

Luiz Guilherme Salge Vieira

**Otimização de Forma Aplicado a Projetos de Vaso
de Pressão**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica

**Rio de Janeiro
Junho de 2016**

Luiz Guilherme Salge Vieira

**Otimização de Forma Aplicado a Projetos de Vaso de
Pressão**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Projeto apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel pelo Programa de
Graduação em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador

Ivan F. M. Menezes

**Rio de Janeiro
Junho de 1026**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, que sempre me deram apoio e incentivo para enfrentar os meus desafios. Acreditaram no meu potencial e, por isso, tiveram um papel fundamental na concretização deste momento tão importante em minha vida.

Um agradecimento especial a minha avó que, gentilmente, me hospedou em sua casa durante todo esse período. Além disso, pelo total apoio, carinho e dedicação que sempre teve por mim.

Muito obrigado a minha namorada, Bianca, que compartilhou comigo esse momento, como sempre muito paciente em minha ausência dedicado ao estudo e sempre me dando muito apoio.

Agradeço ao meu orientador, Ivan Menezes por ter aceitado me auxiliar na elaboração deste projeto, que mesmo com o pouco tempo que lhe coube, me deu todo o suporte necessário. Sua tutoria foi fundamental para a realização deste trabalho.

Além das pessoas citadas, devo um enorme agradecimento aos meus amigos que tive o prazer de conhecer na faculdade. Incentivaram-me e, por diversas vezes estudaram comigo, deram dicas sobre matérias e vivenciaram as mesmas dificuldades que passei durante a faculdade de engenharia mecânica. Graças a eles, me tornei uma pessoa mais focada aos estudos e com isso melhorei a minha capacidade de aprendizado e obtive melhores resultados.

A esta universidade, seu corpo docente, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior. Por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a

manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todas as pessoas que, de alguma maneira, me influenciaram e auxiliaram a chegar nesse momento tão especial. Sei que devo a todos e espero que, de alguma forma, eu possa retribuí-los um dia.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo otimizar a forma de um bocal de um vaso de pressão utilizando técnicas de otimização de forma. Para isso, algoritmos de otimização e um programa de elementos finitos foram utilizados a fim de obter valores mínimos de tensão de von Mises ao longo do contorno do bocal do vaso de pressão.

Visto isso, a curva de contorno foi discretizada por meio de splines cúbicas onde os pontos de controle são as variáveis de projeto do problema de otimização.

Como hipótese simplificadora, o vaso de pressão foi modelado como uma placa 2D axissimétrica. Desta forma aplicando-se uma tensão no bocal e com o algoritmo de otimização, novas coordenadas da curva spline são obtidas e com isso chega-se a forma ideal para o bocal.

Palavras-Chave: Otimização de Forma, Técnicas de Otimização, Vaso de Pressão, Spline Cúbica.

ABSTRACT

The main point of this project is to optimize the shape of a pressure vessel nozzle using shape optimization techniques. Thus, optimization algorithms and finite element program were used in order to obtain the minimum values of Von Mises stress along the boundary of the pressure vessel nozzle.

Thereby, the boundary curve was discretized by means of cubic splines where the control points are the design variables of the optimization problem.

As a simplifying assumption, the pressure vessel was modeled as a 2D axisymmetric plate. Thus, with an application of a tension in the nozzle and the optimization algorithm, new coordinates of the spline curve were obtained. As a result of that, an ideal shape for the nozzle was acquired.

Keywords: Shape Optimization, Optimization Techniques, Pressure Vessel, Cubic Spline

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Objetivo e motivação	3
1.2 Estrutura do trabalho.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Histórico da Otimização Estrutural.....	5
2.2 Técnicas de otimização.....	7
2.2.1 Otimização Paramétrica.....	8
2.2.2 Otimização de Forma	10
2.2.3 Otimização Topológica	12
2.3 Vaso de pressão	13
2.3.1 Formatos e posições de um vaso de pressão.....	16
2.3.2 Tampos dos vasos de pressão	18
2.4 Técnicas de Otimização para Vasos de Pressão	19
3. Formulação do Problema de Otimização de Forma.....	21
4. Implementação Numérica.....	23
5. Resultados Numéricos	25
6. Conclusões.....	30
7. Referências Bibliográficas.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resultado da otimização estrutural de Michell [1904]	6
Figura 2 - Problema inicial para o Método de Otimização Paramétrica.....	9
Figura 3 - Projeto final pelo Método de Otimização Paramétrica.....	10
Figura 4 - Problema inicial para o Método de Otimização de Forma	11
Figura 5 - Projeto final pelo Método de Otimização de Forma.....	11
Figura 6 - Problema inicial para o Método de Otimização Topológica	13
Figura 7 - Projeto final pelo Método de Otimização Topológica.....	13
Figura 8 - Principais formatos de vasos de pressão	17
Figura 9 - Tipos de formatos para tampos de vasos de pressão.....	19
Figura 10 - Fluxograma do processo de otimização.....	23
Figura 11 - Forma inicial do vaso de pressão.....	25
Figura 12 - Modelo para análise do vaso de pressão.....	26
Figura 13 - Forma inicial e forma otimizada	27
Figura 14 - Distribuição da tensão ao longo do contorno externo do vaso de pressão.....	28
Figura 15 - Distribuição das tensões antes da otimização	29
Figura 16 - Distribuição das tensões após a otimização.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos	26
Tabela 2 – Dados de entrada do projeto.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

MEF Método dos Elementos Finitos

MOP Método de Otimização Paramétrica

MOF Método de Otimização de Forma

MOT Método de Otimização Topológica

CAD *Computer Aided Design*

CAE *Computer Aided Engineering*

CAM *Computer Aided Manufacturing*

SLP *Sequential Linear Programming*

PSM *Peak Stress Method*

APDL *ANSYS Parametric Design Language*

\mathbf{x} Vetor das variáveis de projeto

$f(\mathbf{x})$ Função objetivo

$g_j(\mathbf{x})$ Função restrição de desigualdade

n Número de variáveis de projeto

m Número de restrições de desigualdade

x^L Restrição do limite inferior

x^U Restrição do limite superior

$\sigma_i(\mathbf{x})$ Tensão de von Mises

1. Introdução

Na engenharia ou em qualquer processo de fabricação, deseja-se obter reduções de desperdícios, seja de material ou de tempo, também se deseja melhoria na qualidade do produto final. Essa melhoria na produção é alcançada através da experiência obtida pelas tentativas e erros, e na ausência de conhecimento, problemas similares podem trazer soluções razoáveis.

Um dos maiores desafios para a construção de um equipamento é decidir como poderá chegar a uma solução ótima, de forma que a criação pode originar-se de modelos físicos ou intuições empíricas adquiridas ao longo do tempo de experiência na área de desenvolvimento.

O processo de melhoria também está diretamente ligado à engenharia. Com o passar dos anos, os projetos vão sendo aperfeiçoados para que tenha melhoras em sua eficiência na funcionalidade e redução de desperdícios, ou seja, proporciona um aumento em sua capacidade de operação através de métodos científicos e empíricos.

Com o avanço da tecnologia, técnicas de otimização estão sendo implementadas para que uma melhor solução seja alcançada, com a ajuda de uma função objetivo. Com o resultado da otimização, é possível criar equipamentos (ou peças) com melhores desempenhos, ou seja, assegurar a funcionalidade e confiabilidade.

Através do método de otimização é possível sistematizar a escolha da melhor decisão respeitando critérios especificados para um projeto. O desenvolvimento do método de otimização é realizado por aplicações multidisciplinares nas quais registram convivências em diversas situações do cotidiano da engenharia de projeto que estimulam a busca da ótima decisão ou solução

para maximizar a eficiência do desempenho do equipamento, de forma sistemática e iterativa, de maneira a aproveitar o máximo dos recursos disponíveis.

Nos anos 60, com os surgimentos dos softwares de CAE baseados em elementos finitos, vários estudos foram realizados com o objetivo de se alcançar, de forma iterativa, soluções ótimas para os problemas. Atualmente, com os avanços tecnológicos, os resultados dessas pesquisas estão se tornando cada vez mais realidade tanto no nível acadêmico quanto industrial.

O processo de otimização consiste na minimização de uma dada função (denominada função objetivo), respeitando-se determinadas considerações de projeto (denominadas restrições). Entretanto, alguns obstáculos ainda se encontram no caminho das inúmeras pesquisas feitas sobre o tema para se chegar a uma solução. São elas:

- Grande esforço computacional, visto que os métodos exigem solução iterativa para otimizar a função objetivo;
- A existência de extremos locais que aumentam a dificuldade de convergência com o aumento da quantidade de variáveis de projeto;
- A inclusão de termo não linear no problema que contribui para lentidão de convergência da função objetivo.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para aplicação de técnicas de otimização em projetos de vasos de pressão. A ideia consiste na utilização de métodos computacionais para a otimização das dimensões, formas dos contornos e/ou topologia dessas peças. É importante notar que o impacto do uso dessas técnicas não se limita apenas à otimização do vaso em si, mas se estende para toda a cadeia produtiva de uma indústria, pois um vaso de pressão com menor peso

ou volume, economiza material usado, possibilita aumentar a produção, facilita o transporte, e, portanto, reduz o custo total do vaso.

Um dos objetivos deste trabalho é minimizar a concentração de tensões quando ocorrem mudanças em sua forma. Este método ainda não é muito difundido nas indústrias porque as peças ótimas obtidas neste processo ainda apresentam um alto custo de fabricação. Porém com o avanço da tecnologia de manufatura, este procedimento pode se tornar competitivo, e contribuir para um melhor entendimento da real influência de formas sobre o comportamento e vida útil dos vasos de pressão.

O procedimento de otimização adotado neste projeto consiste na combinação de algoritmos de otimização, disponíveis no MATLAB, com análises numéricas via método dos elementos finitos, utilizando-se o programa ANSYS.

1.1 Objetivo e motivação

O objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento e implementação de técnicas de otimização de forma para minimização das tensões ao longo dos contornos externos dos vasos de pressão. A ideia consiste na discretização das curvas de contorno por meio de *splines* cúbicas onde os pontos de controle são as variáveis de projeto do problema de otimização. As tensões a serem minimizadas, em cada passo da otimização, são obtidas a partir de uma análise numérica pelo método dos elementos finitos. Diversos exemplos serão apresentados para demonstrar a eficiência computacional e a aplicabilidade da metodologia proposta.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, sendo estruturado do seguinte modo:

No capítulo 1 é feito uma introdução sobre o desenvolvimento histórico de otimização estrutural e onde ela pode ser utilizada. Apresenta também o objetivo e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é feito uma revisão bibliográfica, onde é feito um breve resumo sobre o histórico do processo de otimização, também destacamos as técnicas de otimização utilizadas em projetos estruturais, os tipos de vasos de pressão existentes, considerando seu formato, posicionamento e tampos utilizados, assim como as normas necessárias para a fabricação dos mesmos.

No capítulo 3 teremos a formulação do problema de otimização. Nele será feito uma proposta matemática para a solução do problema, ou seja, a função objetiva é definida.

No capítulo 4, uma breve explicação da implementação numérica é realizada para que se possa entender o procedimento realizado para otimizar a forma do bocal.

No capítulo 5 serão demonstrados os resultados da otimização de forma, assim como as análises feitas para o resultado obtido.

Por fim, no capítulo 6, uma conclusão será escrita com o intuito de ressaltar os principais pontos abordados durante a elaboração deste trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico da Otimização Estrutural

Maxwell, em 1872, foi o primeiro cientista a aplicar o conceito de otimização estrutural. Naquela época, esse conceito era voltado para estruturas civis, principalmente pontes (4). Maxwell decidiu obter um projeto de ponte que utilizasse a menor quantidade de material e não ocorressem falhas. Nessa tentativa, Maxwell estudou alguns problemas bem simples usando-se de conceitos de teoria de elasticidade, já que não havia computadores. A ideia era essencialmente, dado um carregamento atuando num domínio infinito e os pontos onde esse domínio estaria apoiado (pontos de apoio da ponte, por exemplo), calcular o campo de tensões mecânicas principais usando teoria da elasticidade. As direções das tensões principais correspondem às direções onde não ocorrem tensões de cisalhamento apenas tensões normais. Uma vez obtidas essas direções, Maxwell sugeriu de forma conceitual que a estrutura ótima, que utilizasse menos material, seria constituída de elementos de treliça alinhados com essas direções principais. Essa solução se mostrou mais tarde ser também a solução ótima para o projeto de uma estrutura com a máxima rigidez e menor peso considerando-se um único carregamento. A ideia de Maxwell foi retomada por Michell, em 1904, que decidiu aplicar o método para o projeto de vários tipos de estruturas usando o critério de máxima rigidez com o menor volume de material (5). Seu princípio consiste em calcular o campo das principais isotensões, para isso utiliza a teoria da elasticidade para o caso de uma força aplicada a um ponto de um domínio sujeita as restrições de deslocamento em outros pontos. Obtidas as linhas de isotensões principais, a ideia é alinhar as barras nas mesmas direções das tensões principais calculadas no domínio. Visto isso, a solução ótima seria onde os elementos estariam

sujeitos apenas à tração e compressão, sem a existência de momento fletor. A seguir, podemos observar na figura o resultado obtido por Michell.

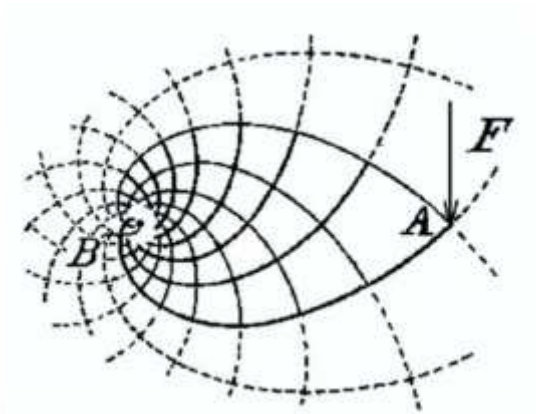


Figura 1 - Resultado da otimização estrutural de Michell [1904]

Entretanto, os resultados obtidos por Michell foram considerados muito acadêmicos e sem aplicação prática, pois eram muito difíceis de serem construídos na época. Somente na década de 80, com a implementação de softwares baseados em otimização topológica que se propõem a sintetizar estrutura, os resultados de Michell passaram a ser reproduzidos.

A utilização de técnicas de otimização na engenharia de estrutura iniciou-se com o trabalho de Schmit (7). Foi a partir dele que a aplicação sistemática do MEF e da programação matemática em problemas de otimização não-linear com restrições de desigualdade para projetos de estruturas de treliças e barras se compreendeu e viabilizou.

Vários artigos foram escritos sobre as técnicas de otimização na década de 70, voltadas para as indústrias aeroespacial e aeronáutica. O principal objetivo era reduzir o peso estrutural sem comprometer a integridade da estrutura.

Foi nessa época também que as técnicas de otimização de forma surgiram. Zienkiewicz e Cambell (9) apresentaram a primeira formulação numérica para o Método de Otimização de Forma (MOF). O problema é aproximado pelo Método dos Elementos Finitos sendo que as variáveis de projeto são as coordenadas nodais do contorno. Para a análise da sensibilidade se resolveu pelo método das diferenças finitas. Para o problema de otimização aplicou-se o método de programação linear sequencial.

2.2 Técnicas de otimização

A técnica de otimização consiste em maximizar a eficiência de um equipamento, ou minimizar o custo de fabricação de um equipamento, por exemplo. Uma das formas de se alcançar esses objetivos é alterando as variáveis de projeto. Essas variáveis de projeto podem ser, para vasos de pressão, por exemplo, material da chapa, espessura, diâmetro interno, formatos do vaso de pressão, formatos do tampo, linha entre tangentes, entre outros.

Existem duas abordagens para se chegar a uma solução ótima desse problema. A primeira abordagem, mais conhecida e utilizada, é chamada abordagem de análise. Consiste essencialmente em se analisar os projetos que resultam de diferentes combinações dos parâmetros descritos acima. Mediante o resultado das análises são construídos gráficos de desempenho em função dos valores de cada parâmetro.

A segunda abordagem para a solução do problema é denominada abordagem de síntese ou otimização. Nessa abordagem são utilizados métodos computacionais de otimização que realizam uma busca da solução ótima, de forma iterativa, ou seja, o algoritmo irá procurar dentro do espaço de soluções definidos pelas combinações dos parâmetros possíveis, a combinação que fornece o

melhor desempenho do equipamento. A utilização de um algoritmo de otimização torna sistemática e automática a busca pelo ponto ótimo, ou seja, independente da experiência do projetista. Assim, o tempo de soluções de problemas de otimização são reduzidos para algumas horas. Dessa forma o termo de otimização é corretamente utilizado quando é utilizado um método matemático de busca sistemática de solução ótima e não simplesmente quando se executa uma análise de diferentes configurações de projetos propostas baseadas na tentativa e erro.

A função objetivo está relacionada com o parâmetro que queremos maximizar ou minimizar. No caso de uma peça mecânica a função objetivo pode ser, por exemplo, a rigidez, ou o volume da peça, etc. As restrições são limites impostos à solução da otimização. Pode ser representada pela máxima massa ou volume que a peça pode apresentar ou o deslocamento máximo ou o valor de tensão mecânica máxima que pode ocorrer num certo ponto da peça. Ou seja, as restrições em geral impõem uma solução de compromisso na melhora da função objetivo. As variáveis de projeto são os parâmetros que podem ser alterados na otimização. Podem ser as dimensões da peça, os parâmetros matemáticos de uma curva ou superfície que representam a forma da peça, ou distribuição de material no domínio da peça.

Temos essencialmente três abordagens em otimização, são elas: Otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica. A seguir têm-se as características de cada uma delas.

2.2.1 Otimização Paramétrica

Nesse tipo de otimização as variáveis de projeto são definidas por parâmetros. Assim, esse tipo de otimização não altera a topologia na região de domínio, onde é definida a equação de estado do problema.

O valor ótimo é alcançado através do algoritmo computacional, que encontra as diversas combinações possíveis entre os parâmetros estabelecidos na função objetivo para uma condição de restrição imposta ao projeto. Nas figuras 2 e 3 é possível observar a otimização das variáveis de projeto, onde a forma é mantida, mas o seu aspecto é alterado.

Este método foi o primeiro a ser desenvolvido pela indústria aeroespacial para minimizar o peso da estrutura, e para exemplificar, pode-se citar a otimização paramétrica de placas formadas por materiais compostos laminados, onde as variáveis de projeto são a espessura do laminado e a orientação das fibras.

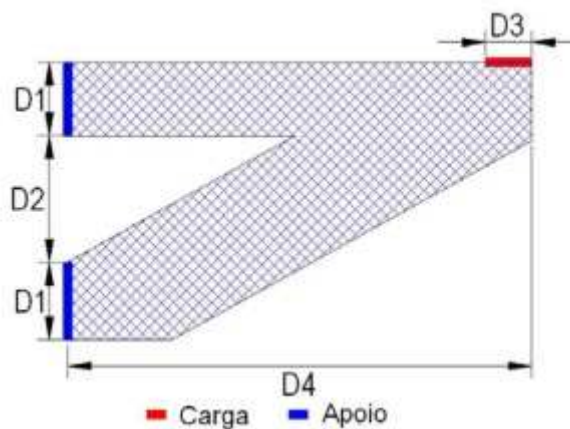


Figura 2 - Problema inicial para o Método de Otimização Paramétrica

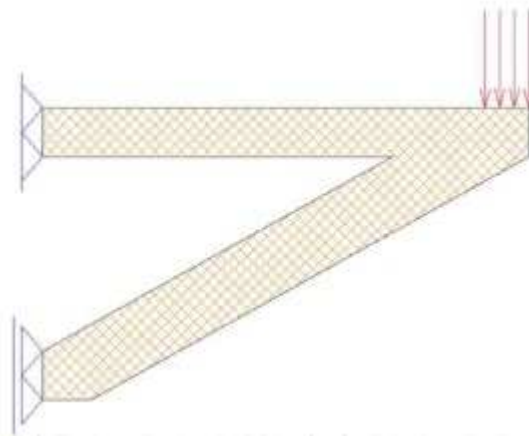


Figura 3 - Projeto final pelo Método de Otimização Paramétrica

2.2.2 Otimização de Forma

Com surgimento na década de 70, tinha aplicações na área de escoamento de fluidos. Hoje é aplicada em diversas áreas da engenharia, buscando a solução ótima pela variação da fronteira do domínio.

As variáveis de projeto podem ser as coordenadas de alguns pontos pertencentes ao contorno dos parâmetros, como por exemplo, coeficientes de uma curva que representa a forma desejada (curvas “spline”). Os parâmetros dessa curva constituem as variáveis de projeto. Utilizando um software de otimização determinam-se os parâmetros ótimos das curvas splines, e, portanto, a forma ótima para o projeto.

Devido às formas complexas que podem ser obtidas é utilizado em geral o método de elementos finitos (MEF) para a análise das estruturas durante a otimização. A principal desvantagem da otimização de forma nesse caso é que com a alteração da forma da estrutura a malha de MEF é distorcida exigindo um remalhamento do domínio durante a otimização.

Em um procedimento típico de otimização de forma tem-se o projeto inicial com um carregamento correspondente e a região de domínio (figura 4). Então são especificadas as direções e regiões em que se deseja alterar a forma. Mediante essa informação o software realiza uma análise de sensibilidade em cada uma dessas direções, ou seja, ele avalia o quanto a mudança da forma em cada direção influencia na melhora da função objetivo. Terminada a análise de sensibilidade o software decide o quanto alterar (ou não) a forma em cada direção especificada. Trata-se de um processo iterativo que após algumas iterações fornece o resultado final (figura 5).

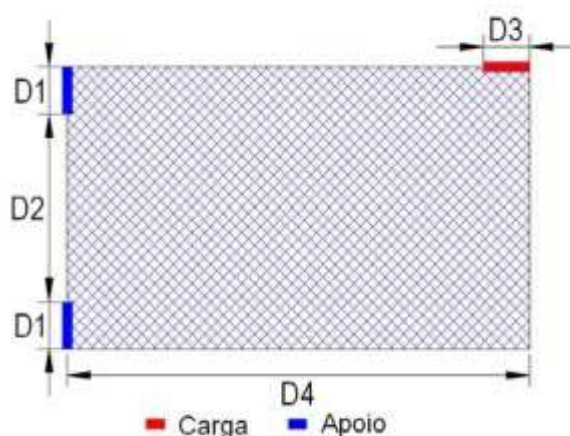


Figura 4 - Problema inicial para o Método de Otimização de Forma

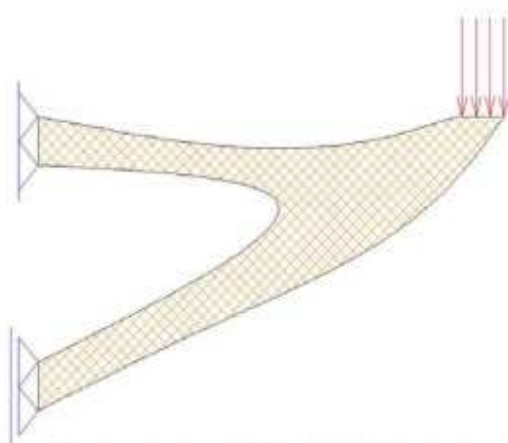


Figura 5 - Projeto final pelo Método de Otimização de Forma

2.2.3 Otimização Topológica

Esse método consiste num método computacional que permite projetar a topologia ótima de estruturas segundo certo critério. Basicamente, o método de otimização topológica distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função custo especificada.

A otimização topológica pode ainda ser definida como um método numérico para encontrar a distribuição ótima de material dentro de um domínio de projeto pré-definido de modo a atender as condições de projeto. O material em cada ponto do domínio pode variar de “vazio” (não há presença de material) até “sólido” (total presença de material) podendo assumir densidades intermediárias entre ar e sólido de acordo com um modelo de material definido. Nas figuras 6 e 7 tem-se um exemplo típico de otimização topológica.

Em um procedimento típico usando a otimização topológica, primeiramente se define o domínio no qual o projeto pode existir. Esse domínio é limitado pelas condições de contorno da estrutura e pelos pontos de aplicação de carga. Outras limitações podem estar relacionadas com a restrição do espaço ocupado.

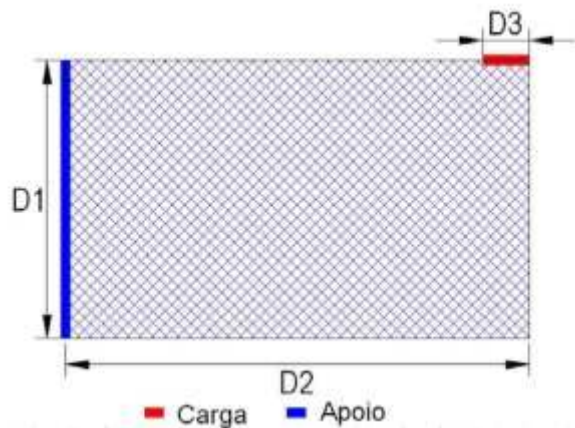


Figura 6 - Problema inicial para o Método de Otimização Topológica

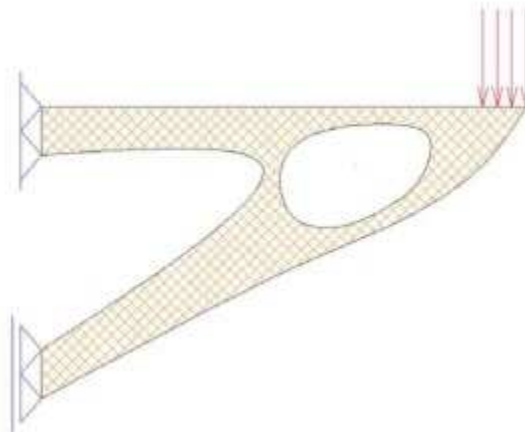


Figura 7 - Projeto final pelo Método de Otimização Topológica

2.3 Vaso de pressão

Vaso de pressão é definido pela ASME como sendo um recipiente projetado para resistir à diferença entre pressão interna e externa. Essa diferença de pressão pode ser causada por uma fonte externa, por aplicação de calor de uma fonte direta ou indireta, por um processo reativo, ou uma combinação deles (1).

O nome Vaso de Pressão é um termo genérico para tratar de todos os recipientes pressurizados, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um líquido pressurizado. Dentro de uma definição tão abrangente inclui-se uma enorme variedade de equipamentos, como por exemplo, os reatores, torres de destilação, de fracionamento e de retificação e também os trocadores de calor, aquecedores, resfriadores, condensadores, refeedores, caldeiras, etc (8).

Contrariamente ao que acontece com quase todos os outros equipamentos, máquinas, veículos, objetos e materiais de uso corrente, a grande maioria dos vasos de pressão não constituem um item de linha de fabricação industrial. Salvo raras exceções, os vasos são normalmente projetados e construídos por encomenda, sob medida, para atender, em cada caso, certas finalidades ou determinadas condições de desempenho. Daí resulta a importância do estudo do projeto dos vasos de pressão, porque, salvo raras exceções, esse projeto deve ser feito individualmente para cada vaso em particular (8).

Em indústrias de processo, refinarias de petróleo, petroquímica e indústrias alimentícia e farmacêutica os vasos de pressão se tornam indispensáveis e, devem ser cuidadosamente projetados de modo a evitar as principais causas de falhas (2), abordadas durante as aulas de mecânica dos sólidos e comportamento e mecânica dos materiais, pois a maioria dessas indústrias trabalha em regime contínuo, dia e noite, durante muitos meses. Os equipamentos ficam, então, submetidos a regimes severos de operação, porque não há paradas diárias para manutenção e inspeção. Visto isso, tornam-se necessário um maior grau de confiabilidade, em comparação as demais indústrias. Essas falhas são (3):

- Deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica;

- Deformação plástica excessiva, incluindo instabilidade plástica;
- Altas tensões localizadas;
- Fluência a alta temperatura;
- Fratura frágil a baixa temperatura;
- Fadiga;
- Corrosão;

Além disso, muitas vezes esses equipamentos se encontram em condições de risco, devido ao manuseio de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, ou em elevadas pressões ou temperaturas, condições para as quais qualquer falha pode resultar em um acidente grave ou mesmo um desastre de grandes proporções.

A fim de evitar acidentes, como os que ocorreram no século XX, foram criados grupos de trabalho onde critérios foram definidos para o projeto, fabricação e inspeção de vasos de pressão e, desta forma, surgiram os primeiros códigos de projeto. O primeiro código americano para vasos foi escrito pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) e tem como objetivo criar regras seguras para projetos e fabricação, apresentando metodologias e critérios para dimensionamento, fabricação, ensaios não destrutivos, além de materiais aplicáveis com respectivas tensões admissíveis (2).

Visto isso, destacamos os principais códigos utilizados pela engenharia quando se trata de projetos e fabricação de vasos de pressão. São eles:

- ASME Section VIII, Division 1 – Rules for Construction of Pressure Vessels.

- ASME Section VIII, Division 2 – Rules for Construction of Pressure Vessels

Alternative Rules.

- ASME Section VIII, Division 3 – Rules for Construction of Pressure Vessels

Alternative Rules for High Pressure Vessels.

- BS-5500 – British Standard Specifications for Unfired fusion welded pressure

Vessels

- AD-Merkblätter

O projeto de um vaso de pressão abrange não somente o seu dimensionamento físico para resistir à pressão e demais cargas atuantes, como também a seleção técnica e econômica dos materiais, dos processos de fabricação, detalhes, peças internas, etc.

O vaso de pressão terá seu tipo específico de acordo com cada aplicação ou serviço.

2.3.1 Formatos e posições de um vaso de pressão

A parede de um vaso de pressão, conhecido como costado, compõem-se basicamente do casco do vaso e dos tampos de fechamento.

O casco do vaso de pressão terá sempre o formato de uma superfície de revolução. Quase todos os vasos, com raras exceções, têm o casco com uma das três formas básicas: cilíndricas, cônicas, e esféricas, ou combinações dessas formas.

Quanto à posição de instalação, os tipos mais comuns são vasos verticais ou horizontais. Podem-se ter, também, algumas variações como vasos inclinados, cônicos, esféricos, etc. Podemos observar suas formas e tipos na figura a baixo.

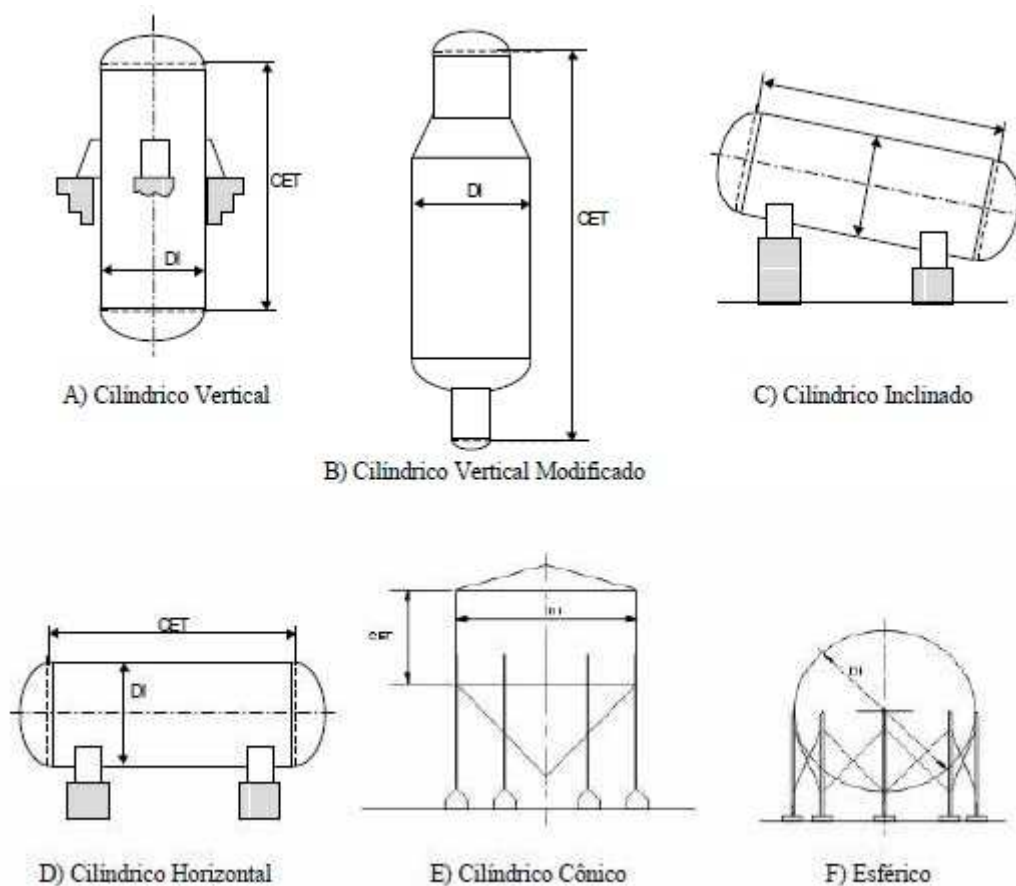


Figura 8 - Principais formatos de vasos de pressão

Quando há necessidade da ação da gravidade ou para o escoamento do fluido, usa-se, preferencialmente, os vasos verticais. Torres de fracionamento, de retificação, e de absorção, bem como muitos reatores de catálise são exemplos deste tipo de aplicação. De maneira geral, vasos de

pressão verticais são mais caros quando comparado aos horizontais, mas em contrapartida, ocupam menor área de terreno (3).

Os vasos do tipo horizontal, muito comuns nas indústrias, são usados para trocadores de calor e para a maioria dos vasos de acumulação.

2.3.2 Tampos dos vasos de pressão

Tampos são as peças de fechamento do costado de um vaso de pressão. Seu formato pode ser variado e, dentre os mais utilizados em sua construção, temos: elíptico, torisférico, hemisférico, cônico e plano.

O tampo elíptico, considerado “normal” tem sua seção transversal como uma elipse, teoricamente, perfeita.

Os tampos torisféricos são constituídos por uma calota central esférica (crown), de raio R_C , e por uma seção toroidal de concordância (knuckle), de raio R_K . Este tipo de tampo é bem mais fácil de fabricar do que o elíptico, e essa facilidade aumenta de acordo com que o raio R_K diminui. Porém, sua resistência será menor tanto maior for o raio R_K , permitindo chapas de menor espessura.

O tampo hemisférico tem sua seção transversal como metade de uma esfera. São proporcionalmente o mais resistente de todos. Entretanto, sua fabricação é complicada e ocupa maior espaço devido à sua altura.

Os tampos cônicos são muito pouco usados, embora fáceis de construir, por serem bem menos resistentes do que qual quer um dos citados anteriormente. Em alguns casos, existe uma concordância toroidal na ligação com o cilindro.

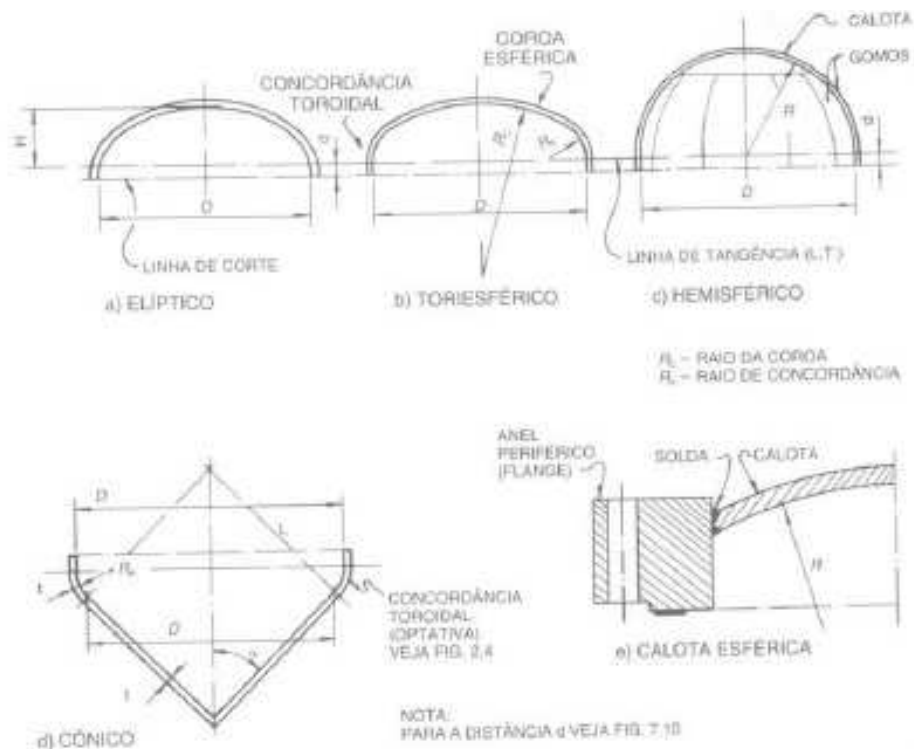


Figura 9 - Tipos de formatos para tampos de vasos de pressão

2.4 Técnicas de Otimização para Vasos de Pressão

Técnicas de otimização tem sido bastante utilizada em projetos estruturais e, para vasos de pressão não seria diferente. Podem-se encontrar assuntos relacionados a projetos de pressão ideal.

Middletown e Owen foram pioneiros em técnicas de otimização para projetos de vasos de pressão. Ambos usavam técnicas de otimização para minimizar o máximo da tensão de cisalhamento do tampo moldado com elementos finitos. Middletown aplicou essas técnicas de otimização para projetar um bocal do vaso de pressão (6).

Outra técnica aplicada para otimização do vaso de pressão, Blachut buscava minimizar o peso dos tampos de fechamento. Ele utilizava o limite de pressão ao invés da tensão mecânica. A

pressão limite foi definida como o primeiro valor que provoca deformação plástica ao longo de toda a espessura do vaso.

Aplicando técnicas de otimização de forma do vaso de pressão, Zhu e Boyle considerou um projeto de vaso de pressão, usando modelo computacional, separando o tampo de fechamento e o bocal, considerando como função objetiva as tensões e o limite de pressão do vaso. O processo de otimização foi implementado utilizando o ANSYS com o APDL (ANSYS Parametric Design Language) e curvas do tipo spline. Os resultados obtidos foram satisfatórios. (6)

Técnicas de otimização discreta paramétrica foram utilizados por Malinowski e Magnuki para projetar reforços internos dos vasos de pressão minimizando, assim, o reforço em massa (6). Desta mesma forma, Banichuk utilizou métodos para encontrar a curva ideal do tampo de fechamento, a fim de maximizar a relação entre o volume do tampo e a massa.

A concentração de tensão entre o tampo e o cilindro do vaso de pressão é uma questão interessante ao projetar o tampo, pois nesta junção, momentos de flexão e forças de cisalhamento aparecem para compensar a diferença de rigidez entre componentes (tampos e cilindros). Estes momentos de flexão e forças de cisalhamento geram uma concentração de tensão que pode ser estimado pela teoria de paredes finas. Se o tampo for não-hemisférico, a concentração de tensão ao longo da junção aumentará. Visto isso, essa concentração de tensão pode ser reduzida alterando a geometria do tampo ou pode ser reduzida através da transição da espessura do tampo e do cilindro. Então, Magnucki e Lewinsky avaliou, analiticamente, a geometria do tampo capaz de gerar uma tensão menor ou igual à tensão do cilindro do vaso. Neste caso, os momentos por flexão internos e as forças de cisalhantes seriam nulas. Eles consideraram uma geometria do tampo parcialmente composto por uma esfera e uma curva genérica (a ser determinado).

3. Formulação do Problema de Otimização de Forma

Neste trabalho, será tratado da técnica de otimização de forma para que a curva de perfil de um bocal possa ser otimizada utilizando curvas splines cúbicas. Para isso, será dada uma forma inicial do perfil desse bocal que será do tipo semicircular. Neste caso, forma refere-se à forma geométrica externa, ou seja, a superfície externa (3).

O desenho otimizado do vaso de pressão pode ser determinado utilizando a tensão máxima como restrição ou, alternativamente, através da definição de uma medida de tensão para ser minimizada como função objetivo. Para este trabalho, lidamos com o problema de minimização da tensão, definindo uma função objetivo baseado na tensão de von Mises. Esta tensão é escolhida baseada em medição de tensão para o projeto de vaso de pressão na literatura. Como a intenção é minimizar as tensões na curva de contorno entre o cilindro e o bocal do vaso de pressão, escolhe-se as tensões de von Mises ao invés da pressão limite.

Na abordagem de otimização de forma adotada, a forma do bocal é dada por interpolação dos pontos, formando a curva spline, cuja forma é alterada durante o processo de otimização, variando as coordenadas dos “nós” (pontos de controle) distribuídos ao longo do perfil. A forma ideal do bocal é obtida de forma iterativa. Desta forma, a otimização se deve a movimentações dos “nós” na direção normal à curva spline (3), portanto, a minimização da função objetiva consiste em minimizar as tensões mecânicas de von Mises na região do bocal.

Neste trabalho, propomos um método de otimização de forma baseados em gradientes para minimizar a tensão de von Mises definido como:

$$\begin{cases} \text{Min } f(\mathbf{x}) & \mathbf{x} \in R^n \\ \text{sujeitos à: } g_j(\mathbf{x}) \leq 0, & j = 1, \dots, m \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

Onde $f(\mathbf{x})$ é a função objetiva, \mathbf{x} é o vetor de n variáveis de projetos, $g(\mathbf{x})$ é a j -ésima inequação de restrição, x_i^L e x_i^U são os limites inferior e superior das restrições, m é o número de inequações de restrição.

Visto isso, a função objetiva foi definida como função “norma p ”, sendo uma p -raiz do somatório do termo p -expoente da tensão de von Mises do bocal, dada por:

$$f(\mathbf{x}) = \left[\sum \sigma_i^p(\mathbf{x}) \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

Onde σ_i é a tensão mecânica de von Mises no i -ésimo ponto dos elementos finitos do bocal do vaso de pressão; p é um coeficiente que pode assumir valores pares ou ímpares (as tensões de von Mises serão sempre positivas), em particular adotaremos o valor 16; as variáveis de projeto são as coordenadas de cada ponto de controle da curva spline. Uma vez que o algoritmo de otimização movimentava cada ponto na direção normal à curva spline, somente a coordenada \mathbf{x} é escolhida, o que reduz o tamanho do problema de otimização.

4. Implementação Numérica

O programa é implementado usando o MATLAB e o software ANSYS, seguindo o fluxograma apresentado a seguir, que analisa as tensões de von Mises por análise de elementos finitos. Todo o processo, incluindo o processo de otimização e entrada e saída de dados do ANSYS são controlados pelo MATLAB. O arquivo de entrada do ANSYS contém todas as informações do modelo do vaso de pressão, auxiliado por um programa de engenharia no computador (CAE). Após a obtenção da entrada de dados, a rotina MATLAB executa o ANSYS, e um arquivo de saída é gerado, em que é retornado e lido pelo MATLAB.

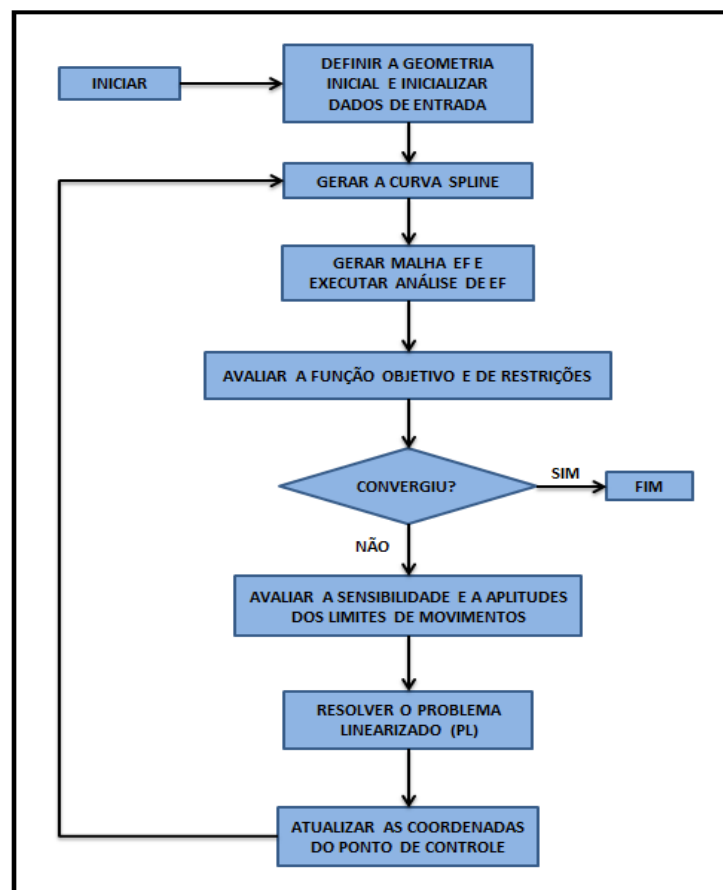


Figura 10 - Fluxograma do processo de otimização

As principais etapas do processo de otimização adotado neste trabalho estão apresentadas no fluxograma.

O vaso de pressão foi modelado, de forma a simplificar o problema, utilizando o método de elementos finitos como uma placa 2D axissimétrico, visto que a intenção é demonstrar a queda no valor das tensões ao longo da curva, aplicada uma dada tensão no bocal, considera-se essa hipótese como válida.

Seguindo o fluxograma, os dados iniciais do problema de otimização são a geometria do vaso de pressão, em que contém as coordenadas dos “nós” da curva spline, as propriedades do material, as cargas e condições de contorno. A curva spline é obtida usando a função MATLAB spline, considerando a variável de projeto x e parâmetros de discretização nn . A função spline usada considera interpolação de dados de uma spline cúbica, em que é gerada usando os parâmetros a seguir:

$$S_n = f(x, y) = [spline(n, x_i, 1:nn); spline(n, y_i, 1:nn)] \quad (3)$$

onde S_n é a matriz que contém as coordenadas dos “nós” da spline cúbica para o bocal.

Em seguida, o modelo CAE é definido incluindo parâmetros algorítmico e atributos de malha, como tipos de elementos finitos, número de nós e elementos, cargas e condições de contorno. Uma vez que o modelo CAE é construído, o solver do ANSYS é executado e então feito uma análise linear estática, onde gera arquivos de saída que contém o resultado da tensão de von Mises em cada ponto de integração do elemento finito.

5. Resultados Numéricos

Na figura 11, temos a forma inicial do vaso de pressão, e os valores de suas dimensões, em metros, nos eixos x e y. Na tabela 1 temos as coordenadas do ponto A, B, C, D, E e F. Os dados de entrada utilizado no projeto são descritos na tabela 2.

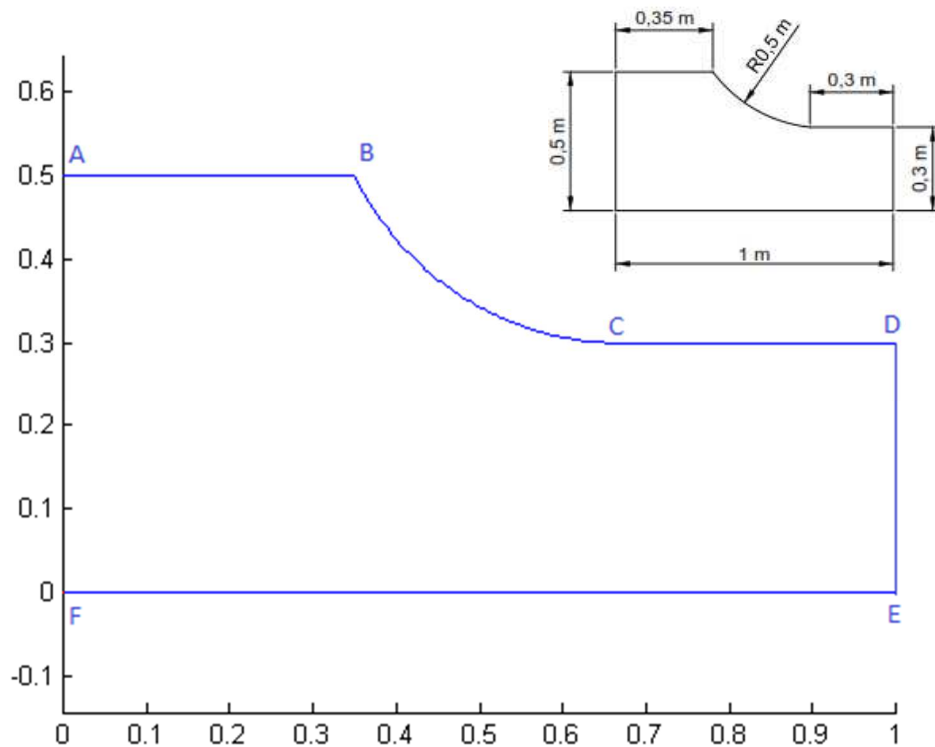


Figura 11 - Forma inicial do vaso de pressão

Uma forma inicial se aproxima de um semicírculo, e desta forma, deseja-se alcançar a forma “ideal” deste contorno. Para isso, a utilização de técnicas de otimização de forma minimiza as tensões ao longo da curva de perfil de um bocal, utilizando splines cúbicas para a sua representação.

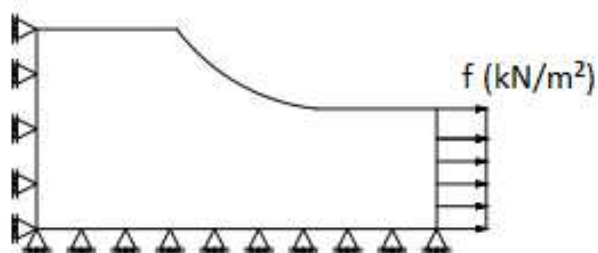


Figura 12 - Modelo para análise do vaso de pressão

Utiliza-se o algoritmo de otimização para obter novas coordenadas e desta forma alcançar a forma final.

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos

Coordenada	(x ; y) em m
A	(0,0 ; 0,5)
B	(0,35 ; 0,5)
C	(0,65 ; 0,3)
D	(1,0 ; 0,3)
E	(1,0 ; 0,0)
F	(0,0 ; 0,0)

Tabela 2 - Dados de entrada do projeto

Parâmetros	Valor
Módulo de elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poison	0,25
Força Trativa	1 kN/m ²

Este exemplo consiste na utilização de técnicas de otimização de forma para minimização das tensões ao longo da curva de perfil de um bocal, utilizando splines cúbicas para a sua representação.

A seguir, na figura 13 temos um gráfico com a forma inicial, em azul, e a forma otimizada, em vermelho, do modelo de vaso de pressão.

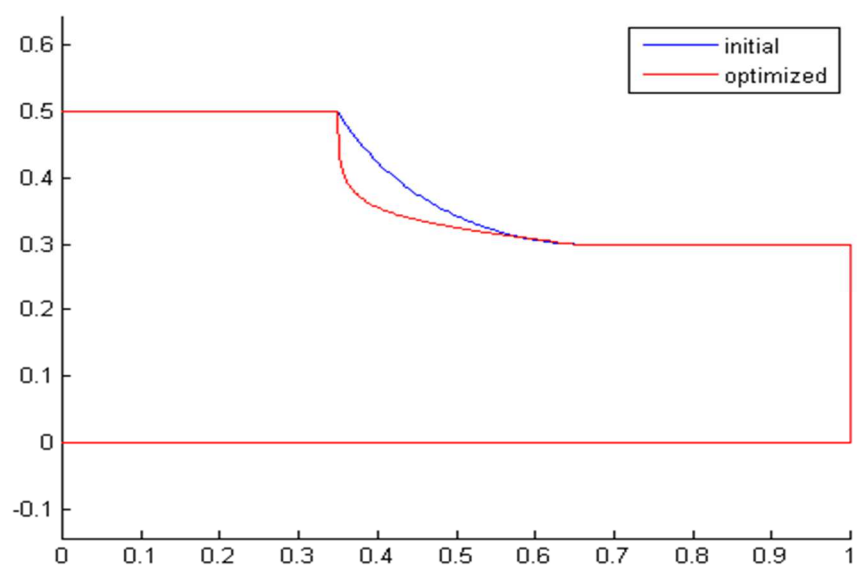


Figura 13 - Forma inicial e forma otimizada

Neste gráfico é possível ver que a forma semicircular, apesar de ser aparentemente mais fácil para produzir, não é o melhor formato para obter menor concentração das tensões.

Na figura 14, é possível ver a distribuição das tensões ao longo do contorno externo do modelo do vaso de pressão e, desta forma, as tensões são inferiores para a forma otimizada. Além disso, as tensões são praticamente constantes ao longo da curva. O que podia se esperar, de acordo com a literatura.

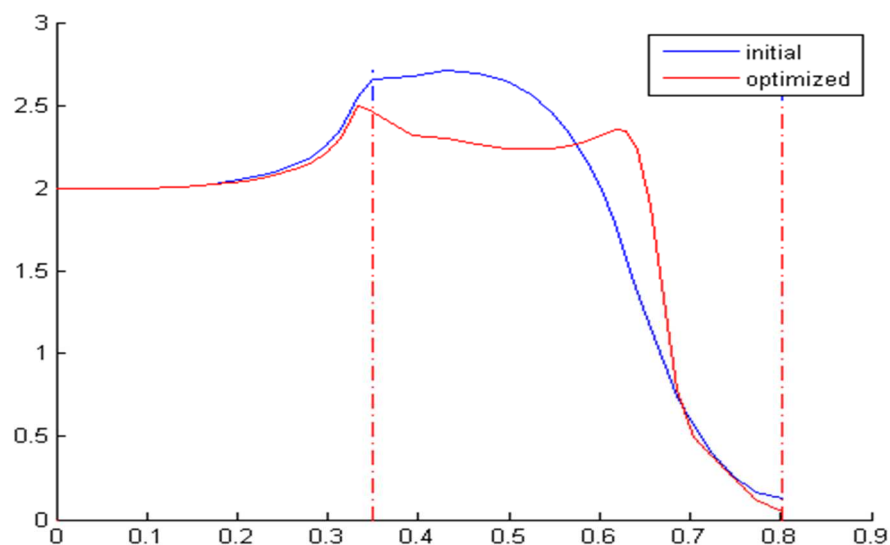


Figura 14 - Distribuição da tensão ao longo do contorno externo do vaso de pressão

As figuras 15 e 16 mostram a magnitude das tensões no modelo do vaso de pressão. Desta forma, fica fácil de observar a queda do valor das tensões ao longo do perfil do vaso. Inicialmente, há uma concentração de tensão no ponto C com valor próximo de 2,5.

Após obter a forma otimizada desta curva, a magnitude da tensão de von Mises decresce para aproximadamente 2,0 e, como já foi dito anteriormente, as tensões são praticamente constantes, e com isso a concentração de tensão é reduzida, de forma que, para um projeto mecânico, a concentração de tensão deve ser evitada ao máximo, principalmente para estruturas mecânicas como vaso de pressão, que usualmente é projetado para trabalhar com produtos perigosos, e como o próprio nome sugere, trabalha com altas pressões. A estrutura do vaso de pressão sofrerá fadiga em casos que, principalmente em regimes cíclicos, concentração de tensões está presente.

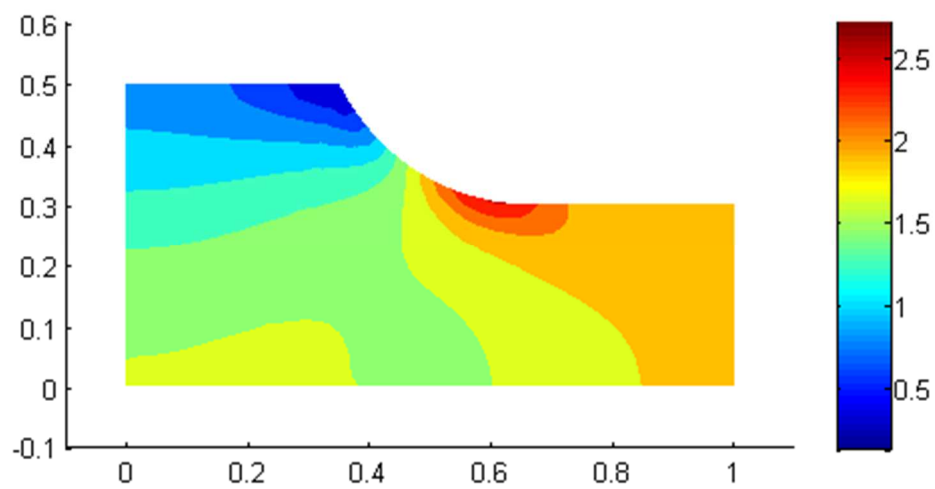


Figura 15 - Distribuição das tensões antes da otimização

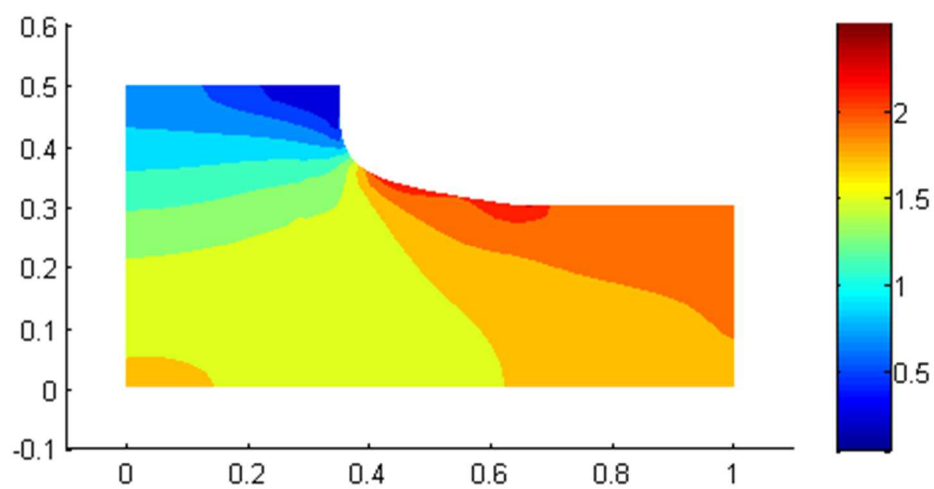


Figura 16 - Distribuição das tensões após a otimização

6. Conclusões

Este trabalho implementou um algoritmo computacional para o Método de Otimização de Forma aplicado a um modelo bidimensional de um vaso de pressão submetido a um critério de tensões de von Mises, utilizando como variável de projeto os pontos-chave pertencentes à fronteira do domínio representado por segmentos de curvas splines cúbicas. Para obter a forma ótima, foi utilizado um algoritmo de otimização, juntamente com um software de análise de elementos finitos e, de forma iterativa, se alcança a melhor condição para minimizar as tensões.

Com os resultados obtidos, pode-se perceber que para a forma inicial, uma forma semicircular, existe concentração de tensão e, esta deve ser evitado ao máximo para que o desempenho do equipamento seja maximizado de forma que as tensões no contorno externo sejam praticamente constantes.

Após utilizar o procedimento de otimização, chega-se ao modelo ótimo para esse problema. Analisando-se o gráfico da distribuição de tensão ao longo de seu contorno, é possível notar que as tensões se tornaram praticamente constantes ao longo do perfil, como previsto na literatura, com valores finais inferiores aos do modelo inicial.

Portanto, podemos concluir que as técnicas de otimização utilizadas neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, apesar de ainda não serem muito utilizadas na indústria, devido ao seu alto custo de fabricação. Somente com o avanço da tecnologia nas indústrias e com o desenvolvimento de pesquisas voltadas a técnicas de manufatura, esse procedimento poderá se tornar economicamente viável.

7. Referências Bibliográficas

- 1 – ASME, Rules for Construction of Pressure Vessels, 2002 Addenda ed., vol. Section VIII Division 1, New York: Asme Boiler And Pressure Vessel Committee, 2002.
- J.T.P de Castro et al., A note on notch shape optimization to minimize stress concentration effects, Theor. Appl. Fract. Mech. (2016).
- 2 – FALCÃO, C, Projeto de Vasos de Pressão e Trocadores de calor, 2002.
- 3 - J.T.P de Castro et al., A note on notch shape optimization to minimize stress concentration effects, Theor. Appl. Fract. Mech. (2016).
- 4 - Maxwell, J. C. On reciprocal figures, frames and diagrams of force. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1872.
- 5 - Michell, A. G. M. The limits of economy of materials in frame structures. Philosophical Magazine, 1904.
- 6 - R.C. Carbonari, P.A. Muñoz-Rojas, E.Q. Andrade, G.H. Paulino, K. Nishimoto, E.C.N Silva, Design of pressure vessels using shape optimization: An integrated approach, Int. J. Press. Vessels Pip. 88 (2011) 198-212.
- 7 - Schmit, L. A., Structural Design by Systematic Synthesis, 1960.
- 8 - TELLES, P. C. S., Vasos de Pressão, Livros Técnicos e Científicos Editora, Edição 1996.
- 9 - Zienkiewicz, O. C.; Cambell, J. S., Shape optimization and sequential linear programming, 1973.