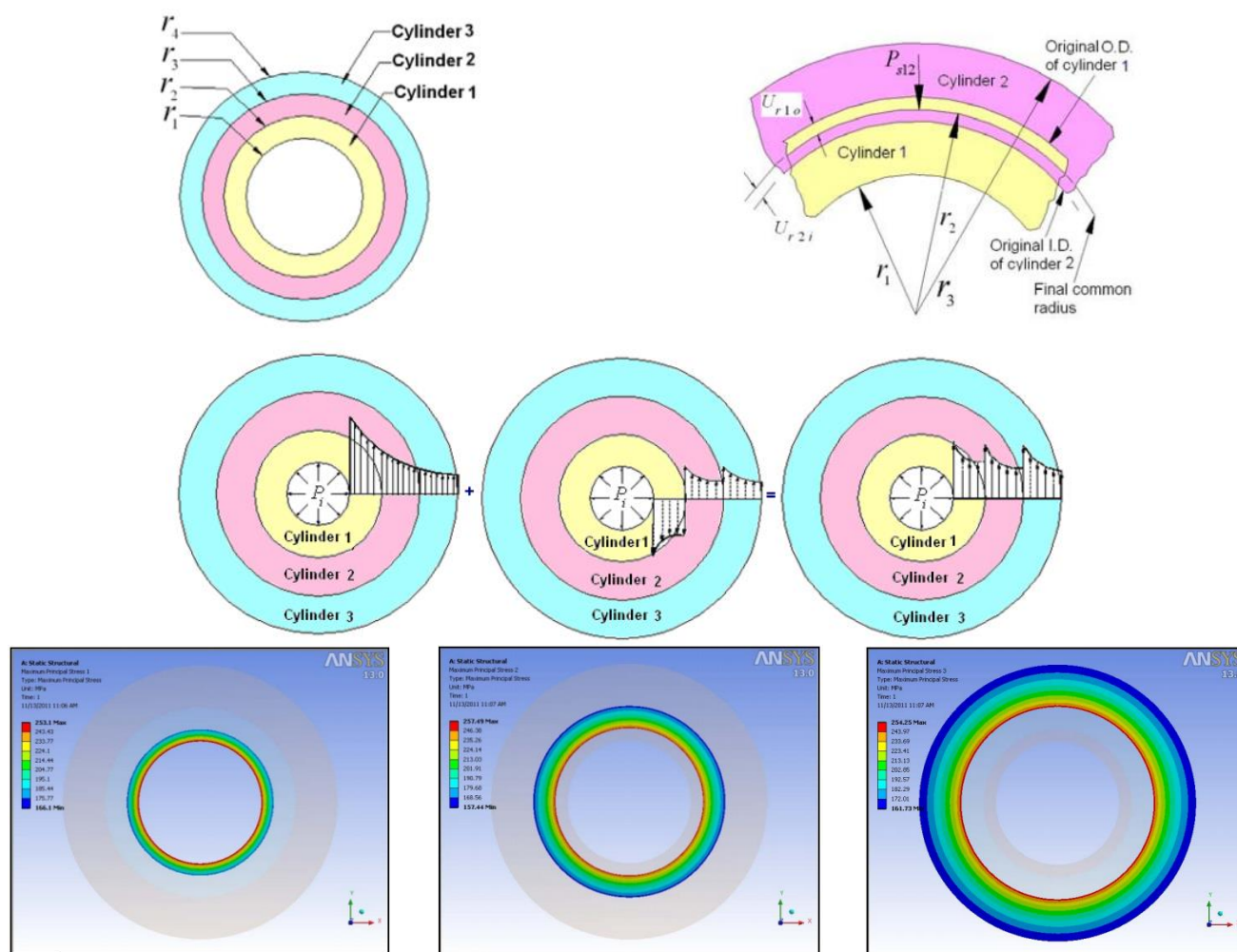


Figura 6: Estudo analítico e computacional em vasos de pressão compostos por 3 cilindros montados por interferência, desenvolvido por Miraje e Patil (2011).

Estudos comprovam que a pré-tensão de montagem por interferência produz efeitos benéficos, reduzindo as tensões de membrana e aumentando significativamente a capacidade de carga final do vaso de pressão. Urade et al (2015), por exemplo, fizeram um estudo analítico e numérico de otimização e verificaram que quanto maior o número de camadas, menor será a tensão de membrana final, entretanto o número ideal de camadas está entre 3 e 5.

Há vários trabalhos na literatura envolvendo otimização de vasos de pressão multicamada, considerando diferentes espessuras e números de camadas, para um mesmo tipo de material, em geral aços. Outros trabalhos como Akçay e Kaynak (2005) e Chauhan e Awasthi (2018) vem estudando a melhor distribuição de espessuras em materiais compostos não metálicos para a aplicação de vasos de pressão para altas temperaturas.

Entretanto, não foram encontrados trabalhos considerando diferentes materiais e diferentes espessuras em um mesmo vaso de pressão, considerando as pressões de montagem ou não. Nesse caso, observa-se que aparentemente há uma lacuna de pesquisas nessa área, de modo que o presente projeto tem o objetivo de iniciar pesquisas nesse tema.

Utilizar diferentes materiais, considerando um exemplo hipotético: núcleo de titânio, camada intermediária de aço e camada externa de material polimérico ou composto, pode proporcionar interessantes propriedades estruturais e térmicas. Nesse caso, algumas perguntas de projeto podem ser investigadas:

- 1) Qual o número de camadas ideal de cada material para a melhor resistência às tensões de origem mecânica (devido às pressões internas e de montagem)?
- 2) Qual a espessura de cada camada de material para melhores propriedades do ponto de vista de dilatação (tensões térmicas) e de condução de calor, para efeitos de isolamento térmico?

Dessa forma, o foco do presente trabalho será pesquisar modelos analíticos e computacionais existentes na literatura especializada para ajudar a responder perguntas do tipo 1), isto é: análise para projeto e otimização e otimização de vasos de pressão multicamada considerando inicialmente efeitos mecânicos.

Outros trabalhos de pesquisa deste mesmo grupo serão dedicados a estudar os problemas do tipo 2), efeitos térmicos, e oportunamente serão propostos trabalhos para investigar o melhor caminho de acoplar ambos os efeitos de origem mecânica e térmica simultaneamente.

2. Objetivo Geral do Projeto

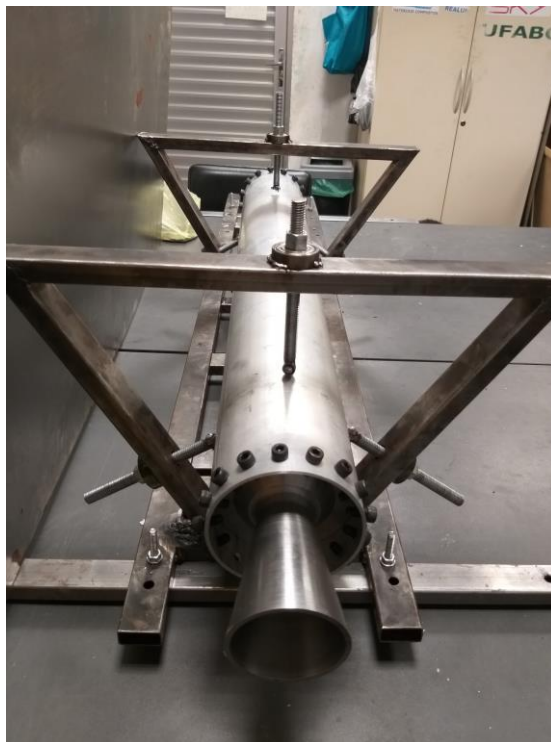
O objetivo principal do presente trabalho é, primeiramente, fazer levantamento bibliográfico acerca do projeto e otimização estrutural de vasos de pressão multicamada, considerando apenas efeitos mecânicos devido à pressão interna e/ou pressões de montagem e, na sequência fazer estudos de casos práticos, cálculo e otimização utilizando o Matlab como ferramenta numérica computacional.

3. Formulação para Tensões Mecânicas em Vasos de Pressão

Durante o dimensionamento de um vaso de pressão e na escolha dos materiais que serão utilizados para sua produção, é de suma importância entender qual será a função desse vaso, quais tarefas ele irá realizar e qual produto será armazenado em seu interior. Por meio disso, é possível prever os tipos de esforços e suas respectivas magnitudes que serão exercidas sob a parede do vaso de pressão, formando a base para a escolha do material e da espessura das paredes. Como exemplo, em um envelope de um motor-foguete como apresentado na Figura 7, é necessário conhecer as pressões de trabalho, as temperaturas e as características do combustível armazenado, isto é, as propriedades do material que compõe o grão propelente e seu formato geométrico.

Neste trabalho, o foco está no estudo de efeitos mecânicos devido à pressão interna e/ou pressão de montagem que agem sobre os vasos de pressão. Demais efeitos serão desconsiderados por ora.

Figuras 7: Envelope de um motor foguete da equipe UFABC Rocket Design



Fonte: Arquivo da equipe UFABC Rocket Design

4.1. Vasos de pressão monocamada

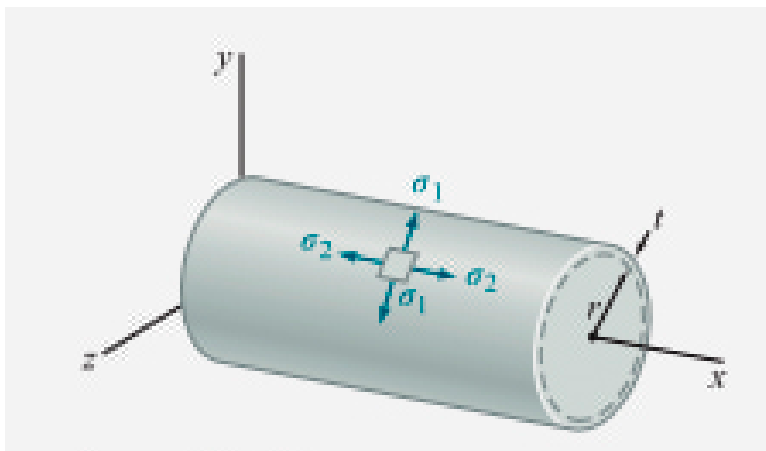
4.1.1. Vasos de Paredes Finas

As dimensões de um vaso de pressão são extremamente importantes para o entendimento de suas aplicabilidades, limitações e até mesmo sua segurança. De acordo com Hibbeler (2010), um vaso de pressão de parede fina é assim denominado devido à razão de seu raio interno “ r ” pela sua espessura de parede “ t ” ser maior ou igual a 10. A relação entre essas dimensões pode ser analisada por meio da equação (01), e uma representação dessas dimensões é vista na Figura 8.

$$\frac{r}{t} \geq 10 \quad (01)$$

Portanto, caso essa relação seja verdadeira, o vaso de pressão em questão pode ser considerado um vaso de parede fina. Caso contrário, seria um vaso de parede grossa, tipo que também será abordado neste trabalho.

Figura 8: Representação de um vaso de pressão cilíndrico e suas dimensões



Fonte: Beer et al, 2013

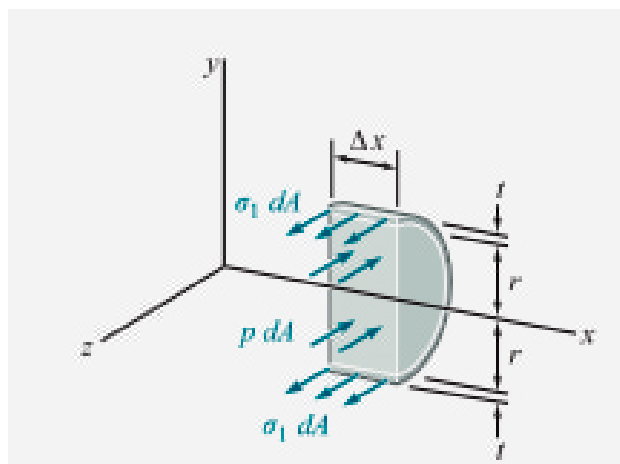
Segundo Beer et al (2013), os principais tipos de tensões que estão presentes em um vaso de pressão de parede fina são as tensões tangenciais ou circunferenciais “ σ_θ ” e as tensões longitudinais “ σ_l ” que estão representadas na figura 8 e indicadas respectivamente como “ σ_1 ” e “ σ_2 ”. Em qualquer ponto do vaso de pressão de paredes finas, a somatória dos esforços no mesmo deve ser nula para que o equilíbrio estático seja respeitado. Dessa forma, Beer et al (2013) apresentam a forma de obtenção dos valores dessas tensões em função da pressão interna do vaso “ p ”, seu raio interno “ r ” e sua espessura “ t ” e chega nas equações (02) e (03). A equação (02) oferece a tensão circunferencial e a equação (03), a tensão longitudinal. Para a obtenção dessas equações foi utilizado como base o equilíbrio estático em pontos da parede do vaso e uma análise visual pode ser vista nas figuras 9 e 10.

$$\sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad (02)$$

$$\sigma_l = \frac{pr}{2t} \quad (03)$$

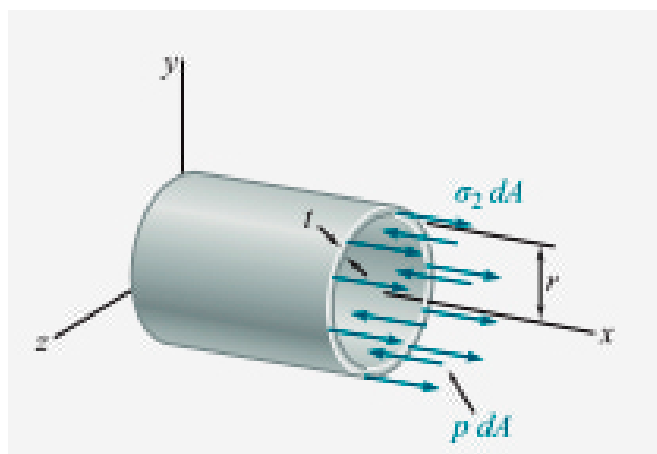
Nota-se por essas equações que o valor da tensão circunferencial é o dobro do valor da tensão longitudinal.

Figura 9: Análise da tensão circunferencial em vasos de pressão de parede fina



Fonte: Beer et al, 2013

Figura 10: Análise da tensão longitudinal em vasos de pressão de parede fina



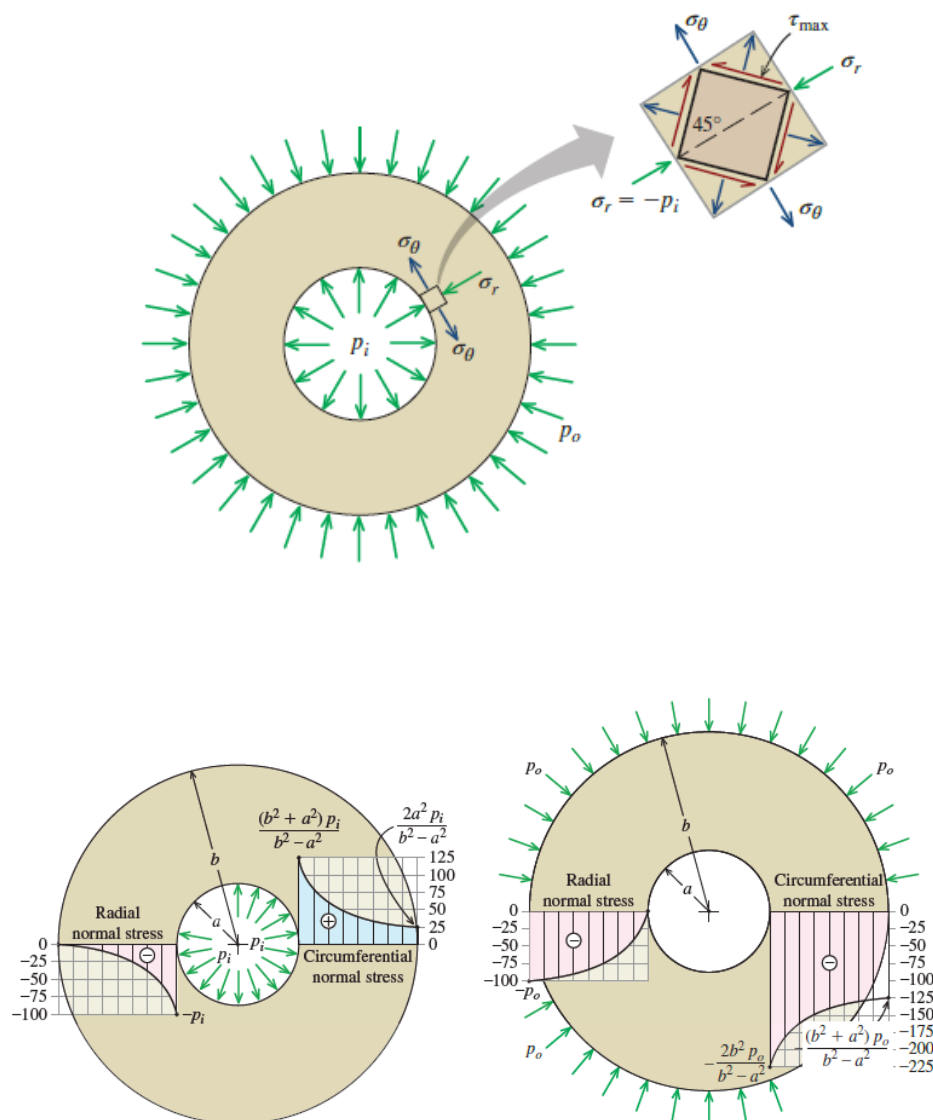
Fonte: Beer et al, 2013

4.1.2. Vasos de Paredes Grossas

Como já comentado neste trabalho, um vaso de pressão de paredes grossas será denominado assim caso a afirmação da equação (01) não for verdadeira, ou seja, quando o raio interno do vaso de pressão for menor que 10 vezes o valor de sua espessura. Esse tipo de vaso de pressão é bastante utilizado em indústrias e outras aplicações que trabalham com maiores pressões internas e altas temperaturas, condições nas quais um vaso de pressão com paredes finas não seria capaz de suportar.

Segundo Hibbeler (2010), essa capacidade de suportar condições de trabalho mais exigentes com altas pressões vem do aumento da espessura do vaso que faz com que as tensões radiais que atuam na parede do vaso quando o mesmo é submetido a uma pressão interna diminuam ao longo da espessura do vaso, diferente do que acontece nos vasos de pressão de paredes finas, onde a tensão radial é considerada uniforme em todo o vaso devido a sua pequena espessura. Na figura 11, podem ser visualizada as tensões (radial e circunferencial) ao longo da espessura de um vaso de pressão de parede grossa.

Figura 11: Distribuição de tensões ao longo da espessura de um vaso de pressão de parede grossa



Fonte: Philpot, 2017

De acordo com Telles (2007), é essa diminuição das tensões na parede do vaso que faz com que ele possa ser utilizado em altas temperaturas pois nessas condições ocorre o fenômeno da redução da resistência do material à fluência, que segundo Hibbeler (2010) trata-se da deformação plástica que ocorre em um material que recebe uma tensão constante em função do tempo, exigindo então tensões admissíveis para que a integridade do vaso de pressão não seja comprometida.

Em um vaso de pressão de paredes grossas, além da tensão radial “ σ_r ” já comentada, outra tensão atuante é a tensão circunferencial “ σ_θ ” que também tem seu valor alterado com o aumento da espessura do vaso. Silva (2017) apresenta equações capazes de retornar os valores dessas tensões em função da posição radial analisada. Essas equações são conhecidas por Solução de Lamé, em homenagem ao engenheiro francês G. Lamé, quem foi o primeiro a deduzi-las. As equações (04) e (05) determinam respectivamente os valores da tensão radial e tensão circunferencial, enquanto a equação (06) retorna o deslocamento radial μ . Nessas equações temos “ r_1 ” sendo o raio interno do vaso, “ r_2 ” como raio externo, “ P_i ” como a pressão interna do vaso, “ r ” sendo o raio para análise em questão, além de “ E ” como o módulo de Young e “ V ” como o coeficiente de Poisson.

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_i}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (04)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 P_i}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (05)$$

$$\mu = \frac{r_1^2 P_i r}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - V) + (1 + V) \frac{r_2^2}{r^2} \right] \quad (06)$$

Silva (2017) também apresenta uma formulação para determinação da tensão equivalente “ σ_{eqv} ” no vaso de pressão que pode ser vista na equação (07):

$$\sigma_{eqv} = P_i \frac{2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (07)$$

Apesar de sua grande vantagem em situações de altas temperaturas e pressões, existem limitações no dimensionamento de um vaso de pressão de paredes grossas. Como lembrado por Silva (2017), existem casos que quando a espessura da parede for muito grande, a tensão equivalente em suas paredes pode chegar ao dobro do valor da pressão interna conforme a equação (08) e a resistência do vaso pode ser comprometida. Além disso, uma espessura muito grande pode inviabilizar o projeto de

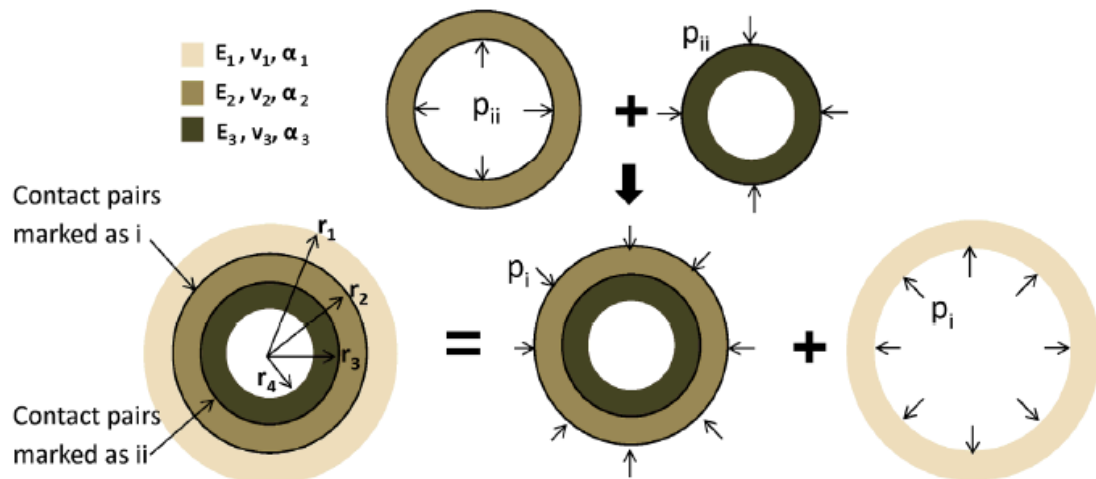
um vaso de pressão devido ao alto custo do material desejado. Nesses tipos de casos, a solução alternativa trata-se da utilização de vasos de pressão com paredes compostas.

$$\sigma_{eqv} = 2P_i \quad (08)$$

4.2 Vasos de pressão multicamada

Uma tendência no desenvolvimento e aplicação de vasos de pressão é utilizar múltiplas camadas ao longo da sua espessura. Dentre as vantagens em usar múltiplas camadas, destaca-se: aumento da capacidade de carga, otimização de materiais e uso em situações de altas pressões e temperaturas, requisitos essenciais para determinados tipos de aplicações de um vaso de pressão. Esses efeitos benéficos surgem da pré-tensão de montagem por interferência, oriunda da fabricação desse tipo de vaso de pressão, a qual envolve inicialmente a fabricação de dois ou mais vasos de pressão monocamada que são acoplados uns aos outros para formarem um vaso multicamadas, seguindo normas como um bom acabamento nas superfícies para proporcionar um contato eficiente. Na figura 12 é apresentado um esquema como exemplo desse tipo de acoplamento. Percebe-se que como o vaso externo possui um raio interno “c-Δ” menor que raio externo “c” do vaso interno, é necessário um aquecimento do vaso externo para que por meio da sua dilatação seguida de resfriamento ocorra o encaixe entre os vasos. Esse acoplamento acaba formando uma pressão de encaixe.

Figura 12: Esquema de acoplagem de vasos monocamada para formação de um vaso multicamada



Fonte: Qiu et al (2015)

Com a pré-tensão de montagem por interferência, quando um vaso de pressão multicamada for submetido a uma pressão interna, suas tensões resultantes serão menores tendo em vista que essa será a soma algébrica da pressão interna e de encolhimento, aumentando então a capacidade de carga do vaso. Tendo isso em vista, é possível utilizar softwares de simulação e otimização para a realização de vários testes com diferentes números de camadas com espessuras e materiais variados, para que os resultados possam ser comparados em busca de uma otimização do número de camadas e dos materiais utilizados. Além disso, encontra-se na literatura como em Urade et al (2015), Telles (2007), Silva (2017) e diversos outros textos, cálculos analíticos que possibilitam definir alguns parâmetros importantes do vaso de pressão como possíveis espessuras e tensões atuantes. Em seguida pode ser proposta uma análise numérica utilizando desses parâmetros e realizar a comparação dos resultados.

A partir do que já foi discutido, nota-se que o projeto de um vaso de pressão leva em consideração essencialmente a resistência dos materiais utilizados em sua composição e as tensões aplicadas em suas camadas. No projeto de um vaso de pressão multicamadas em particular, a tensão circunferencial será a de maior relevância para os cálculos desejáveis.

De acordo com Urade et al (2015), o projeto de um vaso de pressão com múltiplas camadas pode ser simplificado se cada camada for considerada um vaso de pressão separado que recebe pressão de contração e de trabalho. A partir disso, é possível calcular o valor das tensões circunferenciais atuantes em cada camada externamente e internamente, além das pressões de encaixe entre as camadas e demais fatores importantes.

4.2.1 Vaso de pressão com 2 camadas

Seguindo a formulação apresentada por Urade et al (2015), para a estimativa analítica das tensões circunferenciais em um vaso de pressão com 2 camadas, inicialmente calcula-se a tensão circunferencial “ σ_θ ” no raio externo “ r_2 ” e interno “ r_1 ” da camada 1 originada exclusivamente da pressão de contato “ P_{k12} ” entre a camada 1 e a camada 2 conforme a equação (09) e (10) respectivamente.

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{-P_{k12}(r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} \quad (09)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{-2P_{k12}(r_2^2)}{r_2^2 - r_1^2} \quad (10)$$

Igualmente, pode ser calculado de acordo com as equações (11) e (12) respectivamente as tensões circunferenciais na camada 2 no raio externo “r3” e interno “r2” que também possuem origem na pressão de contato entre as duas camadas.

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{2P_{k12}(r2^2)}{r3^2 - r2^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta 4} = \frac{P_{k12}(r3^2 + r2^2)}{r3^2 - r2^2} \quad (12)$$

A tensão circunferencial originada da pressão interna “ P_i ” no raio interno da camada 1 é calculada pela equação (13), já a tensão circunferencial que tem origem no raio externo da camada 1 e raio interno da camada 2 é calculada pela equação (14) e a tensão que atua no raio externo da camada 2 pela equação (15):

$$\sigma_{\theta 5} = \frac{P_i(r3^2 + r1^2)}{r3^2 - r1^2} \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta 6} = \frac{P_i r1^2}{r2^2} \left[\frac{r3^2 + r2^2}{r3^2 - r1^2} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta 7} = \frac{2P_i r1^2}{r3^2 - r1^2} \quad (15)$$

Por fim, as tensões circunferenciais resultantes “ $\sigma_{\theta R}$ ” nos raios internos das camadas 1 e 2 são dadas pelas equações (16) e (17) respectivamente:

$$\sigma_{\theta R1} = \frac{P_i(r3^2 + r1^2)}{r3^2 - r1^2} - \frac{2P_{k12}(r2^2)}{r2^2 - r1^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta R2} = \frac{P_i r1^2}{r2^2} \left[\frac{r3^2 + r2^2}{r3^2 - r1^2} \right] + \frac{P_{k12}(r3^2 + r2^2)}{r3^2 - r2^2} \quad (17)$$

Como já dito, a pressão de encaixe formada no acoplamento das camadas do vaso de pressão durante sua fabricação resulta em uma diminuição da tensão resultante. No entanto, essa pressão de encaixe formada também não pode assumir um valor tão maior que a pressão interna, pois isso

prejudicaria a integridade das paredes do vaso. Dessa forma, Urade et al (2015) também apresenta uma formulação para o cálculo dessa pressão de encaixe adequada em relação a pressão interna do vaso, equação (22), tendo como base a equivalência entre as tensões formadas como na equação (18) e (19). Além disso, também é apresentado a formulação para determinação do valor da interferência “ δ ” entre as duas camadas vista na equação (23).

$$\sigma_{\theta R1} = \sigma_{\theta R2} \quad (18)$$

$$P_i \left[\frac{r3^2+r1^2}{r3^2-r1^2} - \frac{r1^2}{r2^2} \left(\frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r1^2} \right) \right] = P_{k12} \left[\frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r2^2} + \frac{2(r2^2)}{r2^2-r1^2} \right] \quad (19)$$

Considerando as seguintes equações (20) e (21) como constantes K1 e K2, é obtido:

$$K1 = \left[\frac{r3^2+r1^2}{r3^2-r1^2} - \frac{r1^2}{r2^2} \left(\frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r1^2} \right) \right] \quad (20)$$

$$K2 = \left[\frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r2^2} + \frac{2(r2^2)}{r2^2-r1^2} \right] \quad (21)$$

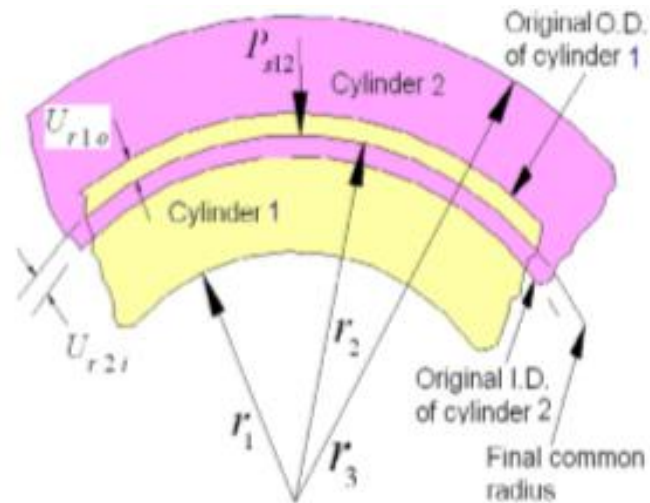
$$P_{k12} = P_i \left[\frac{K1}{K2} \right] \quad (22)$$

$$\delta_{12} = \frac{P_{k12} r2}{E} \left[\frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r2^2} + \frac{r2^2+r1^2}{r2^2-r1^2} \right] \quad (23)$$

4.2.2 Vaso de pressão com 3 camadas

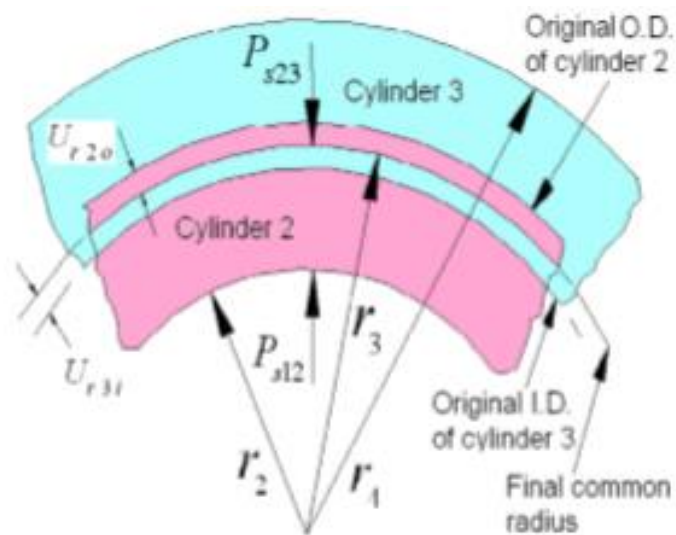
Da mesma forma como exemplificado para um vaso de pressão com 2 camadas, durante a fabricação de um vaso de pressão com 3 camadas, ocorre o acoplamento entre essas três estruturas que foram fabricadas individualmente no início. Esse encaixe originará pressões de contato e consequentemente tensões nas paredes de cada camada. Nas figuras 13 e 14, é esquematizado esse encaixe entre as camadas do vaso de pressão.

Figura 13: Esquema do acoplamento das camadas 1 e 2 de um vaso de pressão



Fonte: Urade et al, 2015

Figura 14: Esquema do acoplamento das camadas 2 e 3 de um vaso de pressão



Fonte: Urade et al, 2015

Prosseguindo na formulação de Urade et al(2015), inicialmente para um vaso de pressão com 3 camadas, são calculadas por meio das equações (24) e (25) respectivamente, as tensões circunferenciais que atuam no raio externo “r2” e interno “r1” da camada 1 originadas da pressão de contato entre as camadas 1 e 2 “ P_{k12} ”. Além disso, calcula-se pela equação (26) o deslocamento radial do raio externo da camada 1 “ U_{r1o} ” devido à pressão de contato.

$$\sigma_{\theta 1} = -P_{k12} \left[\frac{r2^2 + r1^2}{r2^2 - r1^2} \right] \quad (24)$$

$$\sigma_{\theta 2} = - \left[\frac{2P_{k12}r2^2}{r2^2 - r1^2} \right] \quad (25)$$

$$U_{r1o} = \frac{-P_{k12}r2^2(1+V)}{E} \left[(1-V) \left(\frac{r2^2 + r1^2}{r2^2 - r1^2} \right) - V \right] \quad (26)$$

Em seguida, continua-se o processo para determinar as tensões circunferenciais induzidas no raio externo “r3” e interno “r2” da camada 2 pela atuação da pressão de contato entre as camadas 1 e 2 por meio das equações (27) e (28). Além disso, calcula-se pela equação (27) o deslocamento radial do raio interno da camada 2 “ U_{r2i} ” devido à pressão de contato.

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{2P_{k12}r2^2}{r3^2 - r2^2} - \frac{P_{k23}(r3^2 + r2^2)}{r3^2 - r2^2} \quad (27)$$

$$\sigma_{\theta 4} = \frac{P_{k12}(r3^2 + r2^2)}{r3^2 - r2^2} - \frac{P_{k23}r3}{r3^2 - r2^2} \quad (28)$$

$$U_{r2i} = \frac{r2(1+V)}{E} \left[P_{k12} \left((1-V) \left(\frac{r3^2 + r2^2}{r3^2 - r2^2} \right) + V \right) - (1-V) \left(\frac{2P_{k23}r3^2}{r3^2 - r2^2} \right) \right] \quad (29)$$

A subtração de $U_{r2i} - U_{r1o}$ retorna uma nova equação (30), utilizada para o encontro da interferência total “ δ_{12} ” no contato entre as camadas 1 e 2:

$$\delta_{12} = \frac{r2(1-V^2)}{E} \left[P_{k12} \left(\frac{r3^2 + r2^2}{r3^2 - r2^2} + \frac{r2^2 + r1^2}{r2^2 - r1^2} \right) - 2P_{k23} \left(\frac{r3^2}{r3^2 - r2^2} \right) \right] \quad (30)$$

A próxima etapa consiste no cálculo do deslocamento radial do raio externo da camada 2 “ U_{r2o} ” obtido pela equação (31).

Além disso, também encontra-se respectivamente nas equações (32), (33) e (34), a tensão circunferencial que atua no raio externo da camada 3 “r4”, a tensão circunferencial no raio interno “r3” e o deslocamento radial do raio interno da camada 3 “ U_{r3i} ”.

$$U_{r2o} = \frac{r3}{E} \left[\frac{2P_{k12}(1-V^2)r2^2}{r3^2-r2^2} - P_{k23}(1+V) \left((1-V) \frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r2^2} - V \right) \right] \quad (31)$$

$$\sigma_{\theta5} = \frac{2P_{k23}r3^2}{r4^2-r3^2} \quad (32)$$

$$\sigma_{\theta6} = \frac{P_{k23}(r4^2+r3^2)}{r4^2-r3^2} \quad (33)$$

$$U_{r3i} = \frac{P_{k23}r3(1+V)}{E} \left[(1-V) \left(\frac{r4^2+r3^2}{r4^2-r3^2} \right) + V \right] \quad (34)$$

A subtração de $U_{r3i} - U_{r2o}$ retorna uma nova equação (35), utilizada para o encontro da interferência total “ δ_{23} ” no contato entre as camadas 2 e 3:

$$\delta_{23} = \frac{r3(1-V^2)}{E} \left[P_{k23} \left(\frac{r4^2+r3^2}{r4^2-r3^2} + \frac{r3^2+r2^2}{r3^2-r2^2} \right) - \frac{2P_{k12}r2^2}{r3^2-r2^2} \right] \quad (35)$$

Após o encontro de todas as tensões circunferenciais, essas devem ser combinadas algebricamente gerando uma tensão circunferencial resultante no vaso pressão multicamada sujeitos a pressão interna e de contração. Também é possível unir equações encontradas para determinar as tensões circunferenciais máximas que pode atuar em cada camada. Por meio das equações (36), (37) e (38), chega-se aos valores dessas tensões máximas atuantes nos raios internos das camadas 1, 2 e 3 respectivamente.

$$\sigma_{\theta r1máx} = P_i \left[\frac{r4^2+r1^2}{r4^2-r1^2} \right] - 2P_{k12} \left[\frac{r2^2}{r2^2-r1^2} \right] \quad (36)$$

$$\sigma_{\theta r2máx} = \frac{P_i r1^2}{r2^2} \left[\frac{r4^2+r2^2}{r4^2-r1^2} \right] + \frac{P_{k12}(r3^2+r2^2) - 2P_{k23}r3^2}{r3^2-r2^2} \quad (37)$$

$$\sigma_{\theta r 3 m \acute{a}x} = \frac{P_i r_1^2}{r_3^2} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] + P_{k23} \left[\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} \right] \quad (38)$$

Por fim, pode-se obter as pressões de encaixe ideais entre as paredes do vaso de pressão, fornecendo uma maior segurança e integridade do mesmo. Para isso, são formadas constantes C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e C_6 que estão respectivamente representadas nas equações (39), (40), (41), (42), (43) e (44).

$$C_1 = \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (39)$$

$$C_2 = \frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{r_4^2 + r_2^2}{r_4^2 - r_1^2} \right] \quad (40)$$

$$C_3 = \frac{2r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (41)$$

$$C_4 = \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (42)$$

$$C_5 = \frac{r_1^2}{r_3^2} \frac{(r_4^2 + r_3^2)}{(r_4^2 - r_1^2)} - \frac{r_1^2 (r_4^2 + r_2^2)}{r_2^2 (r_4^2 - r_1^2)} \quad (43)$$

$$C_6 = \frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \frac{2r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (44)$$

Tendo em mãos as constantes criadas anteriormente já é possível formular as equações (45) e (46), que retornam respectivamente o valor da pressão de encaixe ideal entre as camadas 1 e 2, “ P_{k12} ” e entre as camadas 2 e 3, “ P_{k23} ”.

$$P_{k12} = P_i \left[\frac{(C_5/C_6) - (C_2/C_3)}{(C_4/C_6) - (C_1/C_6)} \right] \quad (45)$$

$$P_{k23} = P_i \left[\frac{(C_5/C_4) - (C_2/C_1)}{(C_3/C_1) - (C_6/C_4)} \right] \quad (46)$$

4.2.3 Vaso de pressão com “n” camadas

Seguindo a lógica das últimas seções, durante a fabricação de um vaso de pressão de “n” camadas, cada camada é acoplada na outra por interferência e dessa forma são formadas “n-1” pressões de contato e com isso também são distribuídas diferentes tipos de tensões pelo vaso de pressão.

Dando sequência com a formulação de Urade et al (2015), é elaborada uma equação para ser utilizada em vasos de pressão com mais de 3 camadas que traz como resultado os valores das tensões circunferenciais resultantes em cada camada do vaso. Essa equação (47), apresenta algumas variáveis como “Po” e “Pi” que simbolizam respectivamente a pressão externa e interna do vaso de pressão analisado em MPa.

$$\sigma_{\theta} = -Po + \frac{Pi - Po}{F - 1} \quad (47)$$

Nota-se que outra variável presente na equação (47) é o “F” que é descrito pelas seguintes equações (48), (49) e (50). Na equação (50), “d” é o diâmetro da camada analisada.

$$F = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \dots C_r \cdot C_{r+1} \cdot C_n \quad (48)$$

$$C_{r+1} = \frac{2K_{r+1}^2}{1 + K_{r+1}^2} \quad (49)$$

$$K_{r+1} = \frac{d_{r+1}}{d_r} \quad (50)$$

Vale ressaltar que existem normas técnicas de diversos países que tratam de definições para o projeto de vasos de pressão. Essas normas buscam uma padronização e simplificação de cálculos, garantindo a segurança mínima para a operação do equipamento. No entanto, existem casos onde as condições de trabalho do vaso de pressão não são atendidas por essas normas, tendo em vista suas simplificações. Nesse caso, cabe a um responsável do projeto estudar as particularidades em questão e propor soluções cabíveis.

4.3 Formulação para vasos de pressão constituídos por múltiplos materiais

Como já dito anteriormente, a utilização de diferentes materiais na estrutura de um vaso de pressão multicamada pode atribuir características interessantes e desejáveis ao vaso. Diversos trabalhos na literatura trazem essa questão e buscam a otimização desses vasos. Nessa seção, é apresentada uma formulação proposta por Qiu et al (2015), na qual são consideradas camadas de diferentes materiais metálicos ao longo da estrutura de um vaso de pressão. Da mesma forma, essa formulação pode ser utilizada considerando vários outros materiais, não necessariamente metálicos.

3.3.1 Vaso de pressão com 2 camadas

Seguindo a formulação proposta por Qiu et al (2015), calcula-se inicialmente os deslocamentos radiais das duas camadas. O deslocamento radial da camada interna é obtido pela equação (51), enquanto o da camada externa pela equação (52). Além disso a interferência formada é então expressa pela equação (53). Nessas equações, é necessário especificar o material das camadas, logo “ E_1 ” e “ E_2 ” são os módulos de Young da camada exterior e interior respectivamente. Além deles, “ ν_1 ” é o coeficiente de Poisson da camada exterior, enquanto “ ν_2 ” é o da camada interior. Também é importante ressaltar que “ r_1 ” é o raio da camada exterior, “ $r_{2,out}$ ” e “ $r_{2,in}$ ” do ponto de contato entre as duas camadas, exterior e interior respectivamente e “ r_3 ” é o raio interior. P_i é a pressão de contato entre as camadas.

$$u_{r,out|r=r_2} = \frac{r_{2,out}^3 P_i (1-\nu_1)}{E_1 (r_1^2 - r_{2,out}^2)} + \frac{r_1^2 r_{2,out} P_i (1+\nu_1)}{E_1 (r_1^2 - r_{2,out}^2)} \quad (51)$$

$$u_{r,in|r=r_2} = -\frac{r_{2,in}^3 P_i (1-\nu_2)}{E_2 (r_{2,in}^2 - r_3^2)} - \frac{r_3^2 r_{2,in} P_i (1+\nu_2)}{E_2 (r_{2,in}^2 - r_3^2)} \quad (52)$$

$$\delta_i = u_{r,out|r=r_2} - u_{r,in|r=r_2} \quad (53)$$

Derivando da equação (53), chega-se na equação (54) que obtém a pressão de contato P_i entre as duas camadas. Considerando $r_{2,in} = r_{2,out}$, ocorre a simplificação para equação (55).

$$P_i = \frac{\delta_i}{\frac{r_{2,out}(-r_{2,out}^2(-1+\nu_1)+r_1^2(1+\nu_1))}{E_1(r_1^2-r_{2,out}^2)} + \frac{r_{2,in}(r_{2,in}^2(-1+\nu_2)-r_3^2(1+\nu_2))}{E_2(r_{2,in}^2-r_3^2)}} \quad (54)$$

$$P_i = \frac{\delta_i}{r_2 \left(\frac{r_2^2(-1+\nu_1)}{E_1(-r_1^2+r_2^2)} + \frac{r_1^2(1+\nu_1)}{E_1(r_1^2-r_2^2)} - \frac{r_2^2(-1+\nu_2)}{E_2(r_2^2-r_3^2)} + \frac{r_3^2(1+\nu_2)}{E_2(r_2^2-r_3^2)} \right)} \quad (55)$$

Com a pressão de contato entre as duas camadas determinada, é possível determinar as tensões resultantes no vaso de pressão. As tensões radiais e circunferenciais na camada interior são encontradas nas equações (56) e (57) respectivamente. As tensões radiais e circunferenciais na camada exterior são encontradas nas equações (58) e (59). Nessas equações, “ r ” trata-se do raio no qual deseja-se calcular as tensões.

$$\sigma_{r,in} = \frac{-P_i r_2^2}{r_2^2 - r_3^2} + \frac{1}{r^2} \frac{r_3^2 r_2^2 P_i}{r_2^2 - r_3^2} \quad (56)$$

$$\sigma_{\theta,in} = \frac{-P_i r_2^2}{r_2^2 - r_3^2} - \frac{1}{r^2} \frac{r_3^2 r_2^2 P_i}{r_2^2 - r_3^2} \quad (57)$$

$$\sigma_{r,out} = \frac{P_i r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} - \frac{1}{r^2} \frac{r_2^2 r_1^2 P_i}{r_1^2 - r_2^2} \quad (58)$$

$$\sigma_{\theta,out} = \frac{P_i r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + \frac{1}{r^2} \frac{r_2^2 r_1^2 P_i}{r_1^2 - r_2^2} \quad (59)$$

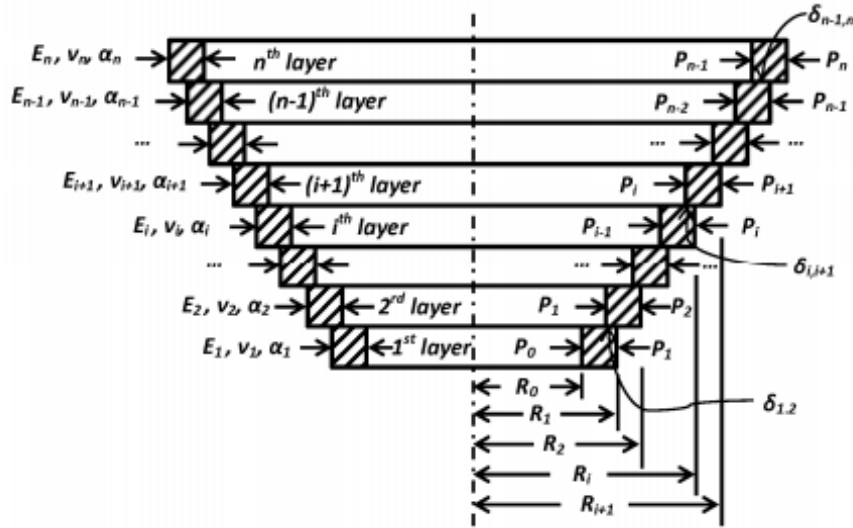
4.3.2 Vaso de pressão com “n” camadas

Um esquema desse tipo de encaixe das “n” camadas é ilustrado pela figura 15, onde cada camada, pressão de contato, interferência e demais informações são simbolizadas. Nessa formulação proposta por Qiu et al, as “n” camadas podem ser fabricadas por diferente materiais. Essa formulação inicia-se com a análise do encaixe entre duas camadas genéricas do vaso, podendo ser denominadas “ i ” e “ $i + 1$ ”. Com isso, calcula-se o deslocamento radial da camada “ i ” pela equação (60), que pode ser simplificada pela equação (61), caso a interferência δ_{i-1} , da camada anterior a “ i ” seja menor do que o raio r_{i-1} da mesma camada anterior.

$$u_i^{out} = \frac{R_i [P_{i-1} (R_{i-1} - \delta_{i-1,i})^2 - P_i R_i^2] (1 - \nu_i)}{E_i (R_i^2 - (R_{i-1} - \delta_{i-1,i})^2)} + \frac{(P_{i-1} - P_i) (R_{i-1} - \delta_{i-1,i})^2 R_i (1 + \nu_i)}{E_i (R_i^2 - (R_{i-1} - \delta_{i-1,i})^2)} \quad (60)$$

$$u_i^{out} = \frac{R_i [P_{i-1} R_{i-1}^2 - P_i R_i^2] (1 - \nu_i)}{E_i (R_i^2 - R_{i-1}^2)} + \frac{(P_{i-1} - P_i) R_{i-1}^2 R_i (1 + \nu_i)}{E_i (R_i^2 - R_{i-1}^2)} \quad (61)$$

Figura 15: Estrutura de “n” camadas acopladas formando “n-1” pressões de contato



Fonte: Qiu et al, 2015

Da mesma forma, calcula-se o deslocamento radial da camada "i + 1" pela equação (62) já simplificada.

$$u_{i+1}^{in} = \frac{R_i [P_i R_i^2 - P_{i+1} R_{i+1}^2] (1 - \nu_{i+1})}{E_{i+1} (R_{i+1}^2 - R_i^2)} + \frac{(P_i - P_{i+1}) R_i R_{i+1}^2 (1 + \nu_{i+1})}{E_{i+1} (R_{i+1}^2 - R_i^2)} \quad (62)$$

Com os deslocamentos radiais dessas duas camadas "i" e "i + 1" é possível calcular a interferência formada entre as duas na equação (63). Expandido essa equação e agrupando chega-se na equação (64).

$$\delta_{i,i+1} = R_i \left(\frac{2P_{i-1} R_{i-1}^2 - P_i (-R_i^2 (-1 + \nu_i) + R_{i-1}^2 (1 + \nu_i))}{E_i (R_{i-1}^2 - R_i^2)} + \frac{2P_{i+1} R_{i+1}^2 - P_i (R_i^2 + R_{i+1}^2) + P_i (R_i^2 - R_{i+1}^2) \nu_{i+1}}{E_{i+1} (R_i^2 - R_{i+1}^2)} \right) \quad (63)$$

$$\delta_{i,i+1} = \frac{2R_{i-1}^2 R_i}{E_i (R_{i-1}^2 - R_i^2)} P_{i-1} + \left[\frac{R_i (R_i^2 + R_{i-1}^2)}{E_i (R_i^2 - R_{i-1}^2)} - \frac{R_i \nu_i}{E_i} + \frac{R_i (R_{i+1}^2 + R_i^2)}{E_{i+1} (R_{i+1}^2 - R_i^2)} + \frac{R_i \nu_{i+1}}{E_{i+1}} \right] P_i + \frac{2R_i R_{i+1}^2}{E_{i+1} (R_i^2 - R_{i+1}^2)} P_{i+1} \quad (64)$$

A equação (64) evidencia que cada uma das pressões de contato P_{i-1} , P_i , e P_{i+1} influenciam no valor da interferência $\delta_{i,i+1}$ entre as duas camadas "i" e "i + 1". Logo, é possível criar coeficientes que sejam formados pelos valores que multiplicam cada pressão. Assim, a equação (64) pode ser reescrita da maneira apresentada na equação (65), e cada coeficiente simboliza o que está sendo visto nas equações (66), (67) e (68).

$$\delta_{i,i+1} = S_{i,i-1}P_{i-1} + S_{i,i}P_i + S_{i,i+1}P_{i+1} \quad (65)$$

$$S_{i,i-1} = \frac{2R_{i-1}^2 R_i}{E_i(R_{i-1}^2 - R_i^2)} \quad (66)$$

$$S_{i,i} = \left[\frac{R_i(R_i^2 + R_{i-1}^2)}{E_i(R_i^2 - R_{i-1}^2)} - \frac{R_i v_i}{E_i} + \frac{R_i(R_{i+1}^2 + R_i^2)}{E_{i+1}(R_{i+1}^2 - R_i^2)} + \frac{R_i v_{i+1}}{E_{i+1}} \right] \quad (67)$$

$$S_{i,i+1} = \frac{2R_i R_{i+1}^2}{E_{i+1}(R_i^2 - R_{i+1}^2)} \quad (68)$$

Dessa maneira, quando são combinadas “n” camadas de um vaso de pressão, são formados “n-1” pares de interferência e com isso, “n-1” equações similares à (65). Como exemplo, partindo da camada mais interior do vaso de pressão, entre a primeira e a segunda camada, a equação da interferência entre essas duas camadas pode ser escrita como na equação (69).

$$\delta_{1,2} = S_{1,0}P_0 + S_{1,1}P_1 + S_{1,2}P_2 \quad (69)$$

Por fim, com essa formulação ainda é possível calcular os valores das tensões radiais e circunferenciais respectivamente em uma determinada camada ou qualquer raio do vaso de pressão que deve ser especificado na variável “r” das equações (70) e (71).

$$\sigma_r = \frac{P_{i-1}R_{i-1}^2 - P_i R_i^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2} + \frac{1}{r^2} \frac{R_{i-1}^2 R_i^2 (P_i - P_{i-1})}{R_i^2 - R_{i-1}^2} \quad (70)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_{i-1}R_{i-1}^2 - P_i R_i^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2} - \frac{1}{r^2} \frac{R_{i-1}^2 R_i^2 (P_i - P_{i-1})}{R_i^2 - R_{i-1}^2} \quad (71)$$

4. Validação das Formulações

Na medida em que foram apresentadas formulações para o equacionamento de vasos de pressão de diferentes tipos nesse presente trabalho, tornou-se necessário a validação e análise da concordância dessas equações. Para isso, foi elaborada uma tarefa na qual foi necessária aplicar essas formulações e testá-las, logo, utilizou-se o Matlab como ferramenta. Nessa tarefa, os dados apresentados em Urade et al (2015) para a formulação do vaso de pressão com 3 camadas, que podem ser visualizados na tabela 1, foram aplicados nas equações de Qiu et al (2016), utilizando a formulação para um vaso de pressão com “n” camadas, já vista anteriormente nesse trabalho. Os valores obtidos na validação por meio dessas equações de Qiu et al (2016), são mostrados na tabela 2 em comparação com os resultados apresentados no trabalho de Urade et al (2015).

Nota-se que os resultados apresentados na tabela 2 são bem parecidos e as poucas disparidades podem ter sido originadas da utilização de algum coeficiente diferente ou de alguma simplificação sugerida por alguns dos trabalhos. Isso mostra que as formulações apresentadas estão em concordância para utilização no equacionamento de vasos de pressão. É importante ressaltar que o trabalho de Urade et al (2015) formulou equações visando a utilização do mesmo tipo de material em todas as camadas do vaso de pressão, enquanto Qiu et al (2016) apresentou uma formulação planejando a utilização de diferentes materiais em cada camada.

Tabela 1: Dados de Urade et al (2015) para vaso de pressão com 3 camadas que foram utilizados na validação

DADOS DE URADE ET AL (2015)	
Pressão Interna (P_i) (MPa)	60,00
Diâmetro interno da 1ª camada (d_1) (mm)	100,00
Diâmetro externo da 1ª camada e interno da 2ª camada (d_2) (mm)	109,33
Diâmetro externo da 2ª camada e interno da 3ª camada (d_3) (mm)	118,66
Diâmetro externo da 3ª camada (d_4) (mm)	128,00

Tabela 2: Resultados obtidos com a formulação de Qiu et al (2016) com os dados da tabela 1 em comparação com os resultados apresentados em Urade et al (2015)

DADOS ENCONTRADOS	RESULTADOS DE URADE ET AL (2015)	RESULTADOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO COM A FORMULAÇÃO DE QIU ET AL (2016)
Pressão de contato entre a 1ª e 2ª camada (P_{k12}) (MPa)	1,890	1,820
Pressão de contato entre a 2ª e 3ª camada (P_{k23}) (MPa)	1,602	1,590
Tensão circunferencial na 1ª camada ($\sigma_{\theta 1}$) (MPa)	224,00	225,73
Tensão circunferencial na 2ª camada ($\sigma_{\theta 2}$) (MPa)	224,00	224,05
Tensão circunferencial na 3ª camada ($\sigma_{\theta 3}$) (MPa)	224,00	224,32

Após o encontro das tensões circunferenciais e pressões de contato em cada camada, foi iniciada uma nova etapa da validação para gerar gráficos importantes que também mostraram-se em conformidade com os trabalhos de Qiu et al (2016), Urade et al (2015) e demais utilizados como referência para esse trabalho. Nessa etapa, foi aplicado o princípio de superposição no vaso de pressão com 3 camadas com o dimensionamento utilizado em Urade et al (2015), as tensões circunferenciais foram combinadas para chegar-se numa tensão circunferencial resultante em cada camada. Os passos dessa combinação podem ser observados pelos gráficos das figuras 16, 17 e 18, neles é possível perceber como as pressões de contato causadas pelas interferências de montagem possuem grande importância no vaso de pressão. Como previsto pela literatura, esse efeito também pode ser visto na figura 19, na qual a montagem do vaso por interferência mecânica entre as camadas reduz as tensões circunferenciais resultantes, o que viabiliza o aumento da capacidade de carga desse vaso.

Percebe-se que na imagem da esquerda da figura 19, é mostrada a tensão circunferencial causada pela pressão interna do vaso, assim como no gráfico da figura 16, já na imagem central, é mostrado apenas as tensões circunferenciais devido as pressões de contato que o vaso está sujeito, como no gráfico da figura 17. E por último, na imagem da direita, essas tensões são combinadas e são mostradas as tensões circunferenciais resultantes do vaso, como no gráfico da figura 18.

Figura 16: Gráfico da tensão circunferencial originada da pressão interna ao longo da espessura do vaso de pressão

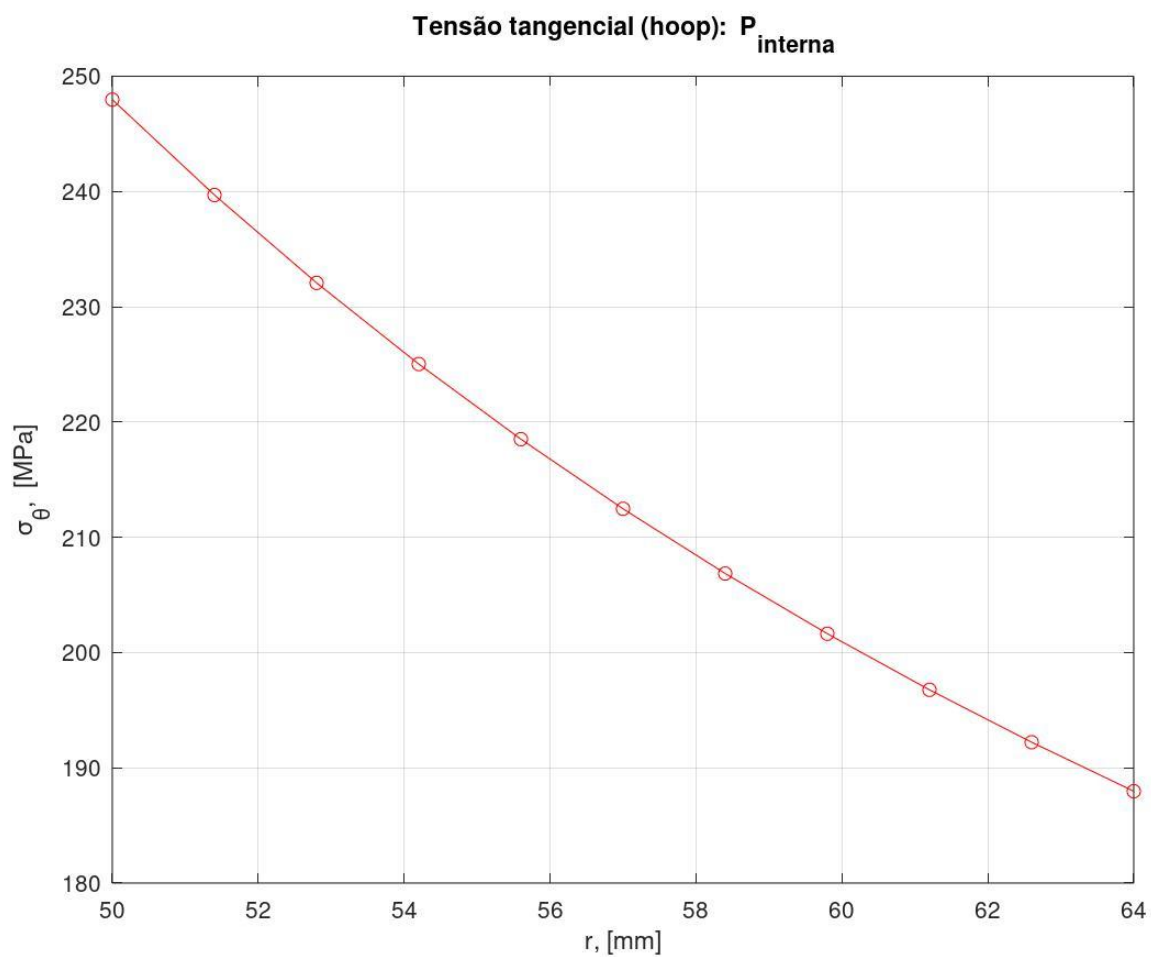


Figura 17: Gráfico da tensão circunferencial originada pelas pressões de contato ao longo da espessura do vaso de pressão

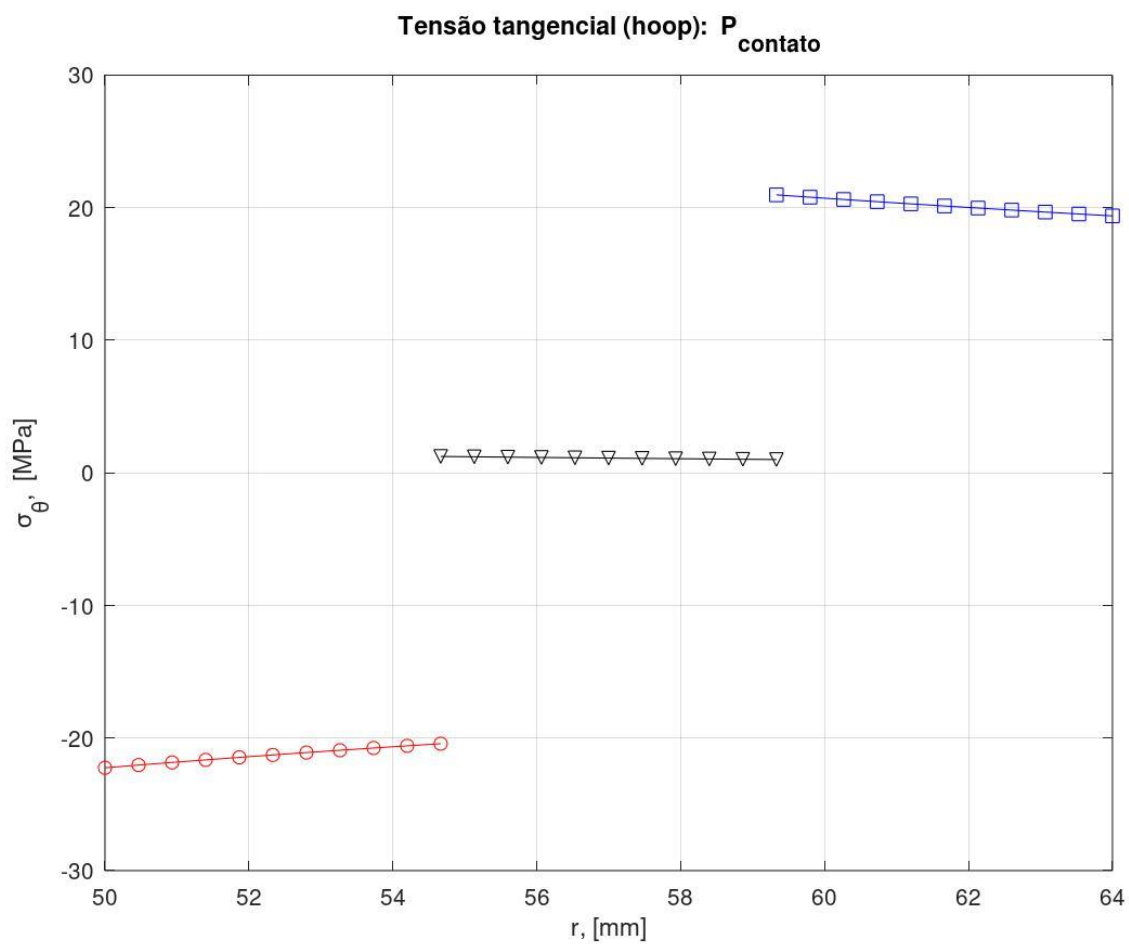


Figura 18: Gráfico das tensões circunferenciais resultantes pelo princípio da superposição em um vaso de pressão com 3 camadas

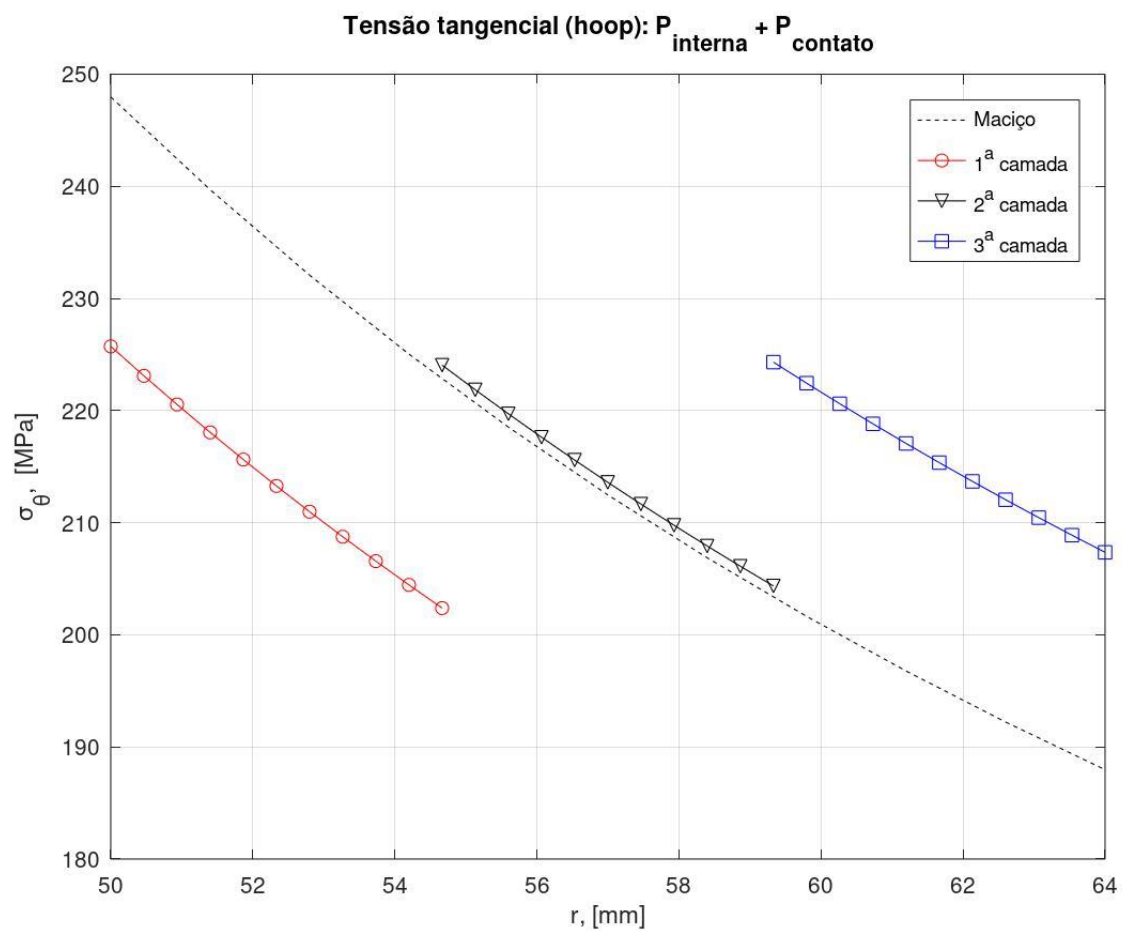
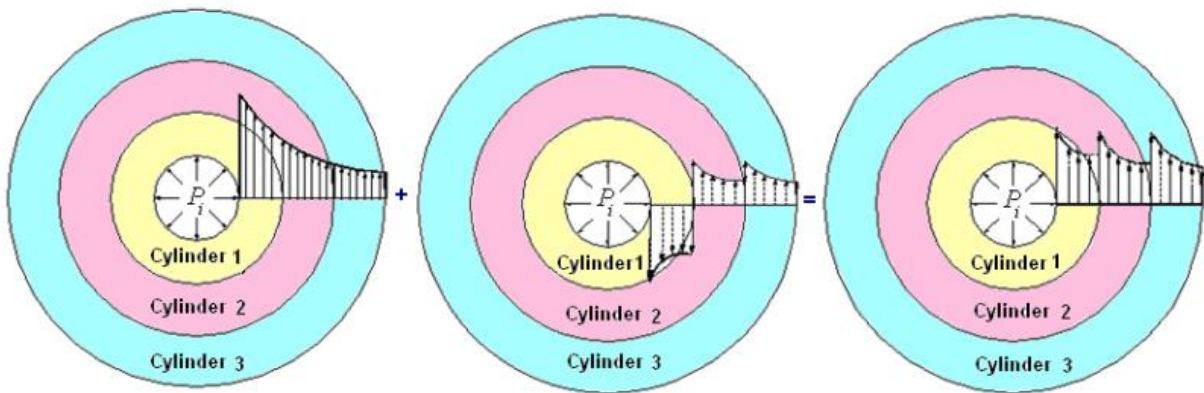
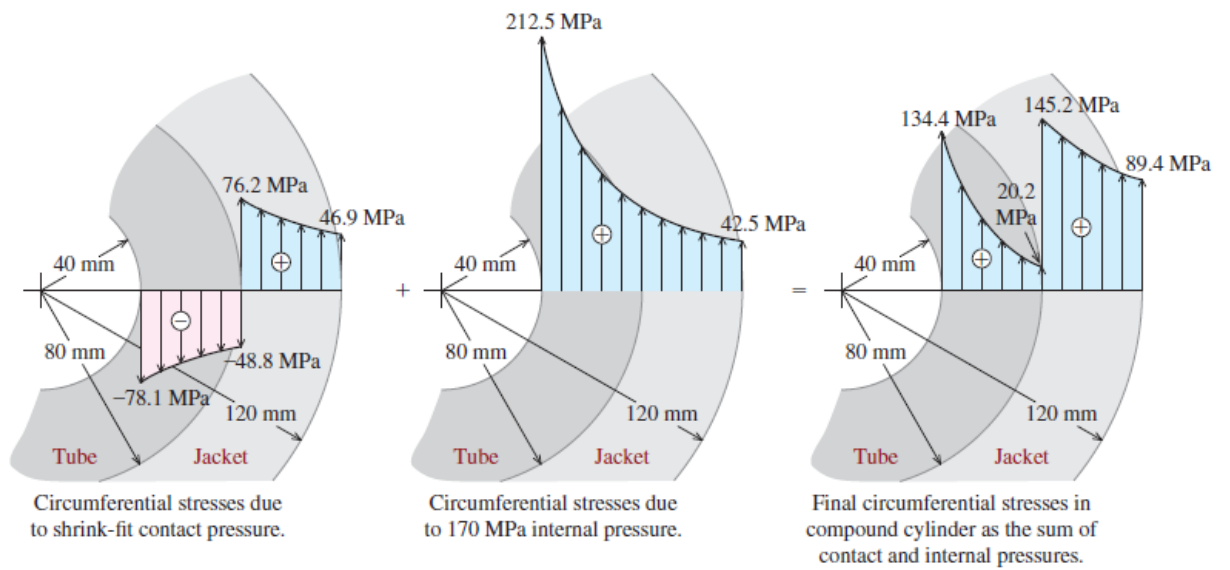


Figura 19: Aplicação do princípio de superposição para determinação das tensões circunferenciais resultantes



Fonte: Miraje e Patil (2011)



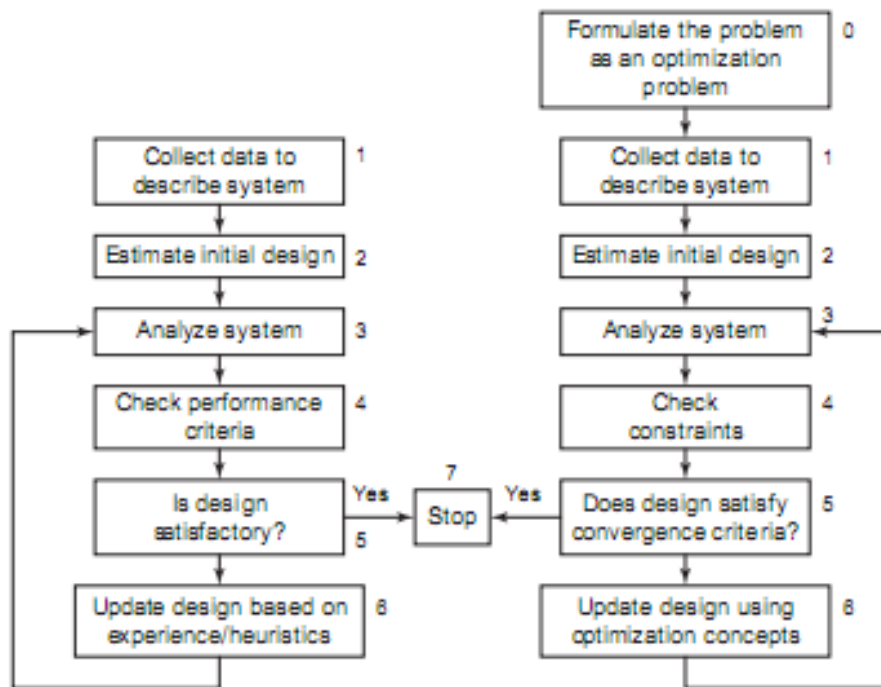
Fonte: Philpot (2017)

5. Métodos de Otimização

Em diversos setores da engenharia como nos ramos de gestão, produção, automobilismo, estruturas aeroespaciais e vários outros que poderiam ser citados, são encontradas tarefas que buscam otimizar algo, podendo esse ser o lucro de uma empresa, o tempo de fabricação de uma peça, a vida útil de uma máquina, o custo da produção de um produto e outros mais. Logo, nota-se que dependendo do objetivo da tarefa, essa necessita de uma maximização como no caso do lucro, enquanto outras precisam de uma minimização, como o caso do tempo de fabricação. O conhecimento do objetivo da tarefa é essencial na escolha do método de otimização que será escolhido. Rao (2009) define otimização, portanto, como a ação na qual busca-se encontrar os melhores resultados para uma tarefa dadas circunstâncias necessárias da mesma.

Antes mesmo de iniciar o processo de otimização, existem alguns fatores fundamentais que devem ser analisados na elaboração de um projeto e suas tarefas. Alguns desses fatores são vistos em Arora (2012), como: a capacidade do projeto tornar-se algo realista que possa ser aplicado em análises matemáticas, o custo estimado que será requerido, a possível divisão do projeto em subprojetos, nos quais cada um pode ter o seu problema de otimização individual, entre outros. Com essas observações feitas, é possível iniciar as primeiras etapas do projeto, desde já, visando sua otimização. O processo de elaboração de um projeto acontece de forma iterativa, isto é, ocorre a repetição de algumas ações do processo. Dessa forma, nenhuma etapa é realizada em completa individualidade e é possível que determinadas etapas sejam retomadas de acordo com os resultados parciais encontrados. O importante é que desde as especificações de necessidade do projeto, passando pelas configurações preliminares até os testes do sistema em estudo, cada etapa seja aprimorada utilizando os métodos de otimização. Isso mostra como o desenvolvimento do sistema em estudo e os métodos de otimização estão totalmente ligados na busca do resultado ideal. A figura 20 apresenta um diagrama que indica os passos da elaboração de um projeto que busca a otimização em suas etapas (lado direito) em comparação com um projeto elaborado de uma maneira convencional (lado esquerdo), baseando-se em experiências e comparações.

Figura 20: Diagrama da elaboração de um projeto de maneira convencional e com otimização



Fonte: Arora (2012)

Existem diversos métodos e formas para o projeto e otimização de uma tarefa ou sistema, e algumas são melhores que outras. No entanto, é necessário perceber que o melhor método para uma tarefa “A” pode ser um método inviável para uma tarefa “B”. Diante disso, torna-se evidente que antes da busca do método de otimização de um projeto em estudo, é necessário ter total conhecimento das circunstâncias do problema analisado e ter todos os cuidados indispensáveis em sua elaboração. Logo, é necessário formular o problema de otimização do sistema em estudo com alguns procedimentos definidos.

6.1 Formulação do Problema de Otimização

Em Arora (2012), é definido um procedimento de formulação do problema de otimização dividido em cinco etapas que serão mostradas a seguir.

6.1.1 Descrição do Projeto de Estudo

Nessa primeira etapa, deve ser realizado um resumo do projeto de forma bem descritiva, na qual sejam expostos claramente os objetivos do projeto e as requisições necessárias por ele.

6.1.2 Dados e Informações do Projeto

Nessa etapa, todos os dados e informações úteis do projeto são coletados, como exemplo, o limite de recursos, o custo dos materiais que serão utilizados, as propriedades desses materiais e até mesmo as ferramentas de análise que serão empregadas.

6.1.3 Definição das Variáveis de Otimização

Nessa terceira etapa, devem ser definidas as variáveis de otimização, isto é, as variáveis que estarão livres para receberem qualquer valor que possa ser atribuído. Esses diferentes valores que farão com que o projeto sofra mudanças que serão analisadas.

6.1.4 Definição dos Critérios de Otimização

Como visto na etapa anterior, vários projetos poderão ser criados com diferentes valores atribuídos nas variáveis de otimização. Mas para que esses projetos sejam comparados em busca do projeto ideal, é necessário que um ou mais critérios de otimização sejam especificados. Esse critério é chamado “função objetivo” do problema e trata-se de uma função que pode ser maximizada ou minimizada de acordo com o objetivo descrito na primeira etapa.

6.1.5 Definição das Restrições do Projeto

Nessa última etapa, ocorre a identificação de todas as restrições do projeto, além do desenvolvimento de expressões matemáticas para as mesmas. As restrições são muito úteis porque evitam que projetos com dimensões inviáveis sejam criados e analisados, o que poderia deixar o processo de análise muito grande e insustentável.

Como visto anteriormente, os métodos de otimização podem ser aplicados em diversas áreas. Com essa característica, é normal que surjam conceitos e restrições específicas de cada área, no entanto, grande parte desses problemas podem ser formulados seguindo as mesmas etapas apresentadas acima. Além disso, Arora (2012) mostra que também é possível definir um modelo matemático geral que pode ser utilizado na busca do projeto ideal em um problema de otimização. Nesse modelo, inicia-se com um vetor $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ em que seus componentes são variáveis de otimização. Em seguida, de acordo com a tarefa do projeto, é necessário minimizar ou maximizar a função objetivo especificada, equação (72). Note que também é necessário que os valores utilizados para gerar resultados, assim como os resultados gerados na função objetivo estejam sujeitos às restrições das equações e inequações estabelecidas para o projeto, como nas equações (73) e (74).

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (72)$$

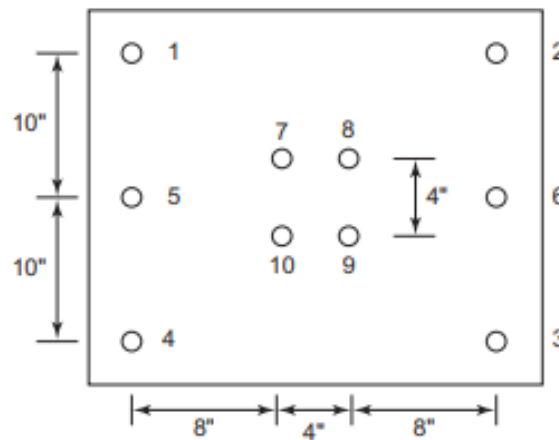
$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad j = 1 \text{ a } p \quad (73)$$

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad i = 1 \text{ a } m \quad (74)$$

6.2 Algoritmo Genético

Nos últimos anos, tornou-se constante a busca de soluções de problemas na natureza. A biomimética tem aparecido cada vez mais em pesquisas, trazendo inspirações e estratégias para serem aplicadas em diversas áreas como Informática, Design, Física e muitas outras. O Algoritmo Genético é um método de otimização que utiliza de técnicas e conceitos baseados na biologia evolutiva como Reprodução, Mutação, População, Crossover, Imigração, entre outros, e com isso simula as operações genéticas. Por tratar-se de um algoritmo bem geral, pode ser utilizado em diversos problemas de otimização de muitas áreas, Arora (2012) exemplifica que o algoritmo genético pode ser utilizado para minimizar os movimentos de um braço robótico na inserção de parafusos em uma placa de metal como na figura 21.

Figura 21: Placa de metal a ser parafusada por um braço robótico



Fonte: Arora (2012)

Basicamente, o funcionamento desse algoritmo se dá com a criação de vários projetos gerados com valores aleatórios que sejam permitidos nas variáveis de otimização pelas restrições previstas. A partir disso, utilizando de uma função objetivo estabelecida pelo critério imposto no projeto, cada projeto inicialmente gerado é avaliado e classificado. Os projetos com melhores classificações são selecionados e colocados em um novo conjunto, nota-se que agora, esse novo conjunto possui projetos com uma maior “aptidão”, ou seja, uma melhor adequação ao que é esperado. Além disso, após a formação de cada novo conjunto mais apto, é possível utilizar de operadores genéticos para criar trocas

de características entre os projetos e até inserir novos projetos. Esse processo continua até que um determinado critério ou um limite de iterações imposto seja atingido. Como exemplo, é possível pensar em um projeto que busque reduzir o custo dos materiais utilizados na estrutura de um vaso de pressão, mas que ao mesmo tempo necessita suportar uma determinada pressão de trabalho. Com isso, podemos estabelecer algumas variáveis de otimização como exemplo, a espessura de cada camada do vaso. O algoritmo genético, já tendo as informações das funções objetivo e restrições, pode ser utilizado na busca dos melhores valores para essas variáveis.

Para uma melhor representação e utilidade, as variáveis de otimização de cada projeto são codificadas em strings binárias. Da mesma forma, cada projeto também é assim codificado, visto que eles são representados por um conjunto de variáveis de otimização.

Arora (2012) ainda destaca que é importante que o algoritmo genético seja rodado algumas vezes, visto que pela utilização de números aleatórios, o algoritmo pode chegar em valores diferentes em seu resultado, logo, com mais testes é possível obter um resultado final de maior confiança.

6. Otimização do Vaso de Vaso de Pressão com 3 camadas

Com as formulações apresentadas nesse trabalho validadas, foi possível utilizá-las em união com outras ferramentas para criar um mecanismo de otimização do vaso de pressão.

Inicialmente, utilizando o Matlab foi analisada a influência do aumento do número de camadas do vaso de pressão com a diminuição da tensão circunferencial resultante do mesmo e constatou-se como previsto por Urade et al (2015) que a queda dessa tensão não é uniforme. O maior decréscimo da tensão circunferencial resultante do vaso se dá nas três primeiras camadas. As camadas em sequência provocam quedas menores nessa tensão e acabam não sendo eficientes quando os custos de produção são considerados.

Nesse trabalho, para ilustrar essa diminuição de tensão com o aumento do número de camadas, partindo de um vaso de pressão com 3 camadas com o dimensionamento de Urade et al (2015) aplicados na formulação de Qiu et al (2016), também foram analisados vasos de pressão com 4 camadas e 5 camadas, todos com os mesmos materiais. Os gráficos vistos nas figuras 18, 22 e 23 mostram o comportamento das tensões circunferenciais ao longo da espessura dos vasos de pressão de 3, 4 e 5 camadas respectivamente e comprovam que a queda da tensão é muito pouca a partir da terceira camada.

Figura 22: Gráfico das tensões circunferenciais resultantes pelo princípio da superposição para um vaso de pressão com 4 camadas

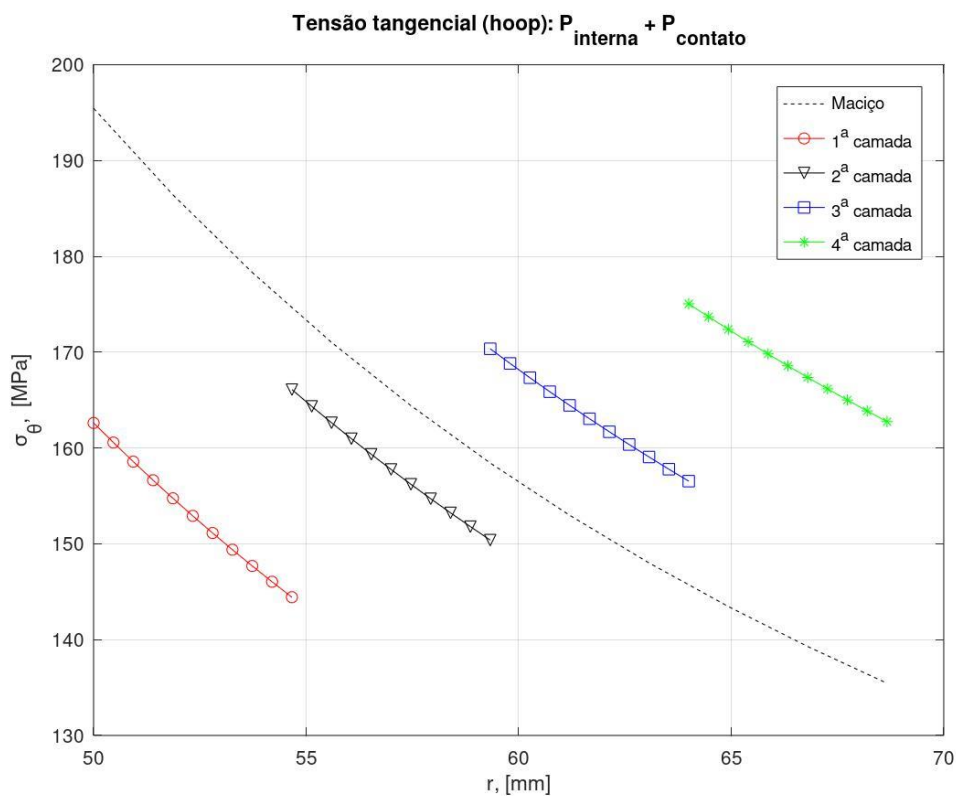
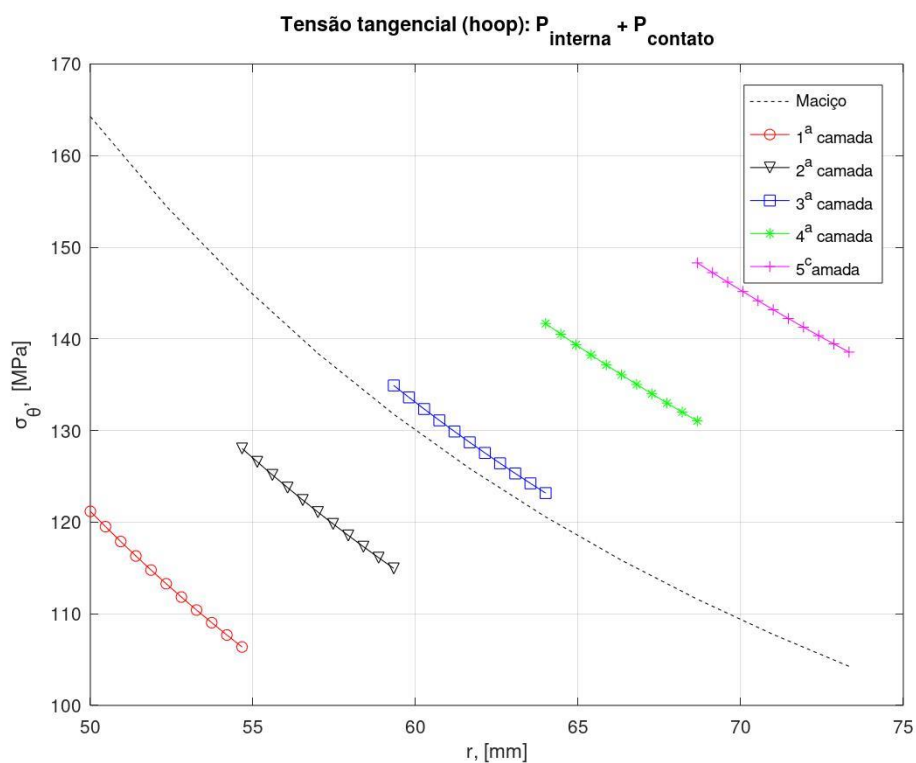


Figura 23: Gráfico das tensões circunferenciais resultantes pelo princípio da superposição para um vaso de pressão com 5 camadas



Portanto, utilizando dessas informações, o presente trabalho iniciou a criação de um mecanismo de otimização com o Matlab para um vaso de pressão com 3 camadas. Esse mecanismo foi dividido em duas

etapas, sendo assim, na primeira etapa foi proposto a otimização do vaso de pressão com 3 camadas com o dimensionamento proposto por Urade et al (2015), já discutido em etapas anteriores desse trabalho. E na segunda etapa, o dimensionamento desse vaso foi alterado, e os valores utilizados foram baseados nos dados de foguetes da equipe UFABC Rocket Design, nesse caso, também foi proposto testes alterando os materiais utilizados em cada camada. Outra importante observação é que durante as duas etapas foram realizados diversos testes, aplicando diferentes métodos de otimização como o fmincon (otimização por gradientes, método de Newton) e o algoritmo genético.

A função objetivo estabelecida em todos esses testes teve como finalidade minimizar a massa do vaso de pressão, logo, as variáveis de otimização estabelecidas foram as espessuras de cada camada do vaso e as interferências entre cada camada. Além disso, foram aplicadas restrições nesse mecanismo, tendo em vista que o vaso de pressão não poderia suportar tensões circunferenciais que excediam os limites de escoamento dos materiais empregados nas camadas dos vasos.

Aplicando essas definições, os resultados obtidos durante a otimização podem ser observados nas tabelas em sequência. A tabela 3 mostra os dados obtidos na primeira etapa, para o vaso de pressão com o dimensionamento de Urade et al (2015) utilizando do mesmo material em todas as camadas, o aço. Já as tabelas 4, 5 e 6 mostram os dados obtidos durante a segunda etapa, para o vaso de pressão baseado em dados da UFABC Rocket Design. Para chegar aos dados da tabela 4, foi utilizado aço nas 3 camadas do vaso. Para a tabela 5, foi utilizado uma liga TiAlV na primeira camada, seguida de aço na segunda camada e alumínio na terceira camada. Por fim, para os dados da tabela 6, foi utilizado uma liga TiAlV na primeira camada, seguida de aço na segunda camada e um polímero reforçado na terceira camada. Na tabela 7 é apresentado os dados desses materiais utilizados nos vasos de pressão.

**Tabela 3: Resultados obtidos para o vaso com o dimensionamento de Urade et al (2015),
utilizando aço nas 3 camadas**

DADOS OBTIDOS	ALGORITMO GENÉTICO					FMINCON
Testes	1	2	3	4	5	Único
Espessura da primeira camada (mm)	0,411	0,064	0,624	0,416	1,419	3,000
Espessura da segunda camada (mm)	0,390	2,122	0,667	0,086	0,292	3,000
Espessura da terceira camada (mm)	0,981	0,853	0,044	0,412	0,198	3,000
Interferência entre 1ª e 2ª camada (mm)	0,0000	0,0100	0,0100	0,0000	0,0100	0,0061
Interferência entre 2ª e 3ª camada (mm)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0000	0,0049

**Tabela 4: Resultados obtidos para o vaso com o dimensionamento baseado na equipe UFABC
Rocket Design utilizando aço nas 3 camadas**

DADOS OBTIDOS	ALGORITMO GENÉTICO					FMINCON
Testes	1	2	3	4	5	Único
Espessura da primeira camada (mm)	1,468	1,138	$3,976 \times 10^{-5}$	0,004	0,159	1,044
Espessura da segunda camada (mm)	1,352	0,125	1,732	1,914	2,431	1,058
Espessura da terceira camada (mm)	0,360	1,923	1,455	1,269	0,605	1,073
Interferência entre 1ª e 2ª camada (mm)	0,0021	0,0015	0,0071	$8,8138 \times 10^{-4}$	$2,5844 \times 10^{-4}$	0,0015
Interferência entre 2ª e 3ª camada (mm)	0,0019	$2,9094 \times 10^{-4}$	0,0025	0,0027	0,0034	0,0015

Tabela 5: Resultados obtidos para o vaso com o dimensionamento baseado na equipe UFABC Rocket Design utilizando liga de TiAlV, aço e alumínio na 1ª, 2ª e 3ª camada respectivamente

DADOS OBTIDOS	ALGORITMO GENÉTICO					FMINCON
Testes	1	2	3	4	5	Único
Espessura da primeira camada (mm)	2,997	2,422	2,991	3,000	3,000	3,000
Espessura da segunda camada (mm)	0,292	0,867	0,298	0,289	0,289	0,289
Espessura da terceira camada (mm)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Interferência entre 1ª e 2ª camada (mm)	3,9276x 10^{-6}	5,4509x 10^{-9}	7,6945x 10^{-9}	9,1423x 10^{-8}	1,5715x 10^{-6}	2,4578x 10^{-11}
Interferência entre 2ª e 3ª camada (mm)	9,0903x 10^{-6}	3,9684x 10^{-9}	2,2112x 10^{-6}	4,4391x 10^{-8}	1,2784x 10^{-7}	2.0948x 10^{-11}

Tabela 6: Resultados obtidos para o vaso com o dimensionamento baseado na equipe UFABC Rocket Design utilizando liga de TiAlV, aço e polímero reforçado na 1ª, 2ª e 3ª camada respectivamente

DADOS OBTIDOS	ALGORITMO GENÉTICO					FMINCON
Testes	1	2	3	4	5	Único
Espessura da primeira camada (mm)	1,177	0,964	0,995	1,134	0,965	0,960
Espessura da segunda camada (mm)	$2,500 \times 10^{-5}$	$1,793 \times 10^{-5}$	$1,826 \times 10^{-5}$	$6,638 \times 10^{-5}$	$1,706 \times 10^{-5}$	$1,205 \times 10^{-5}$
Espessura da terceira camada (mm)	2,772	2,996	2,963	2,817	2,995	3,000
Interferência entre 1ª e 2ª camada (mm)	$5,6886 \times 10^{-5}$	$6,7171 \times 10^{-5}$	$1,1996 \times 10^{-6}$	$8,0881 \times 10^{-5}$	$9,1039 \times 10^{-6}$	$1,9464 \times 10^{-10}$
Interferência entre 2ª e 3ª camada (mm)	$1,1906 \times 10^{-4}$	$2,0318 \times 10^{-5}$	$1,0622 \times 10^{-5}$	$3,6811 \times 10^{-5}$	$9,7683 \times 10^{-6}$	$1,9481 \times 10^{-10}$

Tabela 7: Dados dos materiais utilizados

MATERIAL UTILIZADO	DENSIDADE (g/cm^3)	COEFICIENTE DE POISSON	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)
Aço	7,85	0,30	$210,0 \times 10^3$	290
Alumínio	2,70	0,30	$68,9 \times 10^3$	145
Liga TiAlV	4,43	0,30	$113,8 \times 10^3$	880
Polímero Reforçado	1,85	0,27	$54,0 \times 10^3$	234

7. Conclusões

7.1 Considerações Iniciais

Esse trabalho buscou realizar estudos de análise e otimização em vasos de pressão, analisando o impacto do número de camadas em sua composição e da utilização de diferentes materiais em cada camada do vaso. Essa tarefa proposta tem grande importância, tendo em vista que a obtenção desses resultados pode ajudar a equipe UFABC Rocket Design durante os projetos e competições, tanto na parte teórica de escrita de relatórios requeridos como durante a produção do próprio foguete. Vale ressaltar, que durante esse estudo, foram considerados apenas efeitos mecânicos, enquanto componentes térmicos não foram levados em consideração por ora.

Com o desenvolvimento dessa pesquisa, partindo de um amplo levantamento bibliográfico a respeito de formulações para as tensões mecânicas em diferentes tipos de vasos de pressão desde monocamadas até multicamadas com múltiplos materiais, seguido pela implementação e validação dessas formulações e do estudo das etapas de uma otimização e seus métodos, foi possível unir essas informações para criar um mecanismo de otimização para alguns modelos de vasos de pressão propostos. Logo, pode-se afirmar que os objetivos desse trabalho foram alcançados, tendo em consideração que os dados encontrados na otimização sugerem características e dimensionamentos que podem ser utilizados em futuros projetos da equipe UFABC Rocket Design, cabendo uma discussão mais ampla para isso, que leva em conta diversos outros fatores. Além disso, várias observações previstas pela literatura puderam ser confirmadas e a utilização de trabalhos que se complementam criou uma boa base para análise de diferentes tipos de vasos de pressão.

7.2 Conclusões

- As formulações apresentadas de Urade et al (2015) e Qiu et al (2016), assim como outras que foram referências desse trabalho, podem ser utilizadas em completude de outra com devidos cuidados, visto que apesar de apresentarem várias concordâncias, cada formulação possui características exclusivas que foram aplicadas de acordo com os objetivos dos autores.
- Como previsto pela literatura, foi confirmado que a pré-tensão de montagem de um vaso por interferência mecânica reduz as tensões resultantes nas camadas do vaso, contribuindo para sua utilização em tarefas que exigem maior pressão de trabalho.
- Também como previsto pela literatura, foi confirmado que a queda das tensões quando utilizadas múltiplas camadas não é uniforme e sendo assim, 3 camadas é o número ideal para ser utilizado em vasos de pressão, devido as principais quedas de tensão ocorrerem até a terceira camada, garantindo os benefícios desejados para o vaso de pressão e a viabilidade do projeto.

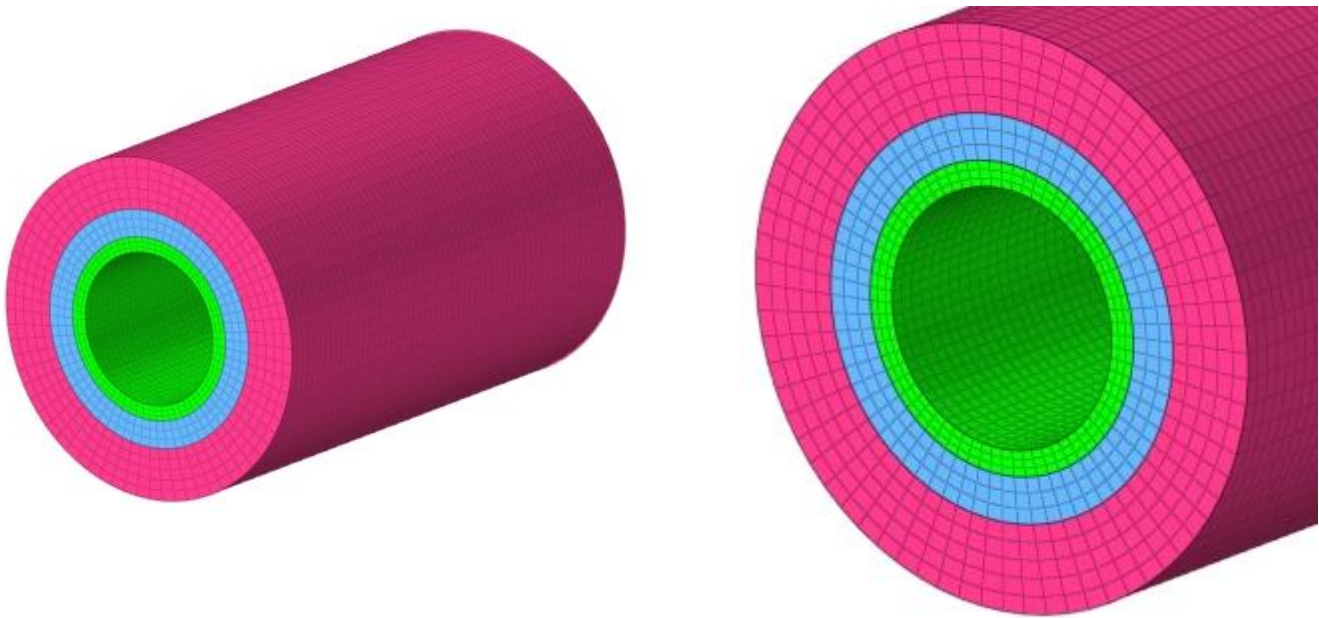
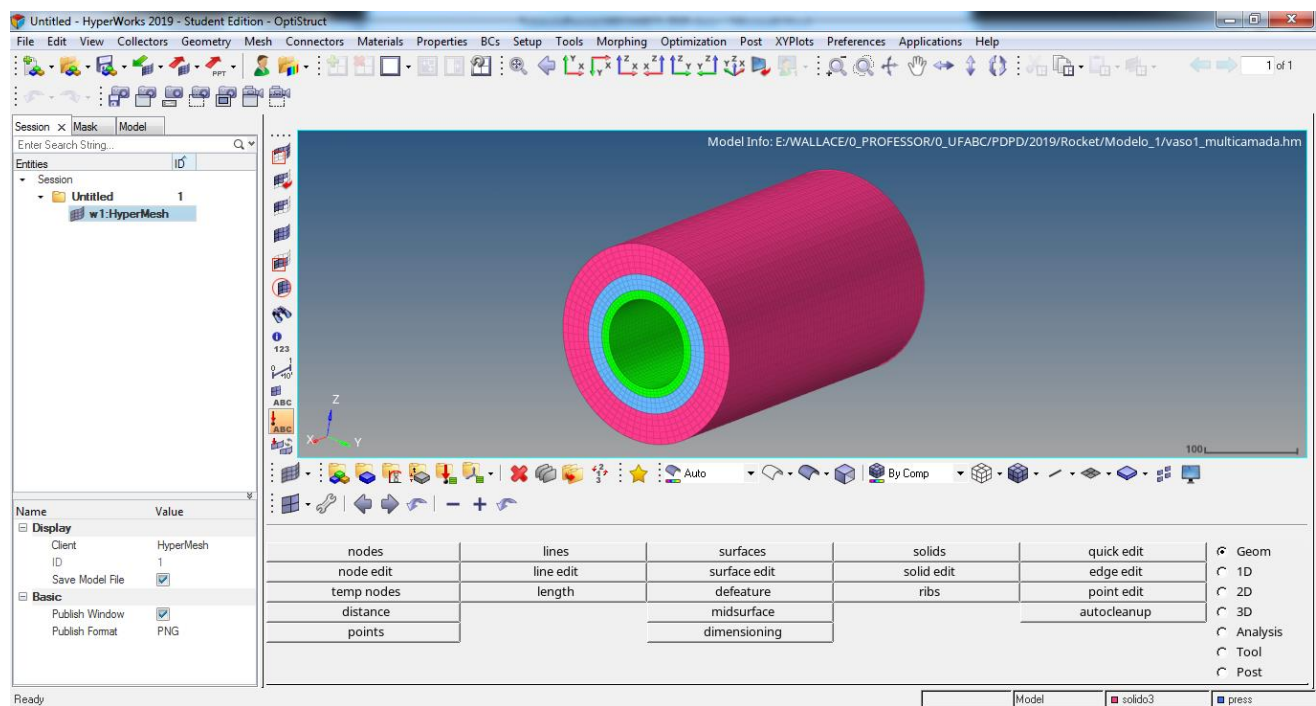
- A utilização dos diferentes materiais propostos no vaso de pressão baseado em dados da equipe UFABC Rocket Design em comparação com a utilização do mesmo material contribuiu muito para a queda das tensões resultantes nas camadas do vaso, evidenciando diversas vantagens na utilização de diferentes materiais como a liga de TiAlV, o Alumínio e Polímero reforçado que podem ser estudados pela equipe de acordo com suas necessidades e restrições.

7.3 Sugestões para Pesquisas Futuras

Pesquisas futuras em continuação desse trabalho podem se direcionar nos seguintes rumos:

- Analisar o comportamento de diferentes tipos de vasos de pressão levando em consideração efeitos térmicos como a dilatação das camadas no caso em que o vaso seja utilizado em temperaturas elevadas e com isso, investigar as implicações que isso traria para as tensões resultantes no vaso de pressão. Podendo então, unir informações geradas pela análise térmica e mecânica do vaso, com a possibilidade de gerar uma nova otimização para esses casos.
- Aplicar as formulações utilizadas nesse trabalho para novos tipos de vasos de pressão, visando encontrar outros materiais úteis para a tarefa que será exigida pelo vaso, assim como novos dimensionamentos.
- Validação dos cálculos utilizando o Método dos Elementos Finitos conforme planejado inicialmente (Fig 24), porém inviabilizado em função da não disponibilidade do software durante a pandemia do COVID-19.

Figura 24: Modelos Preliminares em elaboração no software HyperWorks



Referências Bibliográficas

- AKAÇAY, I. H., KANYNAK, I. Analysis of Multilayered Composite Cylinders under Thermal Loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.24, pp. 1169-1179, 2005.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 13 - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações.
- BEER, F. P. et al. *Estática e Mecânica dos Materiais*. Mc Graw Hill, 2013
- CHAUHAN, G. V., AWASTHI, N. Design and Analysis of high pressure composite vessels. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*, v.3-6, pp. 96-102, 2018.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. Pearson, 2012.
- KUMAR, N. et al. Stress analysis on pressure vessel. *Environment & Ecosystem Science*, Vol. 2, N. 2, pp. 53-57, 2018.
- JEGATHEESAN, J., ZAKARIA, Z. Optimization of shell thickness in multilayer pressure vessel and study on effect of number of shells on maximum hoop stress. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3 No. 4, pp. 2693-2700, 2011.
- LOHAR, H. L. et al. Stress analysis and burst pressure of two layer compound pressure vessel. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 5 No.02, pp. 349-353, 2013.
- MIRAJE, A. A., PATIL, S. A. Minimization of material volume of three layer compound cylinder having same materials subjected to internal pressure. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 8, pp. 26-40, 2011.
- PHILPOT, T. A. *Mechanics of materials: an integrated approach*. Wiley, 4th ed. 2017.
- RAPARLA, S. K., SESHIAIAH, T. Design and analysis of multilayer high pressure vessels. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 1, pp. 355-361, 2012.
- SILVA, O., S. Estudo Teórico de Vasos de Pressão de Paredes Grossas e Paredes Compostas. Trabalho de Graduação. UNESP, Guaratinguetá, 2017.
- TELLES, P. C. *Vasos de Pressão*. Editora LTC, 2a edição, 2016.

URADE, S. D. et al. Stress Analysis of Multilayer Pressure Vessel. Journal of Applied Mechanical Engineering, Vol. 4, Issue 2, 2015.

RAMAKOTAIAH, M., KUMAR, M. S. Design and Analysis of Multilayer Pressure Vessel. International Journal of Engineering, Science and Technology, Volume 5 Issue VIII, 2017.

QIU, J., ZHOU, M. Analytical Solution for Interference Fit for Multi-Layer Thick-Walled Cylinders and the Application in Crankshaft Bearing Design. Institute for Aero-Engine, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China.

ARORA, J. S. Introduction to Optimum Design. Elsevier, 2012.

RAO, S. S. Engineering Optimization: Theory and Practice, Fourth Edition. John Wiley & Sons, 2009