

Marcelo Augusto Spinardi
Vitor Martini Carrara

Projeto Otimizado de Células de Carga Extensométricas

São Paulo
2006

Marcelo Augusto Spinardi
Vitor Martini Carrara

nota final 9.9
(nove e nove)


Projeto Otimizado de Células de Carga com Extensômetros

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Área de Concentração: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos
Nelli Silva

São Paulo
2006

TF06
Sp46p

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012466

FICHA CATALOGRÁFICA

1574377

Spinardi, Marcelo Augusto

**Projeto otimizado de células de carga com extensômetros /
M.A. Spinardi, V.M. Carrara. -- São Paulo, 2006.
105 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1.Otimização paramétrica 2.Método dos elementos finitos
3.Protótipos (Construção) I.Carrara, Vitor Martini II.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.**

DEDICATÓRIA

*Dedicamos este trabalho aos nossos
pais e namoradas pelo constante
apoio e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente ao nosso orientador, Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pela sua constante orientação e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Celso Massatoshi Furukawa e Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias do Departamento de Mecatrônica pelas observações e orientações complementares.

À empresa Excel Sensores pela ajuda na escolha dos materiais e equipamentos e a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

Será utilizado o método de otimização conhecido como Otimização Paramétrica, que aliado ao Método dos Elementos Finitos tem como propósito analisar a influência de cada nó da malha na rigidez total da estrutura.

Diversas geometrias são escolhidas como entrada inicial do processo de otimização, cujas etapas são realizadas no software comercial ANSYS, que é capaz de obter a estrutura otimizada alterando variáveis de projeto pré-definidas dentro de uma faixa de valores estabelecida.

Com o intuito de se comparar os resultados oriundos das simulações, é realizada uma nova otimização envolvendo a célula de carga comercial.

Após as etapas de simulação, são escolhidas, através da otimização paramétrica, três estruturas para fabricação de protótipos, que passam por uma bateria de testes e finalmente a comparação com a célula de carga encontrada no mercado.

Palavras-chave: Otimização Paramétrica, célula de carga, MEF, ANSYS, extensômetros e simulação.

ABSTRACT

Load cells are transducers used to measure forces, torques and moments by converting physical displacement to electrical voltage.

This project shows all the steps necessary to develop optimized load cells based on strain gauges. These steps are analysis (computer simulation), design, and construction. The efficiency of a load cell should be maximized through changes in the structural geometry, intending to amplify the gauge's output signal.

The optimization method used is known as Parametric Optimization, allied to the Finite Element Method (FEM), tries to study the influence of the geometry on the structural stiffness.

Many geometries are chosen as source of the optimization process, whose steps take place on the commercial software ANSYS, where an optimized structure is obtained by changing the state variables.

To compare the results from these simulations, a commercial load cell is simulated using the same assumptions as the previous simulations.

After the optimization, three different prototypes are constructed using the best results, tested and compared with a similar commercial load cell.

Keywords: Parametric Optimization, load cells, FEM, ANSYS, strain gauges and simulation.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Utilização dos extensômetros	6
Figura 1.2: Célula de carga extensométrica.....	7
Figura 1.3: Células de carga em S (esquerda) e de Coluna (direita).....	8
Figura 1.4: Célula de carga de flexão	9
Figura 1.5: Célula de carga de cisalhamento.....	9
Figura 1.6: Extensômetro tipo folha	10
Figura 1.7: (a) Fio resistivo, (b) Zigue-zague e (c) Fio helicoidal.	11
Figura 4.1: Eixo metálico.....	17
Figura 4.2: Gráfico de Tensão vs Deformação	17
Figura 4.3: Extensômetros elétricos de resistência.....	19
Figura 4.4: Esquema da ponte de Wheatstone.....	21
Figura 4.5: Circuitos isolados da ponte.....	22
Figura 5.1: Exemplo clássico de otimização	24
Figura 5.2: Resultado da otimização paramétrica.....	25
Figura 5.3: Resultado da otimização de forma.....	26
Figura 5.4: Resultado da otimização topológica	26
Figura 6.1: Tipo de malhas	31
Figura 6.2: (a) Elemento retangular (b) Elemento quadrilátero	32
Figura 6.3: Condições de Contorno	32
Figura 6.4: Exemplo de malha gerada no ANSYS	33
Figura 8.1: Desenho estrutural da célula de carga	37
Figura 8.2: (a) Célula de Carga H; (b) Célula H montada	38
Figura 8.3: Desenho estrutural da célula de carga	38
Figura 9.1: Disposição dos extensômetros na célula de carga para a primeira estrutura.....	39
Figura 9.2: Disposição dos nós dos extensômetros.....	40
Figura 9.3: Estrutura inicial	41
Figura 9.4: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	42
Figura 9.5: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	43
Figura 9.6: Estrutura inicial	44
Figura 9.7: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	45
Figura 9.8: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	46
Figura 9.9: Estrutura inicial	47
Figura 9.10: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	48
Figura 9.11: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	49
Figura 9.12: Estrutura inicial	50
Figura 9.13: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	51
Figura 9.14 Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	52
Figura 9.15: Estrutura inicial	53
Figura 9.16: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	54
Figura 9.17: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	55
Figura 9.18: Estrutura inicial	56
Figura 9.19: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	57
Figura 9.20: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações.....	58
Figura 9.21: Estrutura inicial	59
Figura 9.22: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises.....	60

Figura 9.23: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	61
Figura 9.24: Dimensões básicas da GL1	62
Figura 9.25: (a) Aspecto final da célula comercial; (b) Tensão de Von Mises	63
Figura 9.26: (a) Aspecto final da nova otimização ; (b) Tensão de Von Mises	64
Figura 9.27: Disposição dos extensômetros na célula de carga para a segunda estrutura	66
Figura 9.28: Estrutura inicial	67
Figura 9.29: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises	68
Figura 9.30: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	69
Figura 9.31: Estrutura inicial	70
Figura 9.32: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises	71
Figura 9.33: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	72
Figura 9.34: Estrutura inicial	73
Figura 9.35: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises	74
Figura 9.36: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	75
Figura 9.37: Estrutura inicial	76
Figura 9.38: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises	77
Figura 9.39: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	78
Figura 9.40: Regiões de tração e compressão da estrutura	79
Figura 9.41: Distribuição de tensão na superfície superior da estrutura	80
Figura 9.42: Estrutura inicial	80
Figura 9.43: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises	81
Figura 9.44: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações	83
Figura 10.1: Características dos extensômetros.....	88
Figura 10.2: Suporte de célula de carga para o engastamento simples	90
Figura 10.3: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo.....	91
Figura 10.4: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo.....	91
Figura 10.5: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo.....	91
Figura 10.6: Placa de aquisição de sinal.....	92
Figura 10.7: Suporte de célula de carga para o engastamento simples	92
Figura 10.8: Suporte de célula de carga para o engastamento duplo.....	92
Figura 11.1: Esquema elétrico utilizado na aquisição de dados	93
Figura 11.2: Gráfico dos resultados finais para a primeira estrutura.....	95
Figura 11.3: Gráfico dos resultados finais para a segunda estrutura.....	97

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Tabela de compensação da célula de carga.....	8
Tabela 1.2 – Diferenças entre tipos de extensômetro.....	13
Tabela 8.1 – Especificações da célula de carga	36
Tabela 8.2 – Dimensões da célula de carga	37
Tabela 8.3 – Dados específicos da célula de carga.....	38
Tabela 9.1 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	41
Tabela 9.2 – Resultado das variáveis de projeto	42
Tabela 9.3 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	44
Tabela 9.4 – Resultado das variáveis de projeto	45
Tabela 9.5 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	47
Tabela 9.6 – Resultado das variáveis de projeto	48
Tabela 9.7 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	50
Tabela 9.8 – Resultado das variáveis de projeto	51
Tabela 9.9 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	53
Tabela 9.10 – Resultado das variáveis de projeto	54
Tabela 9.11 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	56
Tabela 9.12 – Resultado das variáveis de projeto	57
Tabela 9.13 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	59
Tabela 9.14 – Resultado das variáveis de projeto	60
Tabela 9.15: Dimensões básicas da GL1	63
Tabela 9.16 – Resultado das variáveis de projeto	64
Tabela 9.17 – Resultado das variáveis de projeto	65
Tabela 9.18 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	67
Tabela 9.19 – Resultado das variáveis de projeto	68
Tabela 9.20 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	70
Tabela 9.21 – Resultado das variáveis de projeto	71
Tabela 9.22 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	73
Tabela 9.23 – Resultado das variáveis de projeto	74
Tabela 9.24 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	76
Tabela 9.25 – Resultado das variáveis de projeto	77
Tabela 9.26 – Variáveis de projeto de entrada da otimização	81
Tabela 9.27 – Resultado das variáveis de projeto	82
Tabela 9.28 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização ..	85
Tabela 9.29 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização ..	86
Tabela 9.30 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização ..	87
Tabela 10.1 – Dimensões dos extensômetros	88
Tabela 11.1 – Resultado das medições finais para primeira estrutura	94
Tabela 11.2 – Resultado das medições finais para segunda estrutura.....	96

Sumário

1. Introdução	6
1.1 Células de carga.....	6
1.2 Extensômetros.....	9
2. Projeto da célula de carga	14
3. Objetivo	15
4. Fundamentos Teóricos	16
4.1 Cálculo do Extensômetro.....	16
4.2 Cálculo da Ponte de Wheatstone	21
5. Otimização	24
5.1 Otimização Paramétrica.....	25
5.2 Otimização de Forma.....	25
5.3 Otimização topológica	26
5.4 Variáveis de projeto	27
5.5 Função objetivo.....	27
5.6 Restrições.....	28
5.7 Otimização Usando o Software ANSYS	28
6. Modelagem.....	30
6.1 Pré-Processamento.....	30
6.1.1 Espaço.....	30
6.1.2 Dimensões.....	30
6.1.3 Material	31
6.1.4 Discretização	31
6.1.5 Malha	31
6.1.6 Condições de Contorno	32
6.2 Processamento	33
6.3 Pós-processamento.....	34
7. Método dos Elementos Finitos (MEF)	35
8. Células de carga comerciais.....	36
8.1 Primeira Estrutura.....	36
8.1.1 Especificações.....	36
8.1.2 Dimensões.....	37
8.2 Segunda Estrutura	37
8.2.1 Especificações	38
8.2.2 Dimensões.....	38
9. Otimização e Simulação.....	39
9.1 Primeira Estrutura.....	39
9.1.1 Primeira Estrutura – Dois Círculos.....	41
9.1.2 Primeira Estrutura – Três Círculos.....	44
9.1.3 Primeira Estrutura – Quatro Círculos em Linha	47
9.1.4 Primeira Estrutura – Quatro Círculos Assimétricos.....	50
9.1.5 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Dois Triângulos.....	53
9.1.6 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Um Retângulo	56
9.1.7 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Um Oblongo.....	59
9.1.8 Primeira Estrutura – Célula de Carga Comercial	62

9.2.1 Segunda Estrutura – Quatro Círculos em Linha	67
9.2.2 Segunda Estrutura – Cinco Círculos.....	70
9.2.3 Segunda Estrutura – Dois Círculos e Um Oblongo.....	73
9.2.4 Segunda Estrutura – Dois Oblongos e Um Retângulo Simétricos	76
9.2.5 Segunda Estrutura – Dois Oblongos e Um Retângulo Assimétricos	79
9.3 Análise dos Resultados	84
9.4 Otimização para Prototipagem.....	85
9.4.1 Primeiro Protótipo – Dois Círculos e Um Retângulo	85
9.4.2 Segundo Protótipo – Dois Círculos e Um Oblongo.....	86
9.4.3 Terceiro Protótipo – Dois Oblongos e Um Retângulo Assimétrico	87
10. Construção de protótipos	88
10.1. Processo de fabricação.....	88
10.2. Extensômetros.....	88
10.2.1 Colagem dos Extensômetros	89
10.3 Construção de suporte.....	90
10.4 Protótipos	90
11. Testes	93
11.1 Aquisição dos dados	93
11.2 Procedimento	94
11.3 Resultados – Primeira Estrutura	94
11.4 Resultados – Segunda Estrutura	96
13. Bibliografia.....	99
ANEXO A – Esquema Elétrico da Placa de Aquisição	101
ANEXO B – Desenhos de Fabricação	102
ANEXO C – Programa para otimização no ANSYS	106

1. Introdução

1.1 Células de carga

Células de carga são sensores de alta precisão que através das deformações superficiais, são capazes de mensurar grandezas como pressão, força, torque, aceleração, etc. Sendo assim, podem ser classificadas como transdutores¹, transformando força em tensão elétrica.

Criados no fim da década de 30, sua utilização vêm crescendo até hoje, atuando em diversas áreas como a Engenharia, Bioengenharia e Robótica, podendo ser encontrados em diversos tamanhos e geometrias, para os diferentes objetivos. As células de carga predominam na indústria pesada devido principalmente a sua grande versatilidade, alta precisão e baixo custo.

As células de carga são facilmente encontradas em áreas da robótica, como por exemplo, nos braços de um robô industrial que com o intuito de se obter um melhor desempenho, requerem uma flexibilidade de movimentação mais próxima do real e uma melhor resposta às interferências do ambiente. Porém, as células de carga não se restringem apenas à robótica. Outras áreas já estão se aventurando na utilização das células de carga como é o caso da odontologia, onde, por exemplo, pode-se utilizar as propriedades dos extensômetros para analisar a força aplicada em uma escova dental durante a escovação [4].



Figura 1.1: Utilização dos extensômetros

¹ Transdutores: são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra forma de energia.

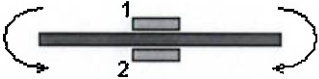
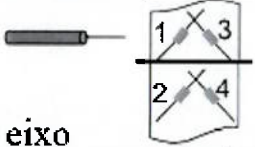
Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico condutor (extensômetro) que é colado sobre uma estrutura. Ao sofrer uma tensão mecânica, a estrutura em análise tende a se deformar dentro do regime elástico. Isso faz com que essas pequenas variações de dimensões da estrutura sejam transmitidas mecanicamente ao extensômetro que, tem o valor da resistência alterada de forma conhecida e proporcional à deformação da superfície. Desse modo o sinal mecânico pode ser transformado em sinal elétrico.



Figura 1.2: Célula de carga extensométrica

A disposição dos extensômetros na célula de carga depende também da natureza da força que se quer medir. Dependendo da quantidade e da posição em que se encontram os extensômetros é possível fazer com que a célula de carga compense a influência de certos fatores externos não desejados, como, por exemplo, a temperatura ou flexão, como mostra a tabela 1.1. Isso é feito através da ligação dos extensômetros em uma determinada ordem na ponte de Wheatstone. Porém este assunto será tratado em um capítulo posterior.

Tabela 1.1 – Tabela de compensação da célula de carga

	Arranjo	Compensação	K
	Extensômetro único em tensão uniaxial	Nenhum	k=1
	Dois extensômetros submetidos à mesma magnitude de deformação com direção oposta - arranjo típico de flexão	Temperatura	k=2
	Dois extensômetros em tensão uniaxial	Apenas flexão	k=2
	Quatro extensômetros em pares submetidos à mesma magnitude de deformação com direção oposta	Temperatura e flexão	k=4
	Quatro extensômetros em pares submetidos à mesma magnitude de deformação com direção oposta - arranjo típico de eixo	Temperatura e axial	k=4

Além destes diferentes arranjos de extensômetros, foram desenvolvidos no decorrer dos anos diversos tipos de células de carga, visando atender às necessidades da indústria, mesclando estes possíveis arranjos com diferentes formatos estruturais, onde se destacam:

- Células de Tração/Compressão: podem ser em formato S, Z ou de Coluna. Medem diretamente a força de compressão ou tração aplicada;



Figura 1.3: Células de carga em S (esquerda) e de Coluna (direita).

- Células de Flexão: os extensômetros são fixados na parte superior e inferior, medindo indiretamente a força aplicada através da flexão da haste. Sua principal desvantagem é a necessidade de aplicar a carga corretamente para obter respostas consistentes;

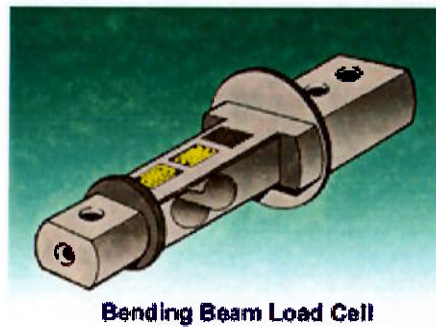


Figura 1.4: Célula de carga de flexão

- Células de Cisalhamento: os extensômetros são colocados nas faces laterais em um ângulo de 45° , em um ponto de menor espessura, maximizando os efeitos da força aplicada.



Figura 1.5: Célula de carga de cisalhamento

1.2 Extensômetros

Os extensômetros, conhecidos em inglês como *strain gauges*, são elementos que, quando são submetidos a pequenas deformações em uma direção preferencial, transformam essas deformações em variações

equivalentes de sua resistência elétrica. Lord Kelvin foi quem, em 1856, primeiro percebeu que condutores metálicos sujeitos a deformações mecânicas exibem mudança em sua resistência elétrica.

Na sua forma mais completa, extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado então sobre um composto isolante. Este é então colado sobre a estrutura em teste com auxílio de adesivos como epóxi ou cianoacrilatos. Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao *strain gauge*, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica.

Os extensômetros tipo folha são os mais usados e são confeccionados com técnicas de circuito impresso, normalmente sobre substratos de plástico ou papel, principalmente. Devido ao grande desenvolvimento que sofreram as técnicas de circuito impresso o material resistivo (filme) possui alguns micrômetros de espessura e está depositado em um material eletricamente isolado, chamado base (figura 1.6).

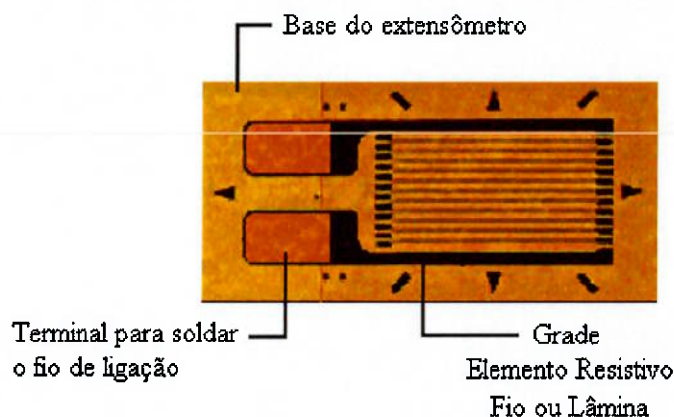


Figura 1.6: Extensômetro tipo folha

As principais características dos extensômetros são:

- a) Grande precisão (1%);
- b) Boa linearidade;
- c) Fácil instalação;
- d) Ampla faixa de temperatura;
- e) Pequeno, leve e barato;
- f) Possibilita realizar medidas à distância;
- g) Excelente resposta estática e dinâmica;
- h) Aplicável mesmo sob condições severas;
- i) Pequeno custo por ponto de medida.

Os extensômetros diferem também quanto à disposição da grade resistiva. As diferentes direções em que força pode atuar implica em uma necessidade de determinado tipo de disposição do enrolamento que otimiza a deformação. Na figura 1.7 são mostrados três tipos de extensômetros e as setas indicam a direção do esforço correspondente a uma máxima sensibilidade.

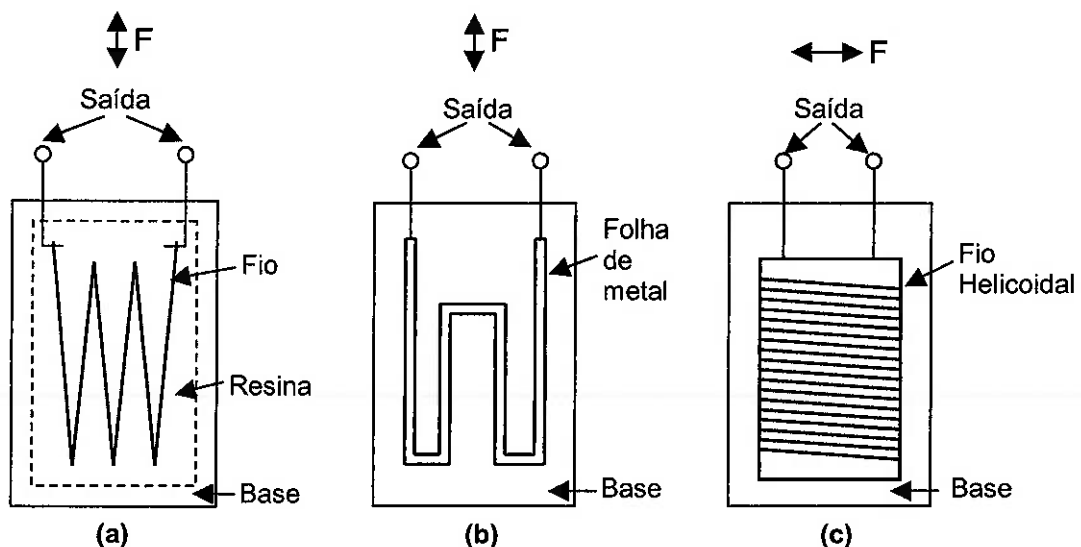


Figura 1.7: (a) Fio resistivo, (b) Zigue-zague e (c) Fio helicoidal.

Sendo a célula de carga constituída por inúmeros extensômetros presos na estrutura é fácil perceber que sua eficiência está intimamente

ligada à forma, ao material desta estrutura, e conseqüentemente ao seu projeto.

Além das diferenças na disposição da grade resistiva, os extensômetros podem variar de acordo com o material resistivo e o material de base. Eles podem ser classificados, como:

- Material Resistivo:
 - Fios resistivos;
 - Lâmina;
 - Semicondutor;
 - Semicondutor por difusão.
- Material de Base:
 - Base de papel;
 - Base de baquelita;
 - Base de poliéster;
 - Base de poliamida;

Para escolher adequadamente o extensômetro para uma determinada aplicação deve-se levar em consideração algumas características de operação, tais como:

- Faixa de temperatura a qual será submetido;
- Limite máximo de alongamento;
- Corrente máxima suportada;
- Resistência à umidade;
- Durabilidade necessária.

Cada fabricante apresenta as características de seus produtos. Na tabela 1.2 é apresentado um exemplo de algumas características dos extensômetros mais encontrados no mercado.

Tabela 1.2 – Diferenças entre tipos de extensômetro

Tipo (base)	Temperatura de operação (°C)	Alongamento máximo (%)	Corrente máxima (mA)	Mudança de resistência do extensômetro com o tempo	Principais aplicações
Lâmina (Phester)	-50 ~ +180	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida)	-50 ~ +200	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida para grandes deformações)	-10 ~ +120	8 ~ 10	30 ou menos	Pequena	Medidas de deformações plásticas.
Fios (papel)	-50 ~ +80	1,2	25 ou menos	Ligeira variação	Medidas usuais de tensão.
Fios (poliéster)	-50 ~ +170	1	25 ou menos	Pequena	Medidas usuais de tensão em estruturas no campo.

2. Projeto da célula de carga

Como já foi dito, a utilização das células de carga em Engenharia e em outras áreas é muito ampla. Porém é na robótica que ela se torna essencial devido, principalmente, à necessidade de maior flexibilidade na movimentação dos braços mecânicos. Desse modo é importante garantir um controle eficiente do robô, que responda rapidamente às reações, sendo necessário para isso sensores de maior qualidade e que possuam maior eficiência, tanto no quesito acurácia quanto precisão.

Com o objetivo de ampliar o sinal de saída é recomendável a adoção de uma geometria complexa (mecanicamente desacoplada). Dessa forma, se faz necessário à utilização de modelos matemáticos que auxiliam na determinação das características físicas da estrutura do sensor, principalmente, geometria e dimensão. Assim, utiliza-se de poder computacional para facilitar a resolução destes algoritmos matemáticos.

Há vários métodos para se alterar a geometria da estrutura de um sensor, sendo que os mais comuns tratam de fazer alterações na sua forma e dimensão, como por exemplo, a Otimização Paramétrica. Além destes, há um método que visa obter uma forma melhor através da análise pontual da estrutura, retirando material de um nó que não é tão necessário, e deixando em outro mais necessário, conhecido como Otimização Topológica. Será abordado neste projeto apenas a Otimização Paramétrica.

Em termos gerais, pode-se definir o processo de otimização como um método genérico de projeto computacional que utiliza algoritmos (como programação linear seqüencial) combinados ao método de elementos finitos (MEF), e que permite projetar estruturas mecânicas de forma sistemática e otimizada [5] segundo um critério estabelecido, neste caso, amplificar o sinal de saída do sistema, maximizando sua eficiência, através da alteração da geometria estrutural da célula de carga.

3. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo projetar e construir determinadas células de carga extensométricas otimizadas, para medição de forças. Sua eficiência deverá ser maximizada através da alteração da geometria da estrutura, de modo a amplificar o sinal de saída dos extensômetros.

Para isso serão utilizadas técnicas de otimização aliadas ao Método dos Elementos Finitos, com o propósito de analisar a influência da geometria na rigidez total da estrutura.

Na técnica de Otimização Paramétrica será utilizado o software comercial ANSYS, que já contempla um conjunto de ferramentas para este tipo de otimização, englobando todas as etapas do processo, isto é, desde a definição da geometria inicial da estrutura e carregamentos até a obtenção da estrutura otimizada.

Posteriormente será realizada uma simulação com as dimensões da célula de carga comercial para que seja possível uma comparação entre os valores resultantes da função objetivo. Determinada a geometria final, serão escolhidos os três melhores resultados (dois para célula engastada em uma extremidade e outra para o caso de bi-engastamento) para a construção de protótipos.

Finalmente, após sua construção serão realizados testes onde serão comparadas a eficácia da célula de carga em relação à célula semelhante disponível comercialmente.

4. Fundamentos Teóricos

4.1 Cálculo do Extensômetro

Para se projetar uma célula de carga deve-se ter em mente os diversos fatores que influenciam no momento da medição e saber que isso varia de sensor para sensor. Na célula de carga, um dos fatores mais importantes é a geometria da estrutura, pois ela define o quanto o extensômetro irá se deformar quando estiver sujeito às forças externas. Outros fatores que influenciam são as forças e torques externos, o material do extensômetro e a disposição em que estão inseridos na célula de carga. Com o objetivo de maximizar a leitura na saída dos extensômetros é fundamental que se conheça também o comportamento destes quando estão sujeitos a uma pequena deformação.

Primeiramente deve-se entender que a medição da deformação é feita mediante uma medição de tensão e estas estão relacionadas pela *Lei de Hooke*, que diz, que a deformação (σ) é a variação do tamanho de um objeto com relação ao seu tamanho original quando está sujeito a uma determinada carga (F). Por exemplo, um fio permanece com volume constante ao se deformar, sendo assim há uma variação de dimensão ao longo do eixo de comprimento L e ao longo da seção transversal de área A como mostra a figura 4.1. A tensão a qual a barra está sujeita é expressa por

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ e a deformação longitudinal por } \varepsilon = \frac{\delta L}{L} .$$

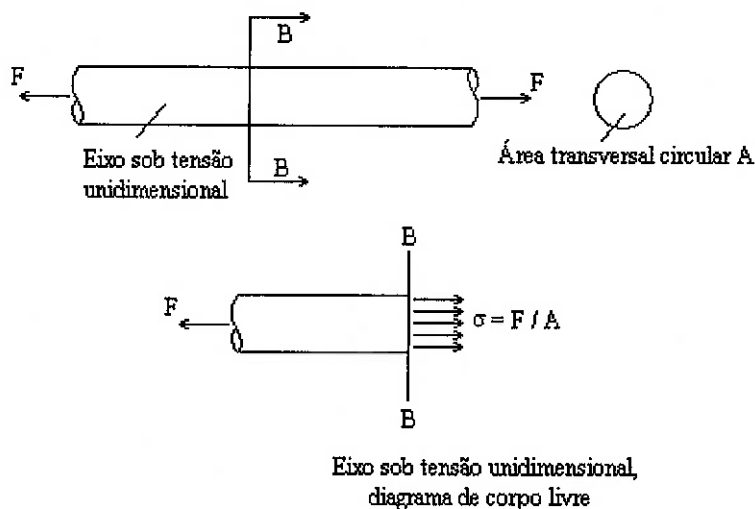


Figura 4.1: Eixo metálico

A Lei de *Hooke* que relaciona a tensão com a deformação é dada por $\sigma = E\varepsilon$, onde E é o módulo de elasticidade ou módulo de *Young* do material da barra, e pode ser obtido pela área abaixo da curva de tensão em função da deformação (figura 4.2). A Lei de *Hooke* estabelece uma relação linear entre a tensão e a deformação, porém ela não pode ser utilizada para valores relativamente altos de tensão, pois ocorreria deformação plástica do material. Se isto ocorrer, a barra perde a capacidade de retornar ao seu tamanho original quando não houver mais forças externas agindo sobre ela e desse modo torna-se inútil utilizá-la como um sensor de deformação.

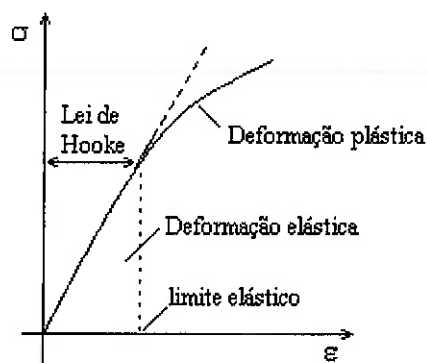


Figura 4.2: Gráfico de Tensão vs Deformação

O extensômetro funciona basicamente como um conjunto de pequenas barras. Assim, pode-se determinar qual a deformação sofrida quando sujeito a uma determinada carga. Além disso, por ser o extensômetro feito de um material metálico, pode-se relacionar sua deformação com a variação de sua resistência.

A resistência elétrica (R) do condutor é dada por:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad [4.1]$$

Onde,

- ρ é a resistividade elétrica;
- L é o comprimento da barra;
- A é a área transversal.

Aplicando-se as derivadas parciais em relação a A , L e ρ , temos:

$$dR = \frac{dR}{d\rho} d\rho + \frac{dR}{dL} dL + \frac{dR}{dA} dA \Rightarrow dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA \quad [4.2]$$

Dividindo ambos os lados por R , resulta a expressão:

$$dR = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad [4.3]$$

Para o caso em que a seção transversal é um círculo, a área será dada por:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad [4.4]$$

Para extensômetros de lâmina, que apresentam seção retangular, a expressão será:

$$A = bt \quad [4.5]$$

onde,

- b : largura da seção retangular;
- t : espessura da lâmina;

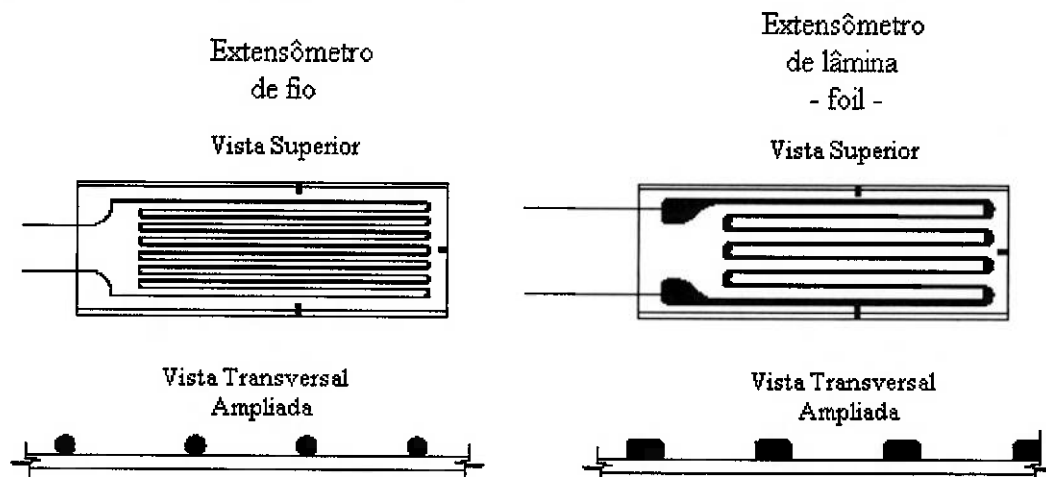


Figura 4.3: Extensômetros elétricos de resistência

Se o comprimento do fio, L , for alongado por uma tensão de tração, e o diâmetro original, D , seja comprimido à D' , igual ao efeito dado pelo coeficiente de Poisson, então:

$$A = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \Rightarrow \frac{dA}{dD} = \left(\frac{2\pi}{4} D \right) \Rightarrow dA = \left(\frac{2\pi}{4} D \right) dD \quad [4.6]$$

Dividindo ambos os lados pela área:

$$\frac{dA}{A} = \frac{\left(\frac{2\pi}{4} D \right)}{\left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)} dD \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad [4.7]$$

Fazendo-se o mesmo para a seção retangular, temos:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t}{t} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad [4.8]$$

onde

- ν é o coeficiente de Poisson.

Substituindo a equação [4.7] ou [4.8] na equação [4.3] tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + 2\nu \frac{\Delta L}{L} = (2\nu + 1) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad [4.9]$$

Como $\Delta L/L$ é a deformação sofrida pelo extensômetro, pode-se escrever a equação acima como:

$$\frac{\Delta R}{R} = (2\nu + 1)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad [4.10]$$

A mudança na resistividade elétrica, ρ , ocorre proporcionalmente com a mudança volumétrica do material, de modo que:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \frac{\Delta V}{V} \quad [4.11]$$

Porém, temos que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta L}{L} + \left(-2\nu \frac{\Delta L}{L} \right) = (1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} = (1 - 2\nu)\varepsilon \quad [4.12]$$

Substituindo a equação [4.12] na equação [4.11] e em seguida na equação [4.10], tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = (2\nu + 1)\varepsilon + [m(1 - 2\nu)]\varepsilon = [(1 + m) + 2\nu(1 - m)]\varepsilon \quad [4.13]$$

Onde,

- m é uma constante proporcional calculada experimentalmente.

A maioria dos materiais resistivos comumente usados em extensômetros são ligas de cobre e níquel, fazendo com que o valor de m seja aproximadamente igual à unidade. Desse modo, temos que:

$$\frac{\Delta R}{R} \cong 2\varepsilon \quad [4.14]$$

Este valor é definido como sensibilidade à deformação do material metálico, e geralmente é expresso pelo símbolo K . Uma vez que o valor de K é determinado dependendo do material resistivo utilizado na fabricação do extensômetro, a equação [4.14] pode ser reformulada para:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad [4.15]$$

A qual indica que a mudança relativa na resistência é proporcional à magnitude da deformação medida. Então é desejável que o material resistivo tenha um valor da constante K sem correlação com a magnitude da deformação. O valor de K para semicondutores simples de cristais usados

como elementos sensores de deformação, exibe uma resistividade variável com a magnitude da tensão imposta a ele, conforme a equação:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi L \sigma \quad [4.16]$$

Onde,

- π é chamado de coeficiente piezo-resistivo, o qual apresenta valores diferentes dependendo da direção dos eixos dos cristais.

O elemento sensor de deformação de um extensômetro é disposto formando uma grade de material resistivo em uma pequena área fornecendo uma dada resistência, usualmente 120Ω.

4.2 Cálculo da Ponte de Wheatstone

A variação da resistência interna dos extensômetros explicada anteriormente é geralmente medida através de um circuito elétrico conhecido como Ponte de Wheatstone.

Criada em 1843 pelo físico inglês Sir Charles Wheatstone, a ponte é constituída de dois divisores de tensão conectados entre o terra e a fonte, como esquematizado na figura 4.4.

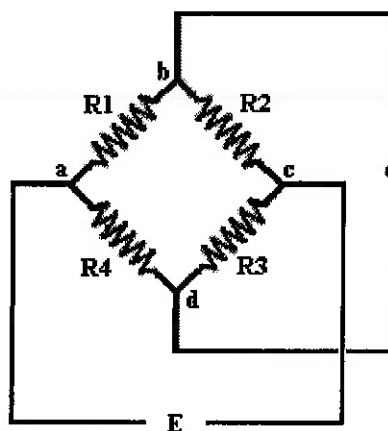


Figura 4.4: Esquema da ponte de Wheatstone

Considerando uma tensão de entrada E entre os pontos a e c , podemos dividir o circuito em duas partes, um formado pelos pontos a , d e c com as resistências R_4 e R_3 , e outro formado pelos pontos a , b e c com resistências R_1 e R_2 , como mostrado na figura 4.5.

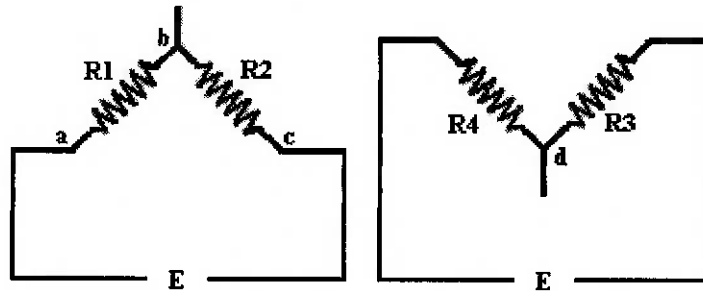


Figura 4.5: Circuitos isolados da ponte

Considerando uma corrente I passando pelo primeiro circuito, temos:

$$I = \frac{E}{R_4 + R_3} = \frac{e_{ad}}{R_4} \Rightarrow e_{ad} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} E \quad [4.17]$$

Analogamente para o segundo circuito, obtemos:

$$e_{ab} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E \quad [4.18]$$

Mas a tensão a ser medida é a tensão entre os pontos a e c , podendo ser obtida pela subtração das tensões e_{ad} e e_{ab} .

$$e = e_{ad} - e_{ab} = \left(\frac{R_4}{R_4 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) E = \left(\frac{R_4 R_2 - R_1 R_3}{(R_4 + R_3)(R_1 + R_2)} \right) E \quad [4.19]$$

Supondo que sejam trocadas as resistências R_1 , R_2 , R_4 e R_3 por extensômetros não deformados com uma resistência R , teríamos:

$$R_x = R + \Delta R_x, \text{ com } x = 1, 2, 3 \text{ e } 4.$$

Obtendo,

$$e = \left(\frac{(R + \Delta R_4)(R + \Delta R_2) - (R + \Delta R_1)(R + \Delta R_3)}{((R + \Delta R_4) + (R + \Delta R_3))((R + \Delta R_1) + (R + \Delta R_2))} \right) E \quad [4.20]$$

Simplificando a expressão,

$$e = \left(\frac{-\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}}{4 + 2\left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}\right)} \right) E \quad [4.21]$$

Considerando $\Delta R_i \ll R$, temos

$$4 + 2\left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}\right) \approx 4 \quad [4.22]$$

Logo,

$$e = \left(-\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \frac{E}{4} \quad [4.23]$$

Como podemos observar na fórmula acima, para a Ponte de Wheatstone, a variação das resistências opostas é somada enquanto que das adjacentes se subtraem.

5. Otimização

A otimização de estruturas mecânicas consiste na utilização de métodos computacionais iterativos para obter as dimensões, forma ou topologias ótimas das peças, ou seja, para maximizar ou minimizar uma função objetivo especificada no projeto. Virtualmente, qualquer aspecto de um projeto pode ser otimizado: dimensões (tais como espessura), forma (como por exemplo, raio de curvatura), frequência natural, entre outros. Para isso, são usados algoritmos numéricos de otimização, o que reduz o tempo para se encontrar a solução ótima. O algoritmo numérico de otimização deve trabalhar em conjunto com um algoritmo de análise estrutural, o qual verifica se a solução proposta pelo primeiro é realmente melhor ou não.

Atualmente, existem três abordagens básicas em otimização estrutural: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica.

Para explicar a diferença entre estes processos de otimização, utilizaremos um exemplo clássico: uma barra engastada em uma das extremidades com aplicação de força na outra extremidade, como mostrado na figura 5.1, com o objetivo de se obter maior rigidez com o menor volume de material.

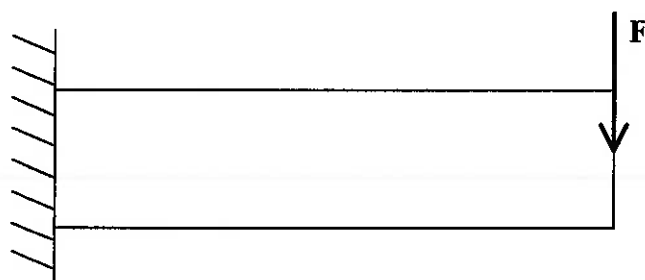


Figura 5.1: Exemplo clássico de otimização

5.1 Otimização Paramétrica

A otimização paramétrica consiste em assumir uma estrutura com forma pré-fixada, onde as variáveis do processo serão as dimensões ou as razões entre as dimensões da peça.

Por exemplo, para o caso da figura 5.1, poderíamos definir uma estrutura em I , determinando as dimensões que definem a estrutura e que servirão de variáveis para a otimização. O resultado obtido para este tipo de otimização pode ser visto na figura 5.2.

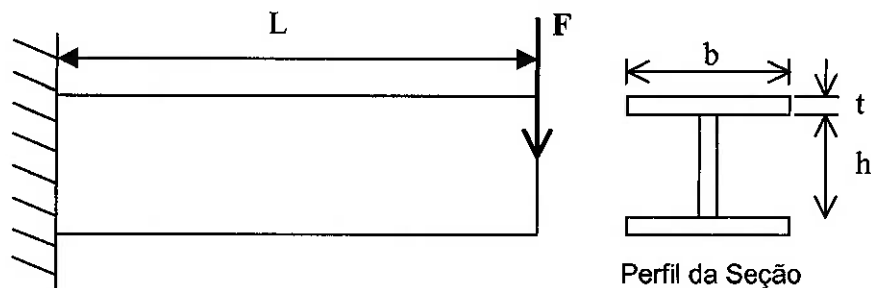


Figura 5.2: Resultado da otimização paramétrica

5.2 Otimização de Forma

A otimização de forma permite alterar a forma da estrutura de maneira a encontrar a solução ótima. Os contornos externos da estrutura são parametrizados por curvas *splines*², sendo os parâmetros dessas curvas as variáveis do problema.

Devido à complexidade das respostas encontradas para este tipo de otimização, utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF) para a análise das peças resultantes.

Utilizando-se de um software de otimização podemos obter os parâmetros ótimos para o exemplo em questão, resultando na figura 5.3.

² Splines: consiste em segmentos curvos cujos coeficientes do polinômio da curva dependem de alguns pontos de controle.

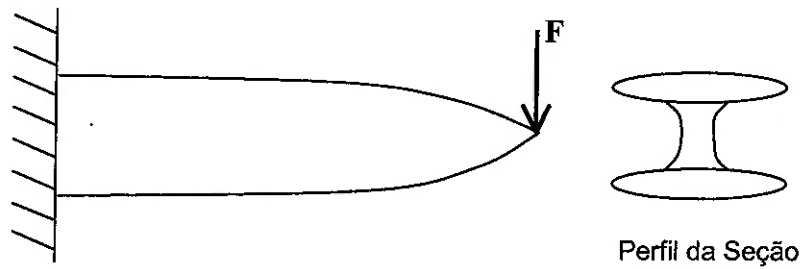


Figura 5.3: Resultado da otimização de forma

5.3 Otimização topológica

A otimização topológica é um método computacional que permite definir a distribuição de material no interior de um domínio fixo de forma a atender uma função objetivo. O material em cada ponto do domínio pode variar entre “vazio” (ausência de material) e “sólido” (total presença de material), podendo assumir diversas densidades intermediárias.

Utiliza-se um algoritmo computacional para de forma iterativa obter-se a distribuição ótima para a peça simulada. Este algoritmo combina métodos de otimização com métodos numéricos de análise, como MEF, por exemplo. Resolvendo o exemplo clássico com esta metodologia encontramos o resultado mostrado na figura 5.4.

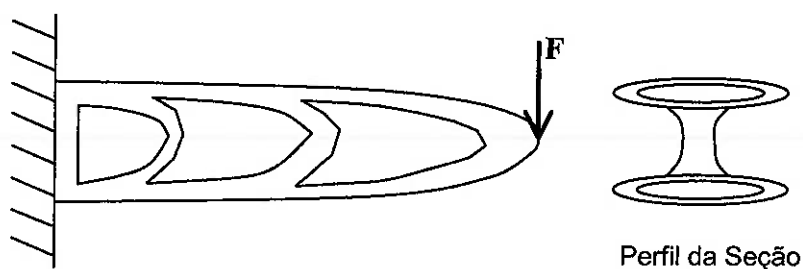


Figura 5.4: Resultado da otimização topológica

Na formulação de um problema de otimização estão presentes os seguintes conceitos: variáveis de projeto, função objetivo e restrições ou variáveis de estado, cujos conceitos serão apresentados a seguir.

5.4 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto são as variáveis independentes que constituem os parâmetros do problema, e que podem ser alteradas para a otimização. Essas variáveis podem ser, por exemplo, uma área de seção, uma certa dimensão a ser alterada, uma propriedade do material etc.

Variáveis de projeto são classificadas em variáveis contínuas e discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor, já as variáveis discretas estão limitadas a valores isolados. Assim, por exemplo, o diâmetro de uma viga tubular seria uma variável discreta, já que existem apenas alguns diâmetros de tubos disponíveis no mercado, já o seu comprimento pode ser uma variável contínua, uma vez que se pode cortar o tubo em qualquer comprimento. Variáveis que indicam valores de materiais também são discretas, já que temos um número limitado de materiais disponíveis.

5.5 Função objetivo

A função objetivo é a variável dependente que se quer maximizar ou minimizar e é uma função dependente das variáveis de projeto escolhida, pois, mudando-se o valor das variáveis de projeto muda-se o valor da função objetivo. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência do projeto.

Uma otimização com mais de uma função objetivo é chamada de multiobjetivo, ou multicritério.

É importante chamar a atenção para algumas equivalências clássicas de função objetivo que podem tornar o problema matematicamente mais simples. Assim, maximizar f é a mesma coisa que minimizar $-f$ ou $1/f$. Isso pode evitar singularidades na derivada da função objetivo.

5.6 Restrições

As restrições são as quantidades dependentes que restringem o projeto, constituindo limitações impostas para se obter a solução otimizada, e são tipicamente funções das variáveis de projeto. Essas restrições são classificadas em três tipos: laterais, igualdade e desigualdade.

Deve-se evitar, na medida do possível, um grande número de restrições no problema, pois isso encarece consideravelmente o custo computacional da otimização.

São classificadas também como locais e globais. Restrições locais se referem a um ponto localizado no domínio, como por exemplo, restrições de tensão mecânica e deslocamento num ponto. A restrição global se refere à estrutura como um todo, como por exemplo, restrições de volume e frequência de ressonância.

Com relação ao estado, podem ser classificadas em ativa e inativa. Ativa é quando o valor da restrição no ponto calculado é igual a zero, e inativa é quando seu valor é maior que zero.

Se qualquer uma delas não é satisfeita, o projeto é considerado inviável. O melhor projeto é aquele que além de satisfazer todas as restrições, produz o valor mínimo (ou máximo) da função objetivo.

5.7 Otimização Usando o Software ANSYS

No ANSYS, qualquer item que pode ser expresso em termos de parâmetros pode ser otimizado. Para a otimização do projeto, é utilizado o Método de Primeira Ordem, baseado nas derivadas da função objetivo para encontrar o ponto ótimo.

O algoritmo implementado no ANSYS realiza uma série de ciclos de análise-avaliação-modificação. Isto é, uma análise do projeto inicial é realizada, os resultados são avaliados junto a critérios de projeto especificados, e o projeto é modificado, se necessário. Este processo é repetido até que todos os critérios especificados sejam satisfeitos. O ANSYS

permite ao usuário definir até 60 variáveis de projeto e 100 variáveis de estado, porém, somente uma função objetivo pode ser especificada. Em uma otimização, as variáveis de projeto, as variáveis de estado e a função objetivo são representadas por variáveis nomeadas pelo usuário, e que constituem os chamados parâmetros.

Para a realização de uma otimização, é necessário um arquivo de análise, que pode ser obtido de várias maneiras. Esse arquivo contém uma seqüência completa de análise (pré-processamento, solução, pós-processamento). O arquivo de análise deve conter um modelo definido parametricamente, usando parâmetros que representam todas as variáveis de projeto, variáveis de estado e a função objetivo. A partir desse arquivo, um arquivo de *loop* é criado e usado para realizar a análise. Um exemplo deste arquivo encontra-se no ANEXO C.

Um *loop* é um passo através do ciclo de análise. Uma iteração é um ou mais ciclos de análise que resultam em um novo projeto.

A base de dados da otimização inclui as definições das variáveis de otimização, parâmetros, todas as especificações da otimização e os grupos de projeto acumulados.

6. Modelagem

A modelagem de estruturas consiste basicamente em reproduzir os efeitos que ocorrem na vida real em simulações computacionais com o propósito de imitar esses efeitos o mais fielmente possível através de inúmeros algoritmos específicos. Para uma melhor compreensão do trabalho, podemos dividir a modelagem em três etapas distintas: pré-processamento, utilização do software de otimização e pós-processamento.

Além disso, é importante salientar que serão utilizados neste trabalho recursos já existentes em softwares comerciais de elementos finitos e de otimização paramétrica, como o ANSYS.

6.1 Pré-Processamento

O pré-processamento consiste em desenhar a geometria do domínio inicial de projeto da estrutura em ANSYS, definindo com ele o modelo de MEF a ser utilizado.

Este modelo é composto por diferentes fatores [9], que são necessários definir para uma correta otimização da estrutura posterior.

6.1.1 Espaço

O espaço a ser analisado neste trabalho possui duas dimensões, ou seja, não leva-se em conta a largura da estrutura. O número de dimensões é limitado pelo software de otimização utilizado em uma etapa posterior, além de um espaço reduzido resulta em menor custo computacional.

6.1.2 Dimensões

As estruturas foram elaboradas com dimensões bastante semelhante às células de carga extensométricas existentes no mercado, principalmente da fabricante nacional ALFA Instrumentos [8]. As dimensões utilizadas

variam de estrutura para estrutura, portanto elas serão abordadas separadamente.

6.1.3 Material

O material base utilizado na simulação da estrutura é o alumínio, mesmo material utilizado nas células de carga comerciais. O alumínio apresenta alto módulo de Young igual a 69 GPa e coeficiente de Poisson de igual a 0,33.

6.1.4 Discretização

A discretização consiste em subdividir a estrutura em inúmeras regiões. O fator que determina o grau de discretização é a dimensão destas regiões, ou a quantidade de regiões. Além disso, como já foi dito, essas regiões estão interligadas pelos nós.

6.1.5 Malha

A malha determina o formato da discretização. Basicamente a malha pode ser dividida em dois tipos: malhas quadriculares (quatro lados) e malhas triangulares (três lados). Há também como definir quantos nós terá cada elemento, podendo ser 4 ou 8 nós (para malhas quadriculares), como mostra a figura 6.2.

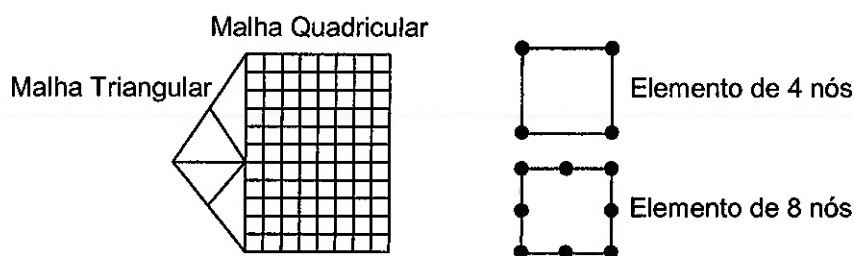


Figura 6.1: Tipo de malhas

Além disso, podemos separar os elementos quadriculares em dois tipos, retangulares e quadriláteros. Elementos retangulares apresentam os 4

lados formando ângulos retos, ao contrário dos quadriláteros que apresentam ângulos e tamanhos variáveis para cada lado.

Neste trabalho foram utilizados elementos quadriláteros de 4 nós para a elaboração da malha.

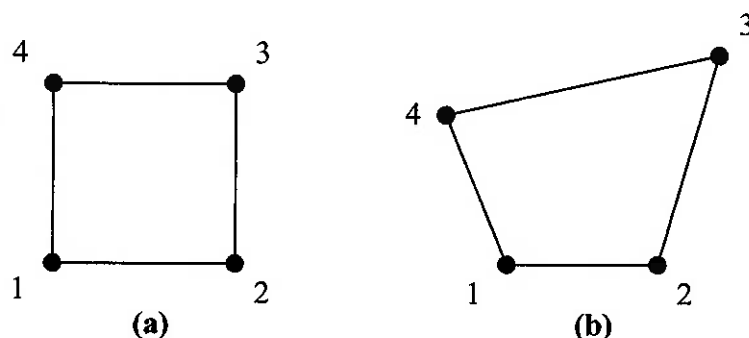


Figura 6.2: (a) Elemento retangular (b) Elemento quadrilátero

6.1.6 Condições de Contorno

As condições de contorno englobam tanto as restrições, quanto os carregamentos.

Restrições - definem como a estrutura se relaciona com o meio ambiente (engastamentos).

Carregamentos - definem as solicitações as quais a estrutura está submetida (forças nodais, pressões, momentos, carga térmica, etc.).

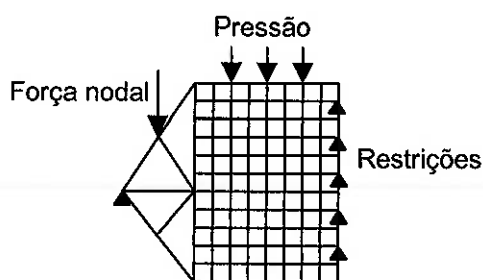


Figura 6.3: Condições de Contorno

Definidos estes fatores, podemos ter uma idéia geral dos diversos aspectos que interferem na modelagem da estrutura da célula de carga, e, portanto podemos partir para o desenho da estrutura inicial no ANSYS. A

figura 6.4 mostra um exemplo de malha gerada no ANSYS, que passará pelo processo de otimização.

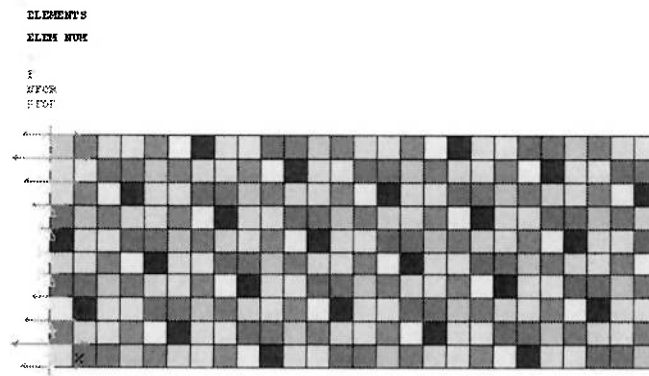


Figura 6.4: Exemplo de malha gerada no ANSYS

6.2 Processamento

Esta etapa é caracterizada pela definição das variáveis de estado, das variáveis de projeto e da função objetivo.

Para a otimização das células de carga utiliza-se como parâmetros:

- Variáveis de projeto: dimensões dos furos da estrutura inicial, limitadas para que a espessura mínima da parede externa da célula não ultrapasse 5 mm;
- Variáveis de estado: tensão máxima de escoamento, limitada por um coeficiente de segurança a um terço da tensão de escoamento do material [10]. Para o alumínio a tensão é 450 MPa [15];

$$S_{MAX} = \frac{S_y}{3} = 150MPa \quad [6.1]$$

- Função Objetivo: definida pela relação entre os deslocamentos dos nós para uma estrutura simulada. Uma vez que a variação de resistência em um extensômetro é proporcional ao seu alongamento, pode-se utilizar a diferença entre os deslocamentos de suas extremidades para calcular o resultado da Ponte de Wheatstone;
- Definição do número de iterações máximas, critério de parada e método de otimização.

6.3 Pós-processamento

O pós-processamento apresenta as seguintes etapas:

- **Análise estrutural**

Esta análise é caracterizada pela simulação numérica da estrutura, através do MEF, com a finalidade de se obter os deslocamentos de cada um dos nós, assim como as tensões de Von Mises no interior da malha.

- **Verificação**

O resultado da otimização é analisado, observando os valores obtidos para as restrições. Estes devem ser menores daqueles impostos na etapa de processamento.

Após a análise estrutural é necessária a comparação da resposta da ponte de Wheatstone da estrutura otimizada com a estrutura inicial gerada pelo pré-processamento.

7. Método dos Elementos Finitos (MEF)

Com o intuito de se analisar os esforços atuantes em uma célula de carga extensométrica são necessários, primeiramente, determinar todos os aspectos geométricos que interferem na qualidade de resposta do sistema a esses esforços. Porém, esta análise é de difícil solução analítica sendo necessário, portanto, utilizar-se de ferramentas que resolvem as equações diferenciais por métodos numéricos e que se aproximam da resposta real do sistema. Para este caso será escolhido o Método dos Elementos Finitos.

O método dos elementos finitos é uma das ferramentas mais importantes na análise estrutural. Desde que foi introduzido na década de 60 tem sido aplicado em vários domínios da ciência, nomeadamente na mecânica de sólidos e na mecânica de fluidos. O MEF, como já foi dito, permite a análise de estruturas que não podem ser resolvidas por métodos analíticos ou aqueles cuja solução é complicada demais. Sua atuação pode se estender a estruturas de formato geométrico complexo, compostas de materiais não homogêneos e não lineares.

A idéia básica do MEF é subdividir um domínio complicado, seja ele uma estrutura, um fluido, ou até mesmo um campo eletromagnético, em uma série de pequenas regiões. Nestas regiões as equações diferenciais são resolvidas com uma determinada aproximação o que faz com que a solução integrada a todas as regiões seja alcançada com um menor custo computacional.

Cada uma dessas regiões é tratada como um *elemento*, e o processo de subdivisão do domínio em um determinado número de elementos é chamado de *discretização*. Cada um dos elementos está conectado ao elemento adjacente por meio dos *nós*.

Os softwares utilizados neste trabalho empregarão MEF para a resolução do problema de otimização a que estão sujeitas as células de carga.

8. Células de carga comerciais

Foram escolhidos dois tipos de células de cargas extensométricas encontradas no mercado para servir de base para o dimensionamento da estrutura bruta utilizada na otimização. Esta escolha baseou-se nos principais tipos de células de carga comercializadas. Isso se deve a necessidade de comparação das respostas do protótipo a ser construído com as respostas das células utilizadas nas indústrias.

A seguir serão explicitadas as características mais relevantes dessas células de cargas assim como seus desenhos de fabricação.

8.1 Primeira Estrutura

A primeira estrutura a ser analisada é uma célula de carga baseada na classe G de células de carga da ALFA Instrumentos [8]. Os números de 5 a 50 se referem ao porte da célula de carga.

8.1.1 Especificações

Tabela 8.1 – Especificações da célula de carga

Capacidade Nominal - kg	5, 10, 20, 30, 50
Material	Alumínio anodizado
Sensibilidade mv/V	2 +/- 10%

8.1.2 Dimensões

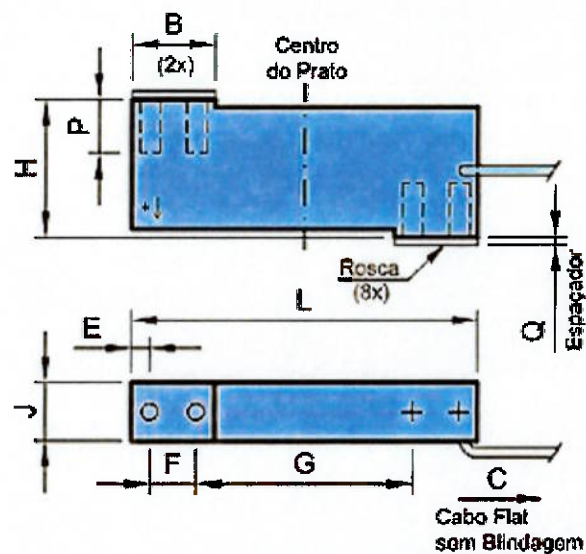


Figura 8.1: Desenho estrutural da célula de carga

Tabela 8.2 – Dimensões da célula de carga

Modelo	B	C(mt)	E	F	G	H	J	L	P	Q	Rosca
G-5	25	0,5	5	15	90	50	25	130	15	3	M5x0,8
G-10/20/30/50	32	0,5	6	20	78	50	25	130	18	3	M6x1

8.2 Segunda Estrutura

A segunda estrutura a ser analisada é baseada em uma célula de carga da classe H da ALFA Instrumentos [8]. A figura 8.2a mostra a célula sem a estrutura necessária para receber a aplicação da força, exemplificada na figura 8.2b.



Figura 8.2: (a) Célula de Carga H; (b) Célula H montada

8.2.1 Especificações

Tabela 8.3 – Dados específicos da célula de carga

Capacidade Nominal - kg	20.000, 30.000, 50.000
Material	Aço Cr/Ni/Mo Níquel químico ou Aço inox
Sensibilidade - mv/v	2 +/- 0,1%

8.2.2 Dimensões

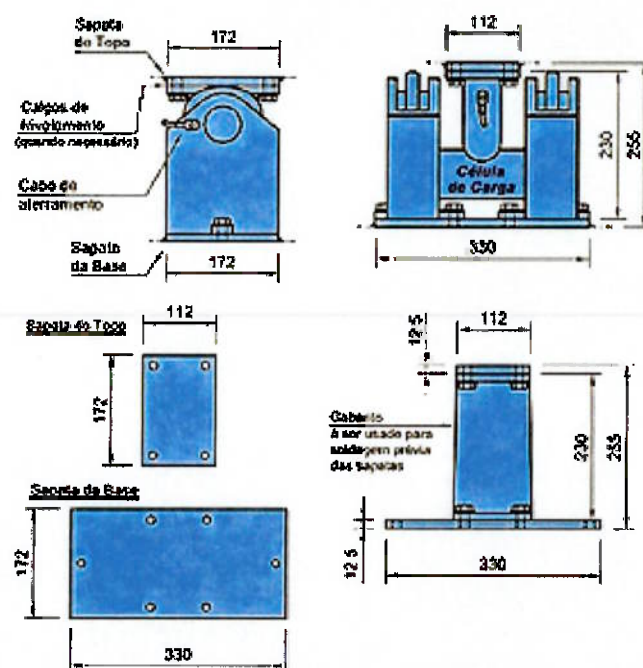


Figura 8.3: Desenho estrutural da célula de carga

9. Otimização e Simulação

9.1 Primeira Estrutura

Foram escolhidas diversas formas geométricas para a realização das otimizações paramétricas da estrutura 1 apresentada acima, baseando-se em células de carga comerciais e algumas inovadoras, tentando encontrar a melhor solução para o problema.

Para todas as otimizações foram utilizados como base os seguintes parâmetros:

- Célula de carga retangular de 150 mm por 50 mm;
- Quatro extensômetros dispostos segundo a figura 25;

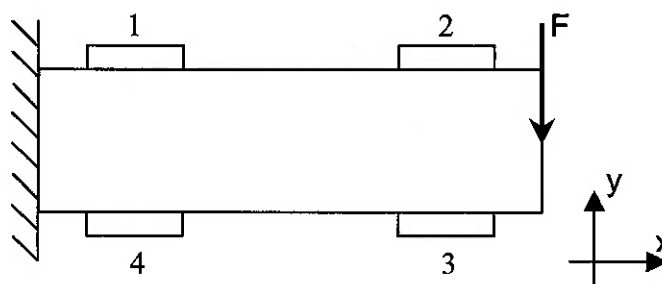


Figura 9.1: Disposição dos extensômetros na célula de carga para a primeira estrutura

- Malha quadrada de 2 mm por 2 mm gerada automaticamente pelo ANSYS;
- Força vertical (F) para baixo de 100 N aplicada no centro da face direita;
- Engastamento da face esquerda;
- Limitação da menor espessura da parede em 5 mm;
- Função objetivo: uma vez que a variação da tensão em um extensômetro é proporcional ao seu alongamento, a função objetivo será calculada através da diferença do deslocamento no eixo x entre dois nós consecutivos onde estaria disposto o

extensômetro. Sendo assim para encontrar a melhor solução basta maximizar a função f_{max} ou minimizar a inversa f_{min} :

$$d_1 = x_1^1 - x_2^1; \quad d_2 = x_1^2 - x_2^2; \quad d_3 = x_1^3 - x_2^3 \text{ e } d_4 = x_1^4 - x_2^4 \quad [9.1]$$

Onde:

d_i é o deslocamento do extensômetro i ;

x_j^i é a posição do nó j no extensômetro i .

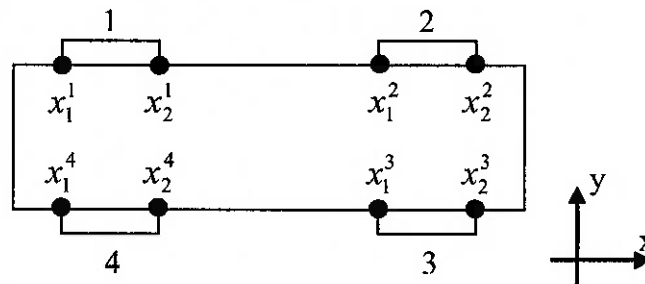


Figura 9.2: Disposição dos nós dos extensômetros

A função objetivo será análoga à Equação 6.23, onde se obtém a saída da ponte em função da variação das resistências. Como esta variação é proporcional ao alongamento dos extensômetros pode-se obter a função objetivo através do deslocamento das extremidades dos extensômetros, como mostrado na Equação 9.2.

$$f_{max} = d_1 - d_2 + d_3 - d_4 \Rightarrow f_{min} = -(d_1 - d_2 + d_3 - d_4) \quad [9.2]$$

Portanto o problema de otimização da célula de carga pode ser descrito como:

$$\text{Minimizar } f = -(d_1 - d_2 + d_3 - d_4)$$

Tal que:

$$S_{MAX} - S_y / 3 \leq 0$$

$$\text{Espessura mínima} = 2\text{mm}$$

9.1.1 Primeira Estrutura – Dois Círculos

Esta estrutura é a mais simples se comparada com as demais estruturas simuladas, pois apresenta figuras geométricas simples e em pouca quantidade. Nela foram criados dois furos circulares, como está mostrado na figura 9.3. Seus parâmetros estão apresentados na tabela 9.1.

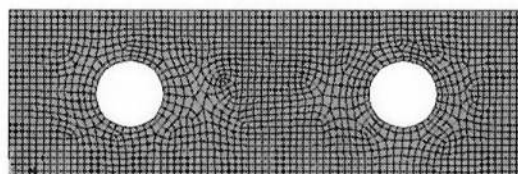


Figura 9.3: Estrutura inicial

Tabela 9.1 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	Parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 2	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
extensômetro 1	x (mm)	35	-	-
extensômetro 2	x (mm)	115	-	-
extensômetro 3	x (mm)	115	-	-
extensômetro 4	x (mm)	35	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

Após a realização de aproximadamente 30 iterações, o resultado da função objetivo convergiu para a solução mostrada na figura 9.4. Os valores obtidos para os parâmetros, assim como da função objetivo, podem ser encontrados na tabela 9.2.

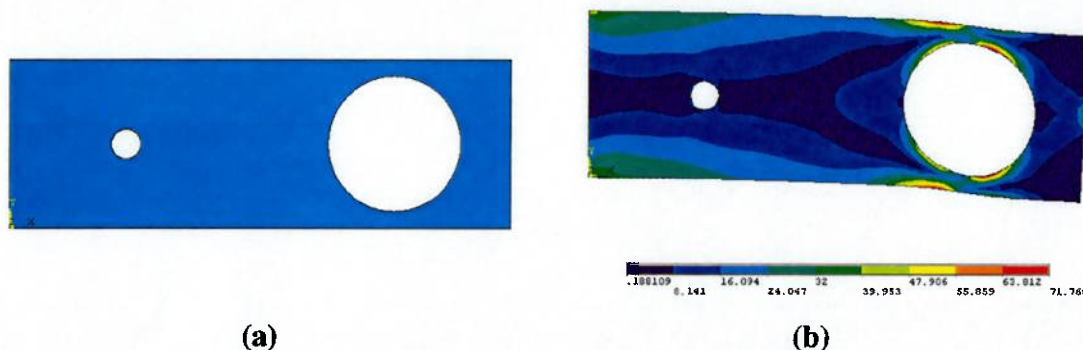
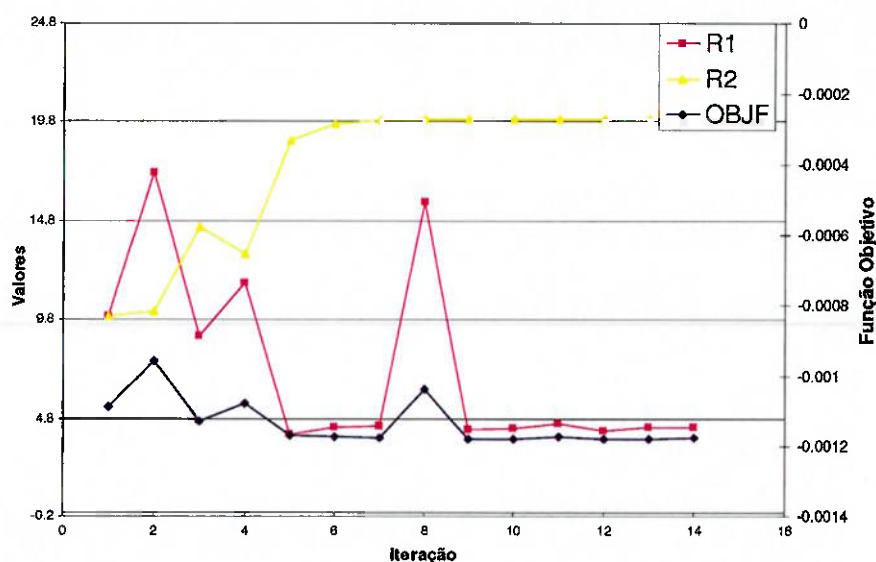


Figura 9.4: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.2 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	4,3097
círculo 2	raio (mm)	19,96
tensão	Von Mises (MPa)	71,662
função objetivo	-1.E-02	0,11795

O gráfico abaixo apresenta a evolução do valor da função objetivo com o decorrer das iterações. Podemos observar que o valor mínimo atingido ocorreu na 10ª iteração.



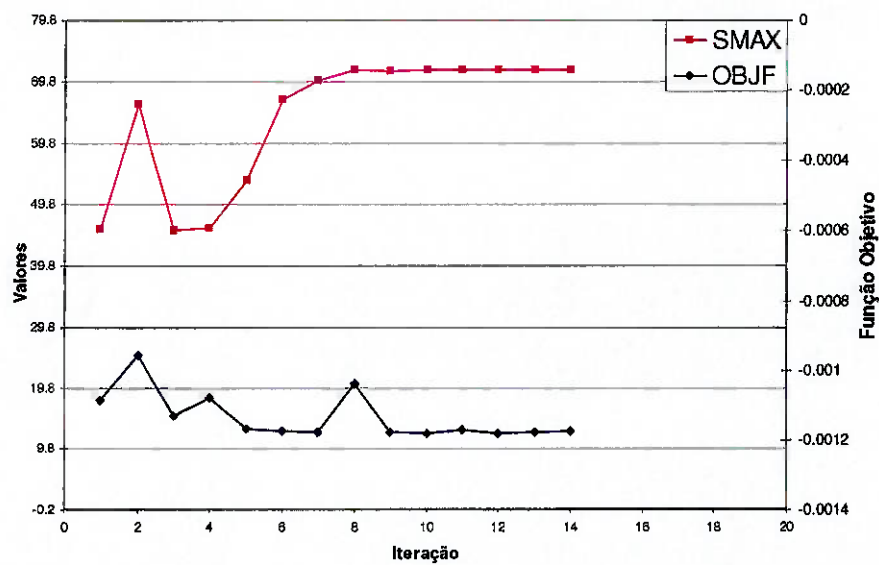


Figura 9.5: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.2 Primeira Estrutura – Três Círculos

Para esta otimização foram criados três furos circulares na estrutura, como mostrado na figura 9.6. Apresenta um grau de complexidade um pouco maior que a estrutura anterior, pois apresenta a inserção de um novo furo. Seus parâmetros estão apresentados na tabela 9.3.

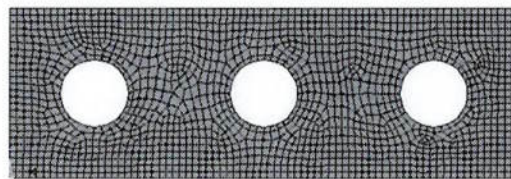
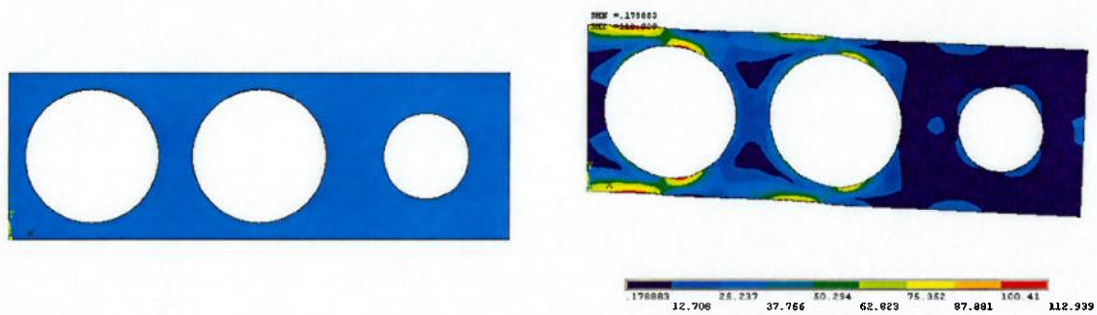


Figura 9.6: Estrutura inicial

Tabela 9.3 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	Parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 2	x centro (mm)	75	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 3	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
extensômetro 1	x (mm)	25	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	125	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

Foram realizadas aproximadamente 15 iterações e o resultado que apresenta o melhor valor da função objetivo é mostrado na figura 9.7. Os parâmetros desta estrutura se encontram na tabela 9.4.

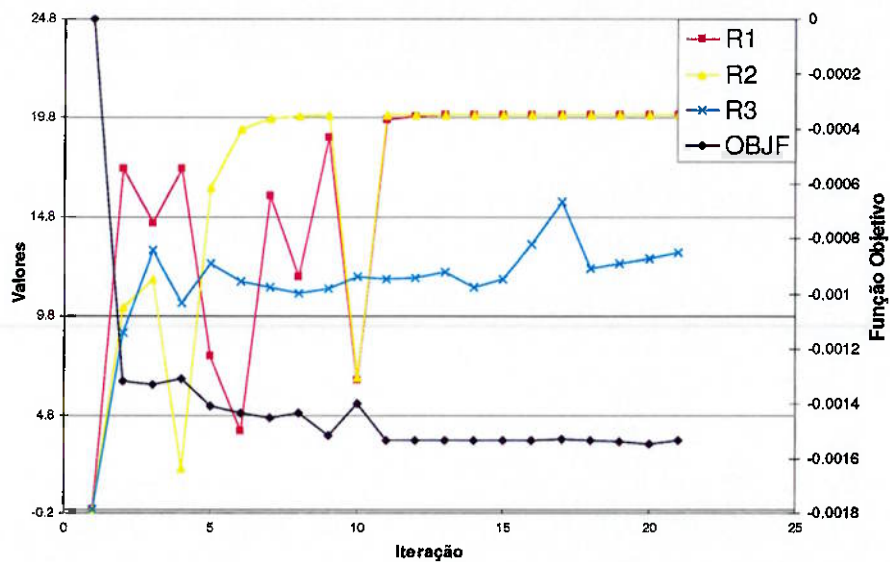


(a) (b)
Figura 9.7: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.4 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	19,962
círculo 2	raio (mm)	19,964
círculo 3	raio (mm)	12,698
tensão	Von Mises (MPa)	112,79
função objetivo	-1.E-02	0,15448

Podemos observar no gráfico abaixo uma rápida convergência da função.



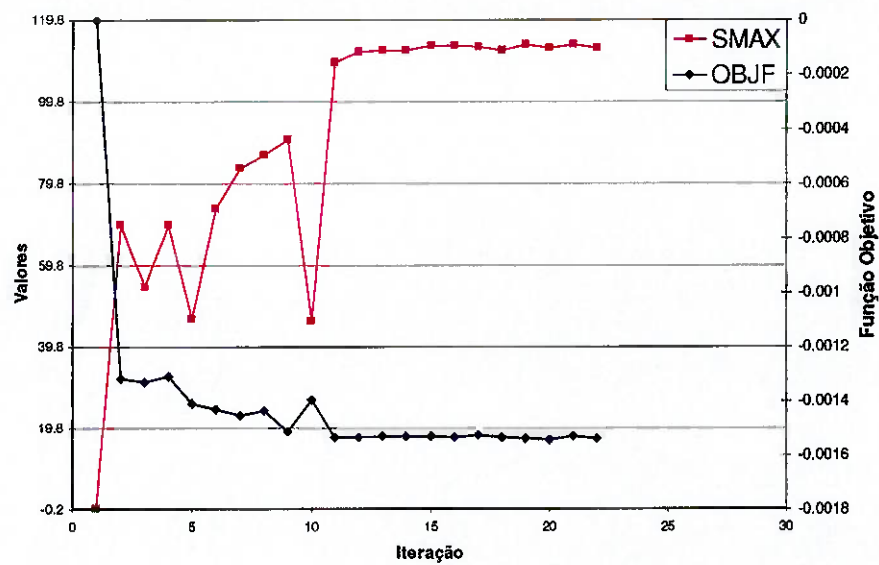


Figura 9.8: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.3 Primeira Estrutura – Quatro Círculos em Linha

Nesta otimização foram criados quatro furos circulares na estrutura, como mostrado na figura 9.9. A idéia é amplificar o deslocamento em alguns extensômetros, e diminuir o deslocamento em outros. Seus parâmetros estão apresentados na tabela 9.5.

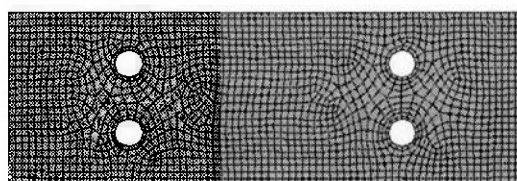


Figura 9.9: Estrutura inicial

Tabela 9.5 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	Parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	4	10	2
círculo 2	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	4	10	2
círculo 3	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	4	10	2
círculo 4	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	4	10	2
extensômetro 1	x (mm)	35	-	-
extensômetro 2	x (mm)	115	-	-
extensômetro 3	x (mm)	115	-	-
extensômetro 4	x (mm)	35	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

O número total de iterações pra esse caso foram aproximadamente 65 iterações. O melhor resultado é mostrado na figura 9.10.

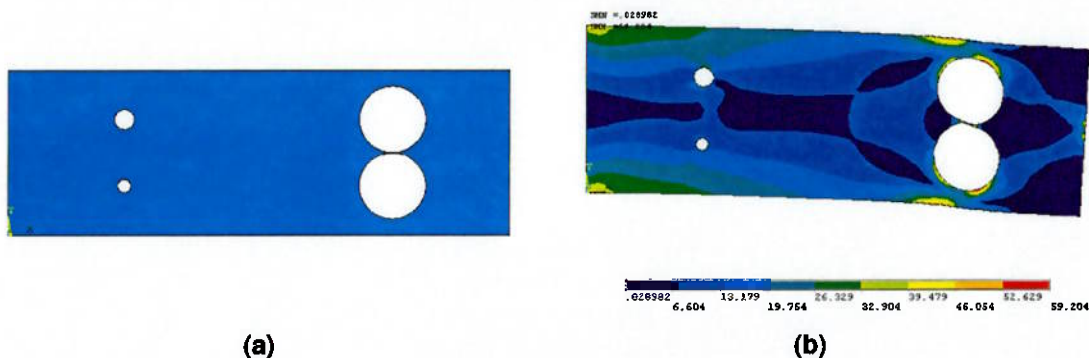
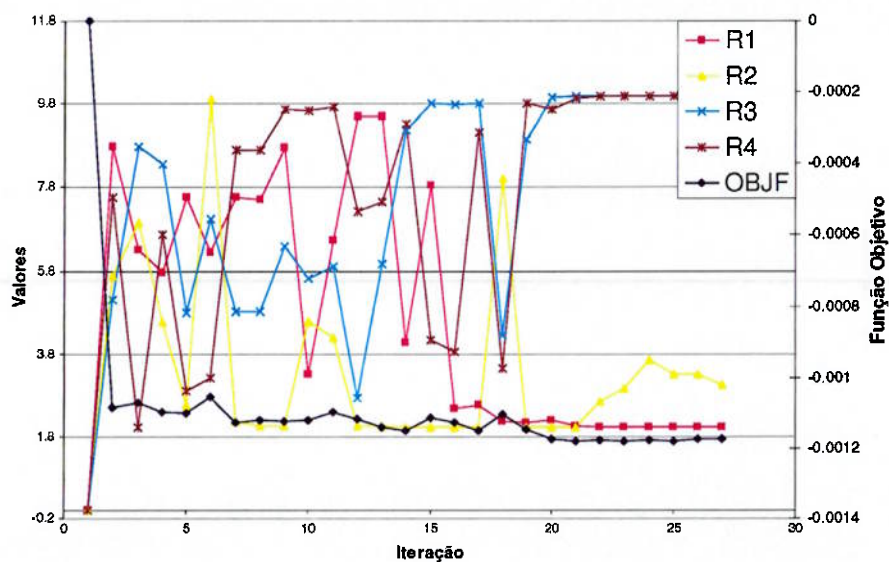


Figura 9.10: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.6 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	2,0264
círculo 2	raio (mm)	2,953
círculo 3	raio (mm)	9,9806
círculo 4	raio (mm)	9,9639
tensão	Von Mises (MPa)	59,058
função objetivo	-1.E-02	0,11809

Como na otimização anterior, ocorreu uma rápida convergência para o valor máximo da função objetivo, observado no gráfico da figura 9.11.



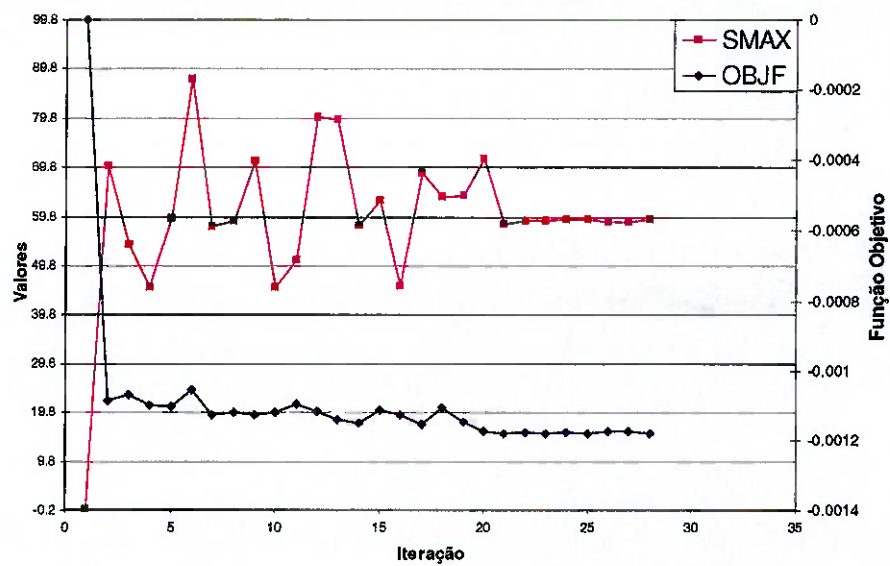


Figura 9.11: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.4 Primeira Estrutura – Quatro Círculos Assimétricos

Similarmente à estrutura anterior, foram criados quatro furos circulares, como mostrado na figura 9.12. Seguindo o conceito anterior de se amplificar alguns deslocamentos, a novidade nesta estrutura é proporcionar uma assimetria do ponto de vista da disposição dos extensômetros. O intuito é melhorar ainda mais o resultado da estrutura anterior. Seus parâmetros estão apresentados na tabela 9.7.

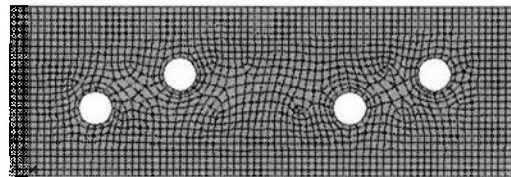
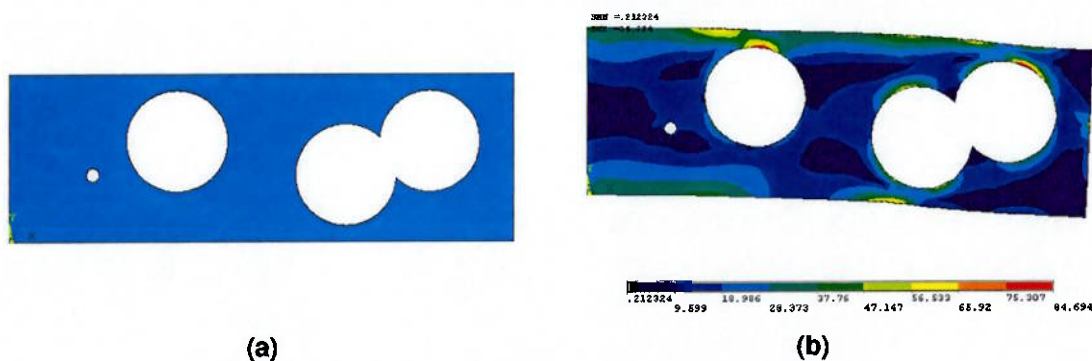


Figura 9.12: Estrutura inicial

Tabela 9.7 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	20	-	-
	raio (mm)	5	15	2
círculo 2	x centro (mm)	50	-	-
	y centro (mm)	30	-	-
	raio (mm)	5	15	2
círculo 3	x centro (mm)	100	-	-
	y centro (mm)	20	-	-
	raio (mm)	5	15	2
círculo 4	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	30	-	-
	raio (mm)	5	15	2
extensômetro 1	x (mm)	50	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	100	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

Após a realização de aproximadamente 20 iterações, o resultado da função objetivo convergiu para a solução mostrada na figura 9.13.

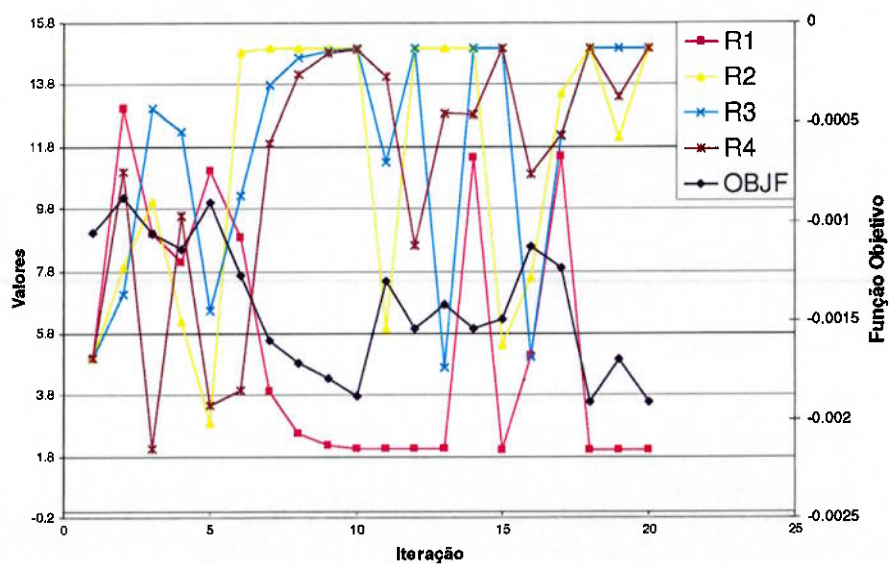


(a) (b)
Figura 9.13: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.8 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	2,0333
círculo 2	raio (mm)	14,973
círculo 3	raio (mm)	14,969
círculo 4	raio (mm)	14,963
tensão	Von Mises (MPa)	84,75
função objetivo	-1.E-02	0,19115

Apesar da grande variação encontrada no gráfico da função objetivo, a convergência ocorreu na 18ª iteração.



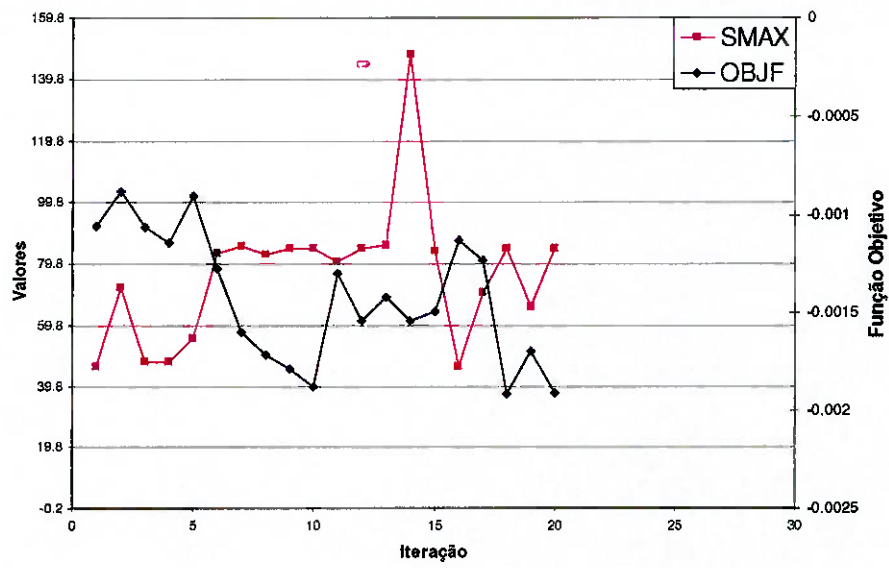


Figura 9.14 Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.5 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Dois Triângulos

Para esta otimização foram criados dois furos circulares na extremidade e dois triângulos espelhados no centro da estrutura, como mostrado na figura 9.15. O propósito aqui é estudar a influência de furos triangulares na função objetivo.

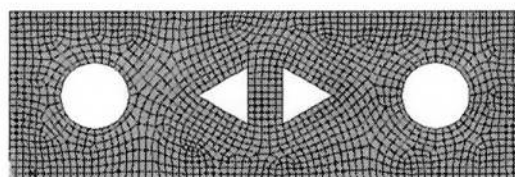
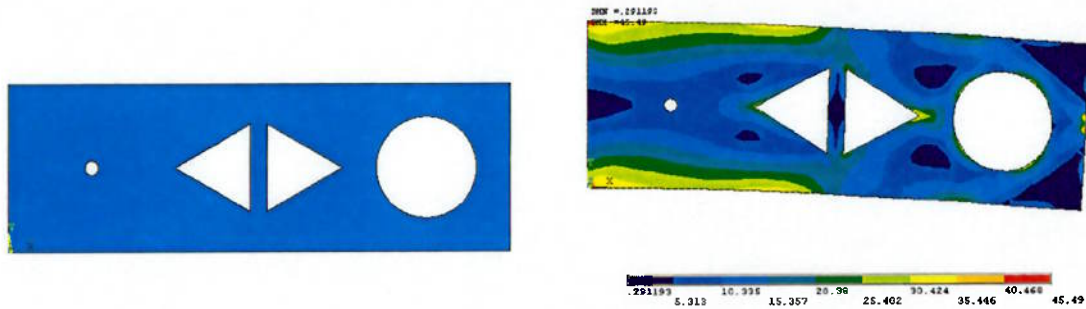


Figura 9.15: Estrutura inicial

Tabela 9.9 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	15	2
círculo 2	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	15	2
triângulo 1	x centro (mm)	65	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	15	2
	ângulo (°)	180	-	-
triângulo 2	x centro (mm)	85	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	15	2
	ângulo (°)	0	-	-
extensômetro 1	x (mm)	25	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	125	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

Após a realização de aproximadamente 27 iterações, o resultado da função objetivo convergiu, tendo como resposta a figura abaixo.

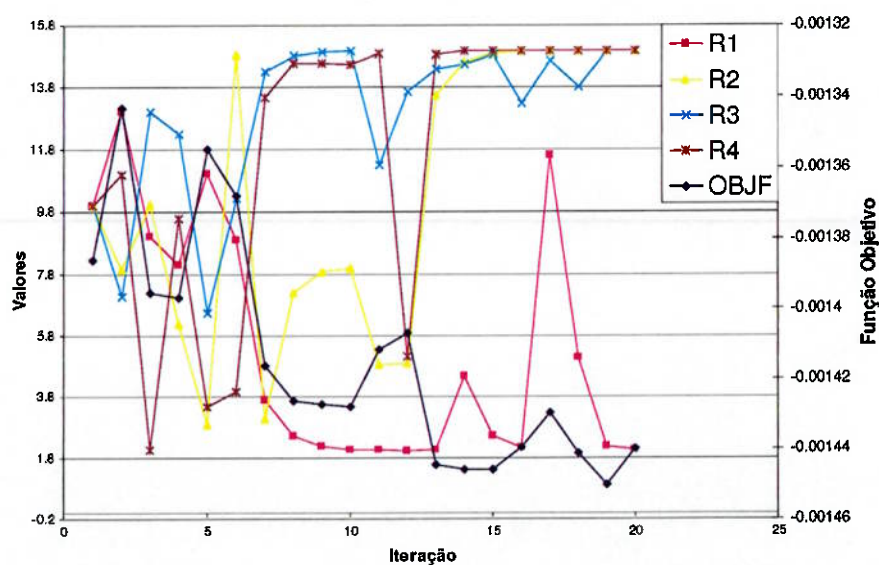


(a) (b)
Figura 9.16: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.10 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	2,1662
círculo 2	raio (mm)	14,956
triângulo 1	raio (mm)	14,948
triângulo 2	raio (mm)	14,972
tensão	Von Mises (MPa)	45,489
função objetivo	-1.E-02	0,14503

O gráfico abaixo apresenta a evolução do valor da função objetivo com o decorrer das iterações. Podemos observar que o valor mínimo atingido ocorreu na 19ª iteração.



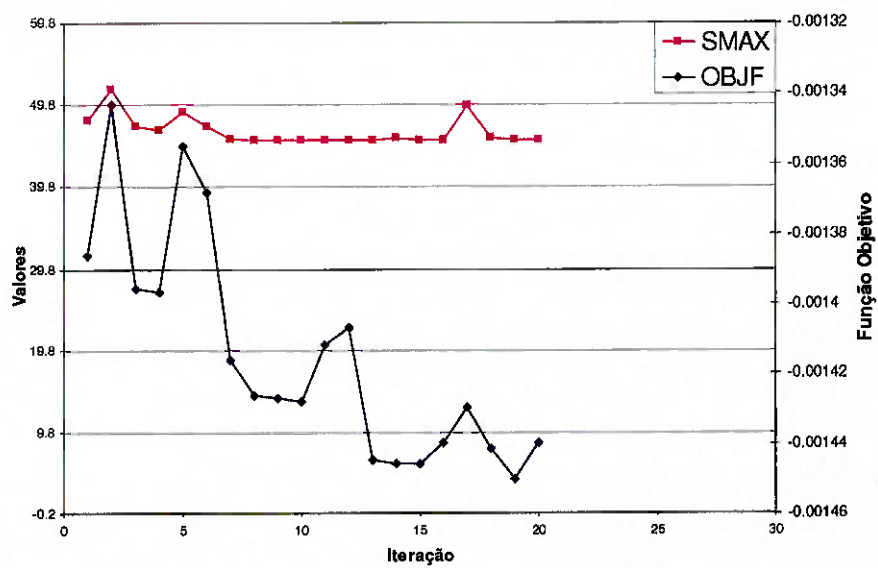


Figura 9.17: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.6 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Um Retângulo

Baseada na geometria das células de carga comerciais foram criados nesta estrutura dois furos circulares e um furo retangular, como mostrado na figura 9.18. Seus parâmetros estão apresentados na tabela 9.11.

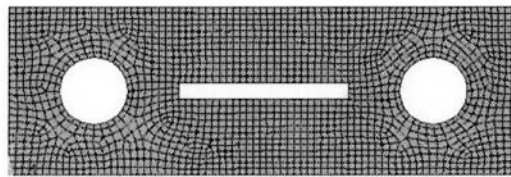
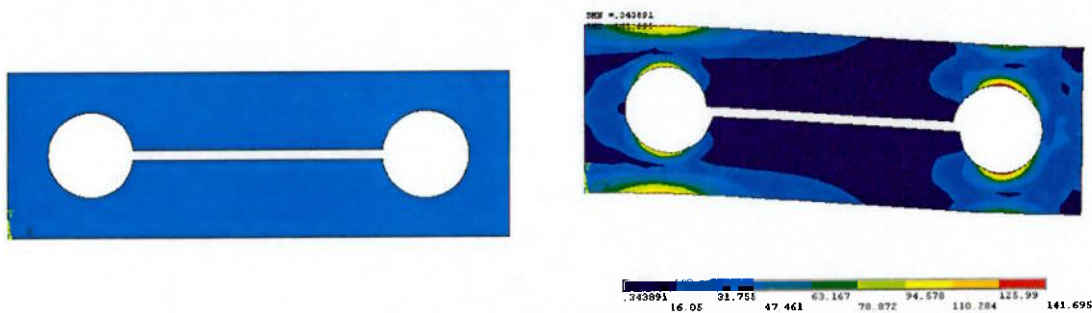


Figura 9.18: Estrutura inicial

Tabela 9.11 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 2	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
retângulo	x centro (mm)	75	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	altura (mm)	10	20	2
	comprimento (mm)	30	-	-
extensômetro 1	x (mm)	25	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	125	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

Após a realização de aproximadamente 65 iterações, o resultado da função objetivo convergiu para a solução mostrada na figura 9.19. Como observado na tabela 9.12, o valor da função objetivo foi consideravelmente melhor que nas outras otimizações.

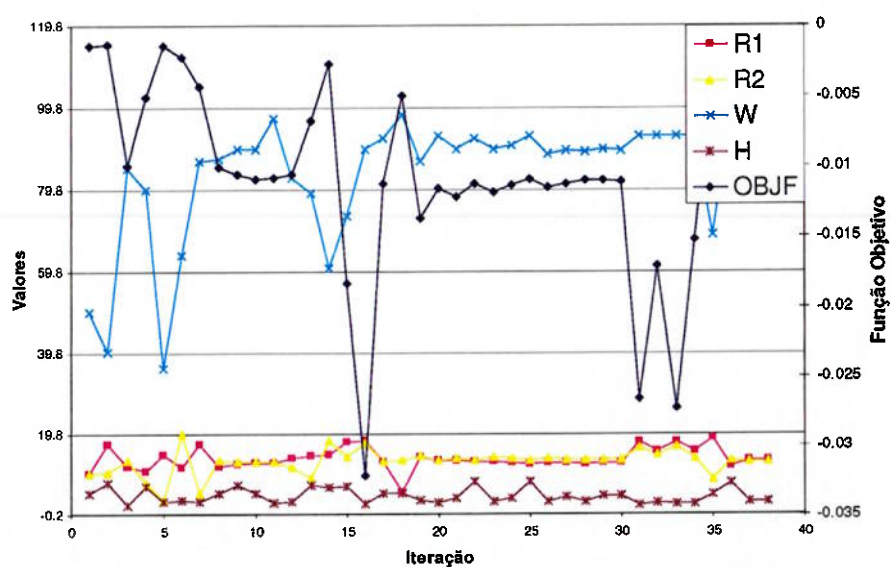


(a) (b)
Figura 9.19: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.12 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	13,005
círculo 2	raio (mm)	13,201
retângulo	altura (mm)	2,8044
	comprimento (mm)	92,988
tensão	Von Mises (MPa)	146,14
função objetivo	-1.E-02	1,1624

Apesar de a função objetivo ter atingido valores muito superiores ao indicado na tabela, para estes valores o valor da tensão máxima extrapolou o limite imposto.



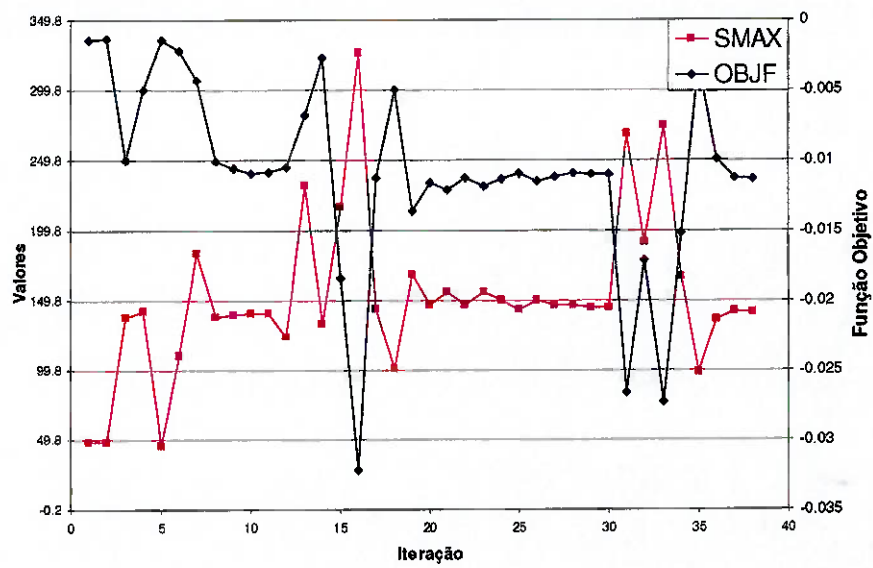


Figura 9.20: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.7 Primeira Estrutura – Dois Círculos e Um Oblongo

Esta otimização é uma evolução da anterior, pois ao contrário do retângulo da estrutura anterior, há um rasgo central na estrutura que apresenta uma gama maior de parâmetros variáveis. A estrutura inicial é mostrada na figura 9.21 e os parâmetros estão apresentados na tabela 9.13.

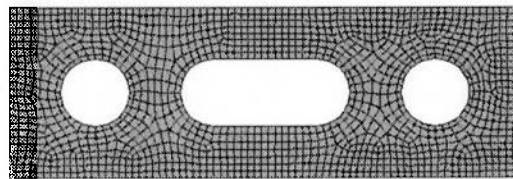
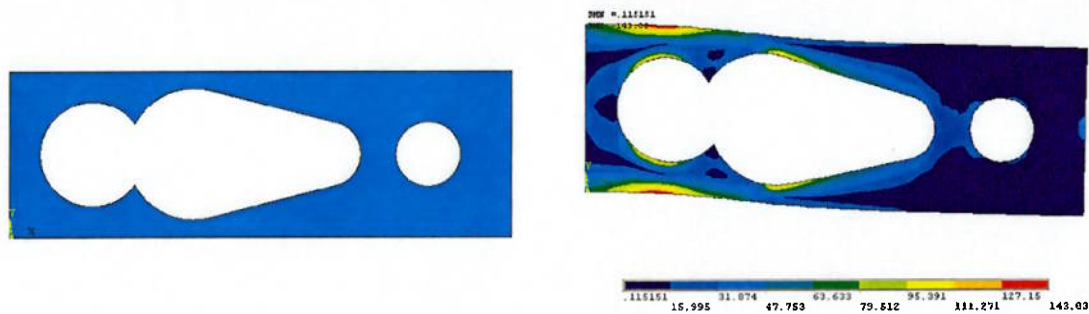


Figura 9.21: Estrutura inicial

Tabela 9.13 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 2	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
oblongo	x centro (mm)	60	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
	x centro (mm)	90	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
	comprimento (mm)	30	-	-
extensômetro 1	x (mm)	25	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	125	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

O processo de otimização gerou a estrutura indicada na figura 9.22(a), a figura 9.22(b) mostra a tensão de Von Mises quando sujeita à força externa.

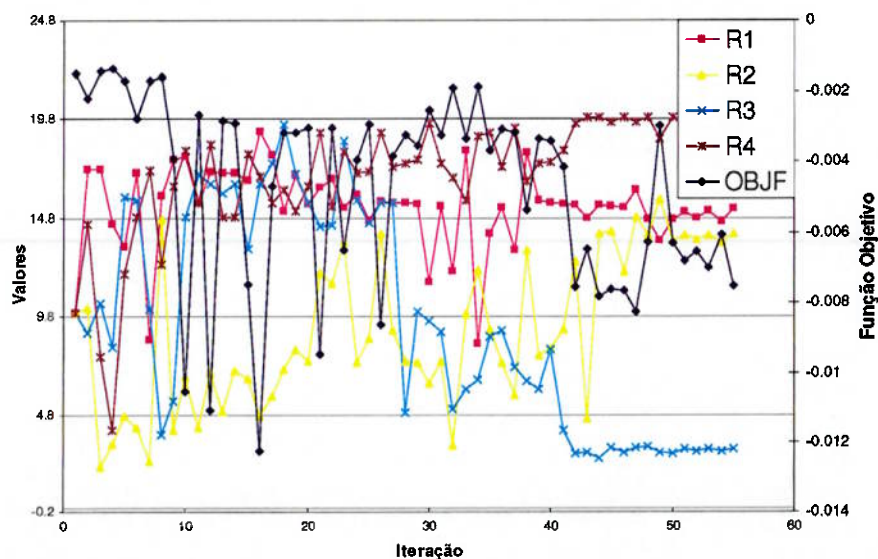


(a) (b)
Figura 9.22: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.14 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	15,444
círculo 2	raio (mm)	19,294
oblongo	raio (mm)	19,619
	raio (mm)	11,372
	comprimento (mm)	30
tensão	Von Mises (MPa)	148,56
função objetivo	-1.E-02	0,85859

Como no caso anterior, os melhores resultados não respeitaram a restrição com relação à tensão máxima, limitando o processo de otimização.



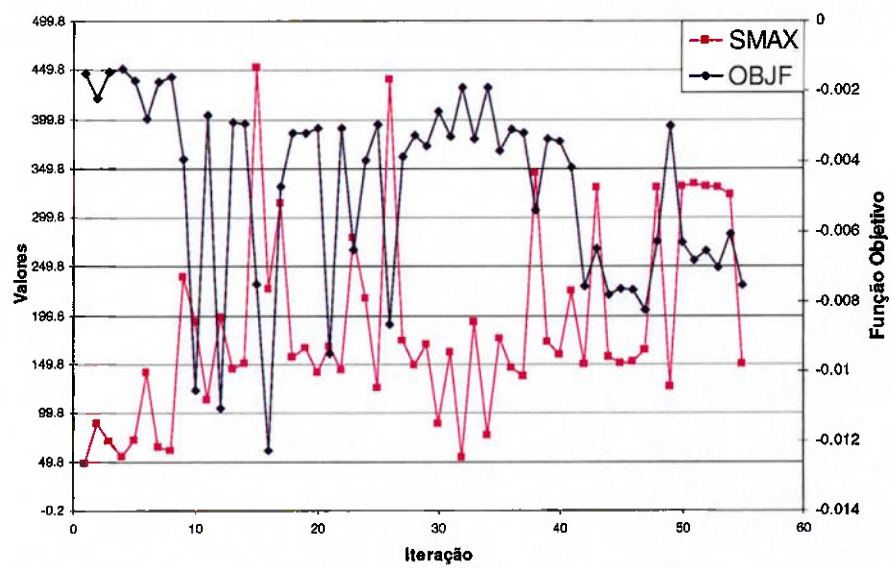


Figura 9.23: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.1.8 Primeira Estrutura – Célula de Carga Comercial

Vejamos agora o desempenho de uma célula de carga comercial utilizando as mesmas condições de contorno utilizadas nas otimizações acima.

Escolheu-se a célula GL1 da ALFA Instrumentos, cujas dimensões estão apresentadas na figura 9.24. Acredita-se que os extensômetros estão dispostos sobre o centro dos furos maiores, uma vez que não é possível a visualização dos mesmos.

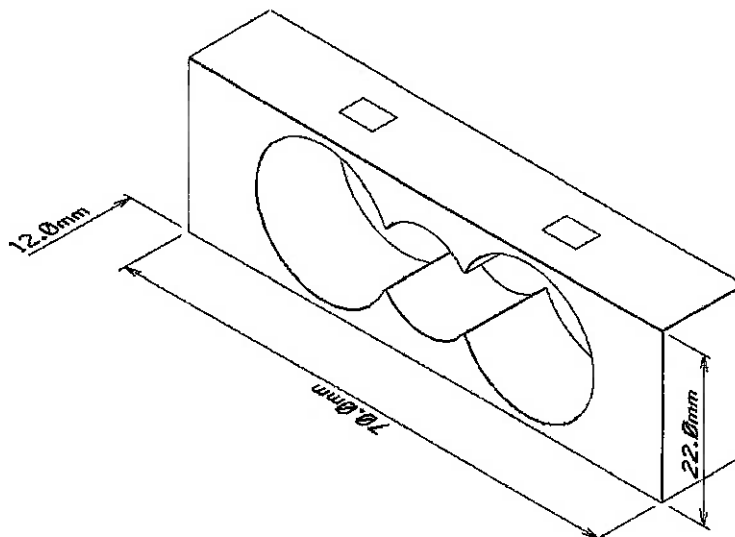
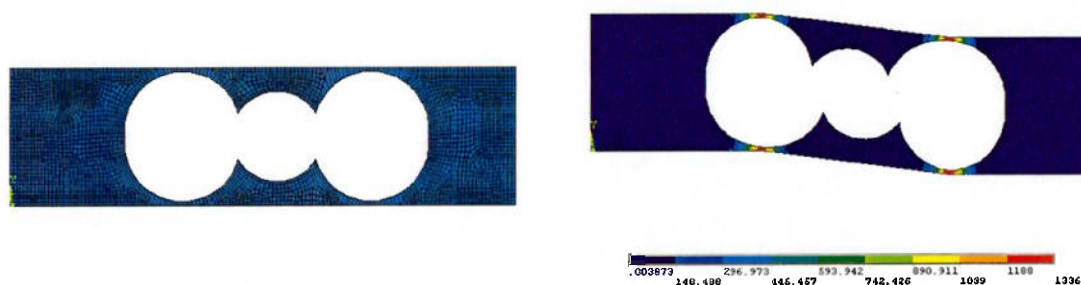


Figura 9.24: Dimensões básicas da GL1

A disposição e as dimensões dos furos, assim como o posicionamento dos extensômetros na estrutura podem ser observados na tabela 9.15.



(a)

(b)

Figura 9.25: (a) Aspecto final da célula comercial; (b) Tensão de Von Mises

A figura acima mostra a discretização da malha gerada para a simulação de elementos finitos e o resultado da tensão de Von Mises.

Tabela 9.15: Dimensões básicas da GL1

	Parâmetro	valor
oblongo 1	x centro (mm)	24,0
	y centro (mm)	13,0
	raio (mm)	8,5
	x centro (mm)	24,0
	y centro (mm)	9,0
	raio (mm)	8,5
oblongo 2	x centro (mm)	50,0
	y centro (mm)	13,0
	raio (mm)	8,5
	x centro (mm)	50,0
	y centro (mm)	9,0
	raio (mm)	8,5
círculo	x centro (mm)	37,0
	y centro (mm)	11,0
	raio (mm)	6,5
extensômetro 1	x (mm)	24,0
extensômetro 2	x (mm)	50,0
extensômetro 3	x (mm)	50,0
extensômetro 4	x (mm)	24,0
tensão	Von Mises (MPa)	1336,36
função objetivo	-1.E-02	3,6928

Para uma possível comparação do valor da função objetivo da célula de carga comercial com o processo de otimização, deve-se realizar uma nova otimização, que tenha como entrada as dimensões da célula de carga comercial e a restrição da tensão de Von Mises com os mesmos valores.

A geometria utilizada será a com dois círculos e um retângulo, pois foi a melhor configuração encontrada nas otimizações anteriores.

Utilizando os parâmetros da tabela 9.16 como valores iniciais da otimização, obteve-se a geometria da figura 9.26.

Tabela 9.16 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	20	-	-
	y centro (mm)	11	-	-
	raio (mm)	5	10.99	1
círculo 2	x centro (mm)	50	-	-
	y centro (mm)	11	-	-
	raio (mm)	5	10.99	1
retângulo	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	11	-	-
	altura (mm)	5	20	1
	comprimento (mm)	10	-	-
extensômetro 1	x (mm)	20	-	-
extensômetro 2	x (mm)	50	-	-
extensômetro 3	x (mm)	50	-	-
extensômetro 4	x (mm)	20	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	1350	1

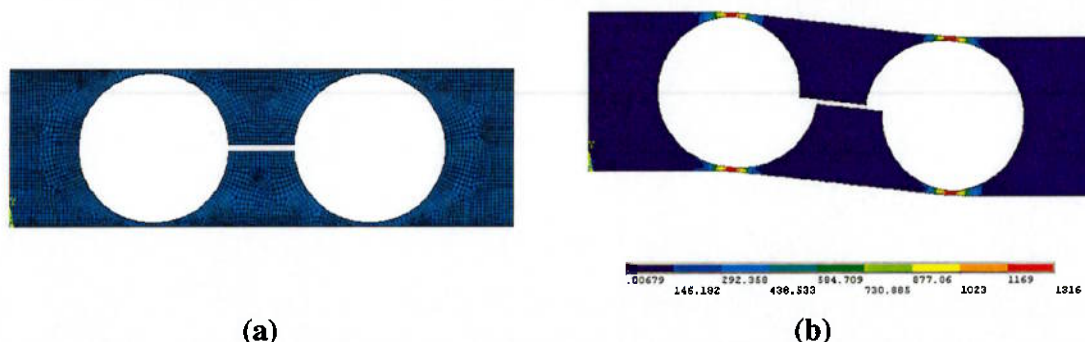


Figura 9.26: (a) Aspecto final da nova otimização ; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.17 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	10,465
círculo 2	raio (mm)	10,465
retângulo	altura (mm)	1,000
	comprimento (mm)	30,000
tensão	Von Mises (MPa)	1331,47
função objetivo	-1.E-02	3,799

Nota-se que os valores obtidos para esta nova otimização são melhores que os valores da célula de carga comercial, uma vez que apresenta maior valor para a função objetivo, com tensão máxima ligeiramente menor.

9.2 Segunda Estrutura

Assim como na primeira estrutura foram escolhidas diversas geometrias para serem otimizadas parametricamente. No entanto as condições de contorno do problema são diferentes, e podem ser encontradas a seguir:

- Célula de carga retangular de 150 mm por 50 mm;
- Quatro extensômetros dispostos segundo a figura 9.27;

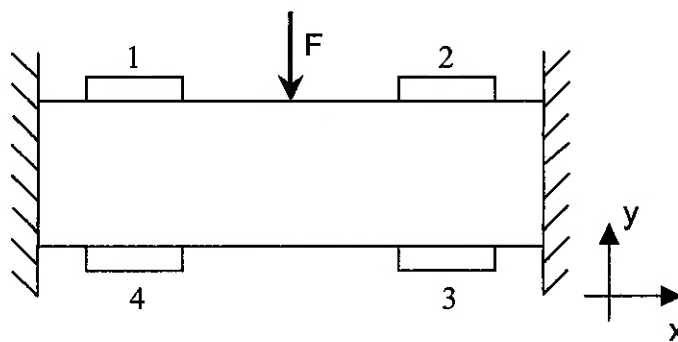


Figura 9.27: Disposição dos extensômetros na célula de carga para a segunda estrutura

- Malha quadrada de 2 mm por 2 mm gerada automaticamente pelo ANSYS;
- Força vertical (F) para baixo de 100 N aplicada no centro da face superior;
- Engastamento das faces esquerda e direita;
- Limitação da menor espessura da parede em 5 mm;
- Função objetivo: como não há alteração da disposição dos extensômetros na ponte de Wheatstone, a função objetivo é a mesma utilizada para a primeira estrutura (equação [9.5]).

9.2.1 Segunda Estrutura – Quatro Círculos em Linha

A primeira estrutura simulada foi uma tentativa de possibilitar um maior ou menor deslocamento para cada um dos extensômetros do sensor. Para tal, foram inseridos quatro furos circulares logo abaixo do centro dos extensômetros, pois quanto maior o tamanho do furo maior a influência do extensômetro correspondente na resposta da ponte. A figura 9.28 mostra a disposição dos furos na estrutura antes da otimização, enquanto que a tabela 9.16 apresenta as dimensões dos parâmetros iniciais.

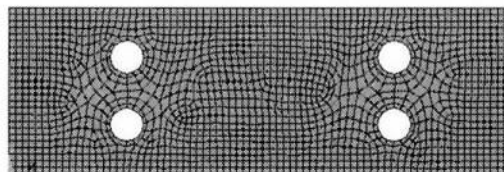


Figura 9.28: Estrutura inicial

Tabela 9.18 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 2	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 3	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 4	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
extensômetro 1	x (mm)	35	-	-
extensômetro 2	x (mm)	35	-	-
extensômetro 3	x (mm)	115	-	-
extensômetro 4	x (mm)	115	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

O resultado da otimização pode ser encontrado na figura 9.29 juntamente com as tensões de Von Mises. A tabela 9.17 contém os dados finais da otimização.

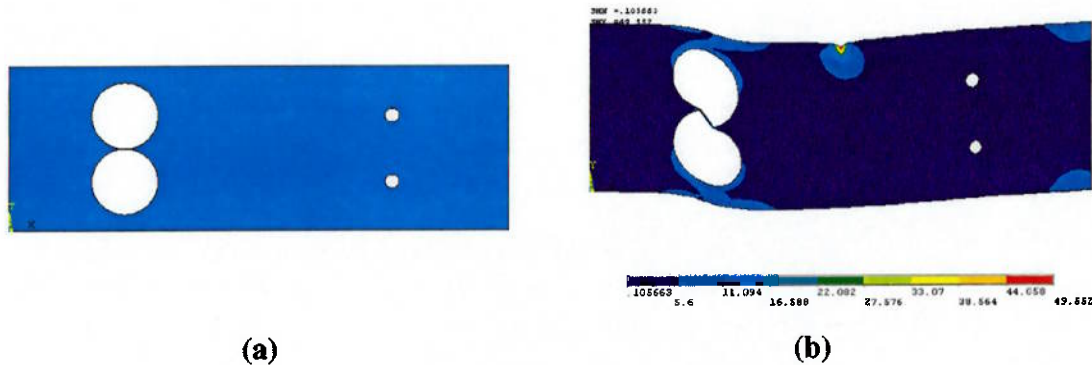


Figura 9.29: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.19 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	9,983
círculo 2	raio (mm)	9,983
círculo 3	raio (mm)	2,019
círculo 4	raio (mm)	2,234
tensão	Von Mises (MPa)	49,55
função objetivo	-1.E-03	0,19475

A figura abaixo mostra a tendência da função objetivo frente às variações dos parâmetros de entrada e das restrições. Observa-se que há um declínio significativo do valor da função objetivo quando os parâmetros $R3$ e $R4$ diminuem e $R1$ e $R2$ aumentam.

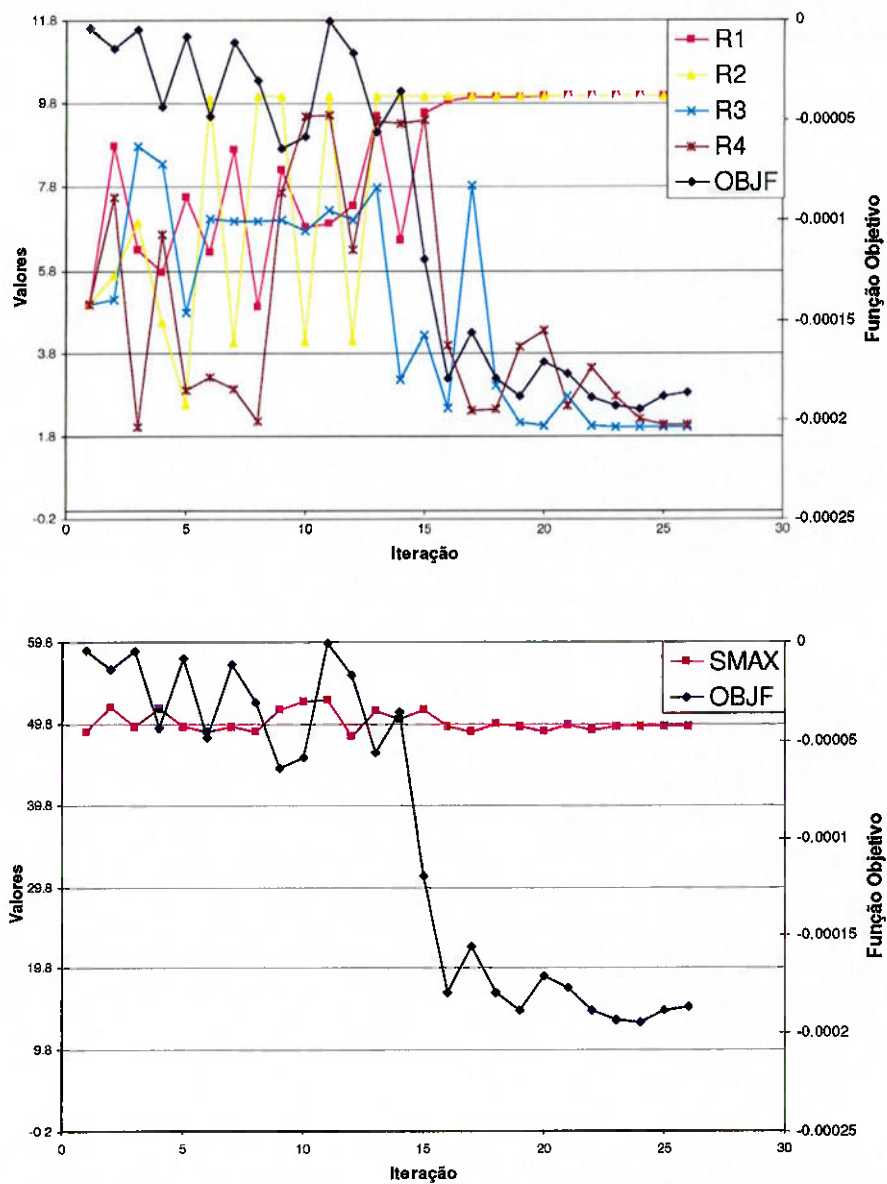


Figura 9.30: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.2.2 Segunda Estrutura – Cinco Círculos

Após analisar os resultados obtidos para a estrutura anterior e analisando as concentrações de tensão (Von Mises) observou-se que há excesso de rigidez no interior da célula. Deste modo a inserção de um furo circular na região central da peça é uma alternativa plausível para se obter uma melhor otimização.

O aspecto inicial da otimização, os valores dos parâmetros iniciais e a solução do processo de otimização estão mostrados nas figuras e tabelas abaixo.

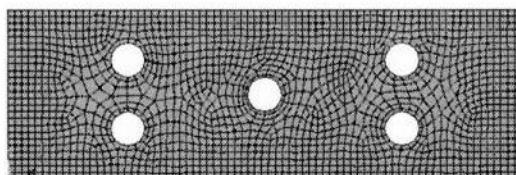


Figura 9.31: Estrutura inicial

Tabela 9.20 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 2	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 3	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 4	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
círculo 5	x centro (mm)	75	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	5	20	2
extensômetro 1	x (mm)	35	-	-
extensômetro 2	x (mm)	115	-	-
extensômetro 3	x (mm)	115	-	-
extensômetro 4	x (mm)	35	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

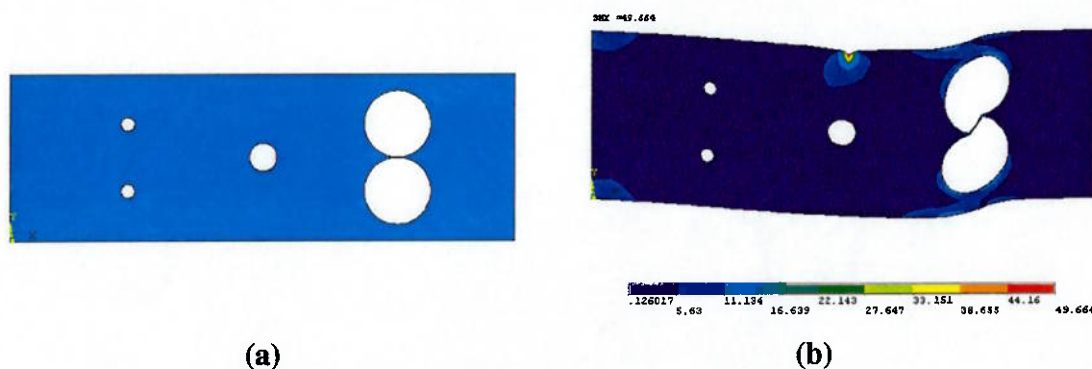


Figura 9.32: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.21 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	2,032
círculo 2	raio (mm)	2,100
círculo 3	raio (mm)	9,984
círculo 4	raio (mm)	9,983
círculo 5	raio (mm)	4,036
tensão	Von Mises (MPa)	49,73
função objetivo	-1.E-03	0,1952

Comparando-se o valor da função objetivo para este caso com o obtido anteriormente, espera-se que a inserção de um furo no interior da estrutura influencie na obtenção do resultado. Porém a influência foi pouco significativa no resultado como pode ser visto na figura abaixo.

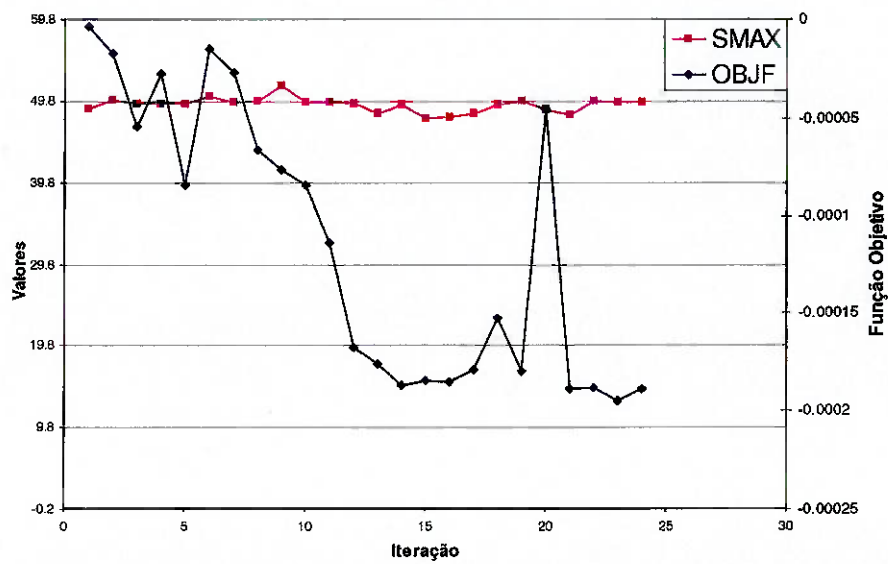
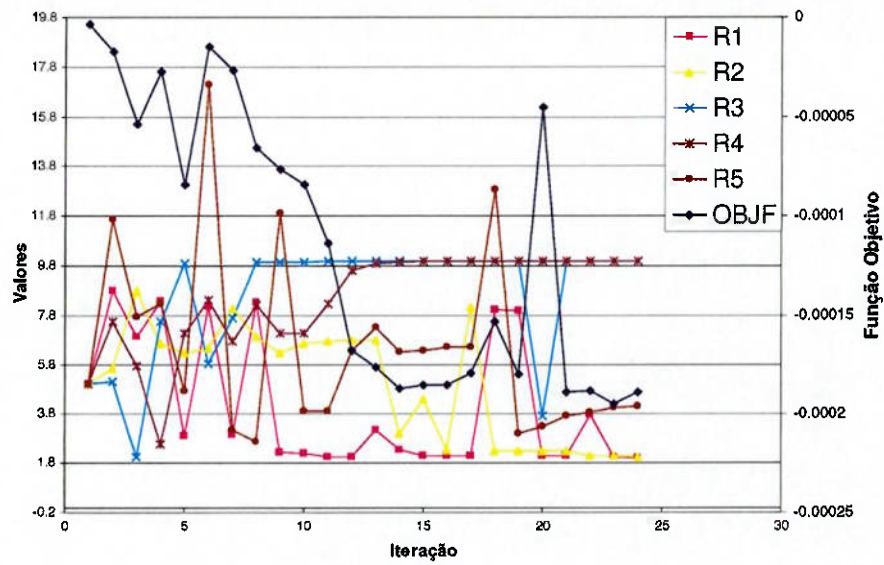


Figura 9.33: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.2.3 Segunda Estrutura – Dois Círculos e Um Oblongo

Baseando-se em uma das melhores soluções para a primeira estrutura, optou-se por simular uma estrutura semelhante à apresentada no item 9.1.7.

Apesar das diferenças entre as condições de contorno, uma vez que a ponte de Wheatstone apresenta a mesma disposição, é natural imaginar que uma mesma solução possa ser satisfatória para ambos os casos.

Abaixo são apresentados os parâmetros de entrada e os resultados obtidos.

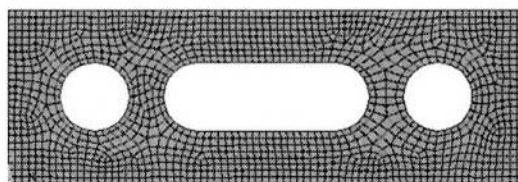
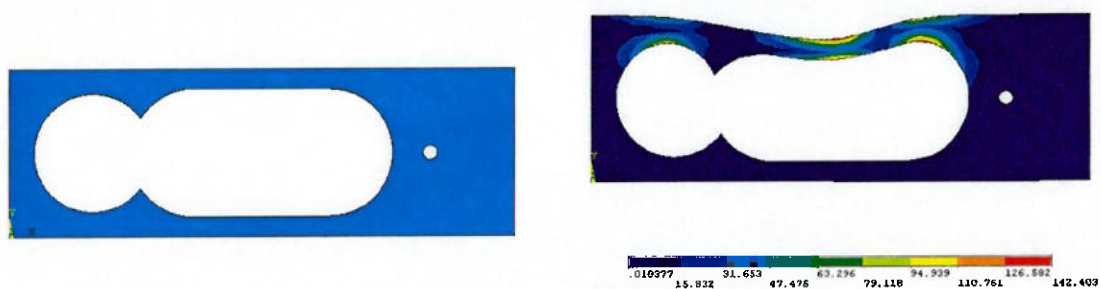


Figura 9.34: Estrutura inicial

Tabela 9.22 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	25	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
círculo 2	x centro (mm)	125	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
oblono	x centro (mm)	55	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
	x centro (mm)	95	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	raio (mm)	10	20	2
extensômetro 1	x (mm)	25	-	-
extensômetro 2	x (mm)	125	-	-
extensômetro 3	x (mm)	125	-	-
extensômetro 4	x (mm)	25	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

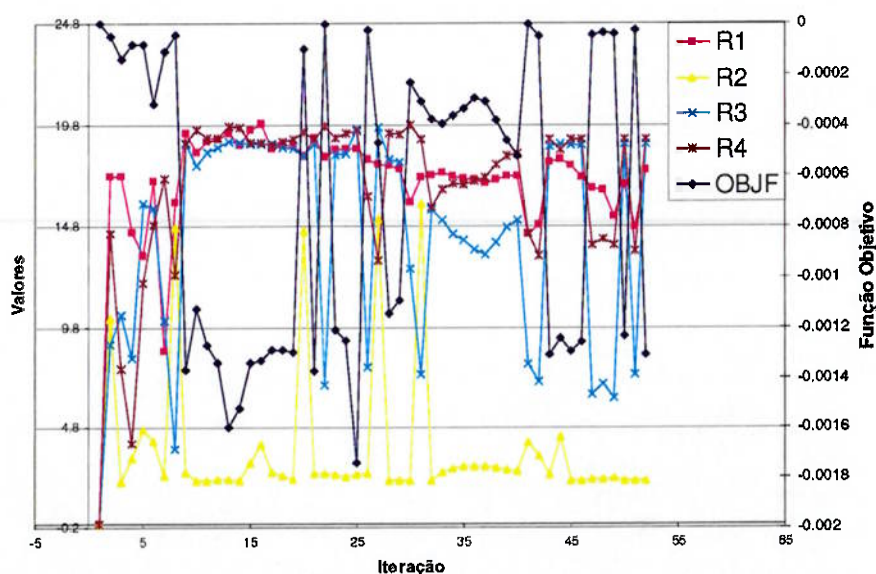


(a) (b)
Figura 9.35: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.23 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
círculo 1	raio (mm)	19,138
círculo 2	raio (mm)	2,4874
oblongo	raio (mm)	18,822
	raio (mm)	19,055
tensão	Von Mises (MPa)	146,44
função objetivo	-1.E-03	1,3726

Os melhores valores encontrados para a função objetivo tiveram sua tensão máxima superior ao limite imposto, como pode ser visto na figura 9.36. Desse modo o valor da função objetivo não é o melhor encontrado durante a otimização.



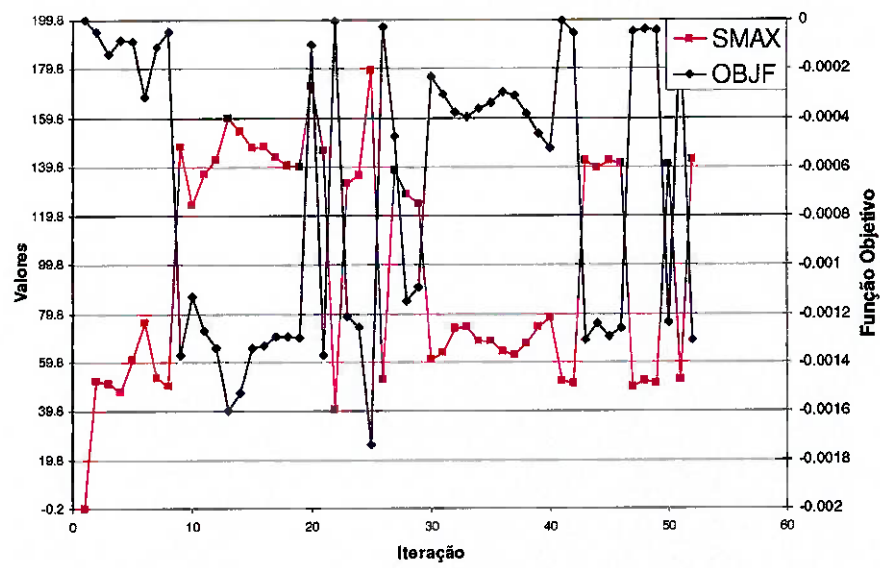


Figura 9.36: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.2.4 Segunda Estrutura – Dois Oblongos e Um Retângulo Simétricos

Assim como no caso dos quatro círculos tentou-se explorar a influência de cada um dos extensômetros no resultado da função objetivo, alterando-se individualmente a rigidez da estrutura.

Além disso, essa otimização é a primeira de uma série que estuda a influência da simetria no valor da função objetivo.

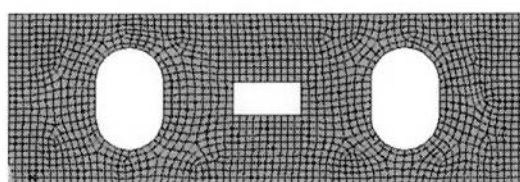


Figura 9.37: Estrutura inicial

Tabela 9.24 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
oblongo 1	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	30	-	-
	raio (mm)	10	15	2
	x centro (mm)	35	-	-
	y centro (mm)	20	-	-
	raio (mm)	10	15	2
oblongo 2	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	30	-	-
	raio (mm)	10	15	2
	x centro (mm)	115	-	-
	y centro (mm)	20	-	-
	raio (mm)	10	15	2
retângulo	x centro (mm)	75	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	altura (mm)	10	20	2
	comprimento (mm)	20	80	2
extensômetro 1	x (mm)	35	-	-
extensômetro 2	x (mm)	115	-	-
extensômetro 3	x (mm)	115	-	-
extensômetro 4	x (mm)	35	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

O resultado da otimização está apresentado abaixo juntamente com os valores dos parâmetros obtidos.

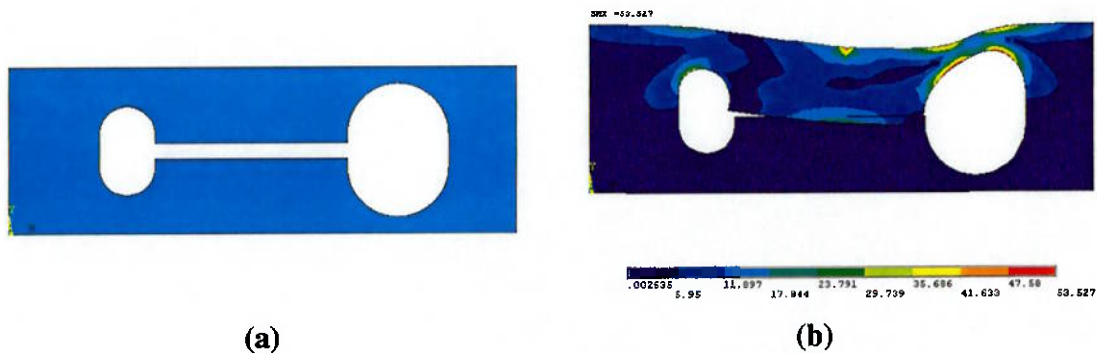


Figura 9.38: (a) Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.25 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
oblongo 1	raio (mm)	8,386
	raio (mm)	8,386
oblongo 2	raio (mm)	14,970
	raio (mm)	14,970
retângulo	altura (mm)	3,407
	comprimento (mm)	78,570
tensão	Von Mises (MPa)	53,70
função objetivo	-1.E-03	1,0570

Podemos concluir analisando-se a figura 9.39 que para um melhor resultado da função objetivo é necessário que o comprimento do retângulo $W3$, seja grande o suficiente para unir os dois furos oblongos.

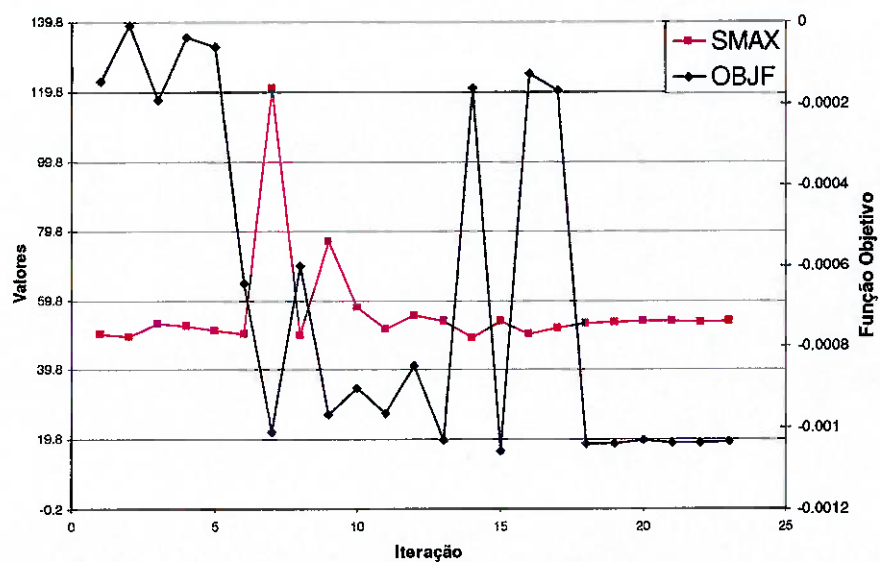
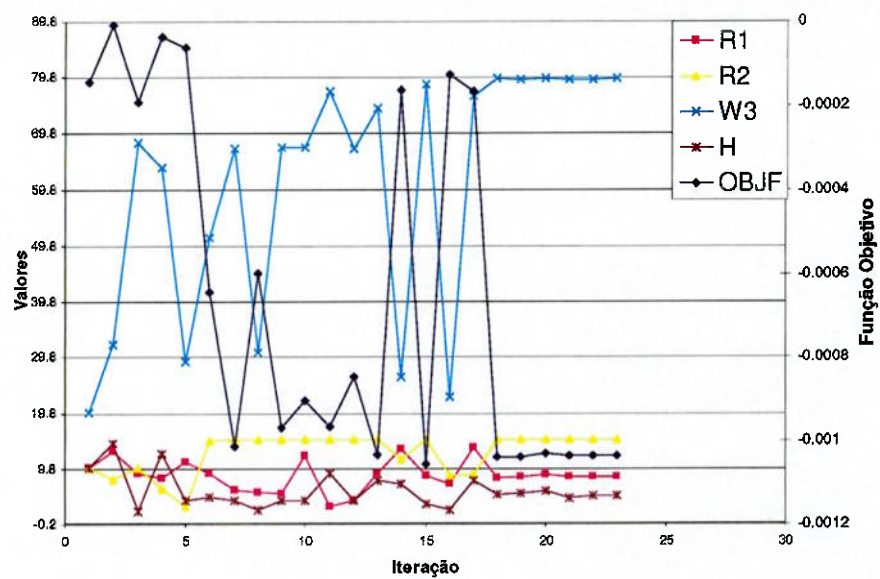


Figura 9.39: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.2.5 Segunda Estrutura – Dois Oblongos e Um Retângulo Assimétricos

A partir de uma simples análise do comportamento de um bloco retangular engastado em ambos os lados e sujeito a um carregamento semelhante ao da segunda estrutura, nota-se que a distribuição das forças de tração e compressão nas faces superior e inferior ocorre de forma repetitiva, ao contrário do que ocorre com a primeira estrutura.

Essa distribuição pode ser dividida em 4 regiões, como é mostrado na figura 9.40.

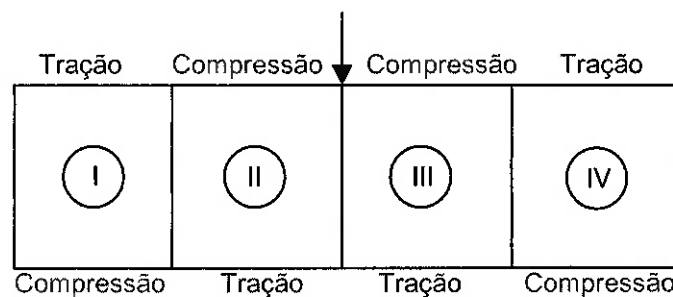


Figura 9.40: Regiões de tração e compressão da estrutura

Observando a expressão da função objetivo (equação 9.2) nota-se que os extensômetros 1 e 3 tem seus efeitos somados, assim como o do 2 e 4. Entretanto, esses valores se subtraem. Conclui-se então que para maximizar a resposta da célula de carga é ideal obter um mesmo sentido de tração ou compressão nos pares (1,3) e (2,4).

Devido à simetria da estrutura em relação ao eixo central, podem-se obter duas combinações:

- Par (1,3) na região I e par (2,4) na região III;
- Par (1,3) na região II e par (2,4) na região IV.

É interessante perceber que os deslocamentos do extensômetro 1 é praticamente igual ao deslocamento do extensômetro 2 se ambos estiverem a mesma distância do ponto de aplicação da força. O mesmo ocorre com os extensômetros 3 e 4. Logo, o valor resultante da função objetivo é nulo.

Portanto, quanto maior a distância do extensômetro da faixa de transição, maior é a magnitude do alongamento provocado. A figura 9.41 mostra a distribuição da tensão na superfície superior da estrutura.

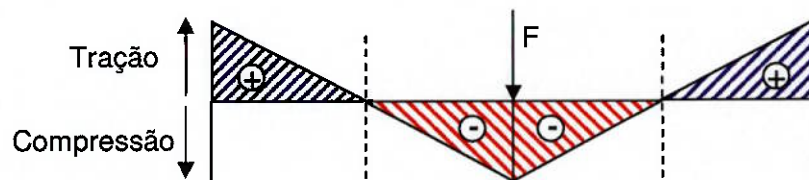


Figura 9.41: Distribuição de tensão na superfície superior da estrutura

Para esta análise foi escolhido o primeiro caso, deslocando-se ao máximo os extensômetros da faixa de transição, e os resultados encontram-se abaixo.

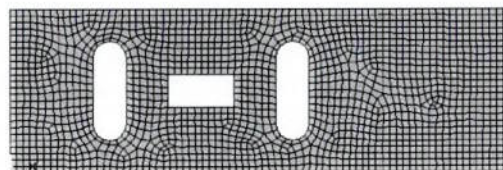


Figura 9.42: Estrutura inicial

Tabela 9.26 – Variáveis de projeto de entrada da otimização

	parâmetro	valor	máximo	mínimo
oblongo 1	x centro (mm)	30	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
	x centro (mm)	30	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	10	10	2
	comprimento (mm)	20	-	-
oblongo 2	x centro (mm)	85	-	-
	y centro (mm)	35	-	-
	raio (mm)	5	10	2
	x centro (mm)	85	-	-
	y centro (mm)	15	-	-
	raio (mm)	5	10	2
	comprimento (mm)	20	-	-
retângulo	x centro (mm)	57,5	-	-
	y centro (mm)	25	-	-
	altura (mm)	10	40	2
	comprimento (mm)	20	55	2
extensômetro 1	x (mm)	30	-	-
extensômetro 2	x (mm)	85	-	-
extensômetro 3	x (mm)	85	-	-
extensômetro 4	x (mm)	30	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	150	1

O resultado da otimização está apresentado abaixo juntamente com os valores dos parâmetros obtidos.

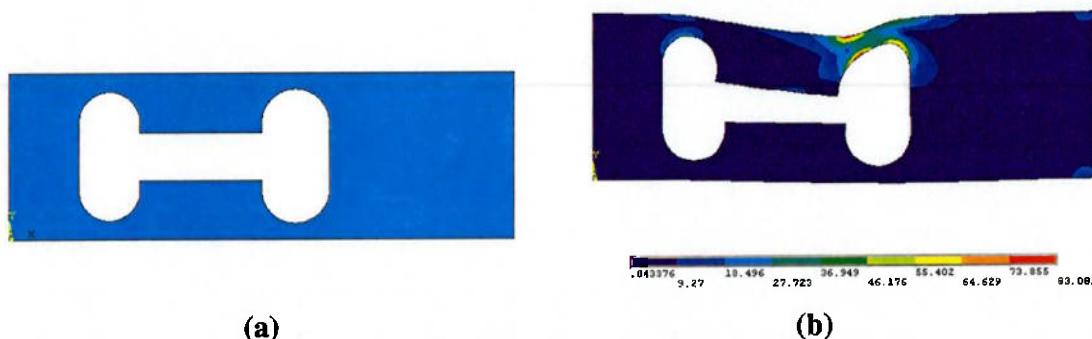
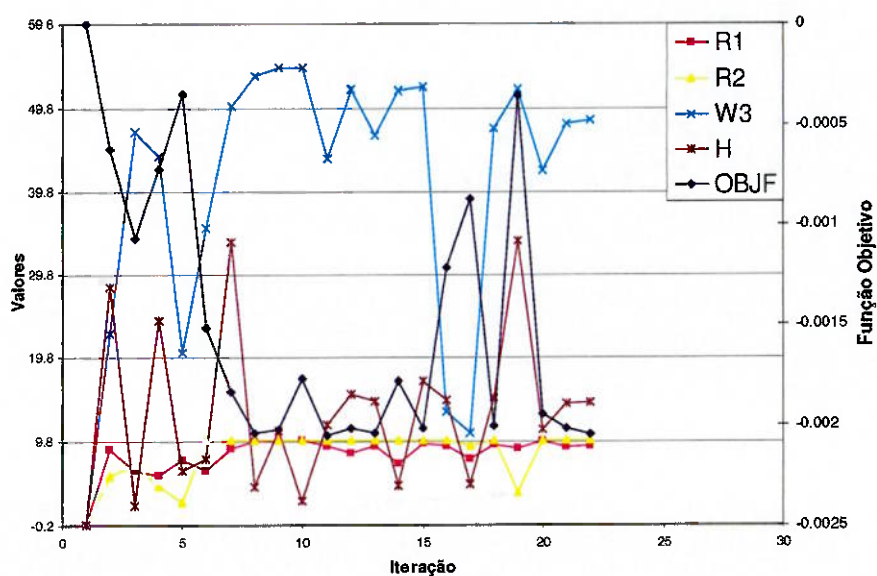


Figura 9.43: Aspecto final; (b) Tensão de Von Mises

Tabela 9.27 – Resultado das variáveis de projeto

	parâmetro	valor
oblongo 1	raio (mm)	9,245
	raio (mm)	9,245
oblongo 2	raio (mm)	9,983
	raio (mm)	9,983
retângulo	altura (mm)	11,777
	comprimento (mm)	43,809
tensão	Von Mises (MPa)	82,94
função objetivo	-1.E-03	2,0523

Observa-se do gráfico abaixo que a função objetivo é fortemente influenciada pela altura H , sendo que os melhores resultados são obtidos para baixos valores de H e altos comprimentos do furo retangular.



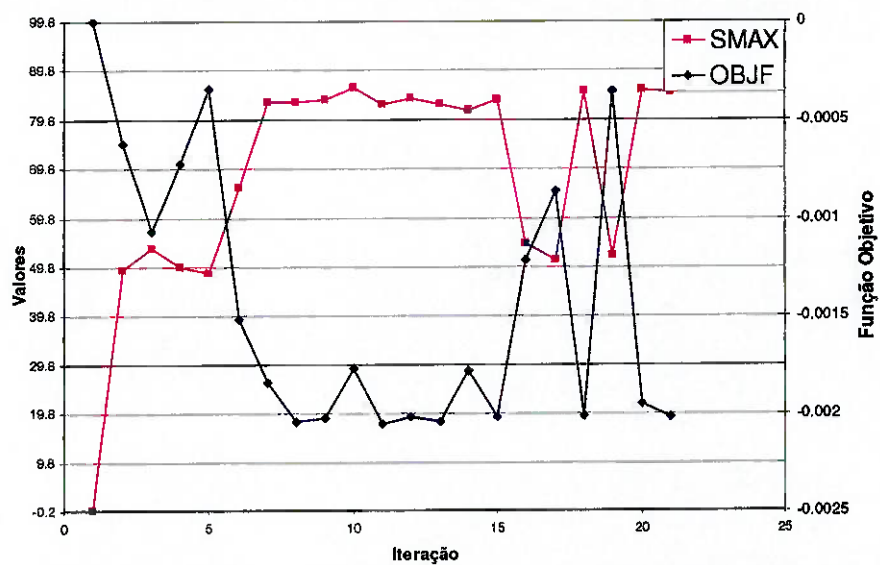


Figura 9.44: Gráficos da função objetivo e restrições X nº de iterações

9.3 Análise dos Resultados

Com base nas otimizações obtidas, pode-se notar que há grande diferença entre os valores obtidos para a função objetivo em cada uma das configurações adotadas. Esses valores variaram de aproximadamente $0,11 \cdot 10^{-2}$ a $1,16 \cdot 10^{-2}$ para a primeira estrutura e $0,195 \cdot 10^{-4}$ a $2,05 \cdot 10^{-3}$ para a segunda, sendo que o número de iterações para que ocorresse a convergência variou de caso para caso.

Para a construção dos protótipos serão escolhidas as duas melhores configurações para a primeira estrutura e apenas a melhor para a segunda.

No primeiro caso foram escolhidas as configurações:

- 2 círculos e 1 retângulo, com valor da função objetivo igual a $1,16 \cdot 10^{-2}$;
- 2 círculos e 1 oblongo, com valor da função objetivo igual a $0,86 \cdot 10^{-2}$.

Já para o segundo caso a geometria escolhida foi a:

- 2 oblongos e 1 retângulo, com valor da função objetivo igual a aproximadamente $2,05 \cdot 10^{-3}$.

A partir das geometrias acima especificadas, serão realizadas novas otimizações com as mesmas dimensões da célula de carga comercial de referência com o intuito de determinar as dimensões dos furos das peças a serem construídas.

9.4 Otimização para Prototipagem

A célula de carga comercial disponível para testes é do tipo GL1 da ALFA Instrumentos.

Com o intuito de se comparar os valores de tensão da saída de cada célula, é imprescindível que as estruturas projetadas tenham as mesmas características da comercial tanto no quesito dimensão quanto no material a ser fabricado. Porém, para não correr risco de ruptura do protótipo, optou-se por seguir a limitação de tensão explicada no capítulo 8.2.

Uma vez que a escolha das estruturas já foi realizada, as otimizações apresentadas a seguir têm como objetivo a adequação das dimensões dos furos às novas dimensões do bloco inicial. Sendo assim, serão apenas apresentados os valores iniciais, as restrições e os resultados obtidos, pois as discussões dos resultados já foram realizadas em itens anteriores.

9.4.1 Primeiro Protótipo – Dois Círculos e Um Retângulo

Tabela 9.28 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização

	parâmetro	valor	final	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	20	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) R	5	9,7023	10	2
círculo 2	x centro (mm)	50	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) R	5	9,7023	10	2
retângulo	x centro (mm)	35	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	altura (mm) H	5	1,6917	20	2
	comprimento (mm) W	10	27,610	-	-
extensômetro 1	x (mm)	20	-	-	-
extensômetro 2	x (mm)	50	-	-	-
extensômetro 3	x (mm)	50	-	-	-
extensômetro 4	x (mm)	20	-	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	149,25	150	1
função objetivo	-1.E-02	-	0,38551	-	-

9.4.2 Segundo Protótipo – Dois Círculos e Um Oblongo

Tabela 9.29 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização

	parâmetro	valor	final	máximo	mínimo
círculo 1	x centro (mm)	20	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) RC	5	9,6968	10	2
círculo 2	x centro (mm)	50	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) RC	5	9,6968	10	2
oblongo	x centro (mm)	32,5	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) RO	10	7,9933	10	2
	x centro (mm)	37,5	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	raio (mm) RO	5	7,9933	10	2
extensômetro 1	x (mm)	20	-	-	-
extensômetro 2	x (mm)	50	-	-	-
extensômetro 3	x (mm)	50	-	-	-
extensômetro 4	x (mm)	20	-	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	148,94	150	1
função objetivo	-1.E-02	-	0,38313	-	-

9.4.3 Terceiro Protótipo – Dois Oblongos e Um Retângulo Assimétrico

Tabela 9.30 – Variáveis de projeto de entrada e valor final da otimização

	parâmetro	valor	final	máximo	mínimo
oblongo 1	x centro (mm)	15	-	-	-
	y centro (mm)	16	-	-	-
	raio (mm) RO1	2	1,984	10	2
	x centro (mm)	15	-	-	-
	y centro (mm)	6	-	-	-
	raio (mm) RO1	2	1,984	10	2
oblongo 2	x centro (mm)	40	-	-	-
	y centro (mm)	16	-	-	-
	raio (mm) RO2	2	4,121	10	2
	x centro (mm)	40	-	-	-
	y centro (mm)	6	-	-	-
	raio (mm) RO2	2	4,121	10	2
retângulo	x centro (mm)	27,5	-	-	-
	y centro (mm)	11	-	-	-
	altura (mm) H	2	1,0143	40	2
	comprimento (mm) W	10	23,712	55	2
extensômetro 1	x (mm)	15	-	-	-
extensômetro 2	x (mm)	40	-	-	-
extensômetro 3	x (mm)	40	-	-	-
extensômetro 4	x (mm)	15	-	-	-
tensão	Von Mises (MPa)	-	19,68	150	1
função objetivo	-1.E-04	-	0,4272	-	-

10. Construção de protótipos

10.1. Processo de fabricação

Definido o tipo de material a ser utilizado, neste caso o alumínio, para a construção dos protótipos deve-se atentar para o tipo de processo de usinagem a ser utilizado, pois, por ser uma célula de carga de pequenas proporções, a qualidade da usinagem deve estar compatível com a necessidade do projeto.

Os processos de usinagem utilizados em todas as células de carga consistiram em corte, fresamento, furação, rosqueamento e acabamento. Os desenhos de fabricação de cada uma das células estão apresentados no anexo B.

10.2. Extensômetros

Na construção dos protótipos foram utilizados extensômetros unidirecionais adquiridos da empresa Excel Sensores Ind. Com. Exp. LTDA. modelo PA-13-062AB-120L. Suas principais características estão apresentadas na tabela abaixo.

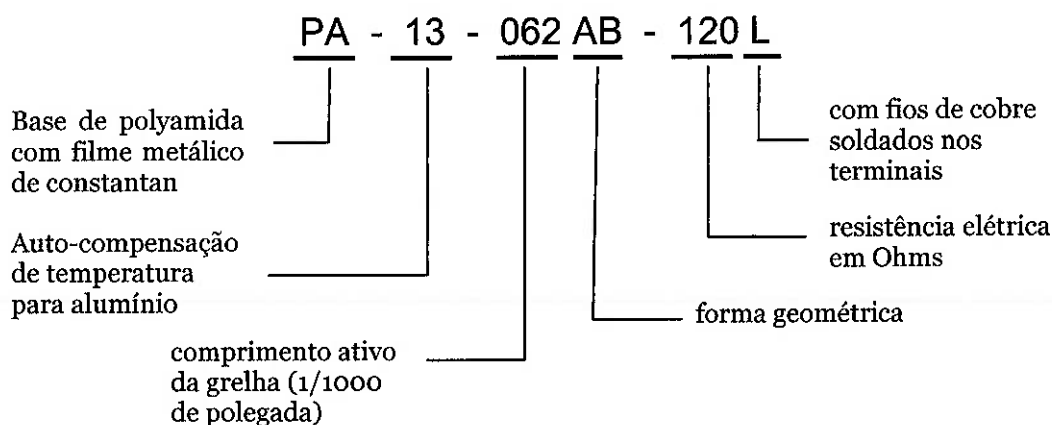


Figura 10.1: Características dos extensômetros

Tabela 10.1 – Dimensões dos extensômetros

Grelha		Total	
comprimento	largura	comprimento	largura
1,57 mm	1,57 mm	3,81 mm	1,57 mm

10.2.1 Colagem dos Extensômetros

Para a colagem dos extensômetros na célula de carga é necessário primeiramente preparar a região limpando-a com substâncias desengordurantes, com o intuito de se eliminar todo e qualquer resíduo que prejudique o funcionamento dos extensômetros. Recomenda-se a utilização de um algodão embebido em álcool isopropílico.

A secagem pode ser feita com qualquer tipo de pano limpo, ou no mesmo caso, utilizando-se um algodão seco.

O fabricante dos *strain gauges* recomenda a utilização de cola à base de cianoacrilato. Para os protótipos em questão será utilizado o Super Bonder®, por ser barata e fácil de ser encontrada.

Essas colas apresentam um endurecimento tão rápido que uma mera pressão na superfície do extensômetro com a ponta dos dedos é suficiente para completar o trabalho de colagem [1]. Sendo assim não há necessidade de se utilizar processos de cura e envelhecimento.

A colagem é simples e consiste em preencher o lado inferior dos extensômetros e a superfície da célula de carga com cola. Utilizando uma pinça, colocam-se os extensômetros na posição correta, alinhado com o eixo longitudinal, tomando o cuidado de manter os fios isolados e fora de contato com a estrutura.

Para garantir o sucesso do processo de colagem é necessário verificar o isolamento entre a superfície metálica da célula de carga e o extensômetro, através da medição da resistência elétrica entre eles, que deve ser maior que 100 MΩ [1].

Outro procedimento para verificar a qualidade da colagem consiste na verificação da leitura de saída do multímetro quando este é submetido a uma pressão homogênea. Usualmente utiliza-se uma placa de borracha, e posicionando-a em cima da área onde o extensômetro foi colado, faz-se uma pressão com a ponta dos dedos. Se a leitura ao variar não retornar à leitura inicial, há bolhas de ar entre o *strain gauge* e a superfície [1].

10.3 Construção de suporte

A finalidade dos suportes é assegurar uma perpendicularidade da célula de carga em relação à linha do horizonte, além de facilitar na medição dos esforços atuantes. A perpendicularidade garante que a célula estará sofrendo apenas esforços de flexão, e não de tração.

O projeto levou em conta a região de engastamento da célula de carga, cobrindo a região superior, onde se encontram as roscas de fixação, a extremidade lateral e a região inferior.

Foram construídos um total de 2 suportes, para o caso especial da segunda estrutura (duplo engastamento).

O material utilizado foi o aço, com o objetivo de minimizar as deformações do suporte, uma vez que a célula de carga exercerá uma força de flexão, quando estiver sendo carregada com os pesos.

O suporte consiste em três chapas dobradas em “L” nas quais duas delas são menores e fixam-se na maior por dois parafusos M5 (rosca métrica de 5 mm de diâmetro) cada.

A figura abaixo mostra a montagem do suporte na célula de carga.

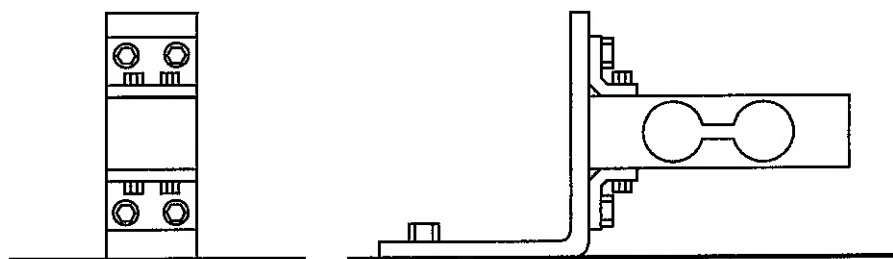


Figura 10.2: Suporte de célula de carga para o engastamento simples

10.4 Protótipos

A seguir são apresentados os protótipos construídos, a placa de aquisição e o suporte das células de carga. Neste estágio, os protótipos já possuem os extensômetros colados e ligados conforme explicitado no capítulo 9. Além disso são mostradas a placa de aquisição com o transformador já conectado e os dois diferentes tipos de suporte utilizados.



Figura 10.3: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo

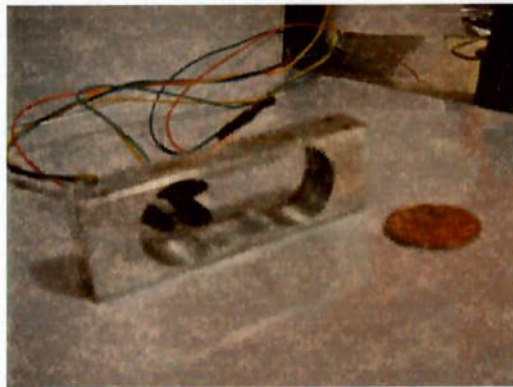


Figura 10.4: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo

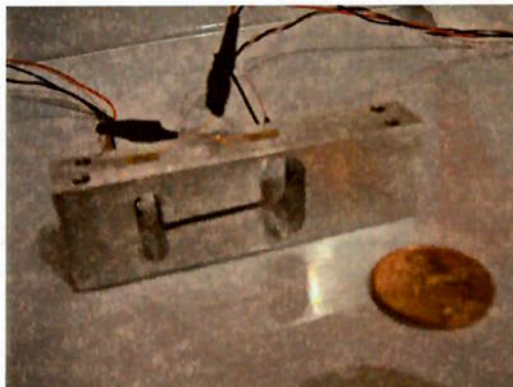


Figura 10.5: Célula de carga 2 círculos e 1 retângulo



Figura 10.6: Placa de aquisição de sinal

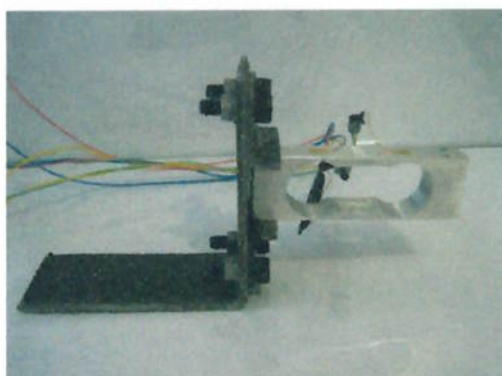


Figura 10.7: Suporte de célula de carga para o engastamento simples

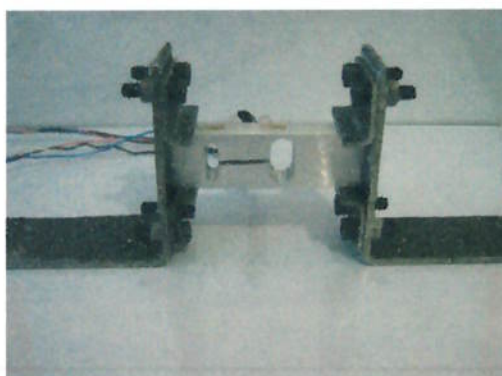


Figura 10.8: Suporte de célula de carga para o engastamento duplo

11. Testes

11.1 Aquisição dos dados

Para a aquisição do sinal de saída fornecido pela célula de carga será utilizada uma placa de circuito impresso (anexo A) que irá amplificar o sinal de saída dos extensômetros. Além disso, esta placa é responsável pela alimentação de energia da ponte de Wheatstone. A calibração é feita pelo ajuste dos potenciômetros de duas maneiras:

- Tara do valor da tensão inicial, dado por dois potenciômetros, um de ajuste fino e outro grosso;
- Ajuste do ganho, dado por um terceiro potenciômetro.

A alimentação da placa é dada por um transformador que converte a tensão da rede elétrica convencional para $\pm 12V$.

Como a saída da placa é dada por um único fio, a tensão resultante será dada pela diferença entre esta saída e o terra de entrada, medida por um multímetro digital.

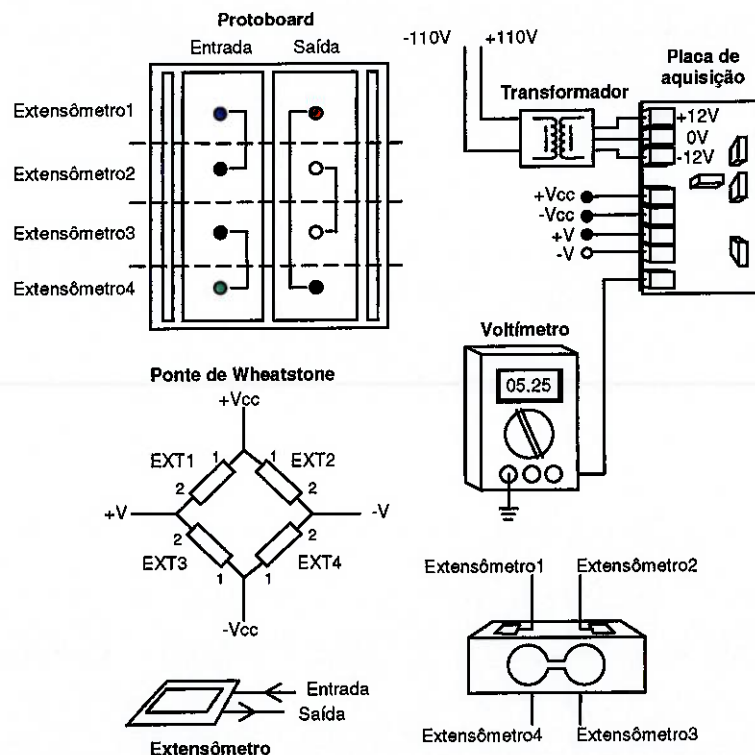


Figura 11.1: Esquema elétrico utilizado na aquisição de dados

11.2 Procedimento

A tomada de medidas se inicia pela montagem da célula de carga no suporte, de acordo com o tipo da estrutura. A próxima etapa consiste em conectar os fios referentes a ponte de Wheatstone na entrada da placa e os fios vindos do transformador na entrada de alimentação.

O ensaio é feito aumentando-se gradativamente a massa presa à célula de carga e medindo-se o valor da tensão resultante de sua deformação. Essa massa deve ser presa respeitando o centro longitudinal da peça, para que não ocorra torção em torno do eixo x – eixo referente na figura 7.1.

11.3 Resultados – Primeira Estrutura

Após a realização de 13 medições para cada uma das estruturas ensaiadas obteve-se como resultado da saída da ponte a tabela 11.1.

Tabela 11.1 – Resultado das medições finais para primeira estrutura

	massa (g)	tensão medida (V)		
		comercial	2 círculos 1 retângulo	2 círculos 1 oblongo
1	5,29	0,10	0,03	0,02
2	26,2	0,51	0,14	0,13
3	49,67	0,96	0,28	0,22
4	97,91	1,88	0,55	0,43
5	193,69	3,72	1,04	0,84
6	299,08	5,75	1,60	1,29
7	395,18	7,59	2,12	1,70
8	496,58	9,52	2,66	2,12
9	600,66	11,52	3,20	2,57
10	713,42	13,68	3,76	3,08
11	797,21	15,29	4,16	3,40
12	899,77	17,26	4,72	3,88
13	943,4	18,10	4,99	4,08

Como pode ser melhor observado no gráfico abaixo, tanto a célula de carga comercial quanto os protótipos construídos apresentaram elevado grau de linearidade, provando a eficácia do processo de colagem dos extensômetros. O parâmetro que define o grau de linearidade é o *R-quadrado*, que nada mais é do que a proporção entre a variância no eixo y atribuída à variância do eixo x. Quanto mais próximo o valor de 1, maior é a linearidade.

Além disso, percebe-se que o resultado obtido no teste da célula de carga 2 círculos 1 retângulo é ligeiramente melhor do que o obtido com a célula 2 círculos 1 oblongo. Isso mostra que o processo de otimização produziu um resultado coerente, uma vez que esta diferença já foi apresentada nos resultados da simulação computacional.

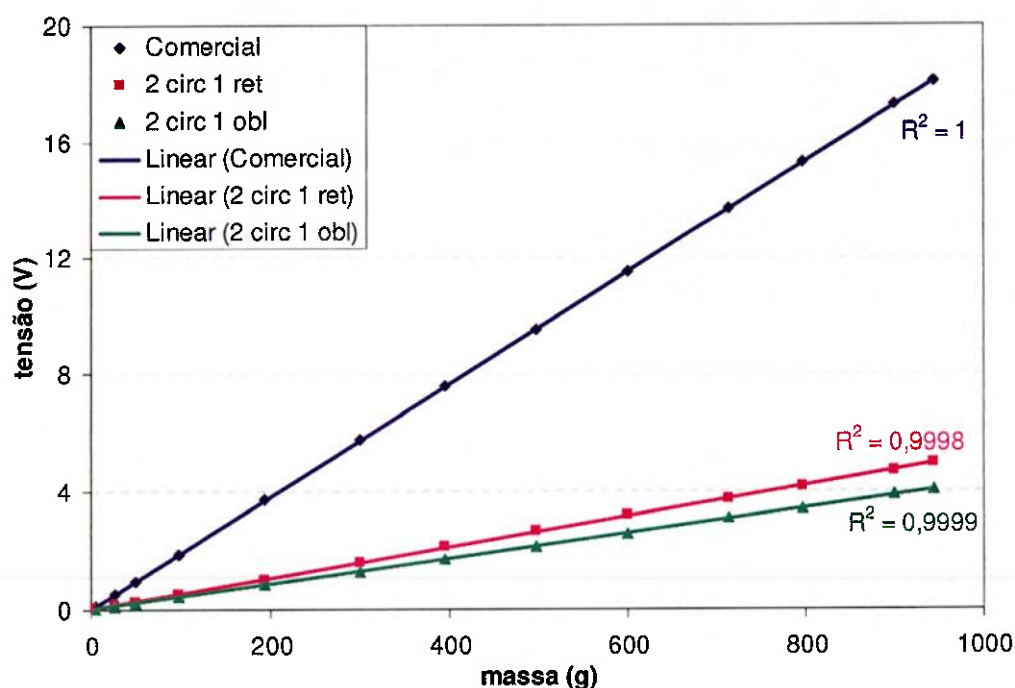


Figura 11.2: Gráfico dos resultados finais para a primeira estrutura

Porém, se compararmos estes resultados com o obtido no ensaio da célula comercial, os protótipos apresentaram uma eficiência muito inferior, o que já era esperado devido à diferença de tensão máxima utilizada no processo de otimização.

11.4 Resultados – Segunda Estrutura

Foram realizadas novamente 13 medições para a célula de carga assimétrica e seu resultado pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 11.2 – Resultado das medições finais para segunda estrutura

	massa (g)	tensão medida (V)
1	5,29	0,002
2	26,2	0,007
3	49,67	0,018
4	97,91	0,037
5	193,69	0,070
6	299,08	0,110
7	395,18	0,143
8	496,58	0,183
9	600,66	0,215
10	713,42	0,256
11	797,21	0,289
12	899,77	0,326
13	943,4	0,344

Observando-se os valores obtidos para este ensaio nota-se que a ordem de grandeza é muito inferior àquela obtida no ensaio anterior. Essa diferença é coerente com os valores obtidos através das otimizações, uma vez que o duplo engastamento permite menor mobilidade dos nós referentes aos extensômetros da estrutura.

Assim como no caso anterior o grau de linearidade dos resultados da ponte de Wheatstone é elevado ($R^2 = 0,9998$), como pode ser observado no grafico abaixo.

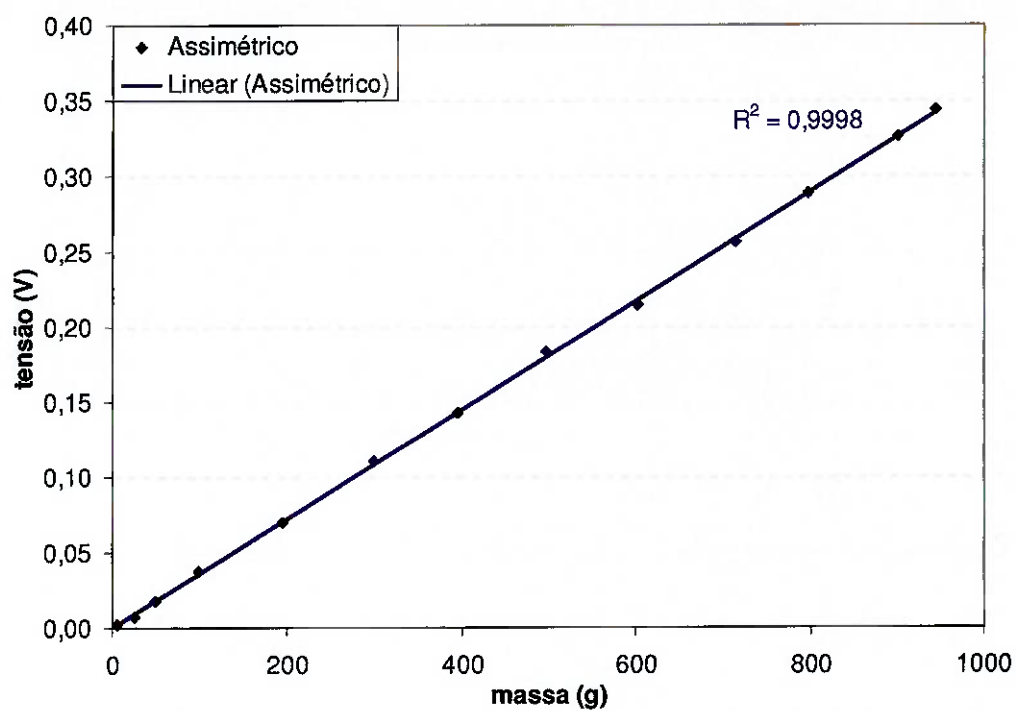


Figura 11.3: Gráfico dos resultados finais para a segunda estrutura

12. Conclusão

O processo de otimização, seja ela paramétrica, de forma ou topológica, é fundamental para o desenvolvimento de um bom projeto, ou seja, competitivo, de baixo custo e inovador.

Diversas são as etapas para se obter a estrutura otimizada, dentre elas podemos destacar: a criação de diversas geometrias novas e outras baseadas em células já existentes, a otimização computacional, a seleção dos melhores resultados e dependendo da necessidade a realização de novas otimizações para adequação das variáveis.

Entretanto ficou comprovado que somente a otimização computacional não é suficiente para garantir o sucesso do projeto, necessitando-se também, de experiência para a determinação dos parâmetros da otimização (inclui-se aqui o coeficiente de segurança, posicionamento dos extensômetros, distribuição dos furos iniciais, etc.).

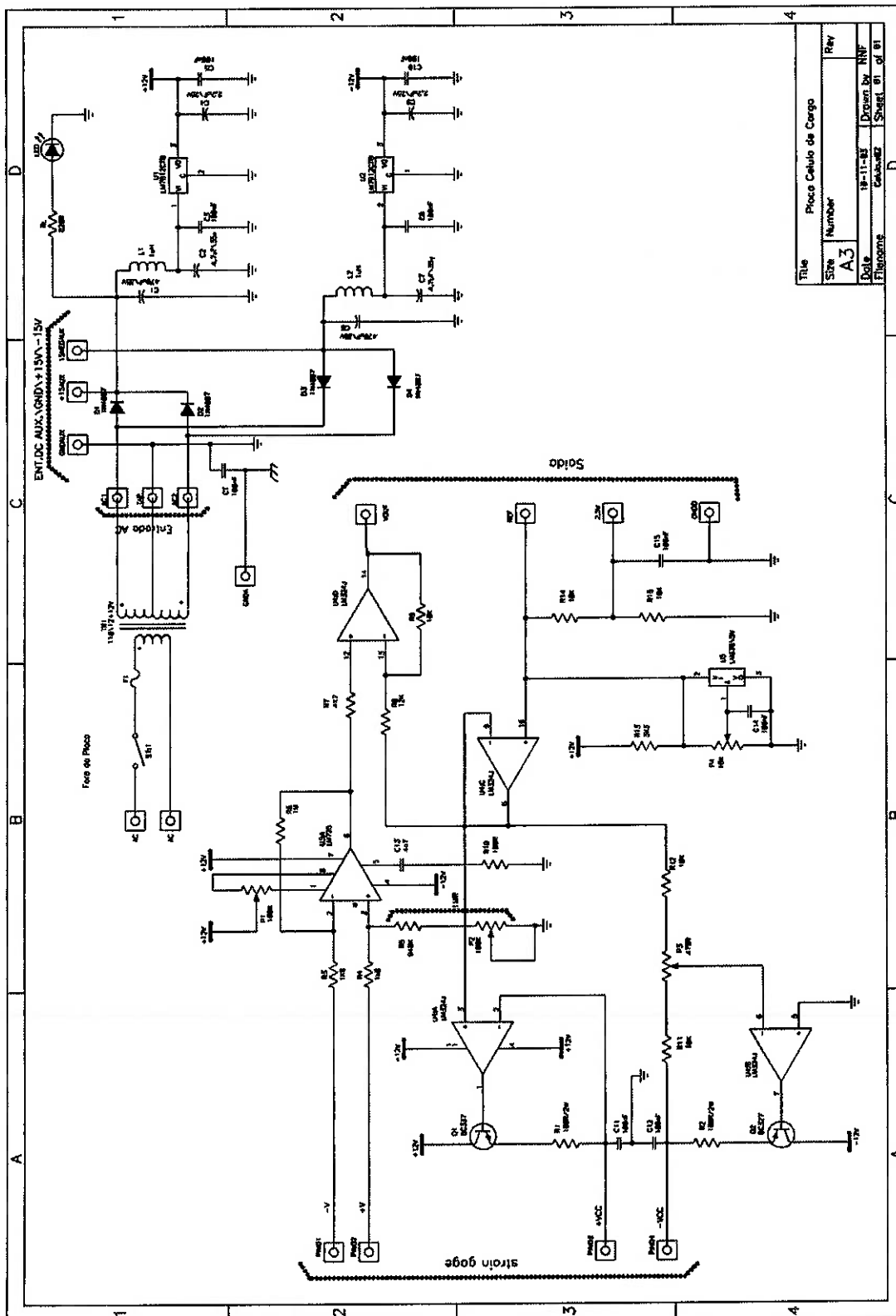
Através de comparação dos resultados da otimização da célula de carga da ALFA Instrumentos, pode-se afirmar que o projeto de otimização desenvolvido funciona e pode ser utilizado no projeto de outras células.

13. Bibliografia

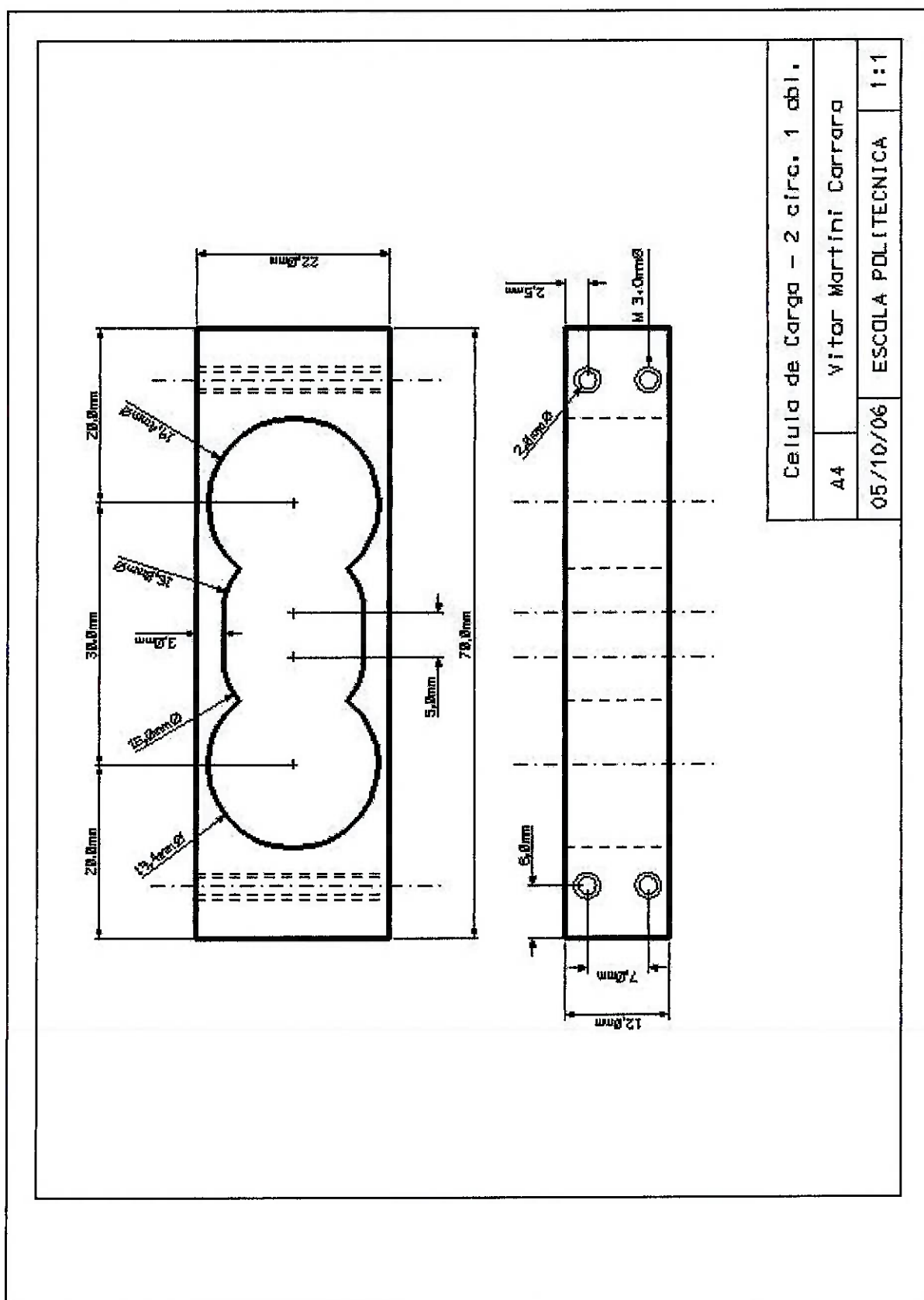
- [1] ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria Básica**, Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2004.
- [2] REGGIANE, L. P. **Célula de carga para matrizes de hidroconformação**, Produção em Iniciação Científica da EPUSP, 2002.
- [3] Balanças Saturno. Apresenta uma introdução à célula de cargas, junto com especificações técnicas e modelos. Disponível em: <<http://www.saturno.ind.br/HConteudo.aspx?33,28,Conteudo>>. Acessado em 20/03/2006.
- [4] Med Center Odontologia. Apresenta a utilização de extensômetros na área de saúde, mais especificamente na higiene bucal. Disponível em <<http://www.odontologia.com.br/artigos.asp?id=123&idesp=12&ler=s>>. Acessado em 20/03/2006.
- [5] Otimização de estruturas Inteligentes. Apresenta um resumo sobre otimização topológica aliada ao método de Elementos Finitos. Disponível em: <<http://www.pmr.poli.usp.br/lsat/estruturas/estruturas.htm>>. Acessado em 25/03/2006.
- [6] OMEGA Engineering Technical Reference. Apresenta fundamentação teórica a respeito de células de carga e extensômetros. Disponível em: <<http://www.omega.com>>. Acessado em: 05/04/2006.
- [7] Sensorland. Apresenta tipos de células de carga. Disponível em: <<http://www.sensorland.com>>. Acessado em: 07/04/2006.
- [8] ALFA Instrumentos. Fabricante de diversos tipos de células de carga. Disponível em <<http://www.alfainstrumentos.com.br>>. Acessado em: 25/04/2006.

- [9] PCE engenharia LTDA. Empresa de Simulações Numéricas. Apresenta metodologia de pré-processamento. Disponível em <<http://www.pce.com.br/>>. Acessado em: 27/06/2006.
- [10] PHAN, A. V. **ANSYS TUTORIAL**, University of South Alabama. Disponível em: <http://www.southalabama.edu/engineering/mechanical/faculty/phan/ANSYS_ShapeOpt.pdf>. Acessado em: 07/07/2006.
- [11] ANSYS TUTORIAL. Design Optimization of a Plate with a Hole. Disponível em: <http://www.four-h.purdue.edu/ABE450/Extra%20Credit/design_optimization_tutorial_2005.doc>. Acessado em: 07/07/2006.
- [12] CHAO, L. P.; CHEN, K. T. **Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors**, Department of Mechanical Engineering, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, 1997.
- [13] KIM, J. H.; KANG, D. I.; SHIN, H. H.; PARK, Y. K. **Design and analysis of a column type multi-component force/moment sensor**, Division of Physical Metrology/Mass and Force Group, Daejeon, South Korea, 2002.
- [14] SILVA, J. G.; CARVALHO, A. A.; SILVA, D. D. **A Strain Gauge Tactile Sensor for Finger-Mounted Applications**, IEEE transactions of Instrumentation and Measurement, Vol 51, nº 1, 2002.
- [15] JUVINAL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**, 3rd Edition, John Wiley and Sons Inc., 2000.

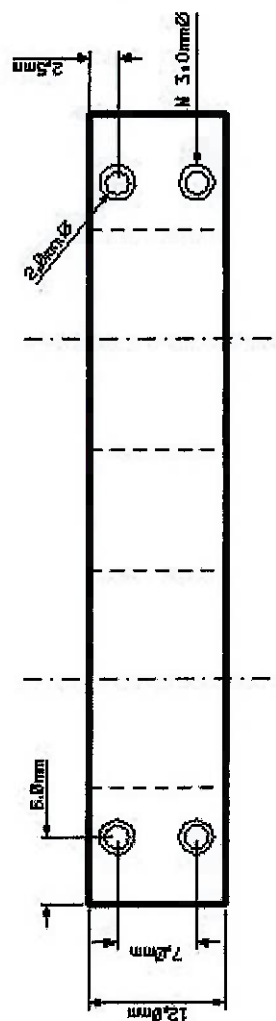
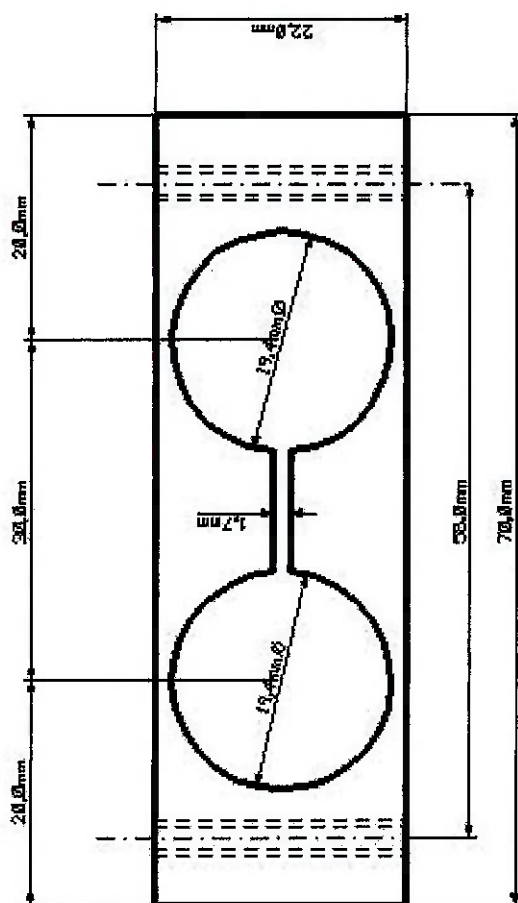
ANEXO A – Esquema Elétrico da Placa de Aquisição



ANEXO B – Desenhos de Fabricação



Celula de Carga - 2 circ. 1 dbl.		
A4	Vitor Martini Carrara	
05/10/06	ESCOLA POLITECNICA	1:1



Celula de carga - 2 oiro. 1 ret.

A4 Vitor Martini Carrara

05/10/06 ESCOLA POLITECNICA 1:1

ANEXO C – Programa para otimização no ANSYS

```
/GO
|*****
!set material properties
|*****
!set gauges' positions
EXT11=160
EXT12=159
EXT21=120
EXT22=119
EXT31=59
EXT32=60
EXT41=19
EXT42=20

/COM, Structural

/PREP7

!set element type
ET,1,PLANE42
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,3
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

!set real constants
R,1,1,

!set material properties
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,69000
MPDATA,PRXY,1,,0.33

|*****
!create variables
|*****
*Set, R1, 10
*Set, R2, 10

|*****
!construct the solid
|*****
!create one rectangle start at (0,0) 150 width 50 height
!and two circles (25,25) (125,25) radius R1 and R2
BLC4,0,0,150,50
CYL4,35,25,R1
CYL4,115,25,R2

!subtract the circles from the rectangle
ASBA,1, 2
ASBA,4, 3

|*****
!mesh the solid
|*****
ESIZE,2,0,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
```

```

CM,_Y,AREA
ASEL,,,1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y

AMESH,_Y1

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

!*****
!define loads
!*****
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,90
/GO
F,P51X,FY,-100

!*****
!solve
!*****
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE

!*****
!optimization parameters
!*****
/POST1
NSORT,S,EQV
*GET,SMAX,SORT, ,MAX

!set gauges' displacements
*SET,DISP1,UX(EXT12)-UX(EXT11)
*SET,DISP2,UX(EXT22)-UX(EXT21)
*SET,DISP3,UX(EXT32)-UX(EXT31)
*SET,DISP4,UX(EXT42)-UX(EXT41)

!set objective function
*SET, OBJF, -ABS(DISP1-DISP2+DISP3-DISP4)

!*****
!optimization process
!*****
/OPT
OPANL,'2circles','lgw',' '

OPVAR,R1,DV,2,20, ,
OPVAR,R2,DV,2,20, ,
OPVAR,SMAX,SV,1,150, ,
OPVAR,OBJF,OBJ, , ,.000000001

OPTHYPE,SUBP
OPSUBP,100,95,
OPEQN,0,0,0,0,0,

/AUTO,1
/REP,FAST
EPL0T

```