

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA
E DE SISTEMAS MECÂNICOS**

**Desenvolvimento de Software para Projeto de
Micro-manipuladores**

Thaís Felipelli

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

**São Paulo
2002**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA
E DE SISTEMAS MECÂNICOS**

**Desenvolvimento de Software para Projeto de
Micro-manipuladores**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia**

Thaís Felipelli

Orientador: Prof. Dr. Emilio Carlos Nelli Silva

**Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica**

**São Paulo
2002**

8,0

Emilio Carlos Nelli Silva

RESUMO

O intuito deste trabalho é o projeto de micro-manipuladores flexíveis. Atualmente, o projeto de MEMS está sendo pouco explorado em relação as demais áreas de desenvolvimento, o que motivou o trabalho. Mecanismos flexíveis são mecanismos fabricados em peça única, aproveitando-se de sua flexibilidade para realizar os pequenos deslocamentos desejados a partir de sua deformação.

No projeto deste micro-manipuladores foi utilizado um software de otimização topológica, que teve de ser inicialmente modificado para conter o modelo ótimo que pondera a flexibilidade e rigidez do mecanismo. Para tanto, foi realizado um estudo de todos os conceitos necessários no projeto como: MEF, dado que o domínio estendido fixo de projeto deve ser discretizado; otimização topológica, para a formulação da função multiobjetivo do problema; PLS, que resolve o problema da não linearidade da função objetivo; etc.

A partir daí, definidas as condições iniciais: domínio, carregamento, deslocamento desejado e pontos de fixação; foram realizadas inúmeras simulações através do software de OT a fim de encontrar as estruturas ótimas.

Com os resultados da otimização, fez-se a interpretação dos resultados obtidos para a estrutura ótima. É através da interpretação que se obtém o contorno final da estrutura.

Para completar o trabalho, os mecanismos foram fabricados, pelo processo de litografia. Anteriormente, para verificar o funcionamento do mecanismo de acordo com o especificado, foram realizados testes computacionais, através de uma nova malha de elementos sobre a estrutura interpretada e inserindo as condições de contorno. Após a fabricação, os mecanismos foram testados manualmente.

Palavras chave micro-manipuladores, MEMS, mecanismos flexíveis, otimização topológica (OT).

ABSTRACT

The intention of this work is the project of compliant micromanipulators. Currently, the MEMS project is being little explored in relation to much areas of development, what it motivated the work. Compliant mechanisms are mechanisms manufactured in only one part, using its flexibility to carry through the small displacements desired from its deformation.

In the project of these micromanipulators, a software of topology optimization was used, it had to be initially modified to contain the optimal model that ponders the flexibility and rigidity of the mechanism. To do so, a study was made of all the necessary concepts in the project as: MEF, since the extended fixed design domain must be divided in a mesh of finite elements; topology optimization method, for the formularization of the multiobjective function of the problem; PLS, that solves the problem of non linearity of the objective function; etc.

Then, defined the initial conditions: domain, forces applied, desired displacement and points of attachment; innumerable simulations through the TO software had been carried through in order to find the optimal structures.

With the results of the optimization, the interpretation of the results gotten for the optimal structure was done. It is through the interpretation that we get the final contour of the structure.

To complete the work, the mechanisms had been manufactured, with the lithography process. Previously, to verify the functioning of the mechanism in accordance with the specified one, computational tests had been carried through, through a new mesh of elements on the interpreted structure and inserting the contour conditions. After the manufacture, the mechanisms had been tested manually.

Key words micromanipulators, MEMS, compliant mechanisms, topology optimization (TO).

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 2 |
| 2.1 | Mecanismos Micro-eletromecânicos (MEMS) | 2 |
| 2.2 | Mecanismos Flexíveis | 5 |
| 2.2.1 | Introdução | 5 |
| 2.2.2 | Vantagens | 5 |
| 2.2.3 | Desvantagens | 6 |
| 2.2.4 | Micro-Atuadores flexíveis | 6 |
| 2.3 | Síntese Ótima com Modelos Contínuos | 7 |
| 2.3.1 | Introdução | 7 |
| 2.3.2 | Otimização Estrutural | 8 |
| 2.3.3 | Histórico da Otimização | 10 |
| 2.3.4 | Domínio estendido fixo de projeto | 11 |
| 2.3.5 | Modelo de Material | 12 |
| 2.3.6 | Modelos Contínuos | 13 |
| 2.3.7 | Análise Elastostática usando o Método de Elementos Finitos | 13 |
| 2.4 | Método de Elementos Finitos | 13 |
| 3 | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA PROJETO DE MICRO-ATUADOR FLEXÍVEL | 14 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.1 | Introdução | 14 |
| 3.2 | Os Conceitos de Flexibilidade e Rigidez | 15 |
| 3.3 | Formulação do Problema | 16 |
| 3.4 | A Função MultiObjetivo | 17 |
| 3.5 | Sensibilidades da Função Objetivo | 18 |
| 4 | IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA | 20 |
| 4.1 | Introdução | 20 |
| 4.2 | Implementação do MEF | 21 |
| 4.2.1 | Elemento isoparamétrico de quatro nós | 21 |
| 4.2.2 | Matriz de Rigidez | 22 |
| 4.3 | Implementação da PLS | 26 |
| 4.3.1 | PL | 26 |
| 4.4 | Implementação do Método de Otimização Topológica | 29 |
| 4.4.1 | Pré-processamento dos Dados | 30 |
| 4.4.2 | Processamento através do Software | 31 |
| 4.4.3 | Pós-Processamento dos Dados | 34 |
| 5 | SIMULAÇÃO E RESULTADOS | 35 |
| 5.1 | Introdução | 35 |
| 5.2 | Condições Iniciais de Projeto | 36 |
| 5.3 | Resultado da Otimização | 37 |
| 5.4 | Interpretação dos Resultados | 38 |
| 5.5 | Teste Computacional | 41 |
| 5.6 | Fabricação | 42 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.7 | Teste Físico | 44 |
| 5.8 | Resultados Finais | 45 |
| 5.8.1 | Garra 1 – força aplicada para a direita | 46 |
| 5.8.2 | Garra 1 – força aplicada para a esquerda | 50 |
| 5.8.3 | Garra 2 – força aplicada para baixo (fechando) | 53 |
| 5.8.4 | Garra 2 – força aplicada para cima (abrindo) | 57 |
| 5.8.5 | Garra 3 – força aplicada para a direita | 61 |
| 5.8.6 | Garra 3 – força aplicada para a esquerda | 66 |
| 6 | CONCLUSÃO | 71 |
| | LISTA DE REFERÊNCIAS | 72 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 2.1 – Microplaca atuada pelo SDA | 3 |
| Figura 2.2 – ‘Switch’ ótico 2x2 usando atuadores SCR e espelhos | 4 |
| Figura 2.3 – Micro-Atuadores Piezelétricos | 4 |
| Figura 2.4 – Mecanismo flexível em maior escala | 5 |
| Figura 2.5 – Procedimento típico de Projeto Estrutural por Otimização Topológica | 8 |
| a) Otimização Paramétrica | 9 |
| b) Otimização de Forma | 9 |
| c) Otimização Topológica | 10 |
| Figura 2.6 – Formas Clássicas de Otimização Estrutural | 10 |
| Figura 3.1 – Corpo elástico submetido a dois casos de tração | 16 |
| Figura 3.2 – Especificações para o projeto de uma estrutura flexível | 17 |
| Figura 4.1 – Elemento Quadrilátero | 21 |
| Figura 4.2 – Estado plano de tensão | 23 |
| Figura 4.3 – Elemento quadrilátero usando a formulação de problemas de tensão plana | 24 |
| Figura 4.4 – Fluxo de informações no software final | 30 |
| Figura 4.5 – Situações de carregamento para a entrada de dados | 31 |
| Figura 4.6 – Cabeçalho do código fonte do Software de Otimização | 32 |
| Figura 4.7 – Fluxo de Informações na rotina de MEF | 33 |
| Figura 4.8 – Esquema geral do funcionamento do software | 34 |
| Figura 5.1 – Garra 1, força F aplicada para a direita (garra1d) | 36 |
| Figura 5.2 – Topologia ótima da garra1d – malha pouco discretizada (247 elementos) | 37 |
| Figura 5.3 – Resultado final – Topologia ótima da garra1d (1551 elementos) | 38 |
| Figura 5.4 – Interpretação da garra1d feita no ANSYS | 39 |
| Figura 5.5 – Interpretação final da garra1d – atuação manual | 40 |
| Figura 5.6 – Interpretação final da garra1d – atuação piezelétrica | 40 |
| Figura 5.7 – Teste da garra1d – configuração deformada e não deformada | 41 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 5.8 – Teste da garra1d – tensão de Von Mises | 42 |
| Figura 5.9 – Peça fabricada por litografia – garra1d | 43 |
| Figura 5.10 – Peça fabricada por litografia – garra1d | 44 |
| Figura 5.11 – Peça afixada em acrílico para teste manual – garra1d | 45 |
| Figura 5.12 – Garra 1, força F aplicada para a direita (garra1d) | 46 |
| Figura 5.13 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra1d | 46 |
| Figura 5.14 – Interpretação da garra1d feita no ANSYS (contorno por linhas) | 47 |
| Figura 5.15 – Teste da garra1d – configuração deformada (azul) e não deformada | 47 |
| Figura 5.16 – Teste da garra1d – tensão de Von Mises | 48 |
| Figura 5.17 – Interpretação final da garra1d – atuação piezelétrica | 48 |
| Figura 5.18 – Interpretação final da garra1d – atuação manual | 49 |
| Figura 5.19 – Peça fabricada por litografia – garra1d | 49 |
| Figura 5.20 – Garra 1, força F aplicada para a esquerda (garra1e) | 50 |
| Figura 5.21 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra1e | 50 |
| Figura 5.22 – Interpretação da garra1e feita no ANSYS (contorno por linhas) | 51 |
| Figura 5.23 – Teste da garra1e – configuração deformada (azul) e não deformada | 51 |
| Figura 5.24 – Teste da garra1e – tensão de Von Mises | 52 |
| Figura 5.25 – Interpretação final da garra1e – atuação manual | 52 |
| Figura 5.26 – Peça fabricada por litografia – garra1e | 53 |
| Figura 5.27 – Garra 2, força F aplicada para baixo (garra2b) | 53 |
| Figura 5.28 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra2b | 54 |
| Figura 5.29 – Interpretação da garra2b feita no ANSYS (contorno por linhas) | 54 |
| Figura 5.30 – Teste da garra2b – configuração deformada (azul) e não deformada | 55 |
| Figura 5.31 – Teste da garra2b – tensão de Von Mises | 55 |
| Figura 5.32 – Interpretação final da garra2b – atuação piezelétrica | 56 |
| Figura 5.33 – Peça fabricada por litografia – garra2b | 56 |
| Figura 5.34 – Garra 2, força F aplicada para cima (garra2c) | 57 |
| Figura 5.35 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra2c | 57 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 5.36 – Interpretação da garra2c feita no ANSYS (contorno por linhas) | 58 |
| Figura 5.37 – Teste da garra2c – configuração deformada (azul) e não deformada | 58 |
| Figura 5.38 – Teste da garra2c – tensão de Von Mises | 59 |
| Figura 5.39 – Interpretação final da garra2c – atuação piezelétrica | 59 |
| Figura 5.40 – Fotolito utilizado na fabricação – garra 2c | 60 |
| Figura 5.41 – Peça fabricada por litografia – garra2c | 61 |
| Figura 5.42 – Peça fabricada por litografia – garra2c | 61 |
| Figura 5.43 – Garra 3, força F aplicada para a direita (garra3d) | 61 |
| Figura 5.44 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra3d | 62 |
| Figura 5.45 – Interpretação da garra3d feita no ANSYS (contorno por linhas) | 62 |
| Figura 5.46 – Teste da garra3d – configuração deformada (azul) e não deformada | 63 |
| Figura 5.47 – Teste da garra3d – tensão de Von Mises | 63 |
| Figura 5.48 – Interpretação final da garra3d – atuação manual | 64 |
| Figura 5.49 – Interpretação final da garra3d – atuação piezelétrica | 64 |
| Figura 5.50 – Peça fabricada por litografia – garra3d | 65 |
| Figura 5.51 – Peça fabricada por litografia – garra3d | 66 |
| Figura 5.52 – Garra 3, força F aplicada para a esquerda (garra3e) | 66 |
| Figura 5.53 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra3e | 66 |
| Figura 5.54 – Interpretação da garra3e feita no ANSYS (contorno por linhas) | 67 |
| Figura 5.55 – Teste da garra3e – configuração deformada (azul) e não deformada | 67 |
| Figura 5.56 – Teste da garra3e – tensão de Von Mises | 68 |
| Figura 5.57 – Interpretação final da garra3e – atuação manual | 68 |
| Figura 5.58 – Interpretação final da garra3e – atuação piezelétrica | 69 |
| Figura 5.59 – Peça fabricada por litografia – garra3e | 69 |
| Figura 5.60 – Peça fabricada por litografia – garra3e | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| Eq. | Equação |
| Fig. | Figura |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| MEMS | Microelectromechanical Systems |
| MOT | Método de Otimização Topológica |
| OT | Otimização Topológica |
| PL | Programação Linear |
| PLS | Programação Linear Seqüencial |
| DSPLP | Rotina de programação linear que usa o método de Karmakar |
| SIMPLX | Rotina de programação linear que usa o método Simplex |
| SIMP | Simple Isotropic Material with Penalization |
| ANSYS | Software Comercial de Elementos Finitos |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| ξ | Abscissa do sistema de coordenadas naturais do elemento |
| θ | Ângulo de rotação da microestrutura |
| A_e | Área do elemento |
| w | Coefficiente de atribuição de peso na função objetivo |
| a, b | Dimensões da microestrutura |
| ρ | Distribuição contínua de densidades |
| ρ_e | Densidade de cada elemento |
| ρ_i | Densidade do elemento i |
| Ω | Domínio estendido fixo de projeto |
| Λ_e | Energia elástica de deformação no elemento |
| $e(x)$ | Erro de linearização da série de Taylor |
| V | Espaço linear admissível |
| h_e | Espessura do elemento |
| p | Fator de penalidade das densidades intermediárias |
| $f(x)$ | Função linear |
| $F(x)$ | Função não-linear |
| F | Função objetivo do problema de otimização |
| g | Função qualquer |
| T | Índice de transposição de matriz ou vetor |
| x_i^{\min} | Limite móvel inferior da variável de projeto |
| x_i^{\max} | Limite móvel superior da variável de projeto |
| S | Matriz das funções de forma do elemento |
| $[B]$ | Matriz de operadores diferenciais dos polinômios bilineares |
| $[K]_e^0$ | Matriz de rigidez base do elemento |
| $[K]_e$ | Matriz de rigidez do elemento |
| $[K]$ | Matriz de rigidez global |
| J | Matriz jacobiana |
| E | Módulo de elasticidade |

| | |
|---------------|---|
| M | Número total de elementos finitos |
| N | Número total de graus de liberdade de deslocamento |
| η | Ordenada do sistema de coordenadas naturais do elemento |
| x | Posição no domínio |
| ν | Razão de Poisson |
| Ω_D | Região no domínio onde há material |
| C | Tensor constitutivo de elasticidade do material |
| C_0 | Tensor constitutivo de elasticidade do material base |
| ε | Tensor das deformações infinitesimais |
| A_n | Variável de projeto qualquer |
| v | Vetor dos deslocamentos nodais |
| σ | Vetor das tensões |
| t^k | Vetor de carregamento superficial |
| u | Vetor de deslocamentos |
| f | Vetor de forças externas aplicadas |
| V_e | Volume do elemento |
| Ω_s | Volume final de material desejado na estrutura |

1 INTRODUÇÃO

A finalidade desta pesquisa é o desenvolvimento de um algoritmo numérico de otimização, em linguagem C, a ser aplicado no projeto sistemático de micro-manipuladores. Serão utilizados no desenvolvimento do tema os conceitos de otimização topológica, aplicada ao projeto de mecanismos flexíveis e o método de elementos finitos (MEF).

O trabalho tem como intuito também o processamento, através do software desenvolvido, de alguns tipos de micro-atuadores e sua fabricação, a fim de verificar o método adotado.

Micro-manipuladores são um tipo de MEMS (MicroEletroMechanical Systems). Apesar do grande desenvolvimento destes mecanismos, os micro-manipuladores ou micro-atuadores têm sido pouco explorados devido a certas dificuldades técnicas, como por exemplo, seu projeto. Mas o mercado para tais componentes está crescendo rapidamente. Os sistemas MEMS serão discutidos mais a fundo adiante.

A aplicação e a demanda por mecanismos desse tipo estão crescendo com o tempo graças ao desenvolvimento da tecnologia computacional necessária e de novos materiais mais confiáveis e resistentes. A demanda por produtos de maior qualidade e menor custo também pressiona os fabricantes a implementarem micro-mecanismos flexíveis.

Pretende-se com este trabalho ampliar ainda mais o conhecimento e os estudos na área aqui no Brasil, além de produzir uma ferramenta de projeto genérica e sistemática que permite aos usuários, pesquisadores e engenheiros de diversas áreas, projetar mecanismos para a aplicação desejada sem necessitar de conceitos aprofundados em otimização e mecanismos flexíveis.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mecanismos Micro-eletromecânicos (MEMS)

Sistemas micro-eletromecânicos (MEMS) integram componentes mecânicos e elétricos com características de tamanho da ordem de micrômetros a milímetros. Eles podem ser fabricados usando métodos similares àqueles usados na indústria de semicondutores para construir circuitos integrados de computador ou 'chips'. Diferente dos 'chips' de computador, eles realizam funções mecânicas ou óticas em adição a funções elétricas. MEMS têm o grande potencial de prover significantes vantagens no custo quando fabricados em lotes. Seu tamanho também possibilita integrá-los em uma grande variedade de sistemas.

São inúmeras as áreas de aplicação, como por exemplo: área médica, micro-cirurgia, bioengenharia, indústria e automação, telecomunicações, automotiva, aeroespacial, no micro-posicionamento e monitoramento de ambientes.

São exemplos de aplicações comerciais de MEMS:

- Micro-controladores: controlam o sistema micro-mecatrônico, por exemplo, componentes lógicos e CPU;
- Micro-sensores: a tecnologia de micro-fabricação introduziu a micro-estrutura em sensores e os integrou com circuitos elétricos. Foram desenvolvidos micro-sensores de pressão, aceleração e químicos. Alguns destes já foram introduzidos, por exemplo, como acelerômetros para detecção da colisão, no controle de pressão do sistema de injeção de combustível em automóveis e como sensores de pressão na aplicação biomédica;
- Micro-atuadores: ocupam-se do movimento nos sistemas micro-mecatrônicos. Já foram propostos vários tipos de micro-atuadores, como micro-atuadores eletromagnéticos, eletrostáticos, piezelétricos, etc. No desenvolvimento destes micro-atuadores há grandes diferenças entre o projeto teórico e as propriedades de um protótipo, assim micro-atuadores não podem ser usados previamente sem ter uma avaliação de suas propriedades após ter

sido construído. São exemplos de aplicação a micro-cirurgia, com o uso de um micro catéter e na área de bioengenharia são utilizados micro-manipuladores na fusão celular.

As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram aplicações interessantes de micro-atuadores. Na Figura 2.1 o micro-atuador do tipo SDA (“Scratch-Drive Actuator”) funciona como um ‘switch’ elétrico e na Figura 2.2 o micro-atuador do tipo RSC (“Residual Stress Cantilever”) funciona como um ‘switch’ óptico.

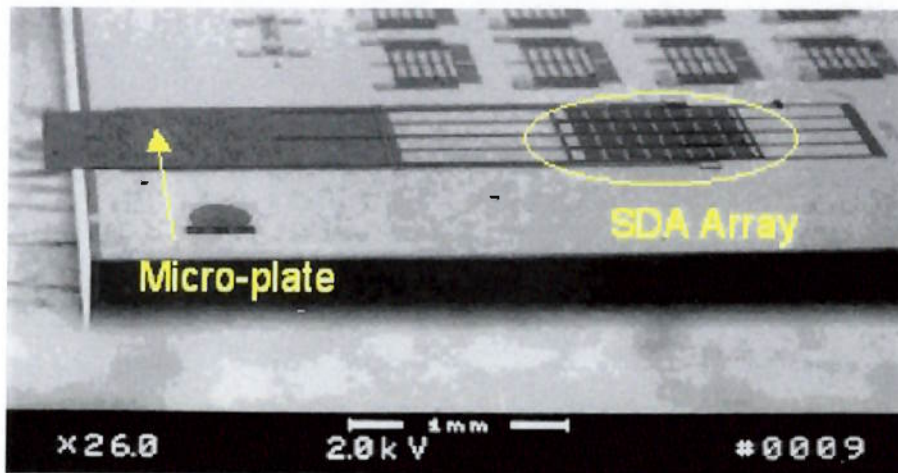


Figura 2.1 – Microplaca atuada pelo SDA

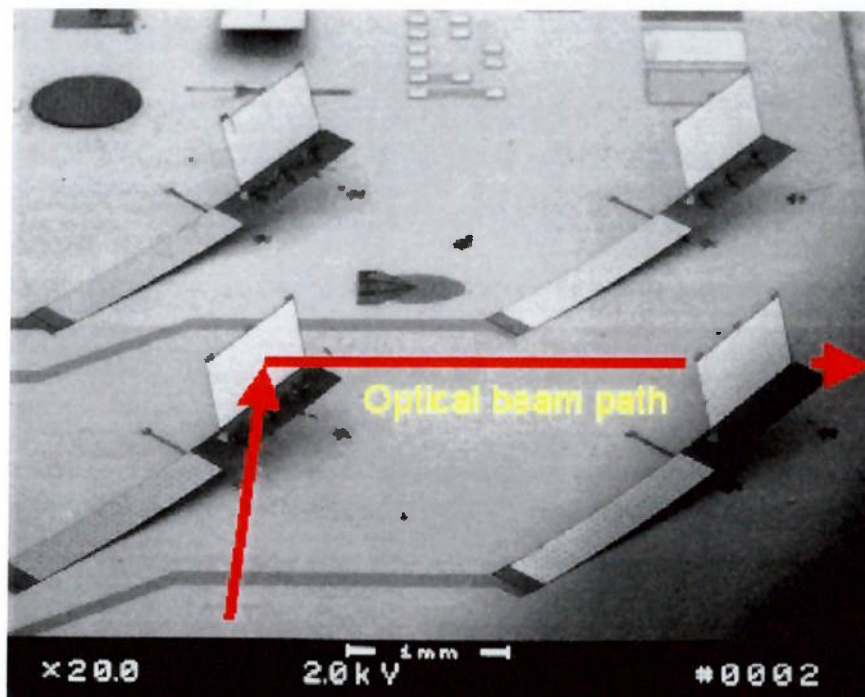


Figura 2.2 – ‘Switch’ ótico 2x2 usando atuadores SCR e espelhos

A Figura 2.3 mostra exemplos de micro-atuadores piezelétricos APA (“Amplified Piezo Actuators”). Eles têm sido usados em várias aplicações como ótica, espacial, controle de fluido, biomédica e fabricação, pois são compactos, robustos e oferecem um eficiente posicionamento de alta precisão, rápida resposta e baixo consumo de potência.

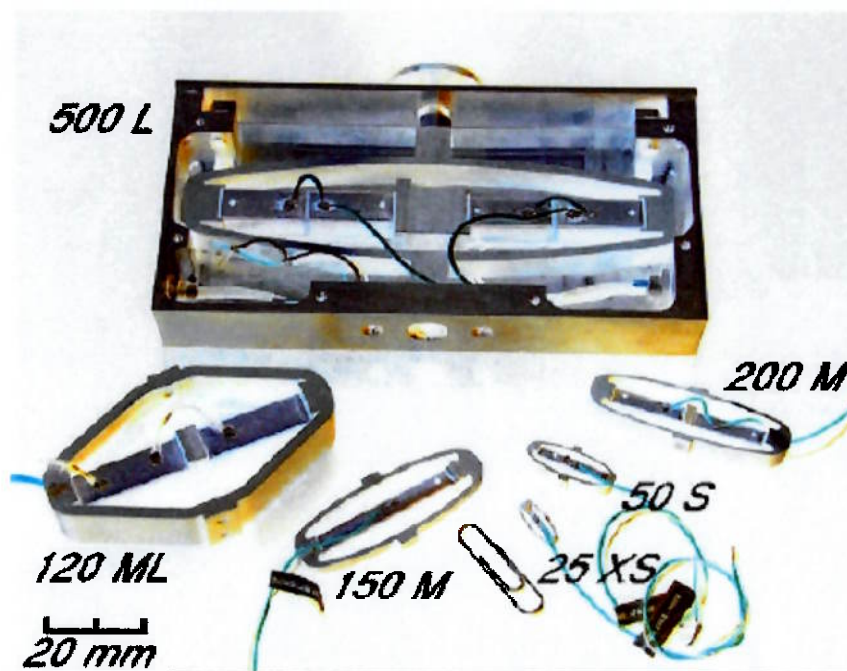


Figura 2.3 – Micro-Atuadores Piezelétricos

Dentre os micro-dispositivos, os micro-processadores e micro-sensores têm sido largamente aplicados, mas não os micro-atuadores. Enquanto ferramentas de projeto para a parte eletrônica dos MEMS estão bem desenvolvidas, ainda há problemas como o método de projeto das partes mecânicas e métodos de fabricação a serem resolvidos.

O software desenvolvido neste trabalho visa o projeto de MEMS flexíveis utilizando o método da otimização topológica. Os itens a seguir explicam melhor estes conceitos.

2.2 Mecanismos Flexíveis

2.2.1 Introdução

Um mecanismo é um dispositivo mecânico usado para transferir ou transformar movimento, força ou energia. Os mecanismos tradicionais de corpo rígido consistem de elos rígidos unidos em juntas articuláveis.

Diferente dos mecanismos de corpo rígido, os mecanismos flexíveis ganham pelo menos alguma de sua mobilidade da deflexão dos membros flexíveis e não especialmente de juntas móveis.

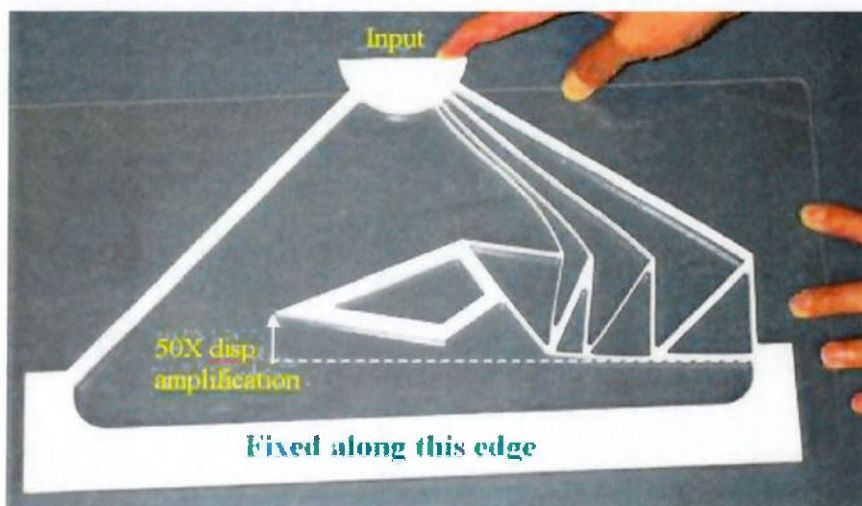


Figura 2.4 – Mecanismo flexível em maior escala

2.2.2 Vantagens

Pode ser considerado o uso de mecanismos flexíveis em uma aplicação particular por uma variedade de razões. As vantagens dos mecanismos flexíveis são consideradas em duas categorias: redução de custo (redução do número de componentes que formam o dispositivo ou peça única, redução do tempo de montagem, processos simplificados de manufatura) e execução melhorada (maior precisão, maior confiança, redução do atrito e necessidade de lubrificação, redução do peso e reduzida manutenção).

Outra vantagem dos mecanismos flexíveis é a facilidade com que eles são miniaturizados. Microestruturas simples, atuadores e sensores têm um grande campo de aplicação, e muitos outros sistemas micro-eletromecânicos (MEMS). A redução no número total de componentes e juntas oferecida pelos mecanismos flexíveis é

uma vantagem significativa na fabricação de micro-mecanismos, isso se dá devido às dificuldades na montagem dos componentes nesta escala.

2.2.3 Desvantagens

Apesar de oferecerem uma série de vantagens, mecanismos flexíveis apresentam vários desafios e desvantagens em algumas aplicações. Talvez o maior desafio seja a relativa dificuldade em analisar e projetar mecanismos flexíveis. É necessário conhecimento de análise de mecanismos, métodos de síntese e da deflexão dos membros flexíveis. Devido a essas dificuldades, muitos mecanismos flexíveis foram projetados por tentativa e erro no passado. Mas tais métodos só se aplicam para sistemas muito simples, que realizam tarefas relativamente simples e são freqüentemente não eficientes economicamente para muitas aplicações em potencial.

A análise de fadiga é tipicamente uma consequência mais vital para mecanismos flexíveis do que para os componentes de corpo rígido, pois estes são freqüentemente carregados ciclicamente.

O movimento de deflexão de elos flexíveis também é limitado pela resistência dos membros defletores. Além disto, um elo flexível não consegue produzir um movimento rotacional contínuo, como é possível com uma junta em forma de pino.

Elos flexíveis que permanecem sob tensão por períodos longos de tempo ou a altas temperaturas podem sofrer tensão de relaxamento ou deformação contínua.

Além disso, ainda há a questão das diferenças entre o projeto teórico e as propriedades obtidas no protótipo. É necessário testar os mecanismos antes de colocá-los em funcionamento a fim de garantir sua performance.

2.2.4 Micro-Atuadores flexíveis

Os métodos mais comuns para fabricação de MEMS usam camadas planas de material. As restrições introduzidas pela natureza planar da fabricação de MEMS e a escala (que torna a montagem de componentes difícil) geram vários desafios na construção de dispositivos mecânicos no nível micro. Como vimos

anteriormente, os mecanismos flexíveis apresentam soluções para muitos desses problemas.

Há ainda alguns desafios associados ao projeto de micro-atuadores flexíveis. O desempenho é extremamente dependente das propriedades do material, apesar disso o projeto está limitado a poucos materiais que são compatíveis com os métodos de fabricação. As propriedades do material nem sempre são bem conhecidas nesta escala, e sempre pode haver uma dispersão nos dados de propriedade do material porque o tamanho dos dispositivos é frequentemente da ordem do tamanho de grão do material. Testes têm demonstrado que componentes flexíveis podem ser muito robustos no nível micro e normalmente duram mais tempo do que os componentes que usam juntas e pinos ou outros elementos que induzem atrito.

2.3 Síntese Ótima com Modelos Contínuos

2.3.1 Introdução

No projeto de mecanismos flexíveis temos um problema inverso ao problema de análise, pois queremos obter a geometria de um material contínuo flexível, para um dado material, dadas as especificações de força e deslocamento. Métodos contínuos de otimização são empregados para resolver este problema inverso.

O comportamento desejado do mecanismo é especificado indicando o ponto onde é aplicada uma certa força, o ponto onde deve ser produzido o deslocamento, e em que direção. A região em que o mecanismo a ser projetado deve estar contido também é especificada. Esta região é chamada “domínio de projeto”. Um material é escolhido e suas propriedades são especificadas.

A característica única deste método de projeto é que soluções ótimas de mecanismos flexíveis podem ser geradas automaticamente a fim de obter um comportamento de força-deflexão desejado. Como é possível perceber, nenhuma decisão é tomada sobre a forma física do mecanismo flexível no início exceto especificar o espaço em que ele deve estar contido. O algoritmo de otimização gera a melhor solução para um dado problema especificado.

A verdadeira otimização consiste em se realizar uma busca sistemática da solução ótima dentro de varias configurações possíveis, através do algoritmo numérico de otimização, tornando assim o resultado independente do analista. Esse algoritmo numérico de otimização deve trabalhar em conjunto com o algoritmo de análise que tem um papel fundamental nesse processo, pois ele vai certificar se a solução proposta pelo primeiro é realmente melhor ou não.

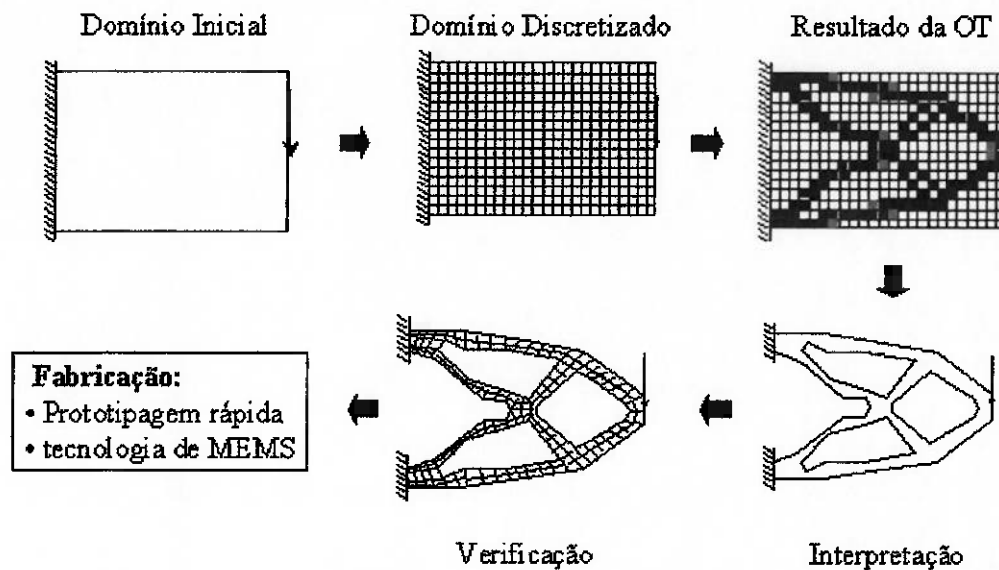


Figura 2.5 – Procedimento típico de Projeto Estrutural por Otimização Topológica

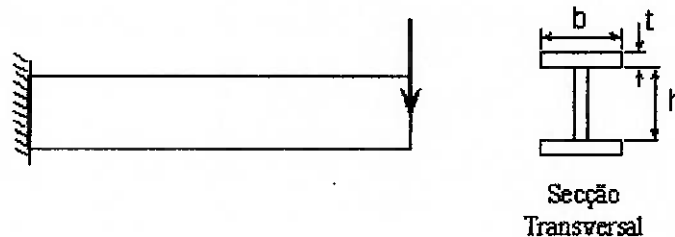
2.3.2 Otimização Estrutural

Um ótimo pode ser definido com base em muitos critérios. Alguém pode projetar uma estrutura com máxima rigidez, mínimo peso, máxima força, adequada flexibilidade, adequadas características dinâmicas, como frequência natural e formato de modo normal, e muitos outros objetivos. Pode haver também restrições na quantidade de material utilizado, tipo de material usado, espaço disponível para colocar a estrutura, tensão máxima permitível, deformação máxima permitível, e daí em diante. De fato, os objetivos e restrições podem ser intercambiados dependendo de qual característica é mais crucial. A característica mais importante é frequentemente escolhida para função objetivo, e as características de importância

secundária são formuladas como restrições. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência do projeto, ela pode ser classificada em simples e multiobjetivo. E o sucesso da otimização vai depender da escolha das variáveis de projeto e da formulação dessa função objetivo.

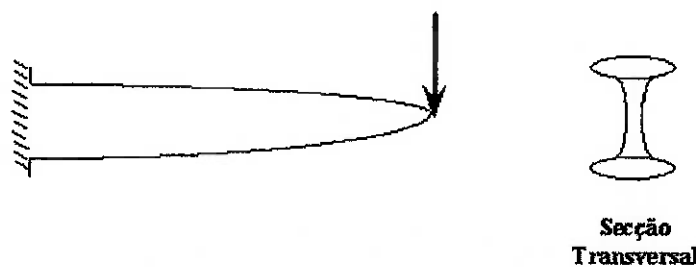
No passado, as estruturas “ótimas” eram projetadas por engenheiros com grande intuição para projeto e talvez, algumas vezes, por tentativa e erro. Hoje, o avanço na matemática e do cálculo variacional, mecânica computacional (MEF) e tecnologia computacional aumentaram o campo de otimização estrutural.

Existem atualmente três abordagens em otimização estrutural: otimização paramétrica (Figura 2.6a), onde são otimizadas as dimensões da estrutura, mantendo-se a sua forma pré-definida; otimização de forma (Figura 2.6b), onde são alterados os contornos (internos e externos) da estrutura; e otimização topológica, onde são encontrados novos buracos de “forma” ótima no domínio estrutural. A redução do peso na estrutura e melhora do objetivo desejado é crescente na seqüência descrita dos métodos. Por isso é utilizada a otimização topológica no projeto dos mecanismos flexíveis (Figura 2.6c).



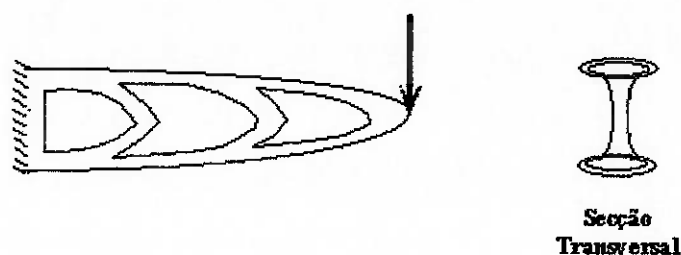
Secção
Transversal

a) Otimização Paramétrica



Secção
Transversal

b) Otimização de Forma



e) Otimização Topológica

Figura 2.6 – Formas Clássicas de Otimização Estrutural

A essência da otimização estrutural é o uso econômico e eficiente de material no projeto de um componente estrutural que atende certos objetivos sob certas restrições.

Existe uma abordagem teórica para o desenvolvimento de projetos de mecanismos flexíveis chamada síntese do contínuo (Ananthasuresh et al., 1994), cujo enfoque é obter a flexibilidade distribuída no mecanismo. Esta teoria é baseada no método de otimização topológica (Bendsøe; Kikuchi, 1988), o qual busca de forma sistemática a mudança de topologia da estrutura. A partir deste método o material é distribuído no interior do domínio de projeto de forma a maximizar ou minimizar uma função objetivo específica.

2.3.3 Histórico da Otimização

A otimização topológica surgiu de uma deficiência da otimização de forma, que era a de distribuir o material de forma mais acentuada no interior do domínio da estrutura. A otimização de forma é um tema estudado desde a década de 70 e são encontrados vários artigos sobre o assunto na literatura científica.

Uma revisão sobre o desenvolvimento dos métodos que permitem a variação do contorno da estrutura na otimização de forma foi feita por Haftka; Gandhi (1986).

Na otimização de forma encontramos sérios problemas quando pretendemos alterar a topologia de uma estrutura, pois isso implica na constante alteração, durante o processo de otimização, do modelo de elementos finitos

associado à estrutura no início do processo. No final da década de 80, Bendsøe e Kikuchi introduziram uma metodologia alternativa, fixando o domínio inicial da estrutura e portanto mantendo inalterado o modelo de elementos finitos utilizado no processo de otimização. Desta forma surgiu a otimização topológica, baseada no conceito de domínio estendido fixo de projeto e, inicialmente, no método de homogeneização (Bendsøe; Kikuchi, 1988).

Além das aplicações na área estrutural clássica, o método de otimização topológica está sendo utilizado em varias áreas de projeto. A aplicação do método por Ananthasuresh (1994) em projetos de mecanismos flexíveis motivou o surgimento de vários trabalhos nesta área: Sigmund (1996), Larsen et al. (1997), Nishiwaki et al. (1998), entre outros.

Atualmente a metodologia da otimização topológica está bem estabelecida, tornando-se evidente em várias linhas de projeto. Dentre eles, transdutores piezelétricos (Silva et al., 1999), micro-mecanismos flexíveis com atuação térmica (Sigmund, 1999), implementação de flexibilidade com carga dinâmica (Nishiwaki et al., 2000), etc.

2.3.4 Domínio estendido fixo de projeto

O MOT é baseado em dois conceitos: o domínio estendido fixo de projeto e o modelo de material, descrito posteriormente.

O domínio estendido fixo de projeto (Ω) consiste num domínio de forma fixa, limitado pelas condições de contorno (apoios) e pontos de aplicação de carga. Este domínio contém a estrutura a ser projetada. O objetivo da otimização topológica é distribuir o material disponível neste domínio, encontrando quais são os espaços preenchidos e os espaços vazios (sem material).

Na implementação numérica, o domínio estendido fixo é discretizado em elemento finitos. Assim, este modelo de elemento não é alterado durante o processo de otimização. Altera-se apenas a distribuição de material nos elementos. Isso torna o processo de otimização bastante vantajoso, pois com o domínio fixo, as derivadas de qualquer função g são facilmente calculadas usando a expressão:

$$\frac{\partial}{\partial A_n} \int_{\Omega} g \cdot d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial g}{\partial A_n} d\Omega \quad (\text{eq. 2.1})$$

, onde A_n é uma variável de projeto.

2.3.5 Modelo de Material

O modelo de material é uma equação que define a mistura em micro-escala de dois ou mais materiais, permitindo que haja estágios intermediários do vazio ao sólido em cada elemento do domínio.

Uma maneira de relaxar o problema, ou seja, permitir valores intermediários às variáveis, é definir um modelo de material que substitua a função discreta por uma contínua. Segundo Bendsøe (1995), um modelo de material que fornecer uma função contínua e consistente das propriedades do material em cada ponto do domínio garante o alcance da solução. Existem vários modelos de material que podem ser utilizados, entre eles o método de densidades (Bendsøe, 1989) e o método de homogeneização (Bendsøe; Kikuchi, 1988).

O método utilizado no software delineado no trabalho é o de densidades ou, modelo de material do tipo SIMP (“Simple Isotropic Material with Penalization”) que define o valor da densidade (variável de projeto) em cada ponto do domínio:

$$C(x) = \rho(x)C_0 \quad , \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1 \quad e \quad x \in \Omega \quad (\text{eq. 2.2})$$

, onde $\rho(x)$ é interpretada como uma função de distribuição (contínua) de densidades.

Com a relação acima, pode ser obtido qualquer valor de propriedade efetiva do material $C(x)$ variando de zero a C_0 . Matematicamente isso estabelece a relaxação do problema e permite a obtenção da solução do problema de otimização topológica. Mas isto implica em obter uma estrutura com regiões de diferentes propriedades de material. Do ponto de vista prático isto não é interessante, pois dificulta a interpretação final da topologia e torna inviável a fabricação.

Assim, para evitar a ocorrência do excesso de densidades intermediárias (“escalas de cinza”), os valores intermediários são penalizados da seguinte forma:

$$C(x) = \rho(x)^p \cdot C_0 \quad (\text{eq. 2.3})$$

, onde p é o fator de penalidade e pode ser ajustado para evitar o aparecimento das “escalas de cinza”.

É importante deixar claro que as topologias obtidas são soluções ótimas locais, que buscam atender o ponto de vista da engenharia. Assim, devemos ter uma solução de compromisso, ou seja, uma solução ótima local, bem definida, o mais próximo possível da solução ótima global e que atenda os requisitos de viabilidade de construção para a estrutura projetada.

2.3.6 Modelos Contínuos

A geometria dos mecanismos flexíveis é freqüentemente irregular, por isso, para resolver as equações diferenciais que governam o comportamento de deflexão elástica, é necessário utilizar um método numérico como o de elementos finitos no projeto dos mecanismos.

2.3.7 Análise Elastostática usando o Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos é usado extensivamente em análise estrutural elastostática para determinar as deflexões, tensões e deformações de uma estrutura com qualquer geometria e condições de contorno. As condições de contorno especificam onde a estrutura é suportada ou fixada e onde as cargas são aplicadas no contorno da estrutura.

Para análise linear elástica, a equação de equilíbrio para o modelo de elementos finitos de um meio contínuo é escrita na seguinte forma matricial:

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (\text{eq. 2.4})$$

,onde $\{u\}$ é um vetor $N \times 1$ de deslocamento, $\{f\}$ é um vetor $N \times 1$ de forças externas aplicadas, $[K]$ é uma matriz $N \times N$ simétrica chamada matriz de rigidez do contínuo flexível e N é o número total de graus de liberdade de deslocamento. Podemos ver que esta equação tem a mesma forma que a equação de equilíbrio de uma mola simples linear: $k.x = f$.

2.4 Método de Elementos Finitos

Os passos básicos envolvidos em qualquer análise de elementos finitos consistem do seguinte:

Fase de Pré-Processamento

1. Criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos; que é, subdividir o problema em nós e elementos.
2. Assumir uma função de forma para representar o comportamento físico de um elemento; é utilizada uma função contínua aproximada para representar a solução de um elemento.
3. Desenvolver equações para um elemento.
4. Construir a matriz de rigidez global.
5. Aplicar condições de contorno, condições iniciais e carga.

Fase de Solução

1. Resolver um conjunto de equações algébricas lineares ou não-lineares simultaneamente para obter os resultados nos nós, tais como valores de deslocamento em nós diferentes ou valores de temperatura em nós diferentes num problema de transferência de calor.

Fase de Pós-Processamento

2. Obter outras informações importantes. Neste ponto, você pode estar interessado em valores de tensão principais, fluxos de calor, etc.

A ferramenta computacional utilizada na fase de pré e de pós-processamento é o ANSYS. Através dele são geradas os dados de entrada do software de otimização topológica. Internamente, o software contém uma rotina de elementos finitos que trata todos estes dados e realiza os cálculos necessários. Após todo o processamento no software, este gera como saída duas malhas que são analisadas também através do ANSYS. Este assunto será tratado com mais detalhes posteriormente.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA PROJETO DE MICRO-ATUADOR FLEXÍVEL

3.1 Introdução

O projeto deste tipo de mecanismo é feito pra que ele sofra máxima deflexão em um ponto e direção de interesse, aplicado um certo trabalho externo. Por

isso, ele também deve ser capaz de suportar este trabalho externo, ou seja, a estrutura precisa, além da flexibilidade, de rigidez.

Assim, o problema de otimização leva em consideração duas questões: a energia mútua, que diz respeito ao deslocamento no ponto e direção de interesse quando submetido a um carregamento qualquer, e a flexibilidade média, que diz respeito à rigidez estrutural do mecanismo.

Com isso, obtemos uma função multiobjetivo para o problema de otimização, pois ambas as condições apresentadas acima são fundamentais e definem o comportamento cinemático e estrutural do mecanismo.

3.2 Os Conceitos de Flexibilidade e Rigidez

A flexibilidade e a rigidez de uma estrutura são formuladas utilizando o conceito de energia mútua. O software desenvolvido utiliza a forma matricial para realizar os cálculos, como segue.

Considere um corpo de material elástico linear, ocupando um domínio tridimensional Ω , como na Figura 3.1. Suponha que ele está fixo em um ponto. Agora considere os dois casos de carregamento. Considere o carregamento superficial t^1 como sendo uma força f_A aplicada em um ponto A que gera um campo de deslocamentos u_A e o carregamento fictício t^2 como sendo uma força fictícia f_B aplicada na direção e sentido do deslocamento desejado em um ponto B, gerando um campo de deslocamentos v_B , então posso definir de forma matricial:

$$\text{Energia mútua} = u_A^T K v_B \quad (\text{eq. 3.1})$$

$$\text{Flexibilidade média} = u_C^T K u_C \quad (\text{eq. 3.2})$$

Onde K é a matriz de rigidez global (simétrica) e u_C é o campo de deslocamentos obtido considerando apenas uma força $f_C = -f_B$, com o ponto A restringido como explicitado anteriormente (caso b da figura).

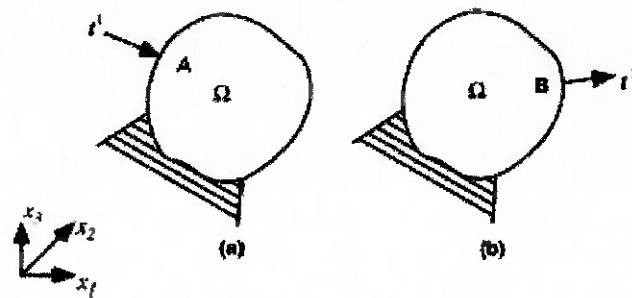


Figura 3.1 – Corpo elástico submetido a dois casos de tração

Assumindo que a tração t^1 do caso (a) é uma força aplicada e que a tração t^2 do caso (b) é uma carga fictícia unitária, a flexibilidade média mútua pode ser interpretada como uma medida da deformação no ponto B, quando aplicada uma tração t^1 no ponto A. Assim, a flexibilidade média mútua é interpretada como quão flexível ou rígido é o mecanismo no ponto B, quando aplicada a força t^1 no ponto A. Então, se $u_A^T K v_B$ for maximizada no problema de otimização, obtemos suficiente flexibilidade na direção t^2 dada t^1 .

Se considerarmos apenas o caso (a), a flexibilidade média pode ser interpretada como uma medida da deformação no ponto A, quando aplicada uma tração t^1 no ponto A. Então, se $u_C^T K u_C$ for minimizada no problema de otimização, obtemos suficiente rigidez no ponto A.

3.3 Formulação do Problema

Para atender o comportamento cinemático, desenvolvemos um raciocínio equivalente ao proposto no item anterior. Considere que o corpo na Figura 3.2, de domínio Ω , está fixo em um ponto, que a tração t^1 do caso (a) é uma força aplicada e que a tração t^2 , também do caso (a), é uma carga fictícia unitária.

A estrutura deve prover deformação suficiente na direção da força considerada fictícia t^2 quando aplicada a tração t^1 , como mostra o caso (a). Isso é obtido maximizando a flexibilidade média mútua dada pela tração t^2 no ponto B e o campo de deslocamentos u_A devido à tração t^1 . Este requisito cinemático é idêntico à formulação feita no item anterior para a energia mútua, maximizando $u_A^T K v_B$.

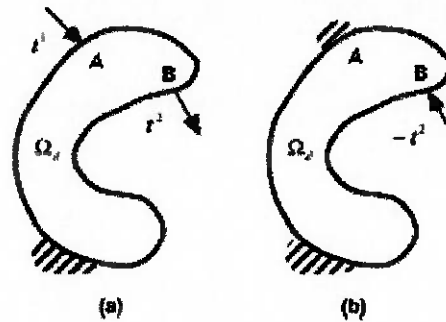


Figura 3.2 – Especificações para o projeto de uma estrutura flexível

Para atender o comportamento estrutural, o mecanismo deve ter rigidez suficiente para manter sua forma após sofrer deformação pelo contato com outra peça. Isto é, a rigidez é necessária para manter a operação em uma peça sem que ocorra uma deformação local onde é imposta a força de reação da peça, enquanto é aplicada uma força. É obtida minimizando a flexibilidade média no ponto B devido à tração $f^3 = -f^2$, caso (b), enquanto o ponto A está fixo, porque a força de reação é oposta à força fictícia f^2 e a estrutura flexível vai ser atuada pela força f^1 .

3.4 A Função MultiObjetivo

A função multiobjetivo combina dois problemas de otimização com objetivos distintos. Foram definidas duas parcelas de energia, mútua e elástica de deformação, que modelam o comportamento cinemático e estrutural do mecanismo, respectivamente. Neste caso, pretendemos maximizar a energia mútua $u_A^T K v_B$ e minimizar $u_C^T K u_C$ a flexibilidade média, como descrito no item anterior.

Neste trabalho foi utilizada uma função objetivo desenvolvida por Nishiwaki et al. (1998) no projeto de estruturas flexíveis pelo método de otimização topológica.

A função multiobjetivo, tal qual é utilizada pelo software, é definida na forma matricial, como segue:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximizar:} \quad & F = w \cdot \ln(u_A^T K v_B) - (1 - w) \cdot \ln(u_C^T K u_C) \\
 \rho & \\
 & K u_A = f_A \\
 & K v_B = f_B \\
 \text{Sujeito a:} \quad & K u_C = f_C \quad (\text{eq. 3.3}) \\
 & \sum_{i=1}^M V_i \cdot \rho_i \leq V^* \\
 & 0 \leq \rho_i^{\min} \leq \rho_i \leq 1
 \end{aligned}$$

ρ é a variável de projeto e é a função de densidade do material, pode indicar desde um elemento “vazio” ($\rho = 0$) a sólido ($\rho = 1$).

Como o domínio da estrutura Ω é discretizado em elementos finitos, as variáveis otimizadas ρ_i são a pseudodensidade de cada elemento do domínio, de forma que o volume total no domínio é dado pela somatória do produto destas pelo volume de cada elemento. São então chamadas de pseudodensidade, mas têm um valor relativo.

Percebe-se que se tem um controle sobre cada uma das parcelas da função devido ao valor de w escolhido, é um coeficiente de atribuição de peso que torna possível ter mais flexibilidade e menos rigidez, ou o contrário.

Assim, V^* é a restrição de volume de material no domínio discretizado, M é o número total de elementos e ρ_i^{\min} é um limite inferior utilizado na solução numérica, para considerar a presença de material.

3.5 Sensibilidades da Função Objetivo

O software de otimização utilizado neste trabalho utiliza o método de Programação Linear Seqüencial (PLS), que será descrito posteriormente, na implementação numérica. Para que este método possa ser utilizado, a função objetivo terá de ser linearizada em relação às variáveis de projeto. Por isso, se faz necessário o cálculo dos gradientes, mais comumente chamados de sensibilidades, da função objetivo definida para a otimização topológica.

Derivando a equação da função objetivo F em relação às variáveis de projeto ρ , obtém-se:

$$\frac{\partial F}{\partial \rho_i} = \frac{w}{u_A^T K v_B} \left(\frac{\partial (u_A^T K v_B)}{\partial \rho_i} \right) - \frac{1-w}{u_C^T K u_C} \left(\frac{\partial (u_C^T K u_C)}{\partial \rho_i} \right) \quad (\text{eq. 3.4})$$

Os termos $\frac{\partial (u_A^T K v_B)}{\partial \rho_i}$ e $\frac{\partial (u_C^T K u_C)}{\partial \rho_i}$ representam respectivamente as

derivadas da energia mútua e da flexibilidade média. Estas são desenvolvidas a seguir.

$$\frac{\partial (u_A^T K v_B)}{\partial x_i} = \frac{\partial u_A^T}{\partial x_i} K v_B + u_A^T \frac{\partial K}{\partial x_i} v_B + u_A^T K \frac{\partial v_B}{\partial x_i} \quad (\text{eq. 3.5})$$

Derivando a relação de equilíbrio $K u_A = f_A$ em relação às variáveis do problema x_i :

$$\frac{\partial K}{\partial x_i} u_A + K \frac{\partial u_A}{\partial x_i} = \frac{\partial f_A}{\partial x_i} \quad (\text{eq. 3.6})$$

Como f_A é constante:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial x_i} u_A + K \frac{\partial u_A}{\partial x_i} = 0 &\Rightarrow \frac{\partial u_A}{\partial x_i} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_i} u_A \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial u_A^T}{\partial x_i} = -u_A^T \frac{\partial K^T}{\partial x_i} (K^{-1})^T &= -u_A^T \frac{\partial K}{\partial x_i} K^{-1} \end{aligned} \quad (\text{eq. 3.7})$$

Como a matriz K é simétrica, $K^T = K$ e $(K^{-1})^T = (K^{-1})$.

Derivando então, $K v_B = f_B$:

$$\frac{\partial v_B}{\partial x_i} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_i} v_B \quad (\text{eq. 3.8})$$

Substituindo a Eq. 3.7 na Eq. 3.8:

$$\frac{\partial (u_A^T K v_B)}{\partial x_i} = -u_A^T \frac{\partial K}{\partial x_i} v_B \quad (\text{eq. 3.9})$$

Analogamente:

$$\frac{\partial (u_C^T K u_C)}{\partial x_i} = -u_C^T \frac{\partial K}{\partial x_i} u_C \quad (\text{eq. 3.10})$$

4 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Introdução

A solução do problema de otimização é uma combinação, em um algoritmo computacional, do método de otimização programação linear seqüencial (PLS) (Haftka et al., 1996) com o método numérico de análise de elementos finitos (MEF).

Aqui é interessante discorrer sobre os métodos numéricos disponíveis e utilizados na solução de problemas de otimização topológica e o porque das escolhas feitas neste trabalho.

Os métodos numéricos usados para resolver problemas de otimização podem ser classificados em dois tipos: específicos e gerais. Entre os métodos específicos vale a pena citar o critério de optimalidade. Este método é muito eficiente para resolver problemas de otimização com funções objetivo simples, uma restrição e muitas variáveis. Ele tem uma aplicação restrita a alguns problemas de otimização estrutural clássicos, pois deve ser desenvolvida uma formulação específica para cada problema. Com o desenvolvimento dos computadores, a tendência é que a aplicação destes métodos seja abandonada no futuro com a utilização de métodos genéricos.

Os métodos genéricos consistem nos métodos numéricos implementados em softwares de otimização em geral, são baseados na teoria de programação matemática. Podem ser aplicados a qualquer problema de otimização, estrutural ou não. Os métodos de programação matemática são classificados em métodos de programação linear, programação não-linear e métodos baseados em teoria de aproximações como programação linear seqüencial (PLS) e programação quadrática seqüencial (PQS). Dentre eles, o método PLS vem sendo utilizado com sucesso na otimização topológica, em particular em projetos de mecanismos flexíveis, como em Nishiwaki et al. (1998) e Sigmund (1996).

O método PLS consiste da solução seqüencial de subproblemas aproximadamente lineares, obtidos escrevendo a expansão em série de Taylor linear para a função objetivo e restrições. Este método resolve o problema de otimização

iterativamente. Para cada passo de iteração, deve ser feita uma análise de elementos finitos. Os métodos numéricos requerem que o domínio contínuo inicial seja discretizado, assim o item seguinte discorre sobre o método de elementos finitos (MEF) utilizado na solução do problema e sua implementação.

4.2 Implementação do MEF

O MEF é comum na grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura que usam o método de otimização topológica.

Introduzimos no MEF uma estrutura sólida, os contornos de fixação, os carregamentos e a malha de elementos finitos na qual ela deve ser discretizada. A partir daí, através do MEF, podemos obter os deslocamentos nos diversos pontos do elemento e, portanto, as tensões na estrutura.

Neste trabalho, o micro-mecanismo é bidimensional e seu domínio de projeto é discretizado em elementos isoparamétricos de quatro nós.

4.2.1 Elemento isoparamétrico de quatro nós

Se considerarmos as coordenadas locais (x,y) , no elemento finito da Figura 4.1 cada nó tem dois graus de liberdade, que são os deslocamentos em x e y .

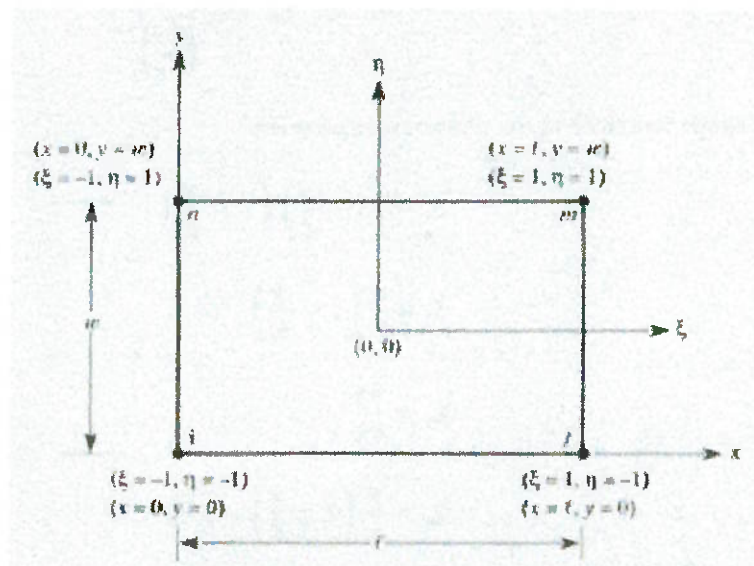


Figura 4.1 – Elemento Quadrilátero

As coordenadas naturais (ξ, η) são, basicamente, coordenadas locais adimensionais. Se fizermos $\xi = \frac{2x}{l} - 1$ e $\eta = \frac{2y}{w} - 1$, as funções de forma, em termos das coordenadas naturais são:

$$\begin{aligned} S_i &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ S_j &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ S_m &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ S_n &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned} \quad (\text{eq. 4.1})$$

A maioria dos programas de elementos finitos realiza a integração numérica do elemento por quadratura Gaussiana, por isso são necessárias as coordenadas naturais. Os limites de integração são o intervalo de -1 a 1 .

Quando usamos um único conjunto de parâmetros (um conjunto de funções de forma) para definir as incógnitas do problema e usamos o mesmo conjunto de parâmetros para expressar a geometria, estamos usando uma formulação isoparamétrica. Um elemento expresso desta maneira é chamado elemento isoparamétrico. Desta forma, podemos usar as mesmas funções de forma para descrever a posição de qualquer ponto do elemento isoparamétrico, com as seguintes equações:

$$\begin{aligned} x &= S_i x_i + S_j x_j + S_m x_m + S_n x_n \\ y &= S_i y_i + S_j y_j + S_m y_m + S_n y_n \end{aligned} \quad (\text{eq. 4.2})$$

4.2.2 Matriz de Rigidez

Para o estado plano de tensão da Figura 4.2, podemos escrever a lei de Hooke numa forma matricial compacta:

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (\text{eq. 4.3})$$

, onde $[\sigma]^T = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \tau_{xy}]$ é a matriz de tensão,

$$[\varepsilon] = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \text{ é a matriz de deformação}$$

$$\text{e } [C] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \text{ é a matriz que contém os}$$

parâmetros de elasticidade do material do elemento pois E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson.

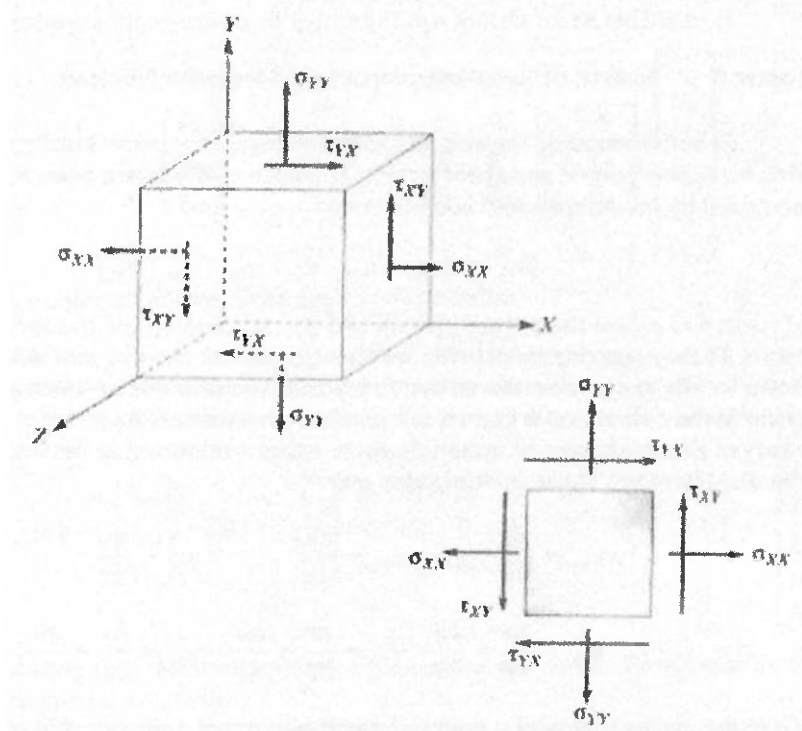


Figura 4.2 – Estado plano de tensão

A energia elástica de deformação, que também pode ser escrita no formato matricial, é dada por:

$$\Lambda_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} [\sigma]^T \{\varepsilon\} dV_e \quad (\text{eq. 4.4})$$

, onde V_e é o volume do elemento.

Substituindo a tensão em termos da deformação, usando a lei de Hooke, temos:

$$\Lambda_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\epsilon\}^T [C] \{\epsilon\} dV_e \quad (\text{eq. 4.5})$$

Agora podemos partir para a formulação do elemento finito isoparamétrico de quatro nós (Figura 4.3).

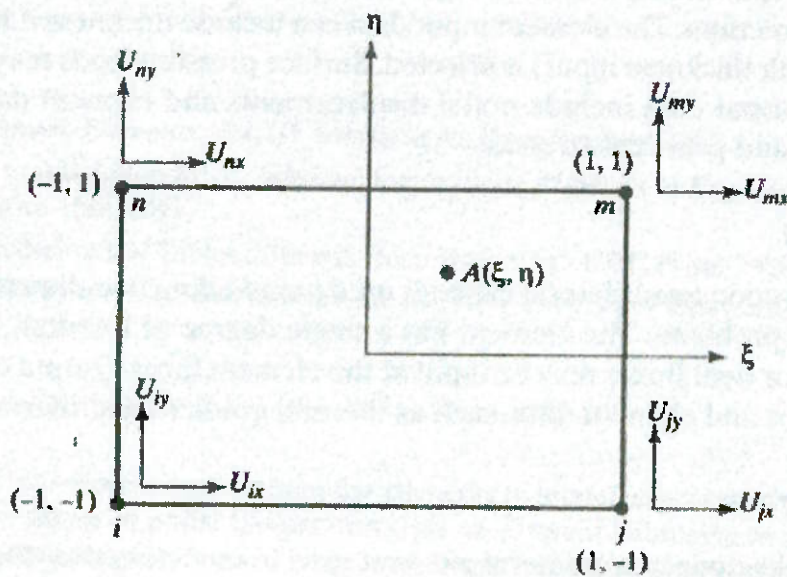


Figura 4.3 – Elemento quadrilátero usando a formulação de problemas de tensão plana

As variáveis de deslocamento, em termos das funções de forma, e os deslocamentos nodais são:

$$\begin{aligned} u &= S_i U_{ix} + S_j U_{jx} + S_m U_{mx} + S_n U_{nx} \\ v &= S_i U_{iy} + S_j U_{jy} + S_m U_{my} + S_n U_{ny} \end{aligned} \quad (\text{eq. 4.6})$$

A relação entre as deformações, o campo de deslocamentos e os deslocamentos nodais é dada por:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Assim, podemos escrever numa forma matricial:

$$\{\epsilon\} = [B] \{U\} \quad (\text{eq. 4.7})$$

$$\text{, onde } [B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_m}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_n}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial S_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_m}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_n}{\partial y} \\ \frac{\partial S_i}{\partial y} & \frac{\partial S_i}{\partial x} & \frac{\partial S_j}{\partial y} & \frac{\partial S_j}{\partial x} & \frac{\partial S_m}{\partial y} & \frac{\partial S_m}{\partial x} & \frac{\partial S_n}{\partial y} & \frac{\partial S_n}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Substituindo a equação 4.7 na equação 4.5:

$$\Lambda_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon\}^T [C] \{\varepsilon\} dV_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} [U]_e^T [B]^T [C] [B] [U]_e dV_e = \frac{1}{2} [U]^T \int_{V_e} [B]^T [C] [B] dV_e [U]$$

$$\Lambda_e = \frac{1}{2} [U]_e^T [K]_e [U]_e$$

(eq. 4.8)

, onde $[K]_e$ é a matriz de rigidez do elemento. Assim,

$$[K]_e = \int_{V_e} [B]^T [C] [B] dV_e = \int_{A_e} [B]^T [C] [B] h_e dA_e \quad (\text{eq. 4.9})$$

,sendo que $V_e = h_e \cdot A_e$, pois a espessura do elemento h_e é constante.

Para transformar as coordenadas naturais (ξ, η) em globais (x, y) , usamos o jacobiano:

$$[K]_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [C] [B] h_e \det J d\xi d\eta \quad (\text{eq. 4.10})$$

, sendo $\det J$ o determinante da matriz jacobiana dada por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}$$

Para elementos com formato quadrilátero qualquer, como é o caso, é extremamente difícil calcular analiticamente a matriz de rigidez $[K]_e$ pela formulação acima. Por isso, é utilizado o método de integração numérica quadratura de Gauss-Legendre.

Como a rigidez do elemento finito está diretamente relacionada com as propriedades efetivas do material, a penalidade do material intermediário, anteriormente descrita na seção 2.3.5, é feita na matriz de rigidez $[K]_e$ do elemento:

$$[K]_e = \rho_e^p [K]_e^0 \quad (\text{eq. 4.11})$$

, onde ρ_e é a densidade do elemento, p é o fator de penalidade e $[K]_e^0$ é a matriz de rigidez base do elemento.

A matriz de rigidez de cada elemento $[K]_e$ é inserida em uma matriz de rigidez global $[K]$. A inserção é feita através de uma matriz de conectividade que associa um número a cada elemento e o número dos nós que o cercam. Cada nó possui uma matriz de coordenadas. O vetor de forças aplicada nos nós $[f]$ é conhecido, pois foi dado o carregamento na estrutura. Então, podemos obter o vetor de deslocamentos nodais $[U]$ a partir da seguinte relação:

$$[K][U] = [f] \quad (\text{eq. 4.12})$$

O sistema de equações lineares obtido acima é resolvido pelo método numérico de Gradientes Conjugados.

4.3 Implementação da PLS

Neste trabalho utilizamos a programação linear seqüencial (PLS) como o otimizador. Isto porque a PLS pode lidar com uma variedade de funções objetivo e restrições, um grande número de variáveis de projeto, e requer apenas o gradiente destas funções.

A PLS resolve o problema de otimização não-linear, como o problema em questão, dividindo-o em uma seqüência de subproblemas de otimização linear, que são resolvidos através da programação linear (PL). A solução é obtida após um número suficiente de iterações.

4.3.1 PL

O método da PL se destina à solução de problemas de otimização lineares, no qual a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis de projeto, isto é:

$$\text{Maximizar: } F(x) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (\text{eq. 4.13})$$

x

Sujeito a:

$$h_i(x) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n = 0, \quad i = 1, \dots, n_g$$

$$g_j(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \geq 0, \quad j = 1, \dots, n_e$$

Apesar da função objetivo, apresentada anteriormente para o problema de otimização, não ser linear em relação à densidade de cada elemento do domínio fixo estendido de projeto, que é a variável de projeto, ela pode ser linearizada através da série de Taylor de 1º grau que a representa.

Do cálculo diferencial, sabe-se que a série de Taylor representa uma função $f(x)$, para um x próximo de x_0 , com um certo erro $e(x)$, como segue:

$$f(x) = f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x-x_0) + \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots + \left. \frac{\partial^N f}{\partial x^N} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^N}{N!} + e(x)$$

(eq. 4.14)

O método PLS se utiliza apenas das derivadas de primeira ordem. Assim, para uma função com n variáveis temos:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x=x_0} (x_1 - x_{01}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x=x_0} (x_2 - x_{02}) + \dots$$

$$+ \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{x=x_0} (x_n - x_{0n}) + e(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{eq. 4.15})$$

Então, a função objetivo F apresentada anteriormente, pode ser representada da seguinte forma:

$$F = F_0 + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho_1 - \rho_{01}) + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho_2 - \rho_{02}) + \dots + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho_n - \rho_{0n})$$

(eq. 4.16)

Abrindo os termos da equação, ficamos com um conjunto de termos constante e um variável:

$$F = \overbrace{F_0 + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right|_{\rho=\rho_0} \rho_{01} + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right|_{\rho=\rho_0} \rho_{02} + \dots + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right|_{\rho=\rho_0} \rho_{0n}}^{\text{constante}} +$$

$$\underbrace{\left. \left. \left. \left. \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right)_{\rho=\rho_0} \rho_1 + \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right)_{\rho=\rho_0} \rho_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right)_{\rho=\rho_0} \rho_n \right.}_{\text{variável}} \quad (\text{eq. 4.17})$$

Os termos constantes não influenciam na maximização da função objetivo, portanto serão descartados. Obtemos, então, a seguinte função objetivo linearizada:

$$F_{\text{linear}} = \left. \left. \left. \left. \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_1 + \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_n \right. \quad (\text{eq. 4.18})$$

Os coeficientes da equação linear acima são as sensibilidades, ou derivadas, desenvolvidas anteriormente na seção 3.5.

Voltando ao raciocínio principal, a PLS resolve o problema de otimização não-linear aproximando-o por uma seqüência de subproblemas lineares. Estes problemas lineares são resolvidos por PL, através de métodos eficientes e confiáveis como o Simplex (Dantzig, 1963) ou pelo algoritmo de Kamarkar (Hafika, 1990).

Através da definição dos limites móveis (Thomas et al., 1992), aproxima-se a função não-linear $F(x)$ por uma função linear $f(x)$ em torno do ponto x_i no intervalo definido. Por isso é muito importante o controle da variação destes limites móveis, pois a aproximação linear só é válida em torno do ponto x_i . A cada iteração a rotina de PLS obtém a solução ótima, que no caso é o ponto de máximo de $F(x)$, no intervalo definido pelos limites móveis x_i^{max} e x_i^{min} , e obtém o valor ótimo para x_i , que será utilizado na iteração seguinte. Isso segue até que haja a convergência da solução.

Os limites são considerados móveis, pois a variável x_i assume um valor diferente a cada iteração. Os limites são normalmente definidos como uma porcentagem do valor desta variável. Percebemos, então, que se o intervalo definido pelos limites móveis for muito grande a aproximação linear não será válida, e se for muito pequeno causará um alto custo computacional. Esta questão pode ser resolvida da seguinte forma, tornando inclusive mais rápida a convergência da solução: nas regiões em que a função não-linear possui valor baixo para suas derivadas podemos usar um intervalo maior, pois neste caso a função não-linear tem um comportamento mais próximo da função linear; já onde os valores das derivadas são altos e ainda, no

momento em que se aproxima o ponto de convergência devemos usar um intervalo bem menor, para evitar “passar” pelo ponto de máximo.

Uma escolha inadequada do valor dos limites móveis pode tornar o método da PLS desvantajoso. Em geral, na literatura, são utilizados valores em torno de 15% de x_i para os limites móveis.

Finalmente, a função inserida na rotina de PL é da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar:} \quad & F_{\text{linear}} = \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_1 + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_2 + \dots + \left. \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \right)_{\rho=\rho_0} \cdot \rho_n \\ & \rho \\ \text{Sujeito a:} \quad & \sum_{i=1}^M V_i \rho_i \leq V^* \\ & 0 \leq \rho_i^{\min} \leq \rho_i \leq \rho_i^{\max} \quad , i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (\text{eq. 4.19})$$

As rotinas de PL são encontradas na literatura, como por exemplo, a rotina SIMPLX (Press et al., 1999) que utiliza o método Simplex ou até mesmo disponíveis gratuitamente na Internet, como é o caso da rotina DSPLP (Hanson; Hiebert, 1981) que usa o método de Karmakar. Neste trabalho foi utilizada a rotina DSPLP, que resolve problemas de otimização envolvendo milhares de variáveis e tem como vantagem a robustez e rapidez da solução. Isso possibilita uma maior discretização para a malha de elementos.

4.4 Implementação do Método de Otimização Topológica

Neste trabalho é implementado um software que resolve o problema de otimização através de rotinas de MEF e PL. A Figura 4.4 ilustra o funcionamento do software final.

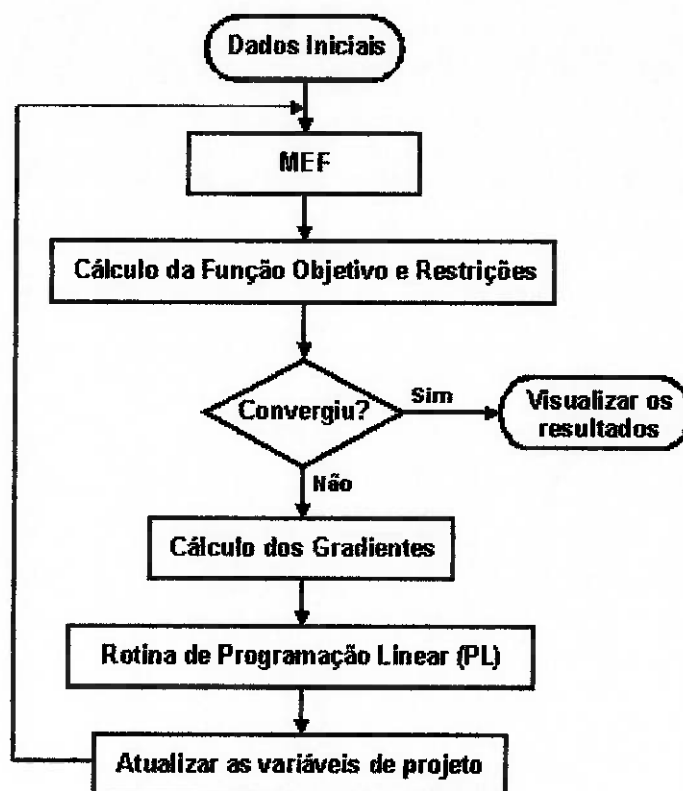


Figura 4.4 – Fluxo de informações no software final

4.4.1 Pré-processamento dos Dados

Os dados iniciais são as informações sobre a geometria do domínio estendido fixo de projeto, os pontos de fixação e as forças aplicadas. Estes dados são introduzidos no software através de um arquivo texto que contém as matrizes de coordenadas, graus de liberdade e aplicação de forças para cada nó da malha de elementos finitos, que é gerada para o domínio inicial de projeto, e algumas informações adicionais.

A fim de implementar numericamente a função multiobjetivo do problema de otimização, devem ser elaboradas duas situações de carregamento, para a mesma malha. Isso tudo é viabilizado pelo software de elementos finitos ANSYS, onde podemos definir o domínio inicial, a malha de elementos, a fixação e as situações de carregamento. O software ANSYS grava estas informações no formato texto descrito anteriormente.

Este arquivo texto gerado contém o número de elementos, número de nós, as coordenadas e dos nós, a conectividade dos elementos, o material (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), os nós fixos e os nós onde estão aplicadas as forças.

Para o cálculo da função multiobjetivo, são necessários os valores da energia mútua e da flexibilidade média a partir das situações de carregamento. Então, é preciso montar duas situações: na primeira (Figura 4.5a e Figura 4.5b) temos a força aplicada e a força fictícia, na direção do deslocamento desejado, e na segunda (Figura 4.5c), temos a força de reação, aplicada no mesmo ponto e direção oposta à força fictícia anterior. Neste segundo caso, a estrutura deve ter uma fixação no mesmo ponto e direção da força aplicada no caso anterior.

Com isso, então, serão gerados dois arquivos texto no ANSYS, um para cada situação de carregamento. O software recebe dois arquivos texto como entrada, um contendo todas as informações referentes à malha além das informações de carregamento e o outro contendo apenas as informações de fixação e carregamento.

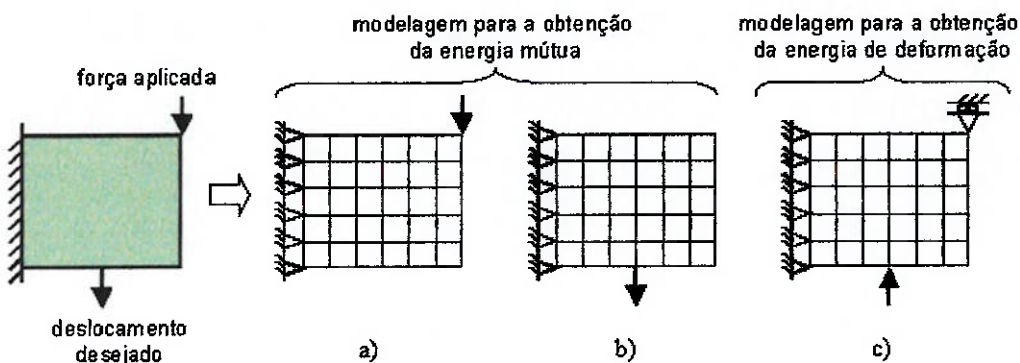


Figura 4.5 – Situações de carregamento para a entrada de dados

4.4.2 Processamento através do Software

Inicialmente, o usuário deve informar ao software os nomes dos arquivos texto de entrada de dados, estes foram preparados na fase de pré-processamento. Isso é feito logo nas primeiras linhas de comando, como mostra a Figura 4.6.

```

#include <stdio.h>
#include <malloc.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

                                     nome dos arquivos de entrada
                                     ↙
#define arquivo1 "malha300a.txt"      /* input */
#define arquivo2 "malha300b.txt"      /* input */

#define arquivo3 "complementar.txt"   /* input */

#define arqANSYS1 "otANSYS.txt"       /* output */
#define arqANSYS2 "otmlhANSYS.txt"   /* output */

#define TAM 150
#define NMAX 1.0e5
#define ITMAX 200
#define THRESH 1.0e-12
#define TOL 1.0e-3
#define ITOL 1

```

Figura 4.6 – Cabeçalho do código fonte do Software de Otimização

O “loop” de otimização compreende basicamente as rotinas de MEF, cálculo da função objetivo e gradientes, determinação dos limites móveis, aplicação do filtro espacial e programação linear.

O software faz a leitura dos arquivos de entrada e armazena os dados necessários. Com isto, são determinados os vetores e matrizes fixas que serão utilizados ao longo do processo de otimização. Os dados disponíveis são, então, organizados desta forma: matriz de coordenadas nodais, matriz de conectividades, vetor de restrições nodais e vetores de forças nos nós dos três carregamentos, matriz de graus de liberdade dos nós.

A rotina de MEF executa um ‘loop’ interno de M voltas, sendo M o número de elementos da malha. Constrói a matriz de rigidez local do elemento e posiciona os valores desta na matriz de rigidez global, de acordo com a matriz de conectividade. A matriz de rigidez global é montada de forma que não são consideradas as posições de deslocamento nulo, isto é, os nós fixos. Assim temos uma matriz de tamanho reduzido e, portanto, um tempo menor de processamento.

Com a matriz de rigidez global, são obtidos os vetores de deslocamentos nodais para cada caso de carregamento.

A Figura 4.7 esquematiza o fluxo de informações na rotina de MEF.

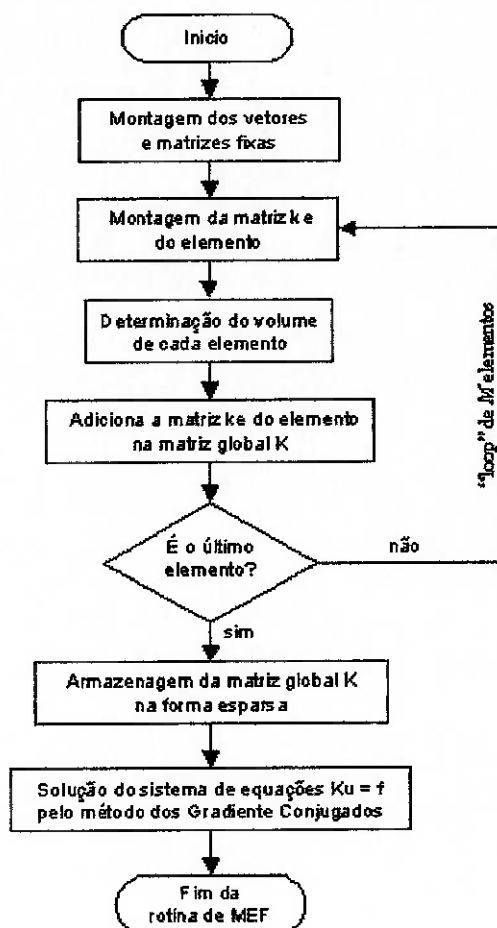


Figura 4.7 – Fluxo de Informações na rotina de MEF

Assim, pode-se dizer que a rotina de MEF determina, para cada situação de carregamento, a deformação na malha. Com isto é possível obter a energia mútua e a flexibilidade média, de forma matricial. Calcula-se então a função objetivo.

O software utiliza o método de PLS como otimizador, por isso são calculados os gradientes da função objetivo para cada elemento no domínio. Com isso, a rotina de PL (DSPLP) obtém os valores ótimos das variáveis de projeto, através de um processo iterativo. Na primeira iteração, o usuário define valores quaisquer para as variáveis do problema, que servem como ponto de partida.

A cada iteração a matriz de rigidez global, os cálculos da função objetivo e seus gradientes têm de ser refeitos, pois as variáveis de projeto vão se “deslocando”. Há convergência quando o valor da função objetivo não apresenta mais variação, aqui é utilizada uma margem de erro de 0.01% entre as iterações.

O processamento através do software pode ser esquematizado como na Figura 4.8.

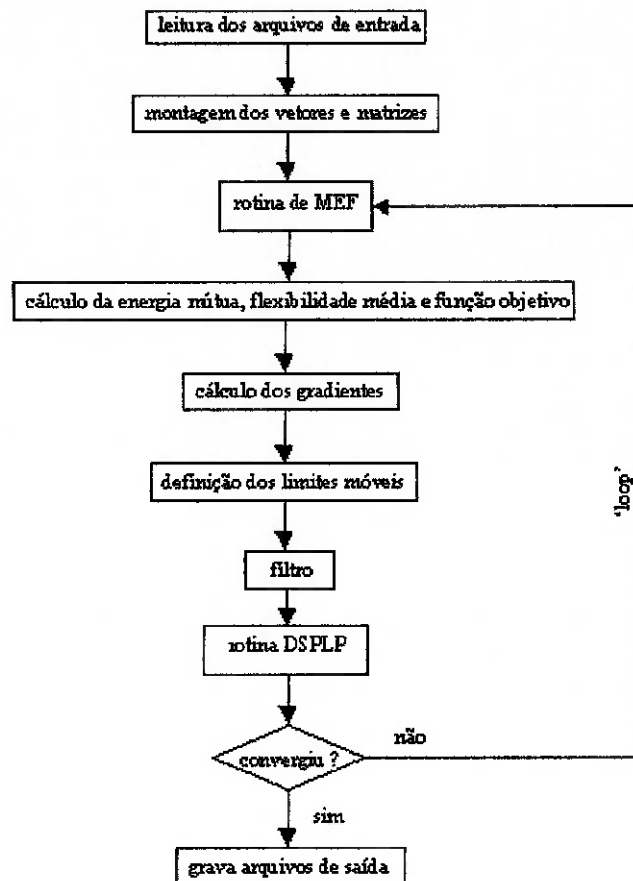


Figura 4.8 – Esquema geral do funcionamento do software

4.4.3 Pós-Processamento dos Dados

Terminado o processo de otimização, o software gera dois arquivos texto, num formato padrão do ANSYS. Um dos arquivos contém a configuração ótima da topologia e o outro, a distribuição ótima de densidade dos elementos.

O arquivo gerado pelo software contém uma informação de um número atribuído a uma determinada cor para cada elemento, conforme o valor da densidade obtida na otimização. Para que o ANSYS interprete este número, forneço para ele um mapa de cores, gerado no CMAP do ANSYS, que contém um intervalo de dez cores entre preto e branco. Os elementos em preto indicam a maior densidade e os elementos em branco, a menor. Existem as tonalidades de cinza para indicar as densidades intermediárias.

O ANSYS disponibiliza ainda algumas ferramentas para posterior análise e verificação do mecanismo.

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

5.1 Introdução

O objetivo deste trabalho foi alcançado com a fabricação e teste de alguns exemplos de micro-manipuladores, sem aplicação específica. Após um estudo preliminar da ferramenta escolhida para a otimização da topologia dos manipuladores, foi feita uma série de simulações até encontrar o resultado mais adequado às condições iniciais pré-estabelecidas.

Inicialmente foram definidas as condições iniciais do projeto, tal como o domínio estendido fixo, carregamento, deslocamento desejado e material a utilizar. Estes dados foram escolhidos baseados em casos quem podem ser encontrados na literatura e têm uma grande gama de aplicação.

Com isso, primeiramente realizei algumas simulações com um domínio pouco discretizado (menos de 500 elementos). Isso permitiu obter resultados preliminares grosseiros mais rapidamente, a fim de avaliar se a otimização ocorreu conforme o esperado e ainda ter uma idéia da melhor faixa de parâmetros de otimização para cada caso.

A discretização do domínio foi feita com elementos isoparamétricos quadriláteros de 4 nós.

Como a intenção deste micro-manipulador é realizar movimento aproveitando a deformação sofrida, a estrutura deve ter uma boa relação de

flexibilidade. Por isso trabalhamos com um w alto, coeficiente de atribuição de peso, entre 0.8 e 0.95 e uma V^* baixa, restrição de volume de material, entre 0.15 e 0.25. Para todas as simulações apresentadas aqui, o fator de penalidade é $p = 3$, pois quanto maior este valor, as escalas de cinza são mais atenuadas, mas não é aconselhável utilizar valores muito altos, sob pena de aumentar o efeito do ‘tabuleiro de xadrez’. Para diminuir razoavelmente este efeito, foi utilizado o filtro disponível no software de otimização, ajustando o parâmetro do raio para alcançar de 6 a 8 elementos vizinhos. O filtro foi desligado nas últimas iterações para não comprometer a nitidez do resultado.

Em seguida, foram feitas as simulações para uma discretização maior do domínio (mais de 1000 elementos) através das quais foram escolhidos os resultados mais apropriados. De posse da topologia otimizada é possível fazer uma interpretação em CAD e um teste do mecanismo obtido, por meio de software.

5.2 Condições Iniciais de Projeto

Foram definidos 2 domínios diferentes, sendo que para um deles temos duas formas de fixação diferentes. Isto nos daria 3 casos, mas para cada um destes foram feitas simulações invertendo-se o sentido de aplicação da força, resultando em 6 casos diferentes. Um destes casos está ilustrado na Figura 5.1.

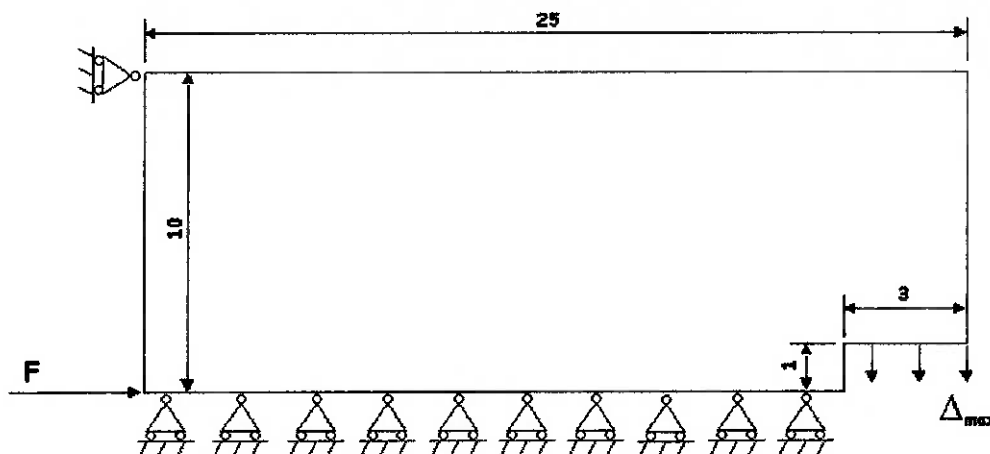


Figura 5.1 – Garra 1, força F aplicada para a direita (garra1d)

Na simulação utilizamos a relação de simetria da peça, como por exemplo esta ilustrada na Figura 5.1. Como as peças são simétricas em relação ao eixo x (onde está sendo aplicada a força neste caso), não é necessário dar entrada no software com a geometria da peça inteira. Isso elimina uma boa quantidade de informação e processamento desnecessário, agilizando o processo. É necessário para tanto informar as condições de simetria, que seria toda essa fixação em y, na base.

As condições iniciais, como podemos ver são, portanto o domínio estendido, os pontos de fixação, a aplicação da força e o deslocamento desejado. Com a otimização da topologia obtemos o deslocamento máximo possível.

O material utilizado normalmente em experiências deste tipo, e neste trabalho, é o bronze: módulo de elasticidade $E = 106 \text{ Gpa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.324$.

5.3 Resultado da Otimização

Depois de variadas simulações, verificou-se que os valores ideais para o coeficiente de atribuição de peso e restrição de volume são respectivamente $w = 0.85$ e $V^* = 0.20$, para todos os casos.

A seguir é apresentado um exemplo, para comparação entre o resultado obtido na simulação com uma discretização menor e o resultado final, obtido da topologia ótima, com uma maior discretização.

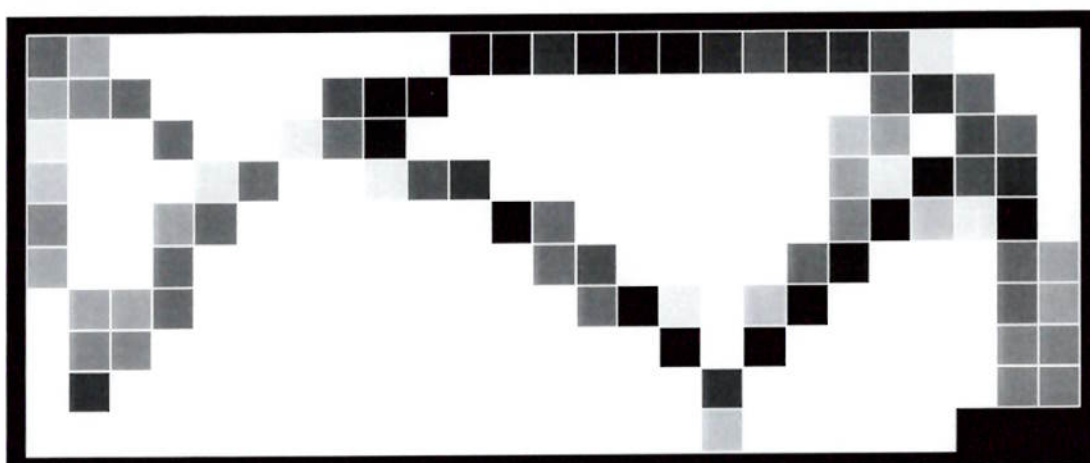


Figura 5.2 – Topologia ótima da garra1d – malha pouco discretizada (247 elementos)

Observando a grande diferença entre as Figuras 5.2 e 5.3, percebe-se que para obter um bom resultado e cada vez mais preciso é necessário ter uma maior discretização do domínio, o que encarece e torna o processo mais demorado. Pode-se, então descobrir, com as dimensões da peça, qual nível de discretização necessário é suficiente.

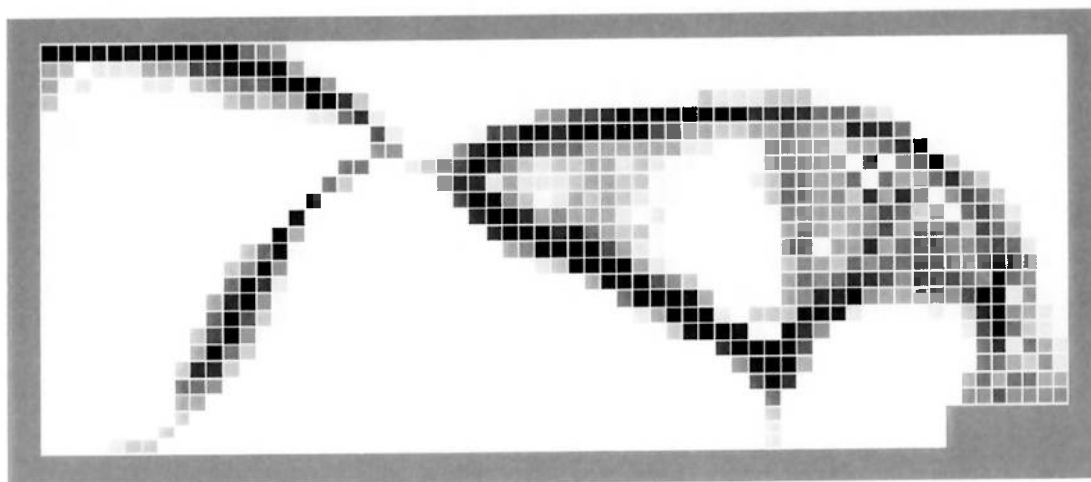


Figura 5.3 – Resultado final – Topologia ótima da garra1d (1551 elementos)

Na Figura 5.3 podemos observar o efeito das escalas de cinza, do preto ao branco, com tons intermediários de cinza, temos a densidade decrescente do material, da máxima densidade até a falta de material.

Esta é a imagem visualizada no software ANSYS a partir do arquivo de saída gerado pelo software de otimização. Este arquivo já tem um formato próprio, com extensão txt para ser visualizado através do ANSYS.

5.4 Interpretação dos Resultados

Existem softwares específicos para realizar este tipo de trabalho, de interpretação da otimização. Neste trabalho, a interpretação foi feita manualmente, observando-se a disposição de concentrações de densidades na saída otimizada gerada no software e desenhando-se o provável, ou o melhor contorno possível para a peça.

Foi realizada uma interpretação prévia no software ANSYS, utilizando apenas linhas para desenhar o contorno. Em seguida, esta interpretação foi exportada para o software AutoCAD, onde foi possível desenhar as 'abas' necessárias para a

fixação da peça e do cristal piezelétrico, que realiza a força de atuação. E finalmente, este desenho foi ainda melhorado através do software CorelDraw, onde os cantos formados entre as linhas, desenhadas no ANSYS, foram suavizados em curvas. Com este último arquivo foi fabricado o fotolito, máscara utilizada na fabricação por corrosão.

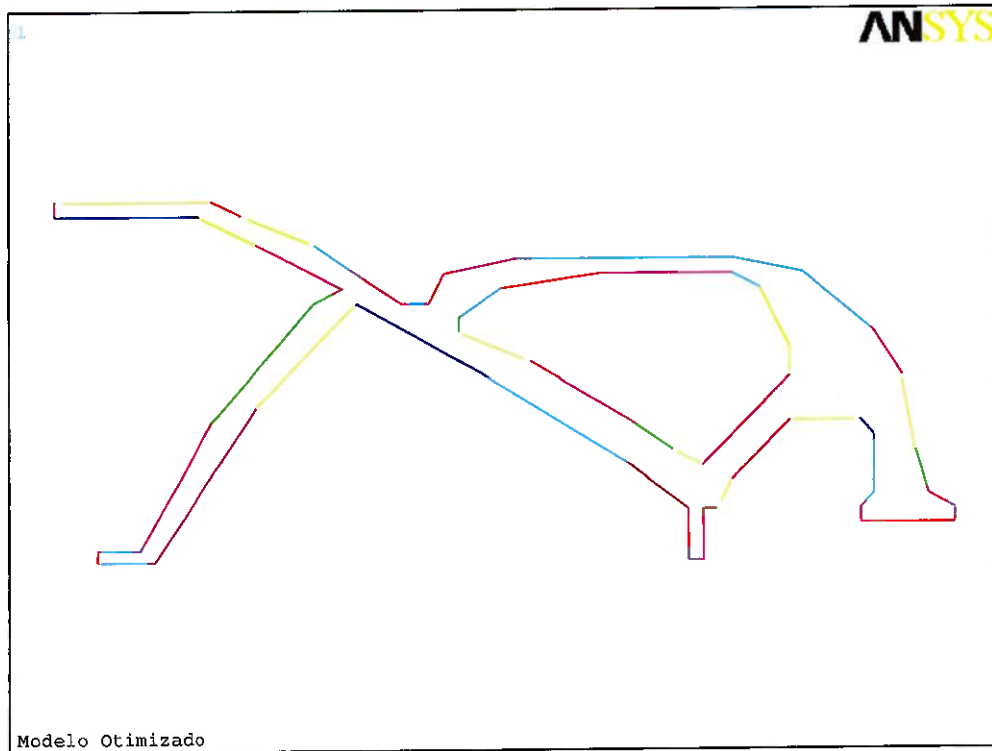


Figura 5.4 – Interpretação da garra1d feita no ANSYS

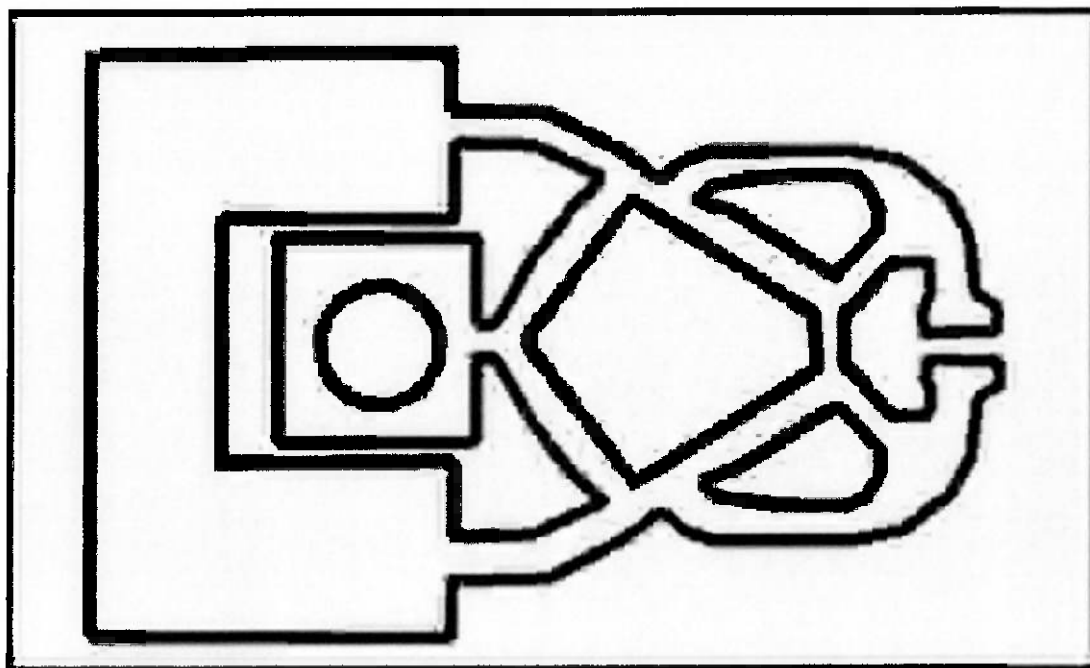


Figura 5.5 – Interpretação final da garra1d – atuação manual

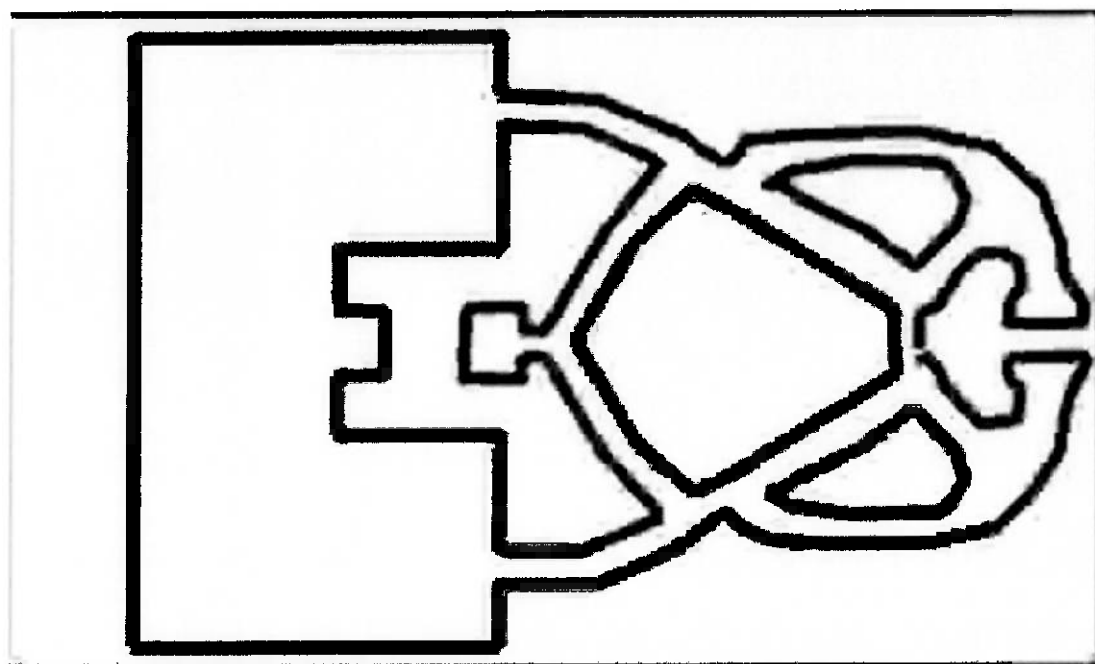


Figura 5.6 – Interpretação final da garra1d – atuação piezelétrica

Nas Figuras 5.5 e 5.6 podemos ver a configuração final da peça que será fabricada. Os cantos foram ligeiramente arredondados e foram acrescentadas 'abas' para o acionamento da peça tanto manualmente, com a ajuda de alguma ferramenta, como na Figura 5.5, quanto com uma cerâmica piezelétrica, como na Figura 5.6.

Para a fabricação do fotolito foram enviadas estas figuras com as cores invertidas, para que possa se dar o processo de corrosão.

5.5 Teste Computacional

O software utilizado para testar as peças, após a interpretação foi o ANSYS. O intuito é o de confirmar se, para a interpretação das topologias, de fato ocorre a deformação no sentido do deslocamento desejado.

Através do ANSYS é possível gerar uma nova malha de elementos, para a interpretação feita anteriormente, aplicar as condições de contorno e visualizar uma série de resultados diferentes para a posição final. Aqui nos interessa a configuração deformada, em relação a inicial, para visualizar a variação no deslocamento, e é interessante também observar as tensões acumuladas no mecanismo, para saber onde ele está sendo mais solicitado, por isso são também ilustradas figuras indicando a tensão de Von Mises.

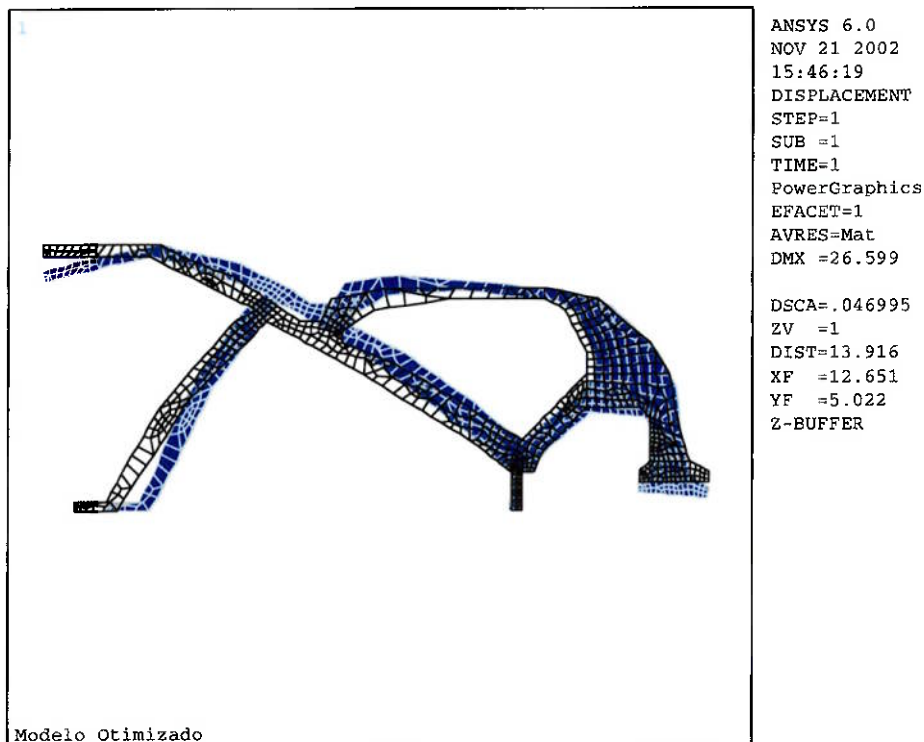


Figura 5.7 – Teste da garra1d – configuração deformada e não deformada

Com este teste é possível observar se o objetivo foi alcançado, vemos na Figura 5.7 que a peça deformou no sentido do deslocamento desejado. A configuração deformada está em azul e a original em branco.

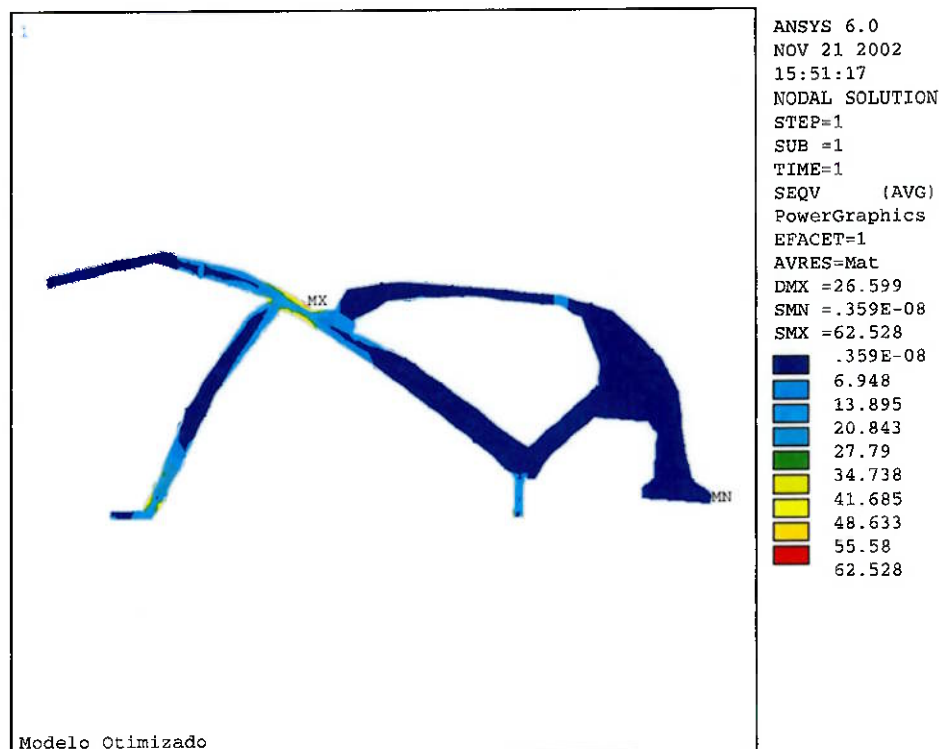


Figura 5.8 – Teste da garra 1d – tensão de Von Mises

Com esta figura podemos observar onde a peça está sendo mais solicitada durante o processo. Os pontos mais propensos à falha são aqueles com coloração mais alaranjada e vermelha, ou seja, onde o mecanismo romperia primeiro.

5.6 Fabricação

O método de fabricação utilizado é o de litografia.

Na litografia profunda utiliza-se uma máscara litográfica, ou fotolito já mencionado anteriormente, onde as regiões claras são transparentes à radiação e as regiões escuras são opacas à radiação. É feita então a projeção da imagem, com radiação ultravioleta, da microestrutura numa resina fotosensível, o fotorresiste, tornando insolúvel as regiões atingidas pela radiação. É utilizado o fotorresiste positivo sobre a chapa de cobre, já na dimensão necessária. Em seguida, é feita a

revelação da resina. No processo de corrosão são removidas as regiões atingidas pela luz UV, obtendo-se a microestrutura final.

Nas Figuras 5.9 e 5.10 pode-se observar o resultado obtido na fabricação.



Figura 5.9 – Peça fabricada por litografia – garra1d

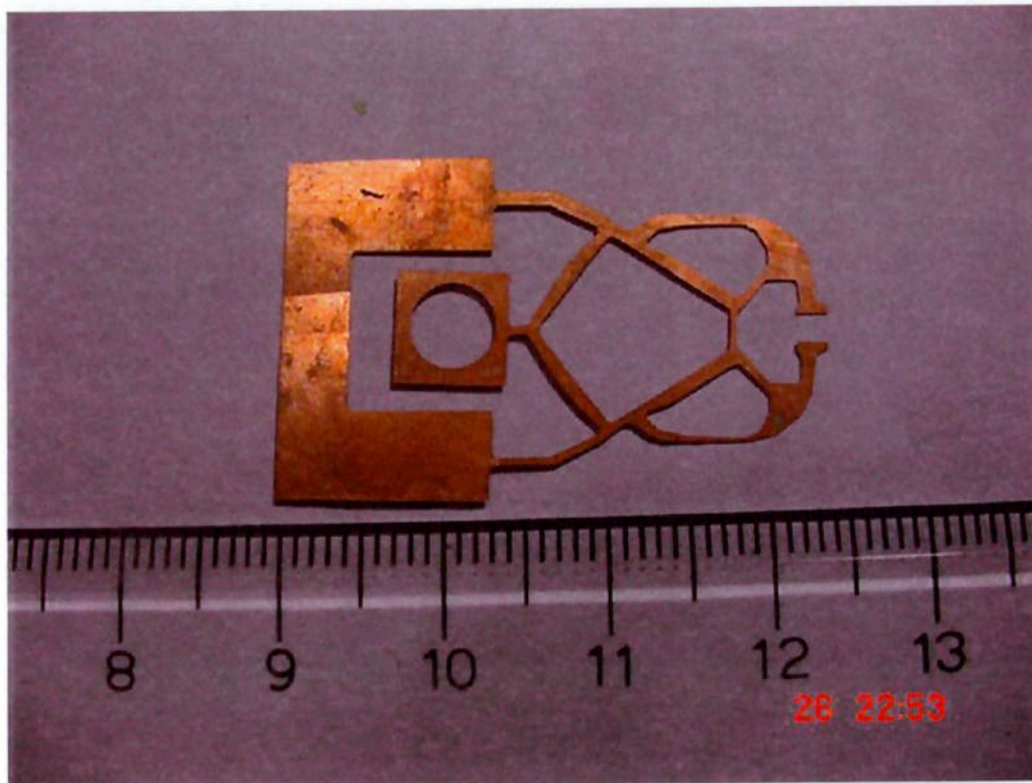


Figura 5.10 – Peça fabricada por litografia – garra1d

5.7 Teste Físico

Os micro-manipuladores foram afixados em peças de acrílico, com cera de abelha misturada a breu, apenas em seus pontos de fixação.

A maioria deles foi testada manualmente com auxílio de ferramenta, houve também o teste com a atuação de cerâmica piezelétrica. A deformação foi constatada através de microscópio, em laboratório da Engenharia Elétrica da Escola Politécnica.

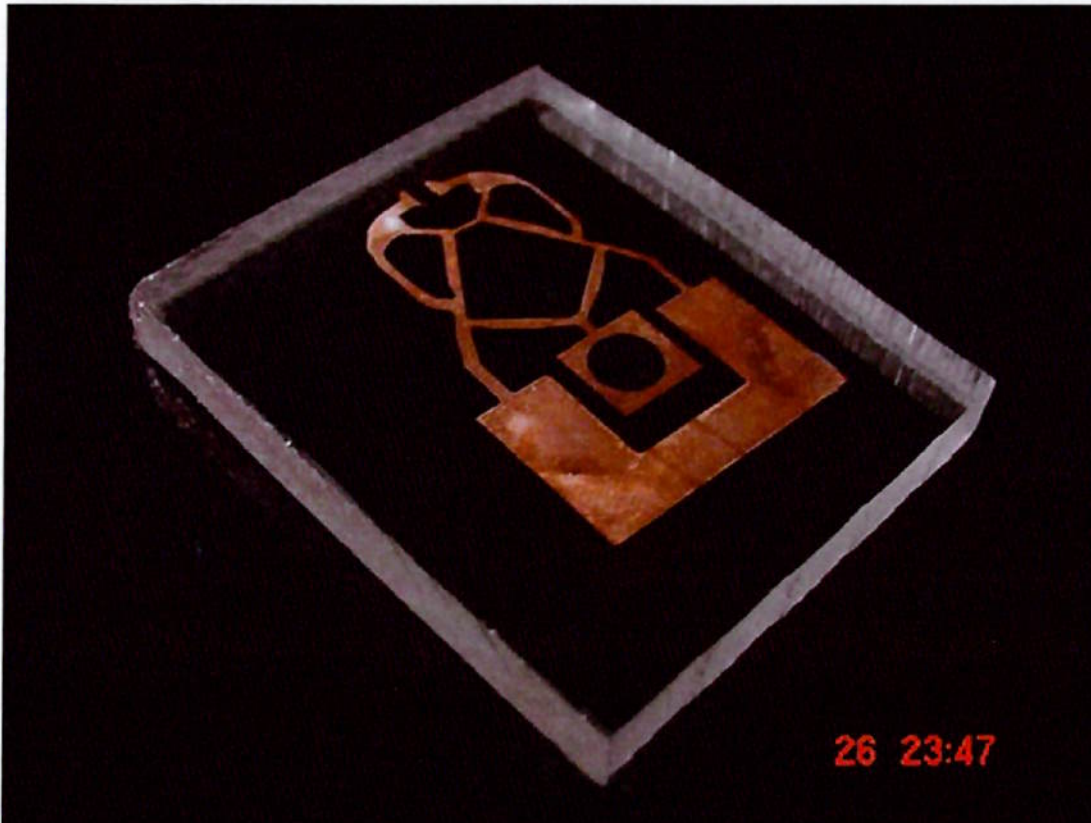


Figura 5.11 – Peça afixada em acrílico para teste manual – garra1d

5.8 Resultados Finais

Aqui são apresentados os resultados finais, para as 6 condições iniciais formuladas, na seqüência em que o trabalho foi se desenvolvendo, ou seja:

- Definição das condições iniciais de projeto;
- Resultado da otimização, obtido com o software de otimização;
- Interpretação inicial, contorno por linhas;
- Teste computacional, deformação e tensão;
- Interpretação final, imagem para fabricação;
- Foto dos mecanismos fabricados.

Dessa forma, é possível visualizar melhor todas as etapas do trabalho, desde o projeto até a fabricação de uma mesma peça e verificar o resultado.

5.8.1 Garra 1 – força aplicada para a direita

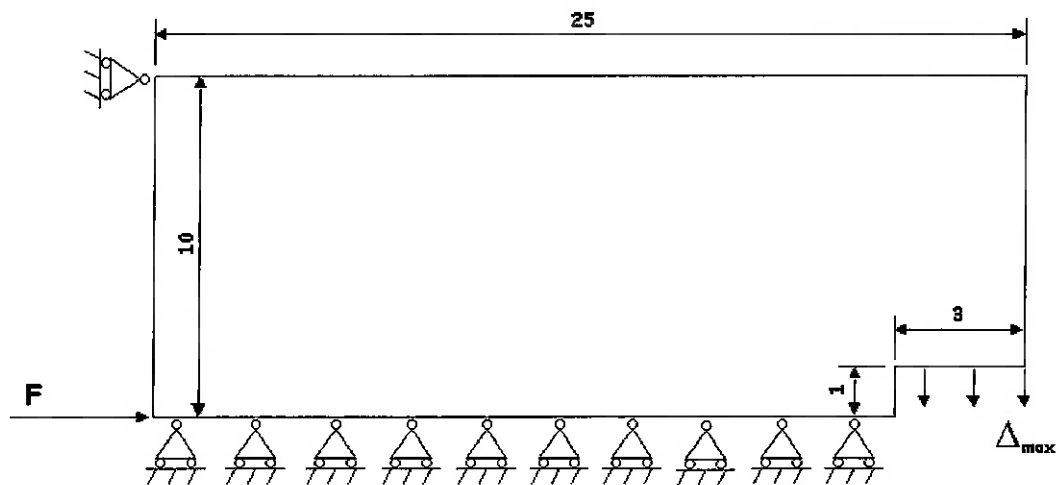


Figura 5.12 – Garra 1, força F aplicada para a direita (garra1d)

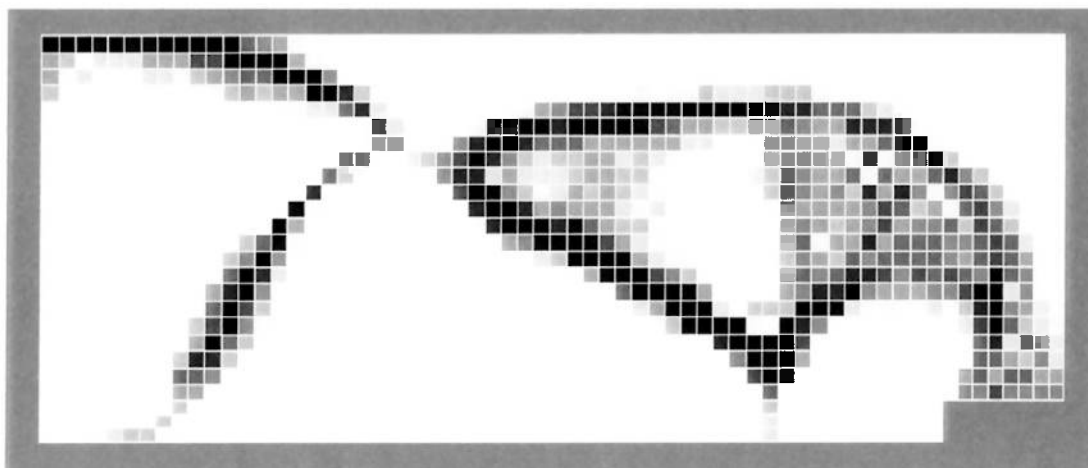


Figura 5.13 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra1d

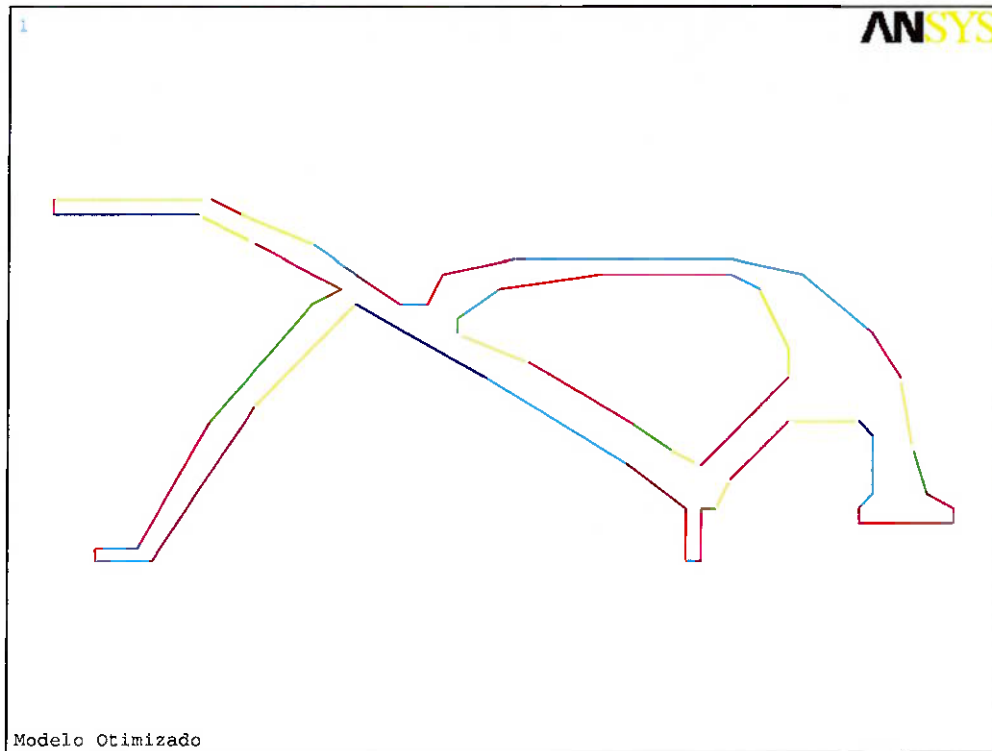


Figura 5.14 – Interpretação da garra1d feita no ANSYS (contorno por linhas)

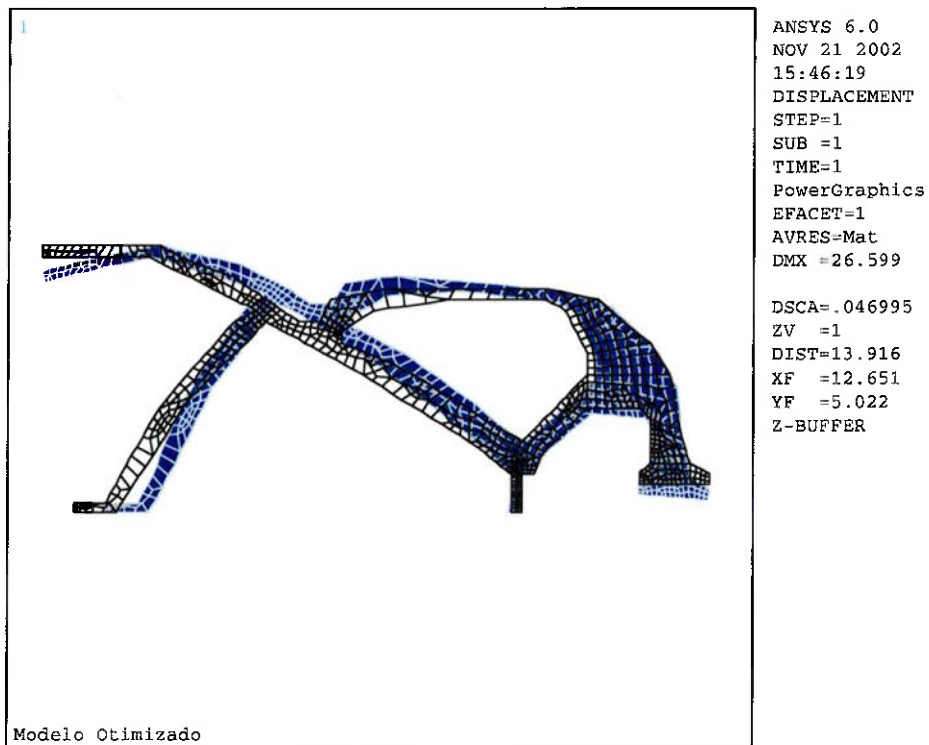


Figura 5.15 – Teste da garra1d – configuração deformada (azul) e não deformada

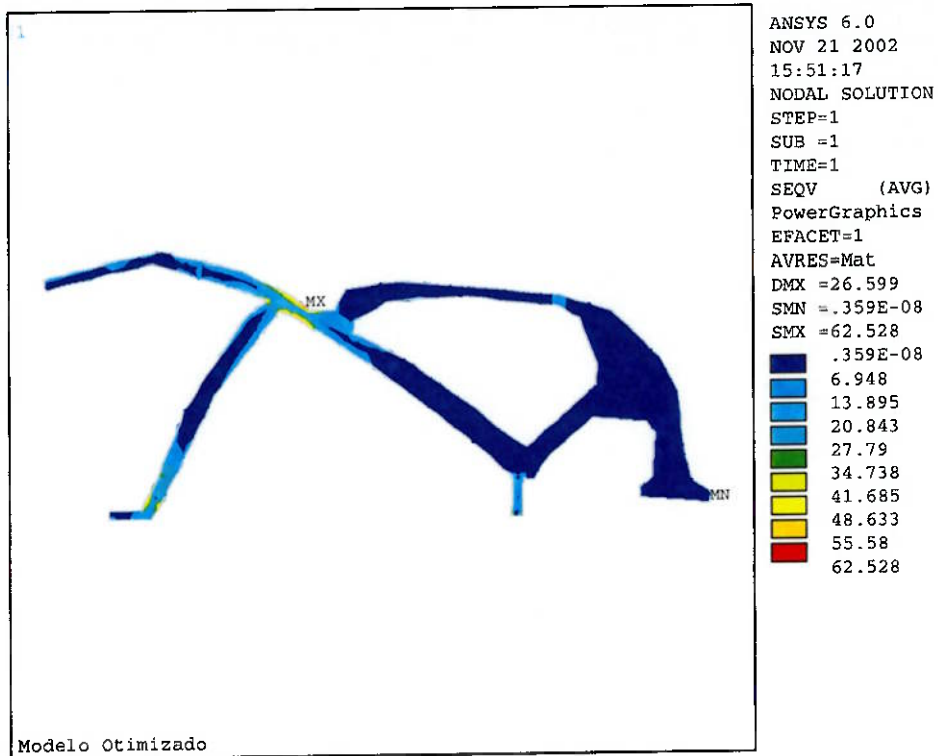


Figura 5.16 – Teste da garra1d – tensão de Von Mises

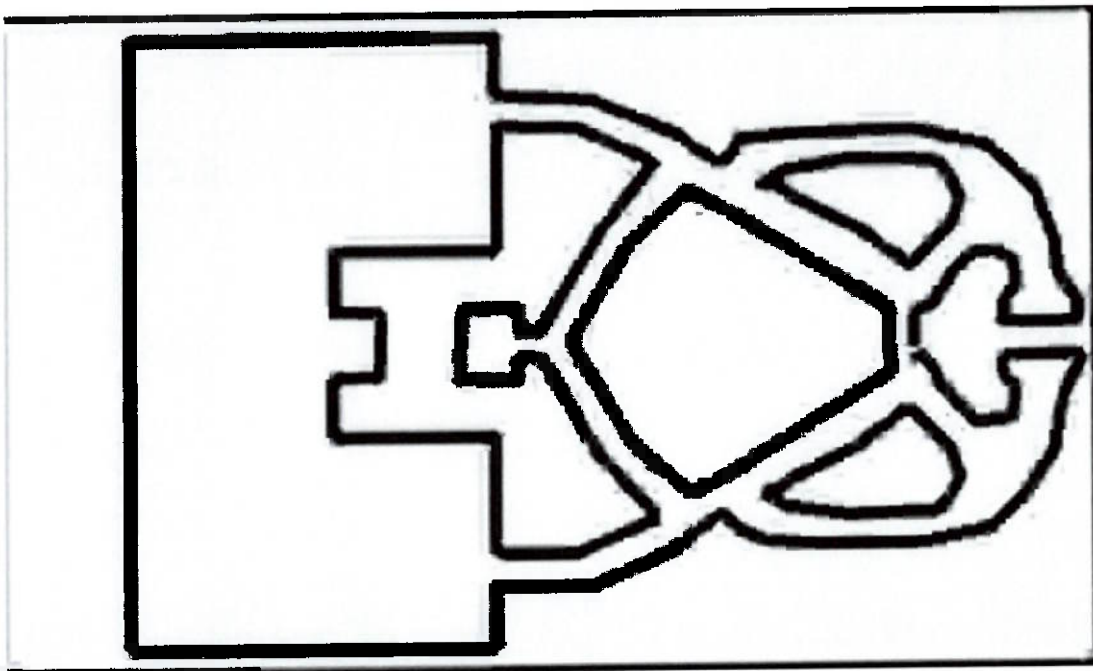


Figura 5.17 – Interpretação final da garra1d – atuação piezelétrica

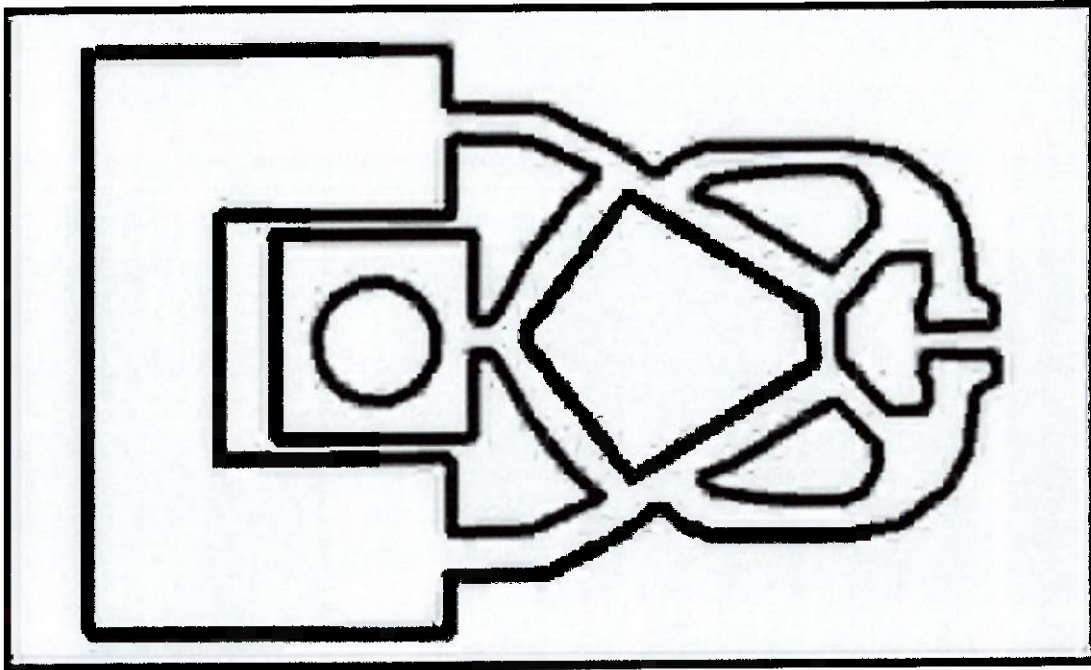


Figura 5.18 – Interpretação final da garra1d – atuação manual

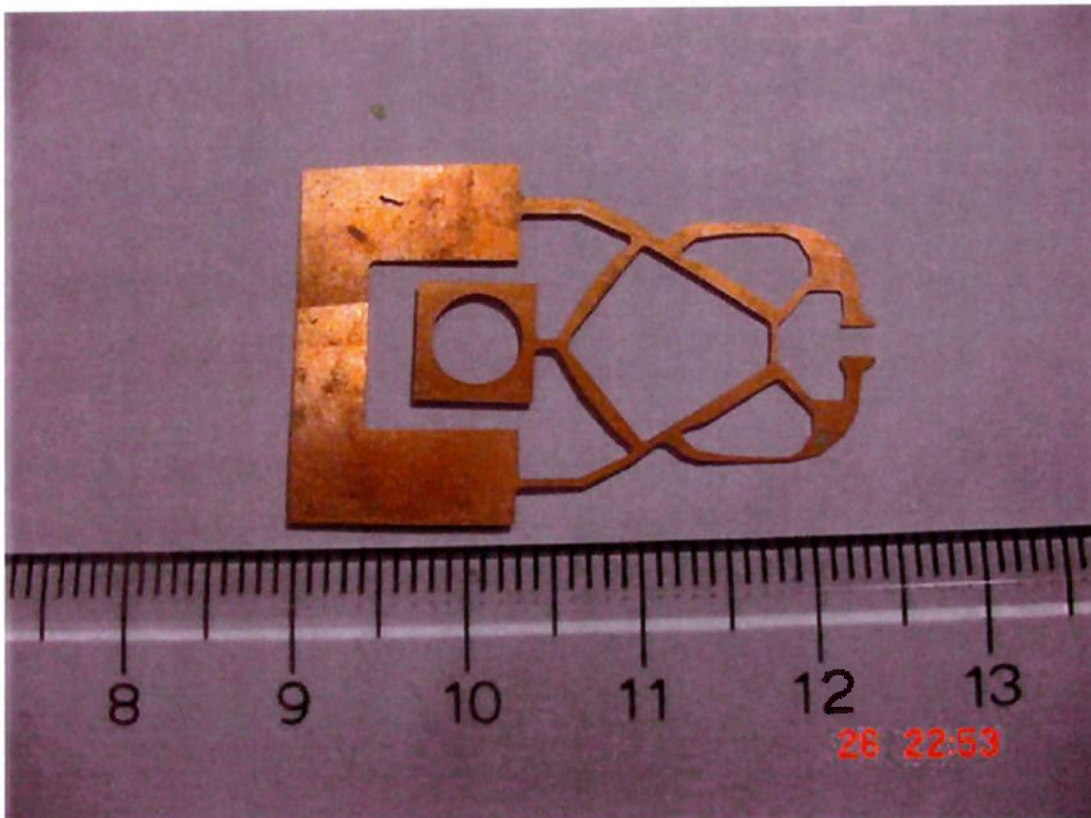


Figura 5.19 – Peça fabricada por litografia – garra1d

5.8.2 Garra 1 – força aplicada para a esquerda

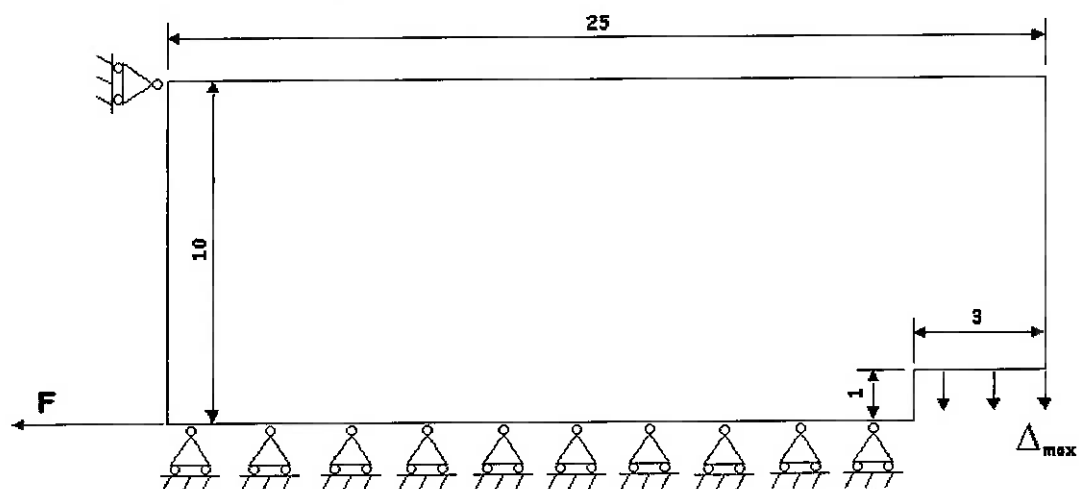


Figura 5.20 – Garra 1, força F aplicada para a esquerda (garra1e)

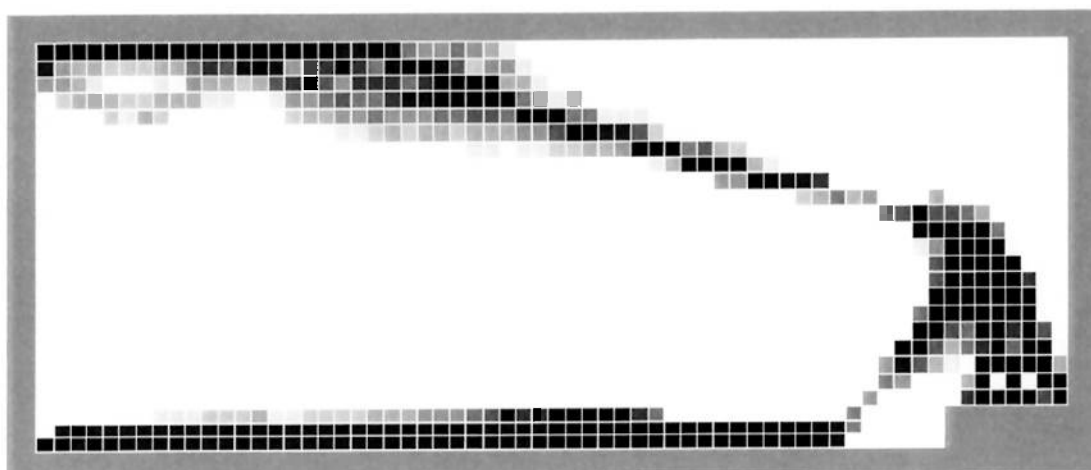


Figura 5.21 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra1e

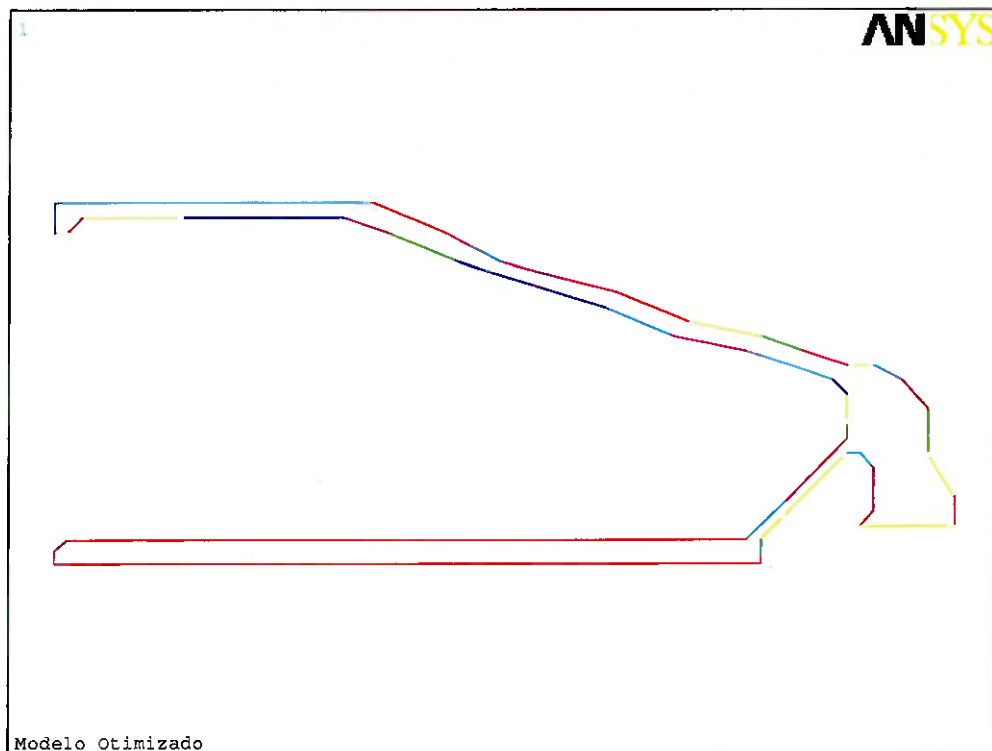


Figura 5.22 – Interpretação da garra feita no ANSYS (contorno por linhas)

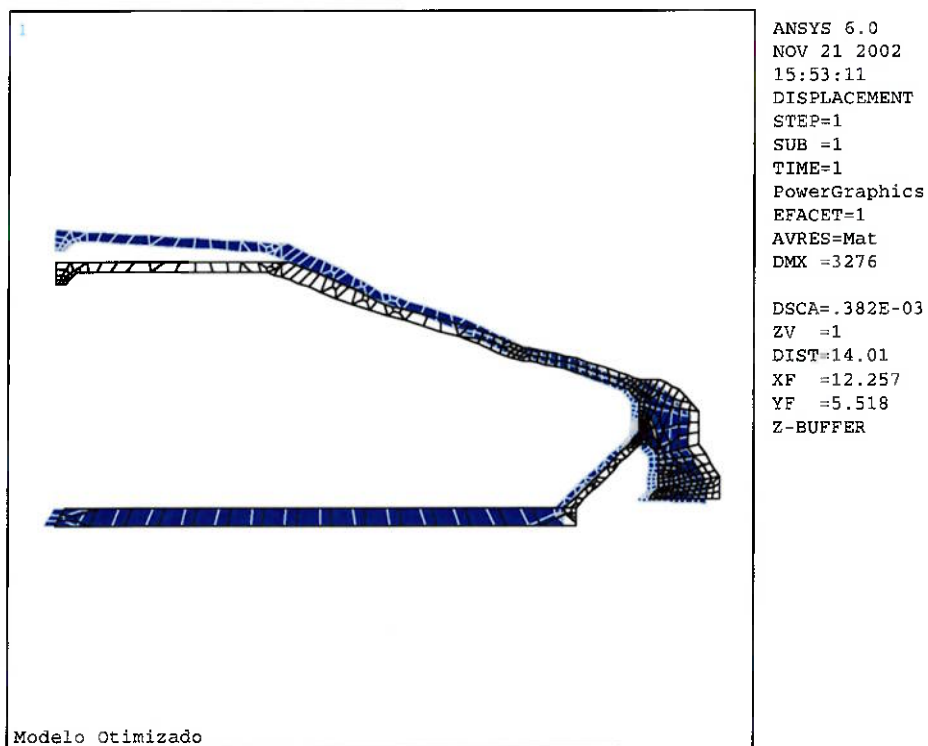


Figura 5.23 – Teste da garra e – configuração deformada (azul) e não deformada

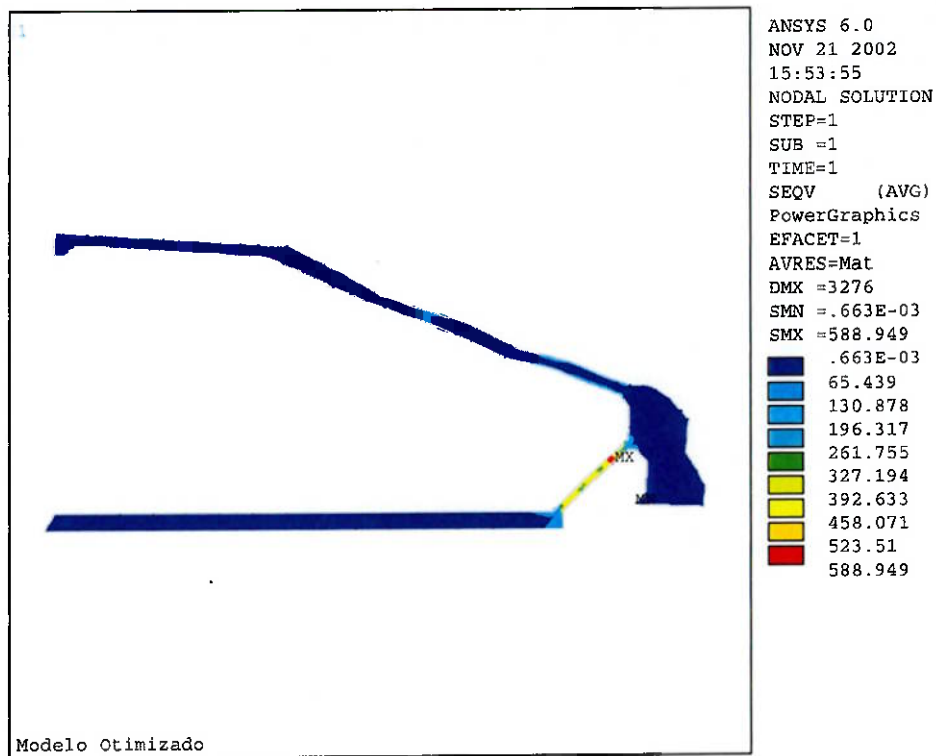


Figura 5.24 – Teste da garra le – tensão de Von Mises

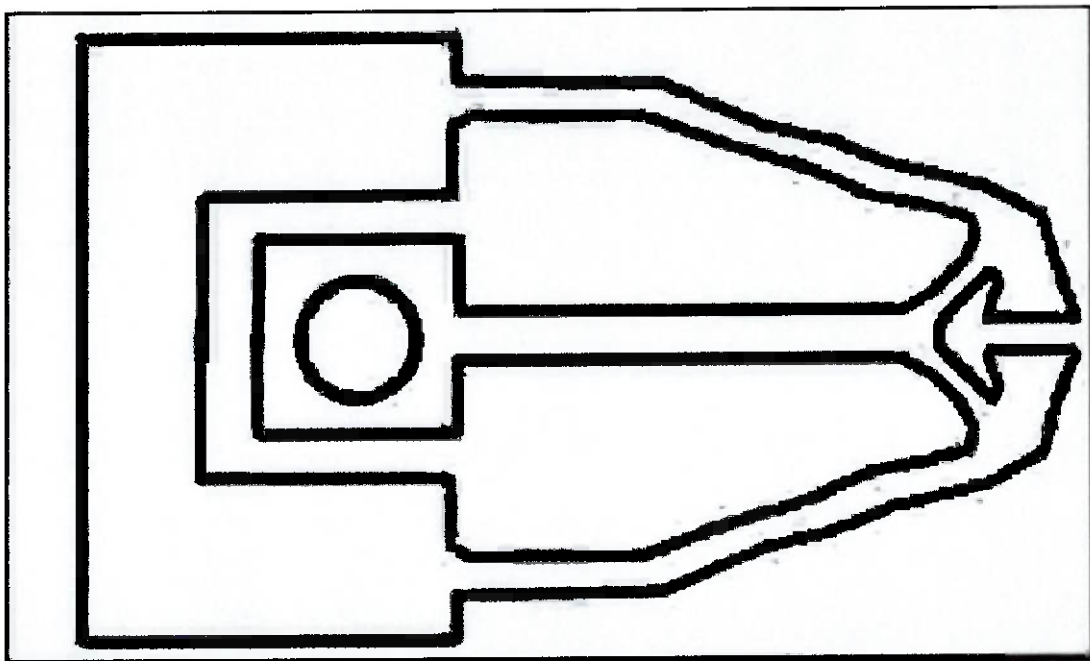


Figura 5.25 – Interpretação final da garra le – atuação manual

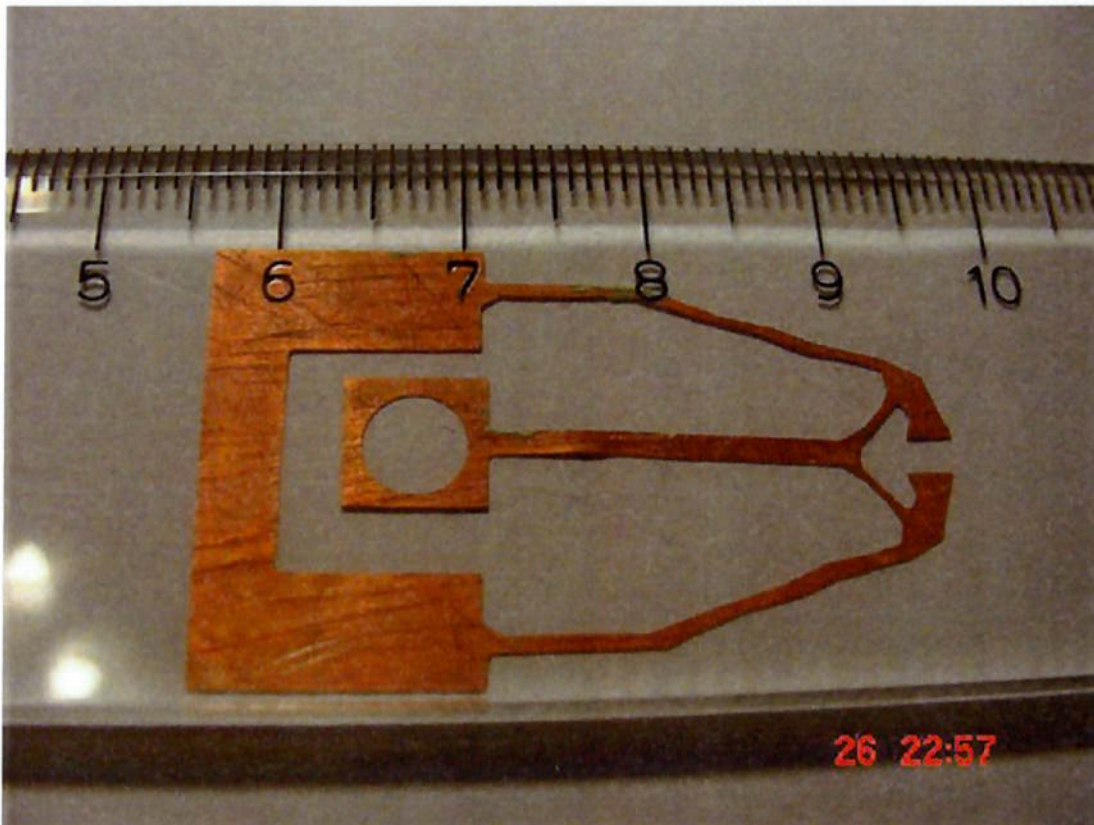


Figura 5.26 – Peça fabricada por litografia – garrale

5.8.3 Garra 2 – força aplicada para baixo (fechando)

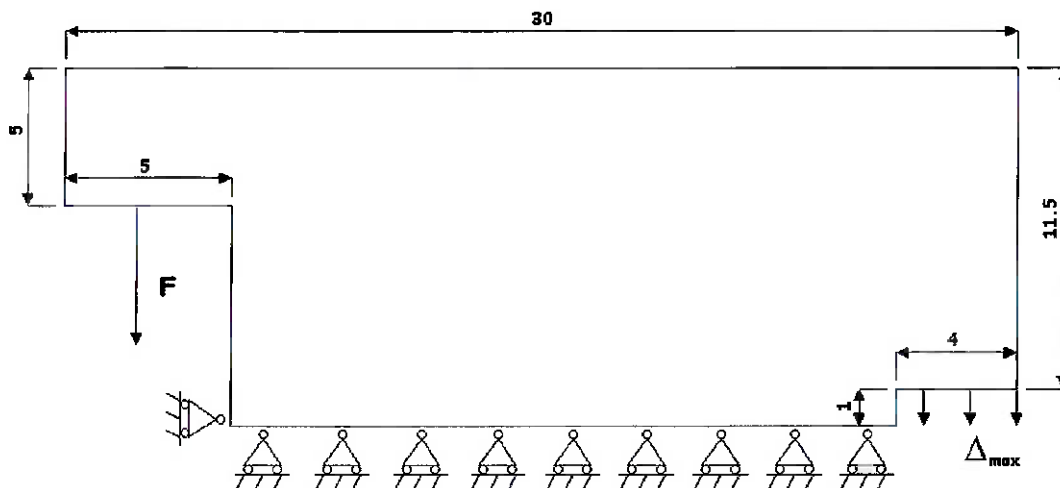


Figura 5.27 – Garra 2, força F aplicada para baixo (garra2b)

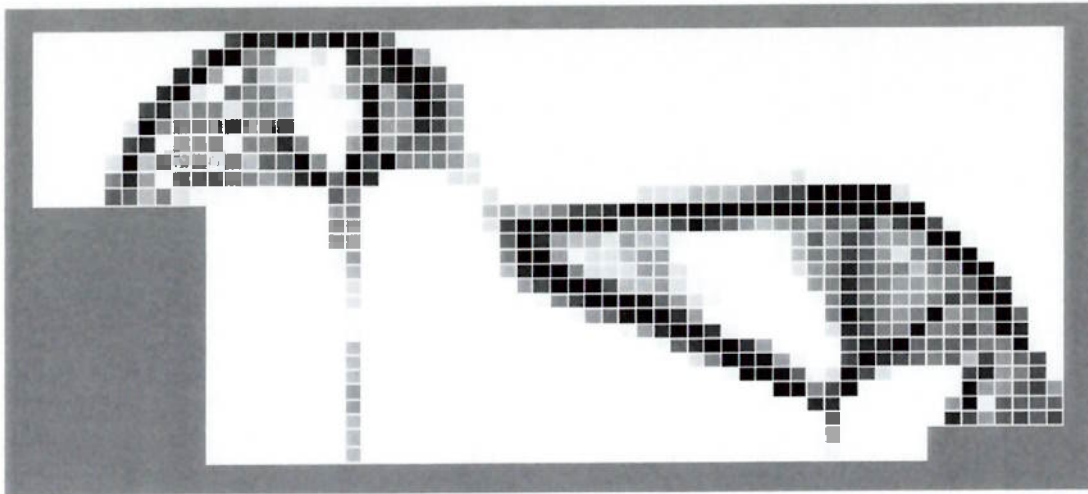


Figura 5.28 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra2b

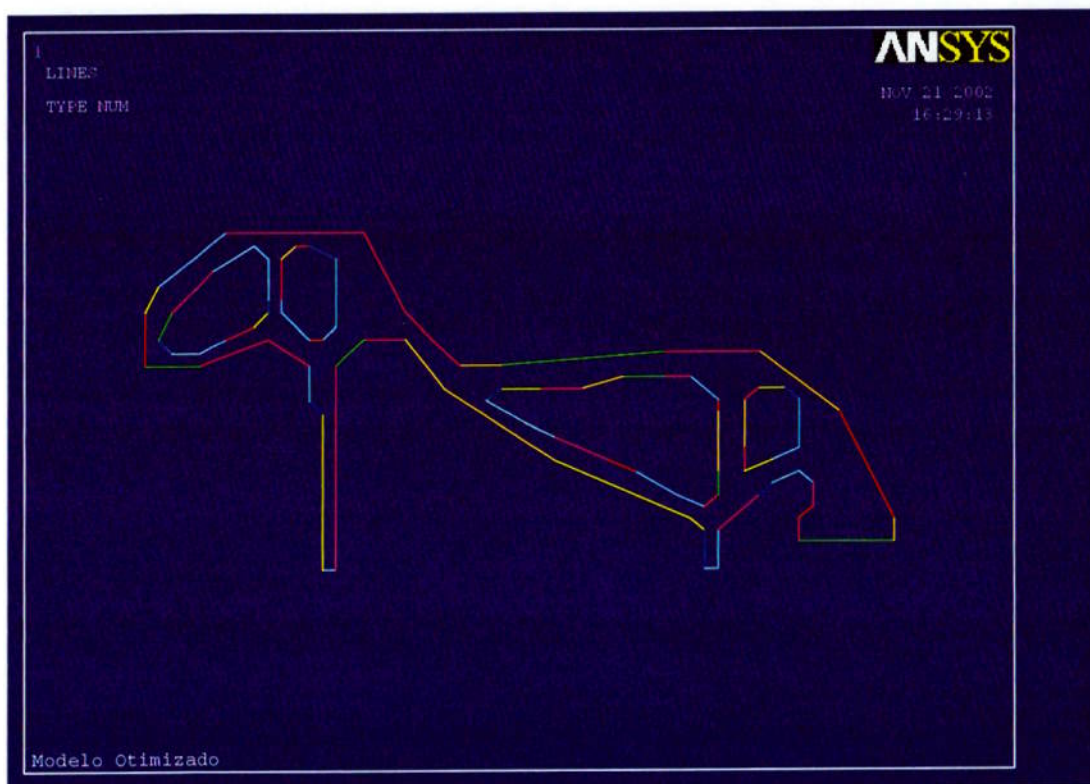


Figura 5.29 – Interpretação da garra2b feita no ANSYS (contorno por linhas)

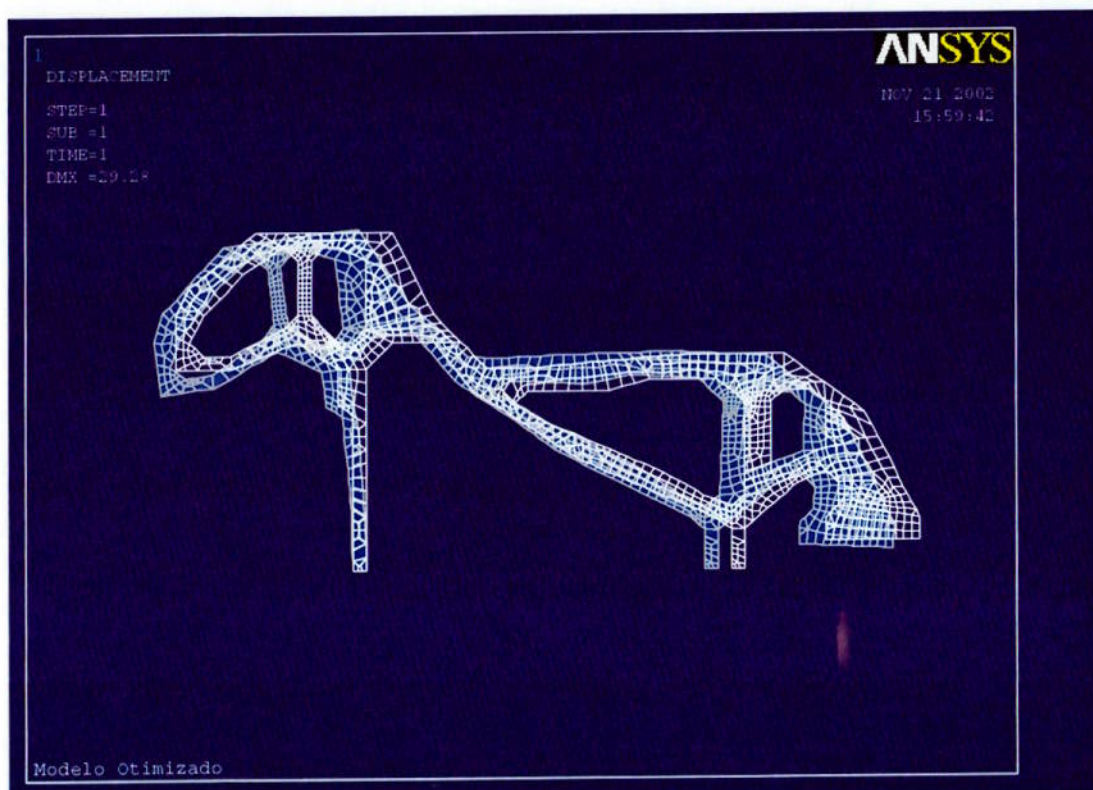


Figura 5.30 – Teste da garra2b – configuração deformada (azul) e não deformada

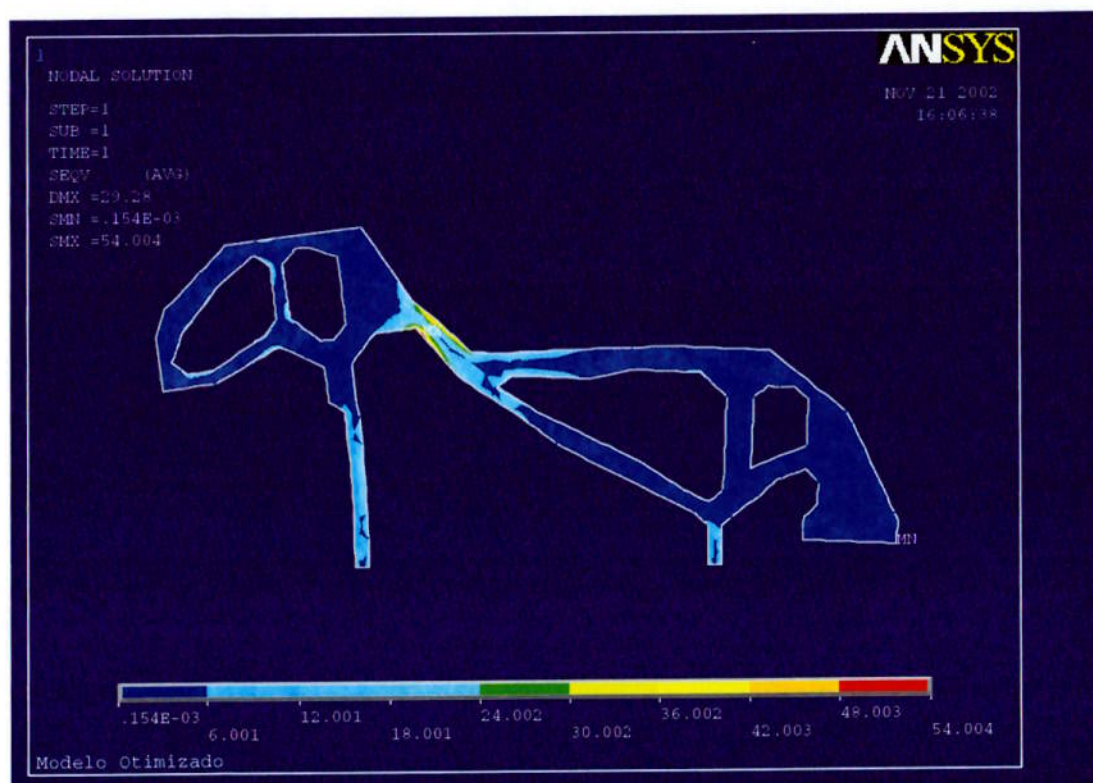


Figura 5.31 – Teste da garra2b – tensão de Von Mises

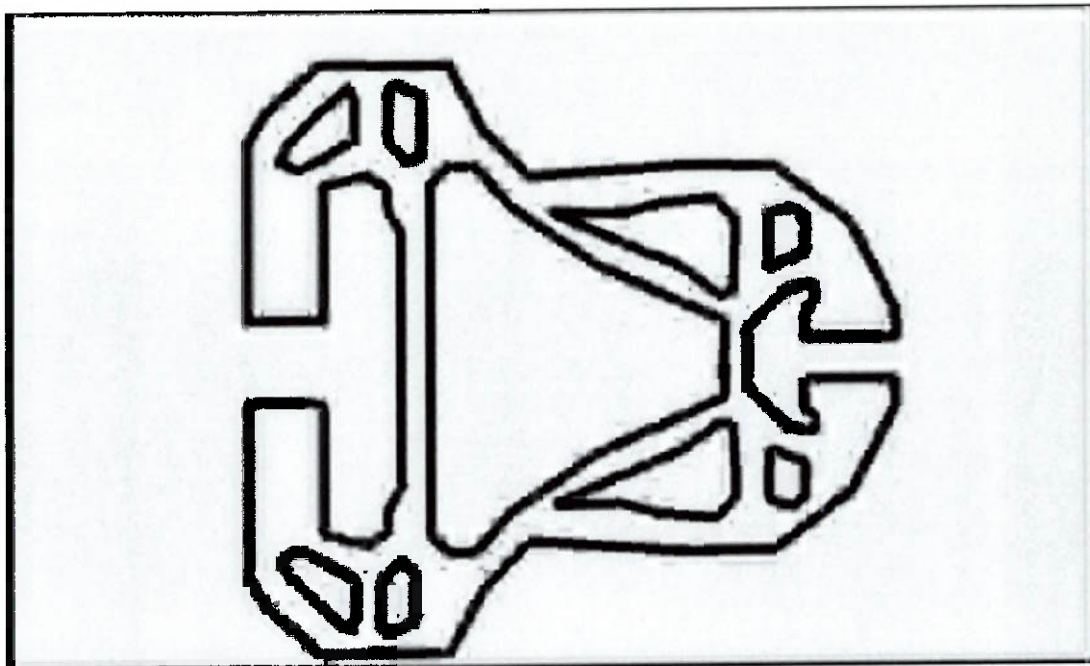


Figura 5.32 – Interpretação final da garra2b – atuação piezelétrica

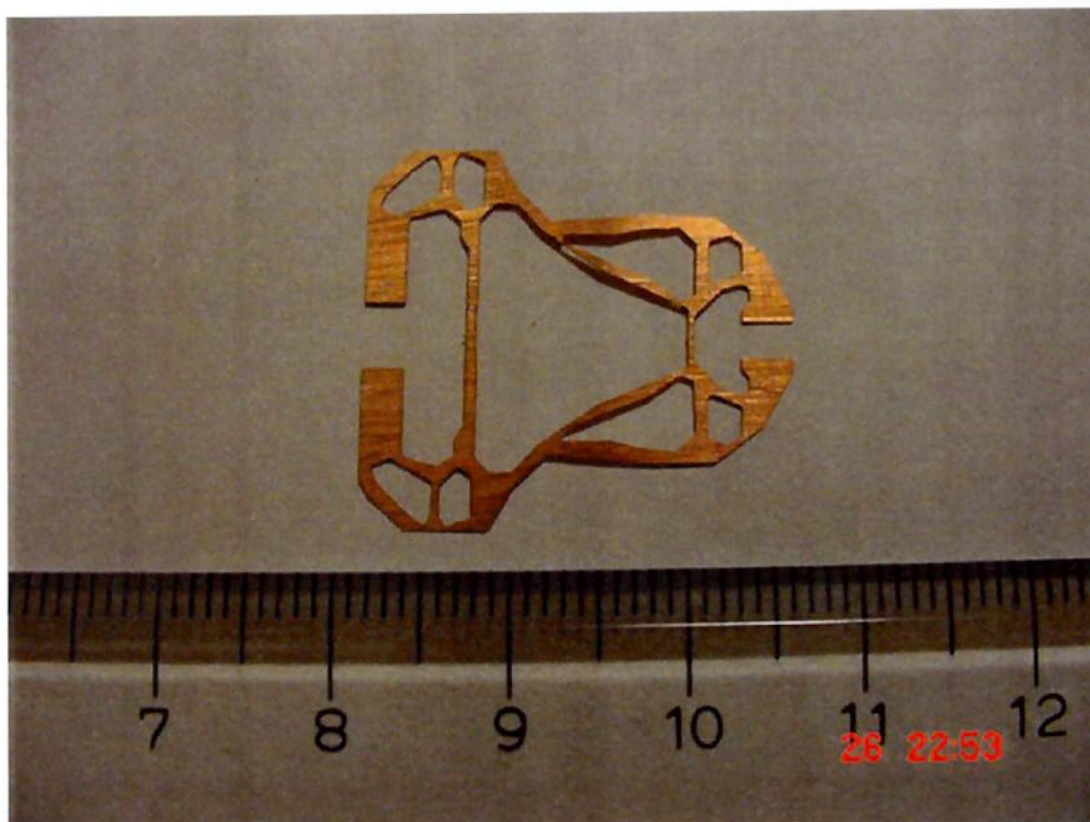


Figura 5.33 – Peça fabricada por litografia – garra2b

5.8.4 Garra 2 – força aplicada para cima (abrindo)

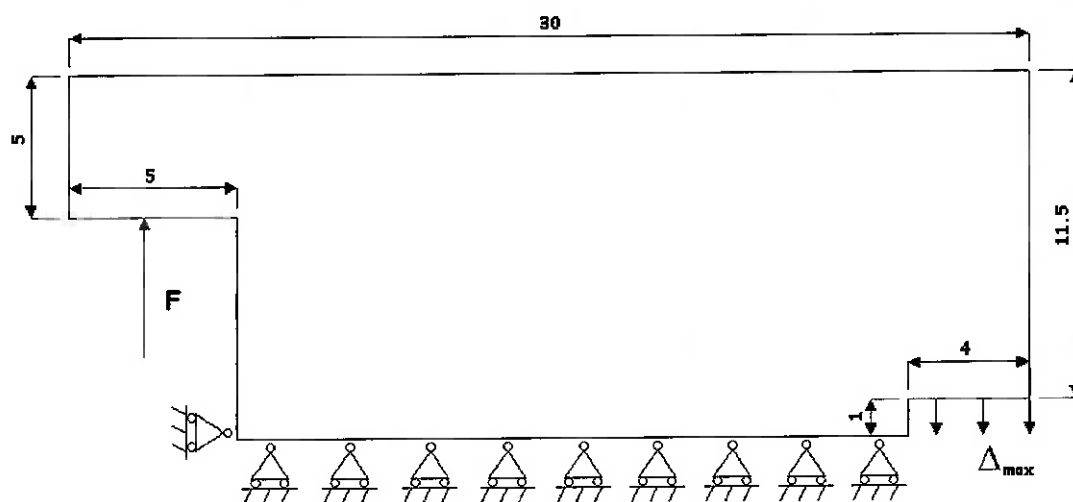


Figura 5.34 – Garra 2, força F aplicada para cima (garra2c)

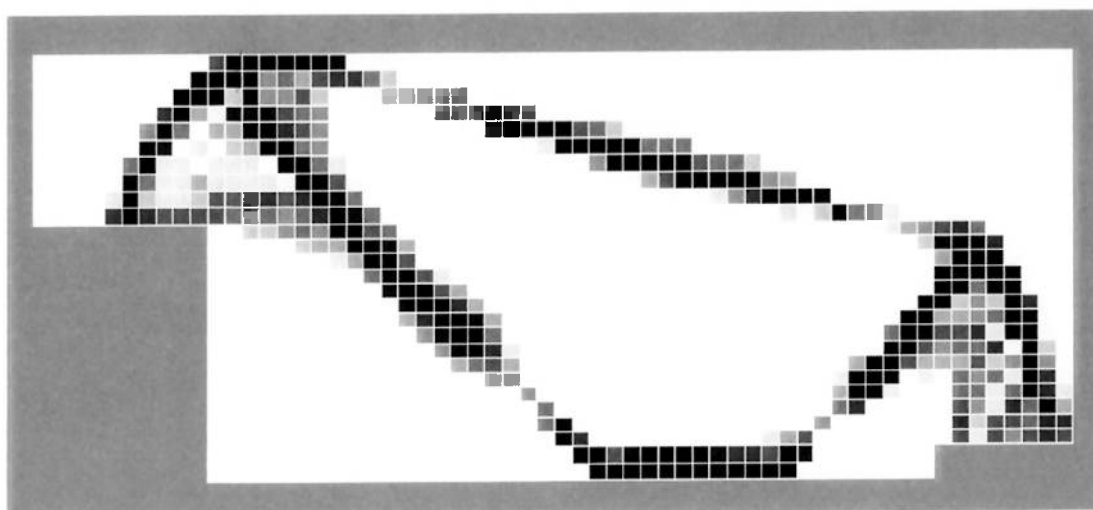


Figura 5.35 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra2c

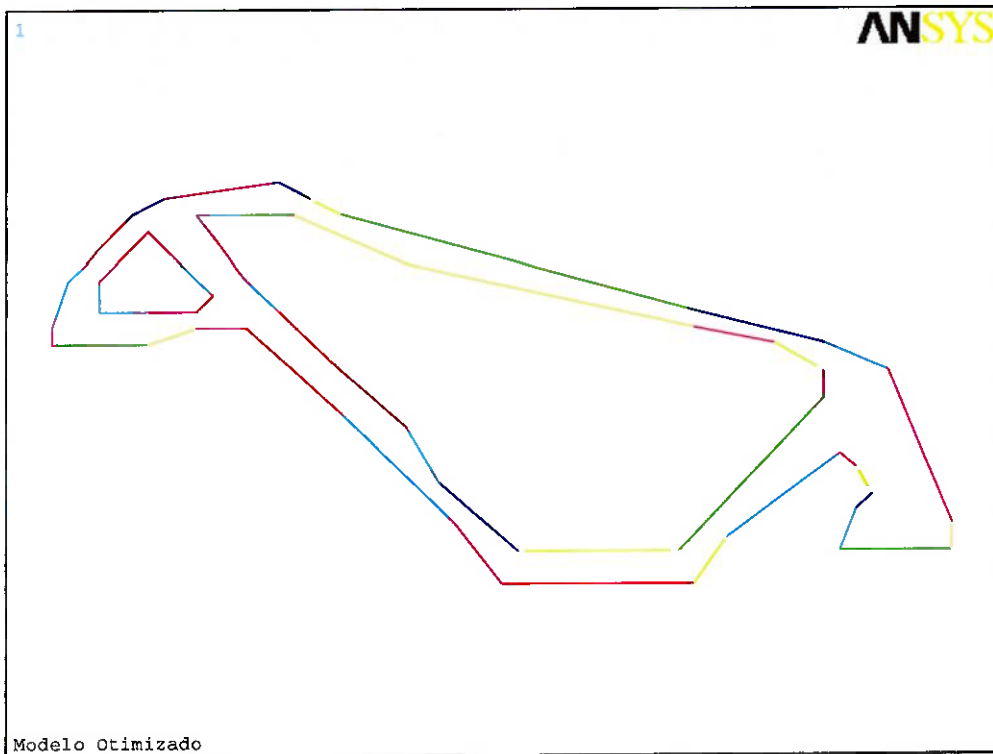


Figura 5.36 – Interpretação da garra2c feita no ANSYS (contorno por linhas)

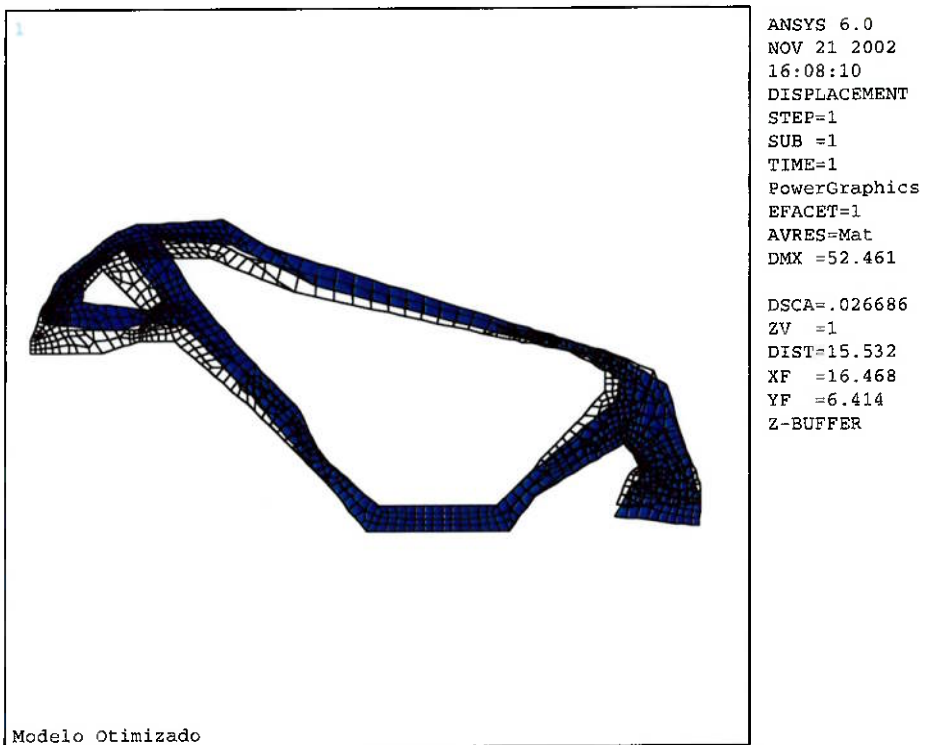


Figura 5.37 – Teste da garra2c – configuração deformada (azul) e não deformada

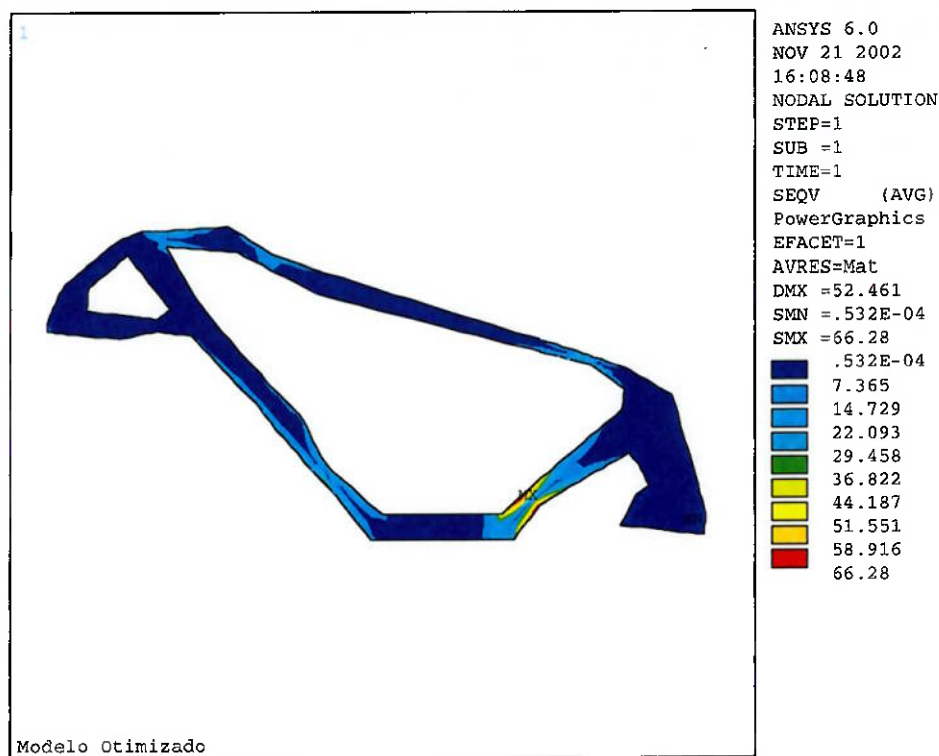


Figura 5.38 – Teste da garra2c – tensão de Von Mises

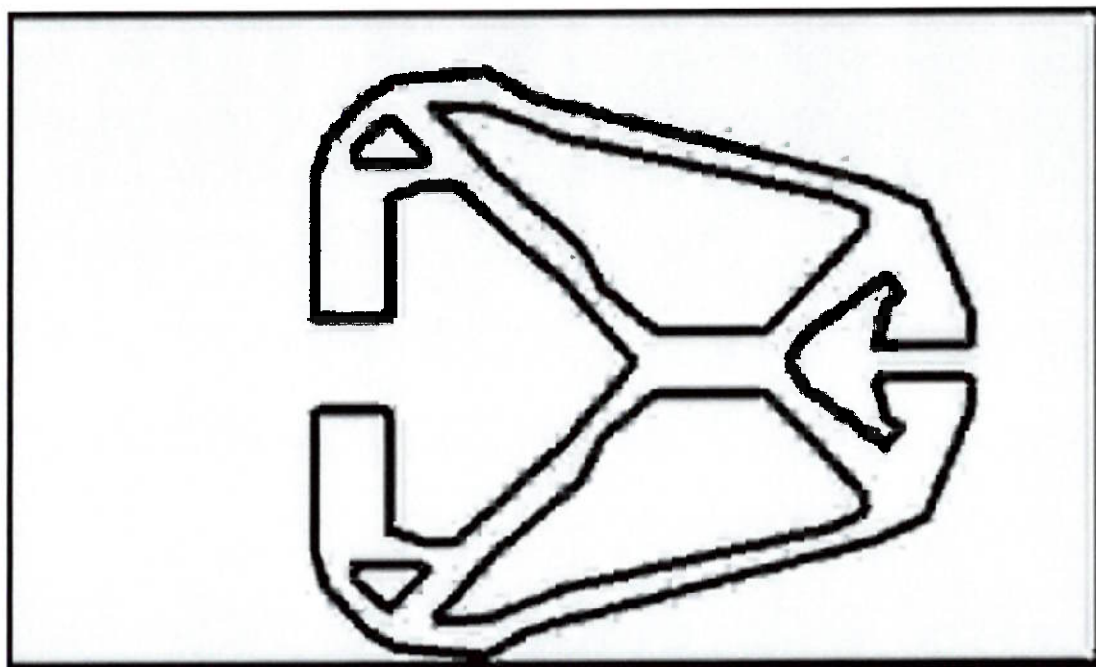


Figura 5.39 – Interpretação final da garra2c – atuação piezolétrica

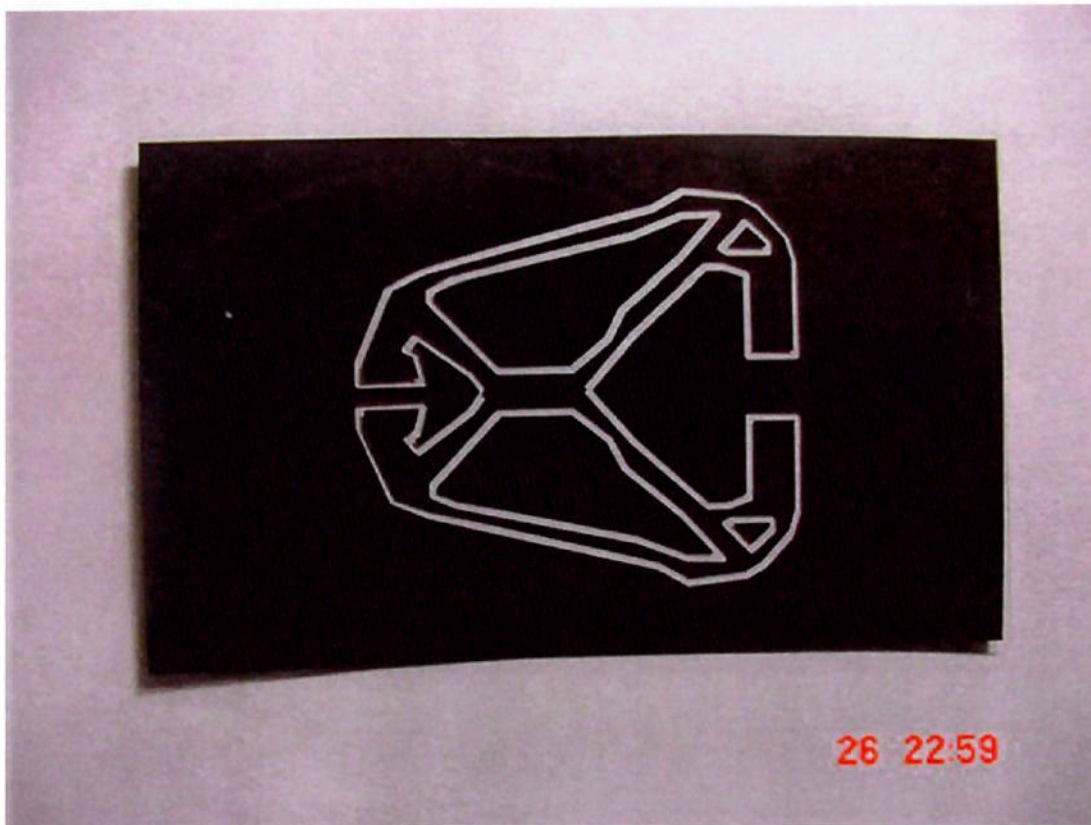


Figura 5.40 – Fotolito utilizado na fabricação – garra 2c

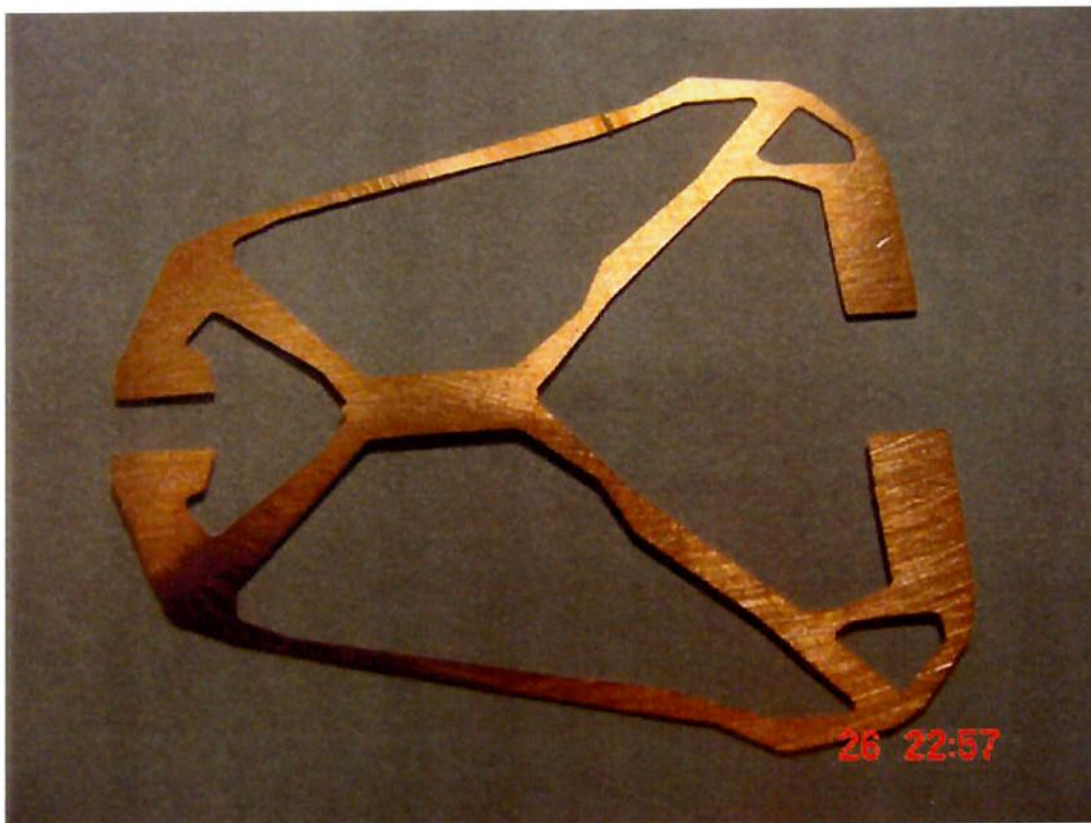


Figura 5.41 – Peça fabricada por litografia – garra2c

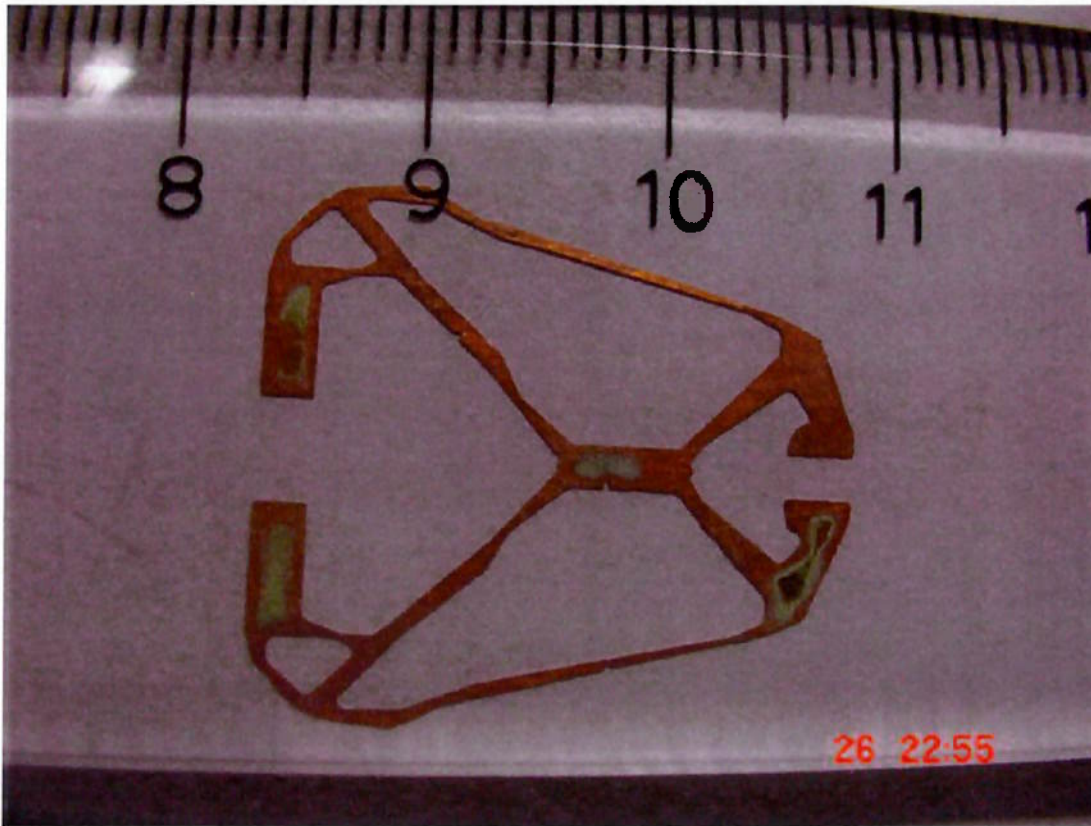


Figura 5.42 – Peça fabricada por litografia – garra2c

5.8.5 Garra 3 – força aplicada para a direita

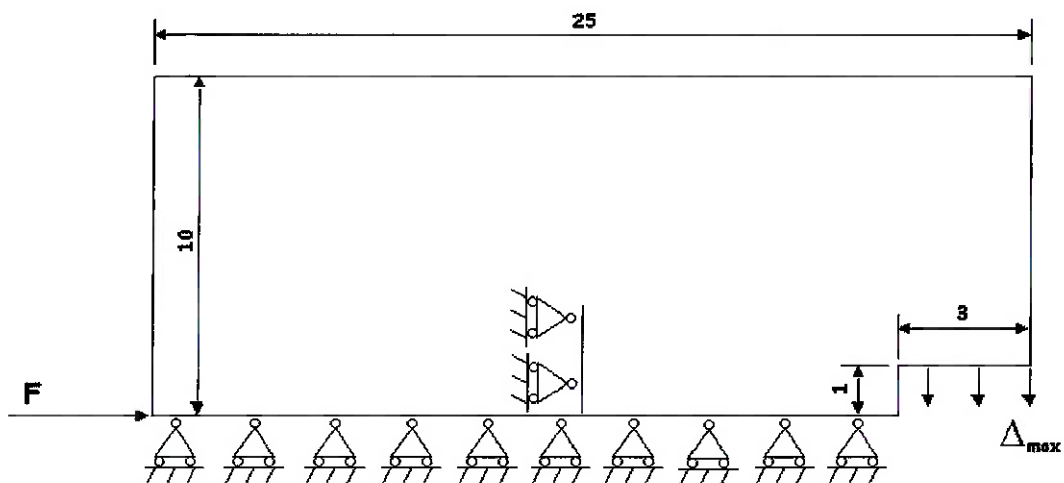


Figura 5.43 – Garra 3, força F aplicada para a direita (garra3d)

Este domínio de projeto, apresentado na Figura 5.43 é igual ao da garra 1, mudando apenas os pontos de fixação.

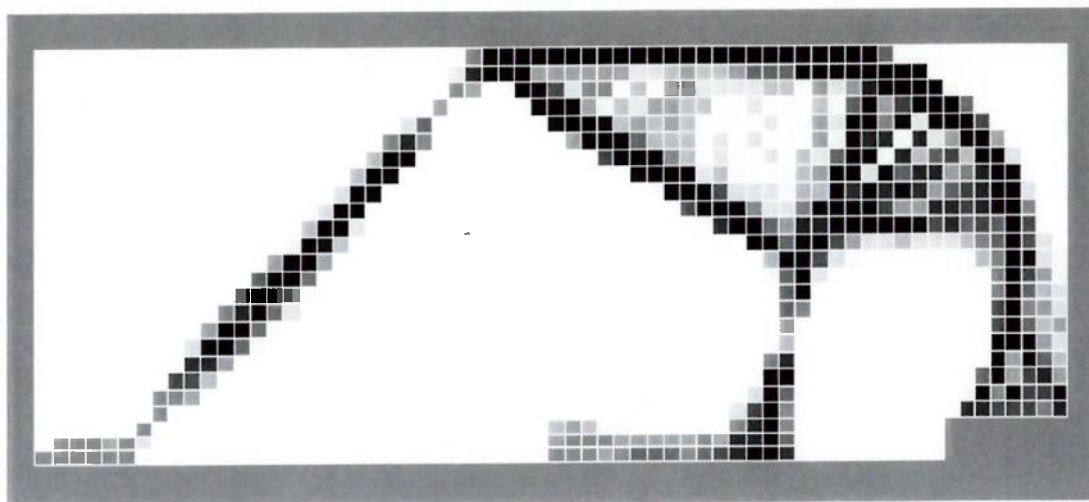


Figura 5.44 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra3d

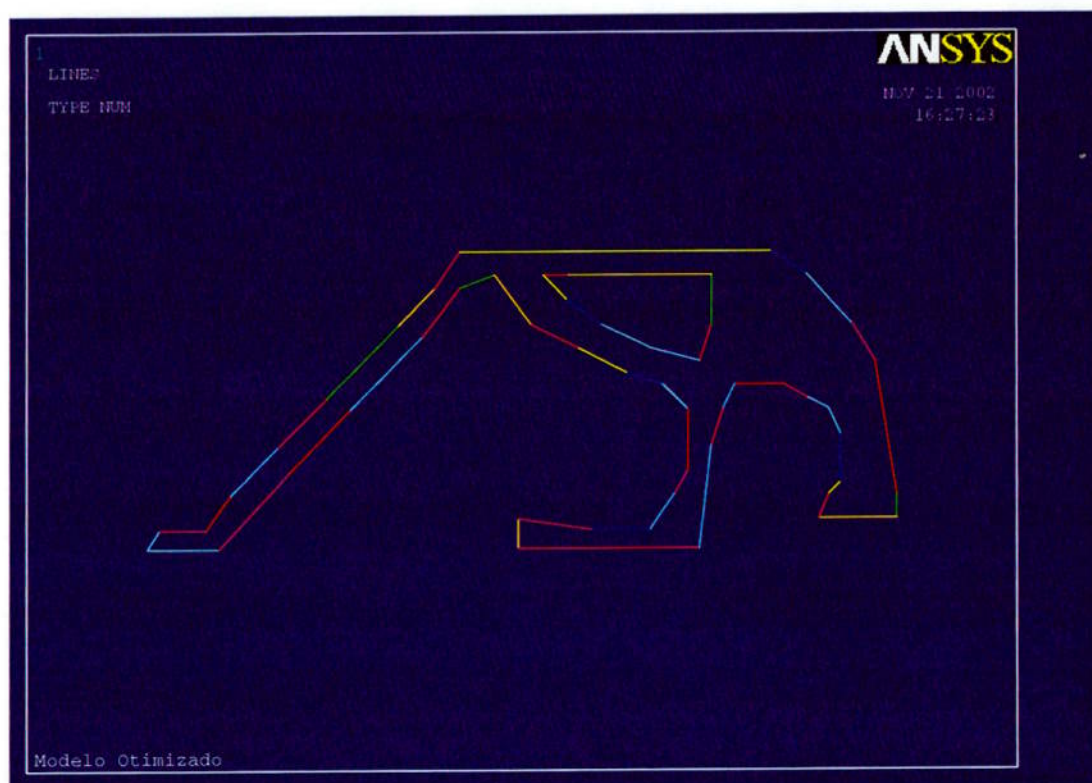


Figura 5.45 – Interpretação da garra3d feita no ANSYS (contorno por linhas)

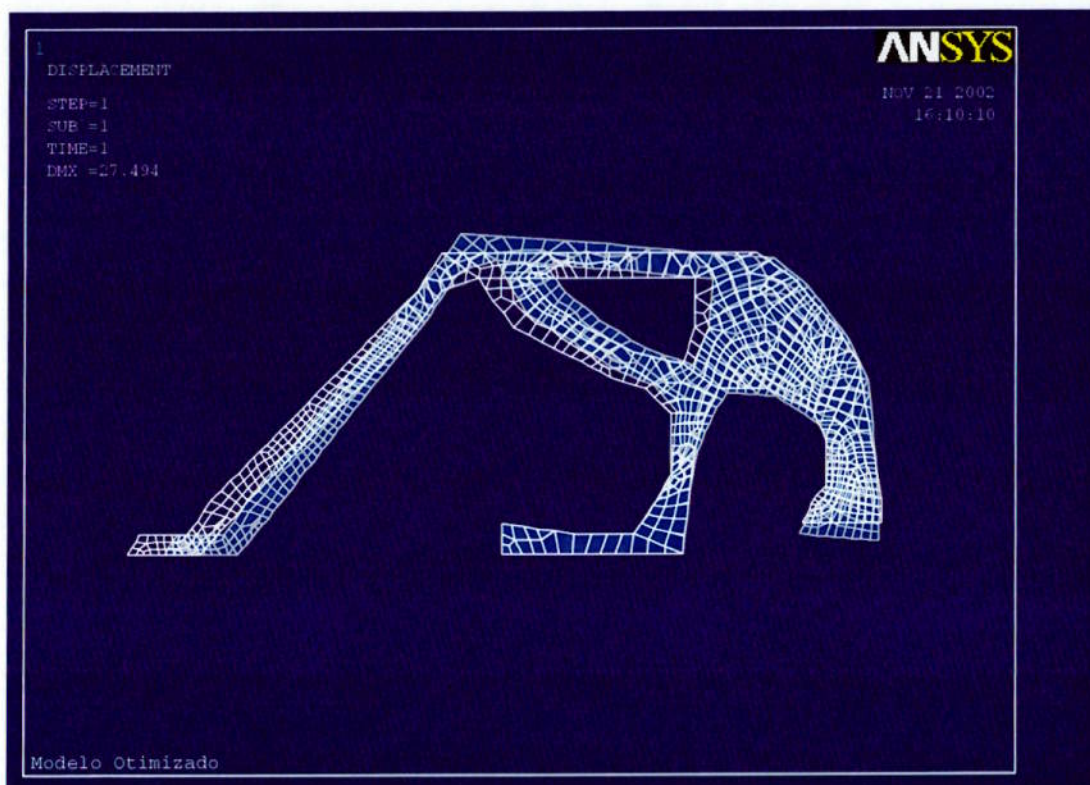


Figura 5.46 – Teste da garra3d – configuração deformada (azul) e não deformada



Figura 5.47 – Teste da garra3d – tensão de Von Mises

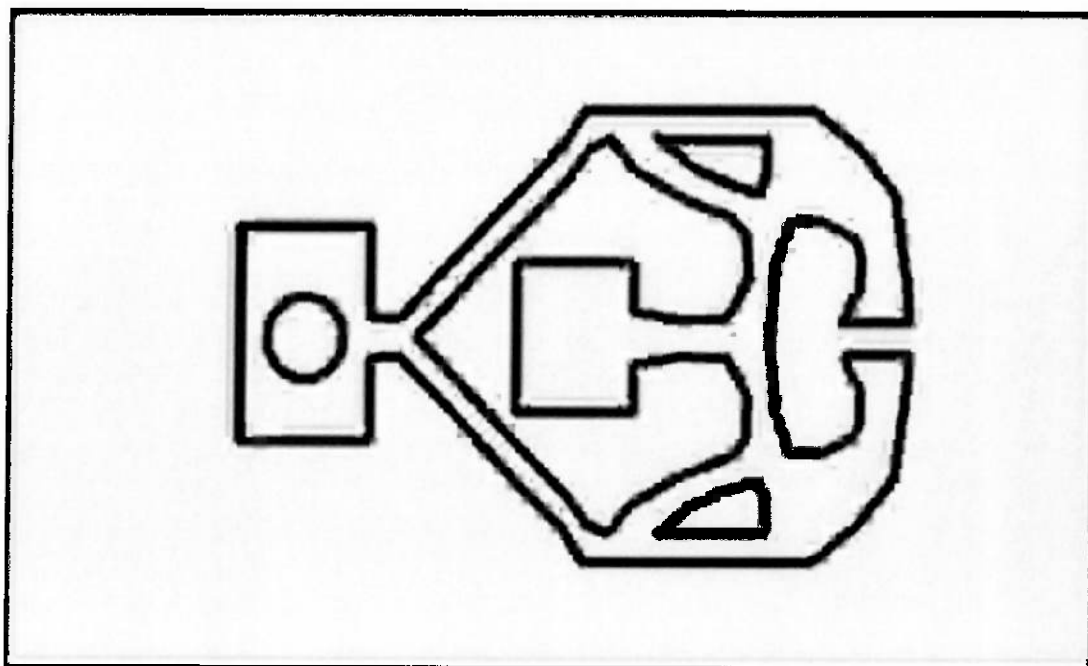


Figura 5.48 – Interpretação final da garra3d – atuação manual

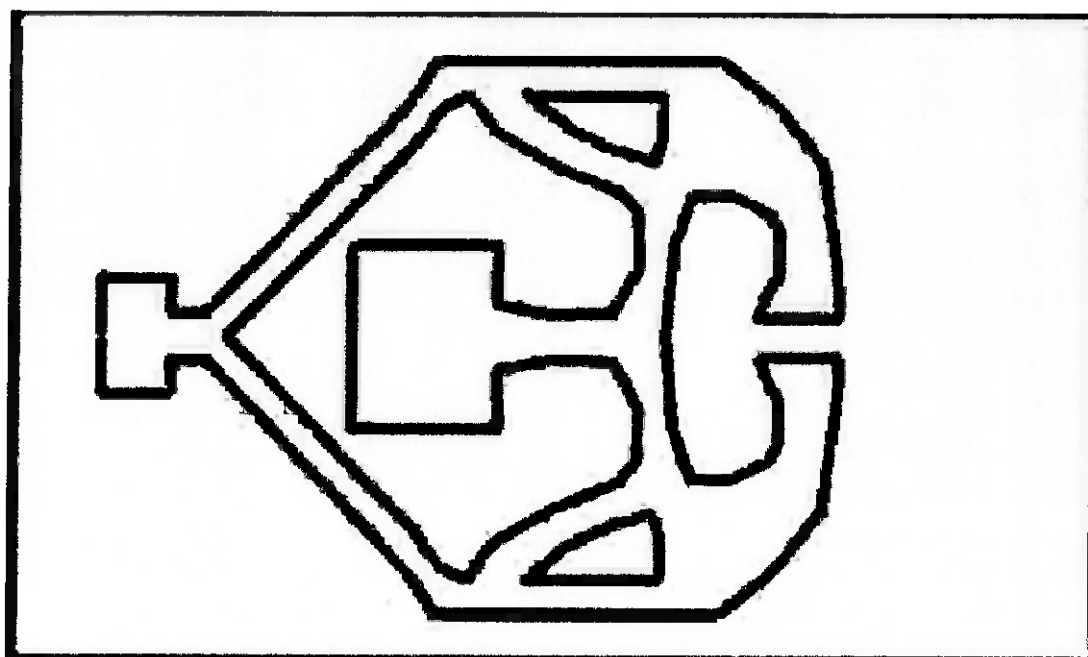


Figura 5.49 – Interpretação final da garra3d – atuação piezolétrica

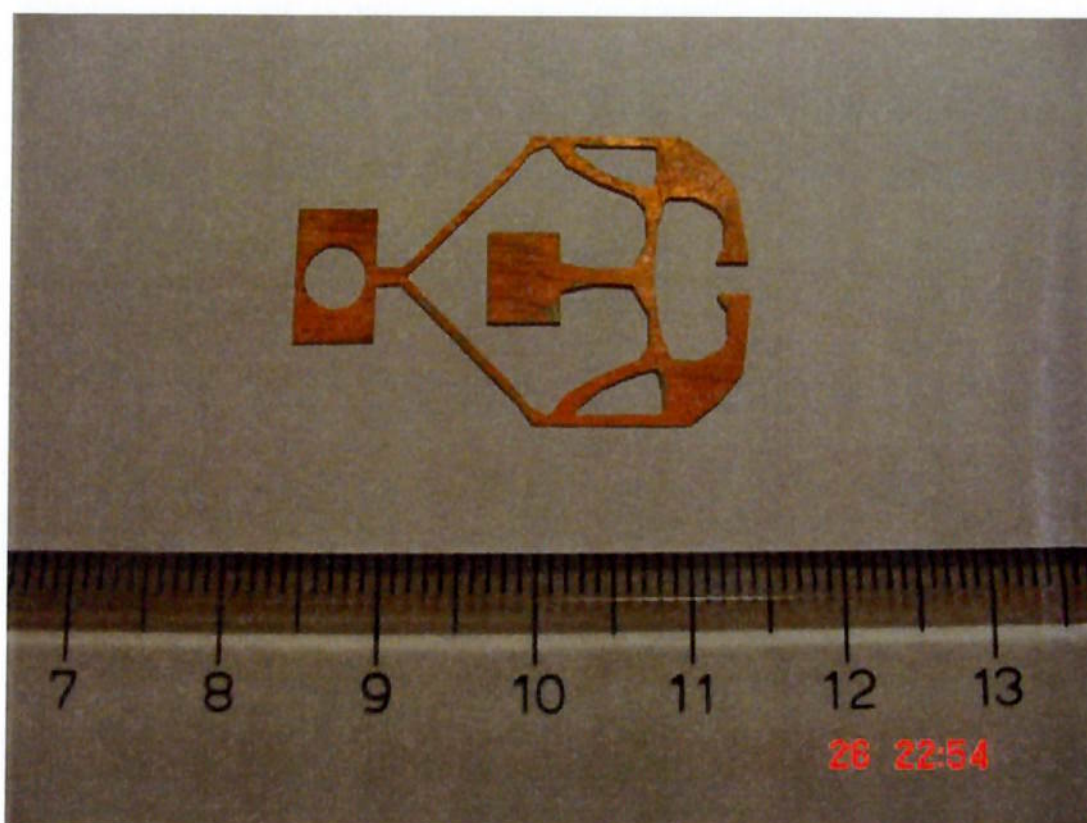


Figura 5.50 – Peça fabricada por litografia – garra3d

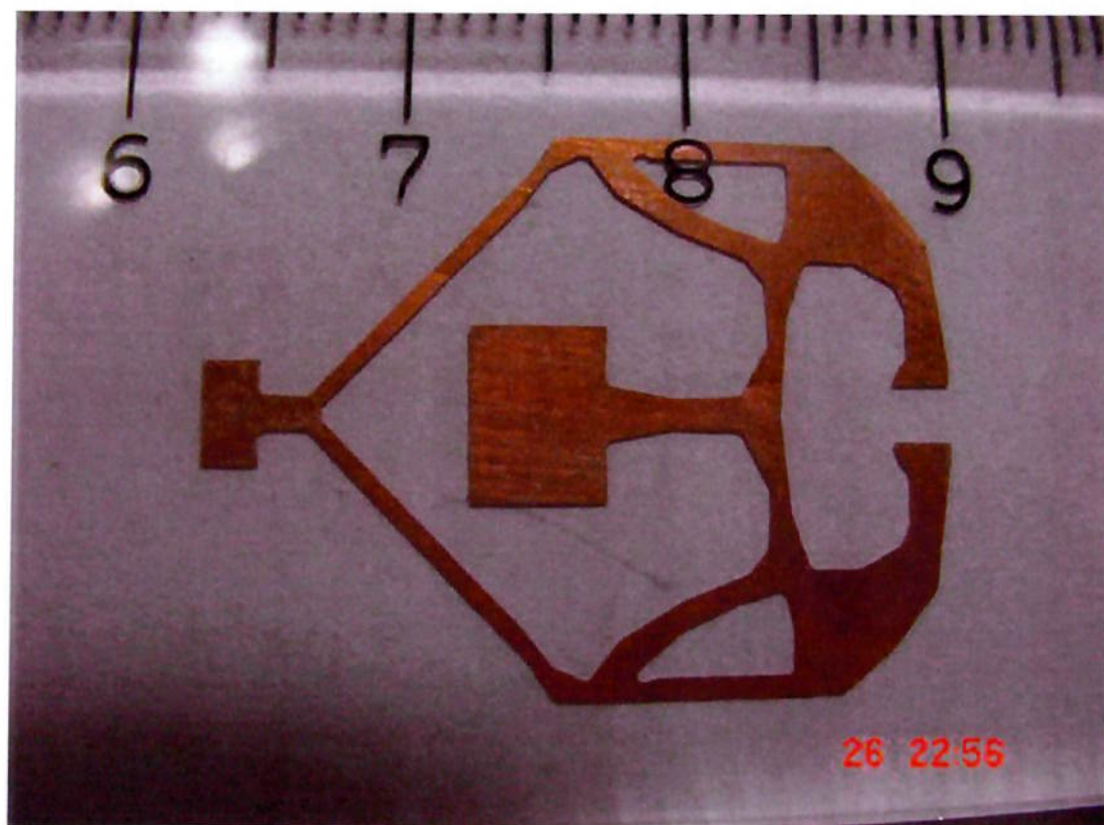


Figura 5.51 – Peça fabricada por litografia – garra3d

5.8.6 Garra 3 – força aplicada para a esquerda

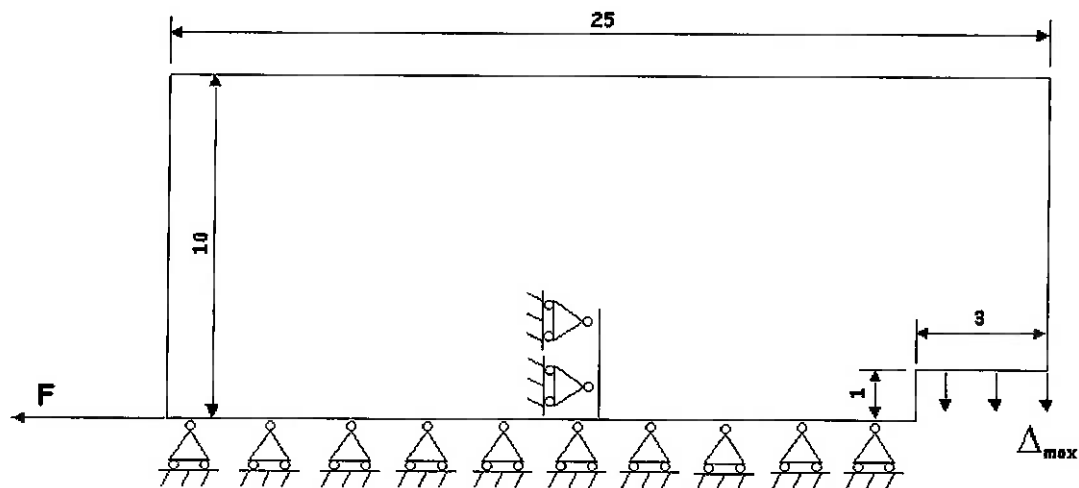


Figura 5.52 – Garra 3, força F aplicada para a esquerda (garra3e)

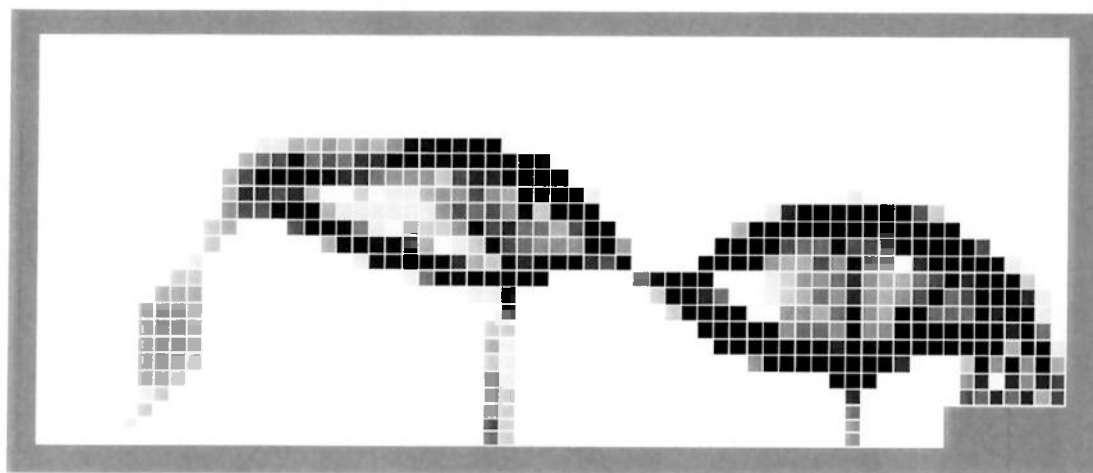


Figura 5.53 – Resultado da otimização - Topologia ótima da garra3e

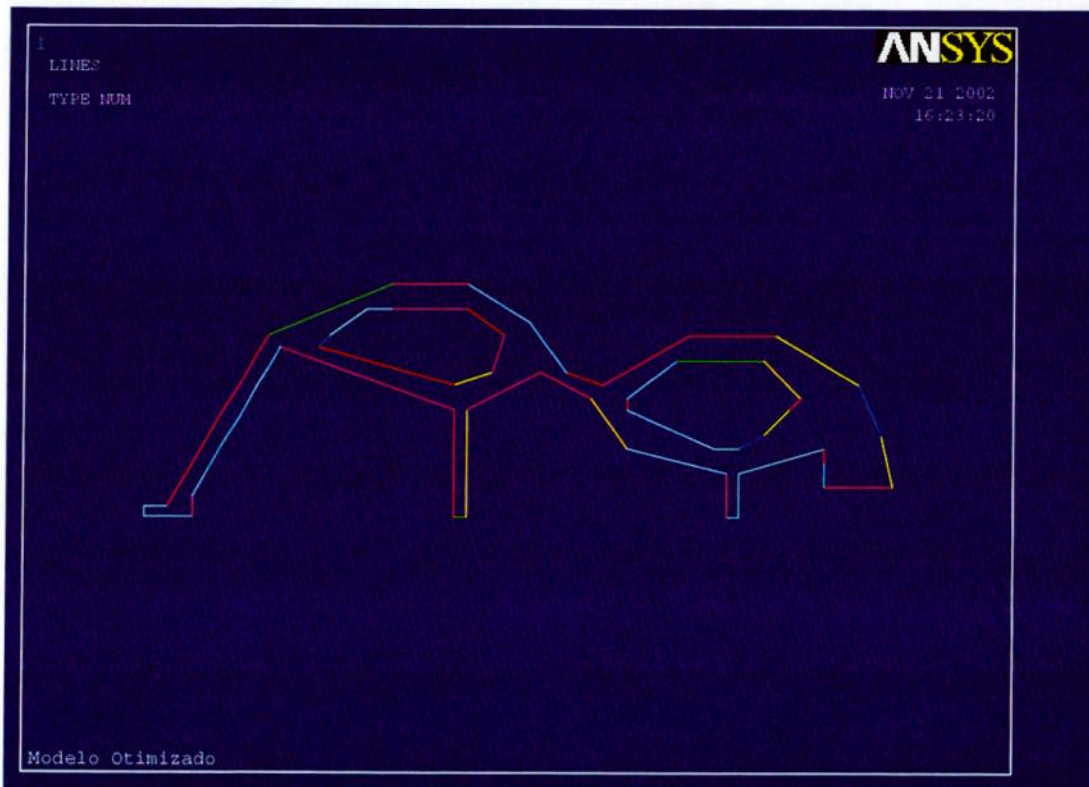


Figura 5.54 – Interpretação da garra3e feita no ANSYS (contorno por linhas)

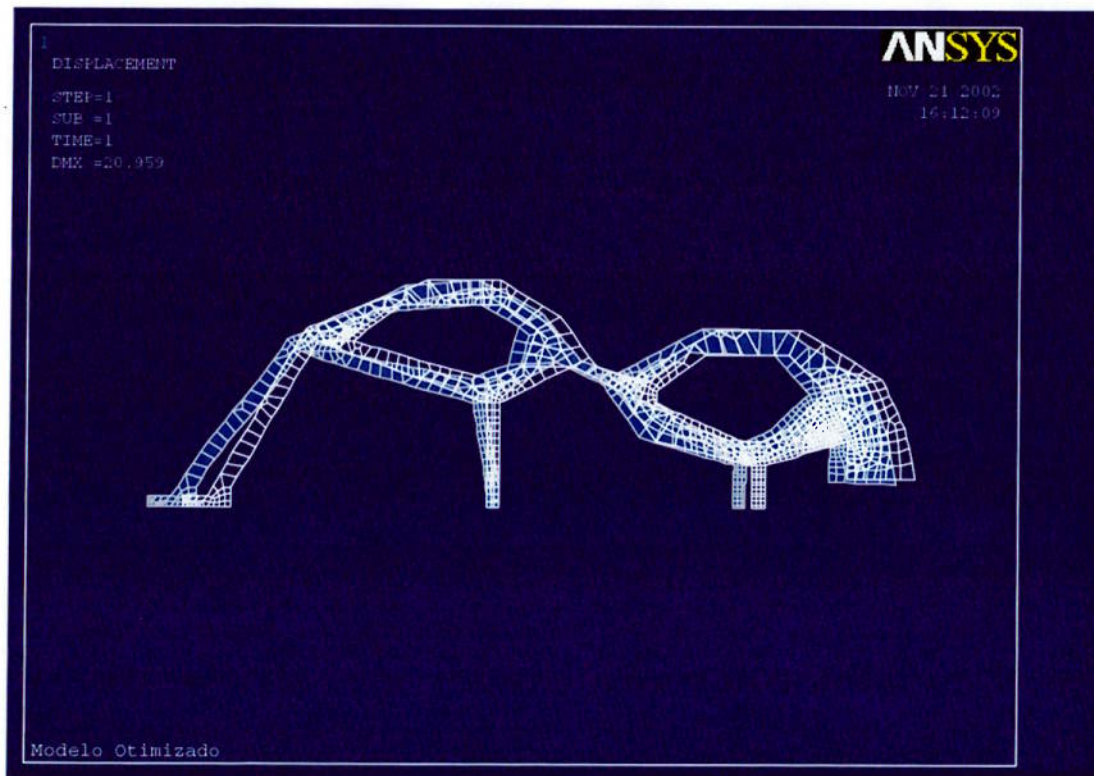


Figura 5.55 – Teste da garra3e – configuração deformada (azul) e não deformada

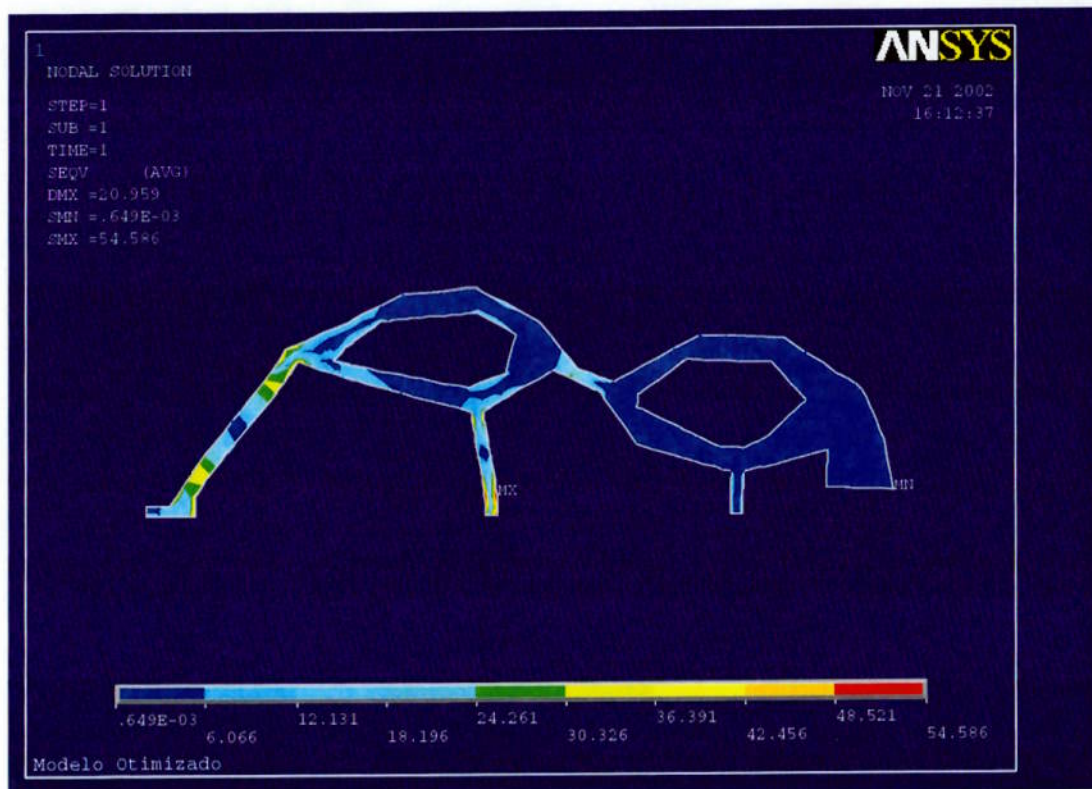


Figura 5.56 – Teste da garra3e – tensão de Von Mises

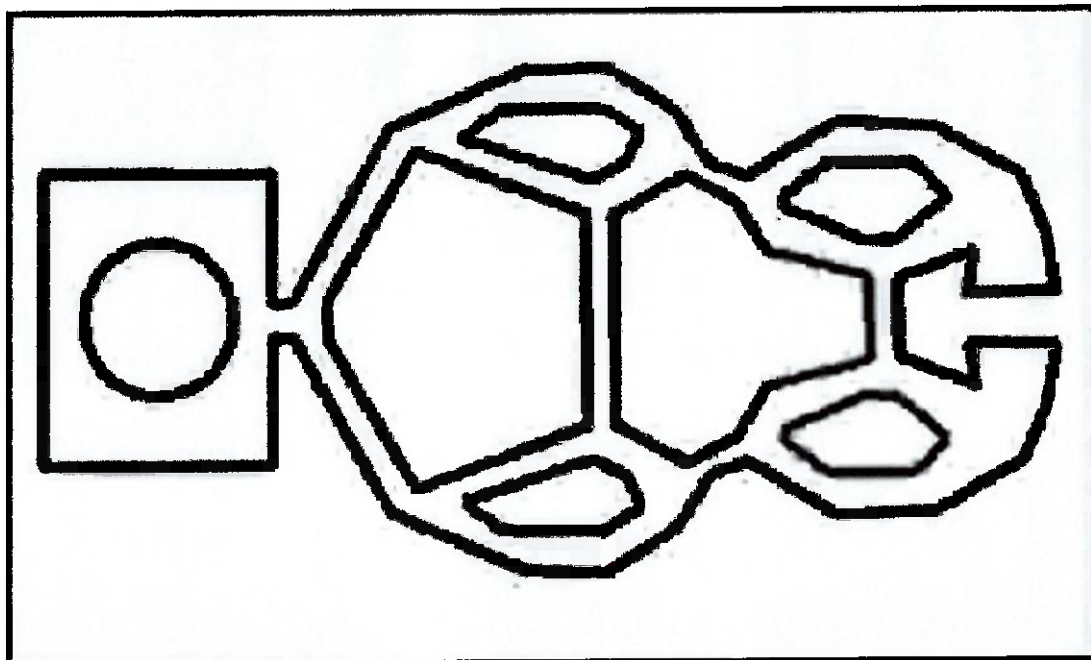


Figura 5.57 – Interpretação final da garra3e – atuação manual

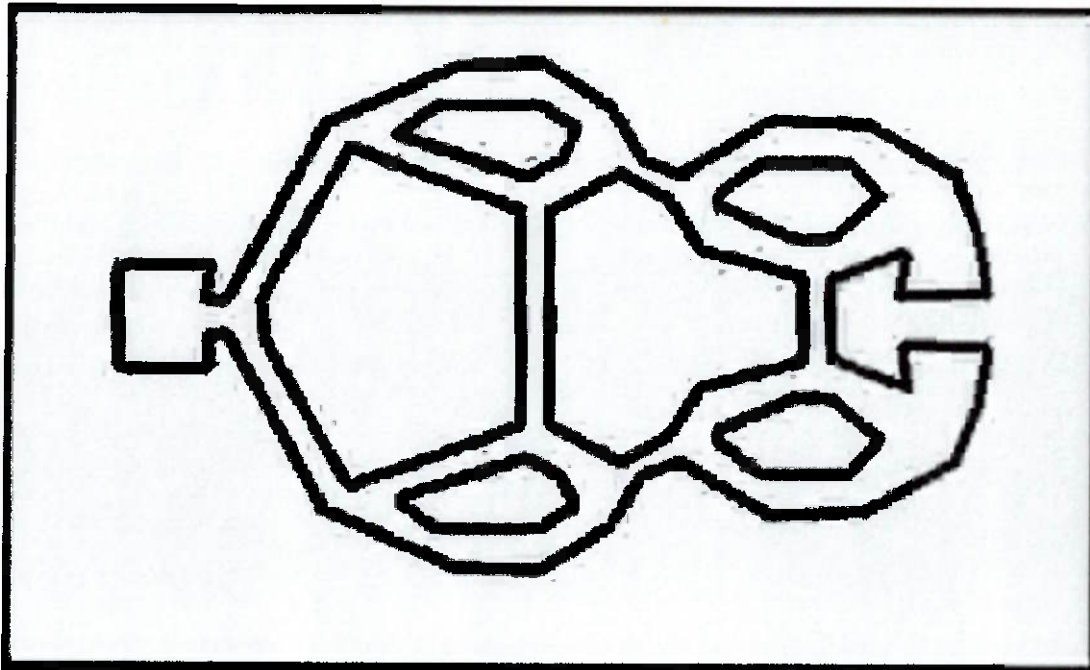


Figura 5.58 - Interpretação final da garra3e – atuação piezolétrica

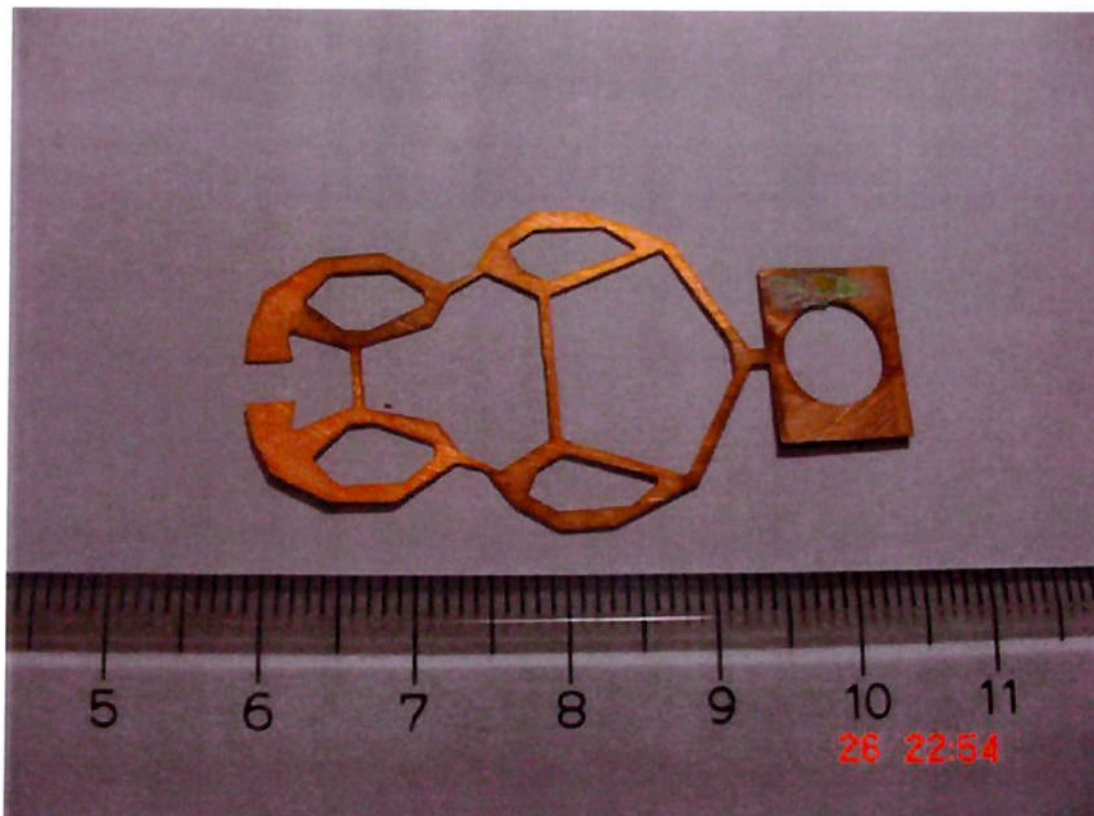


Figura 5.59 - Peça fabricada por litografia – garra3e

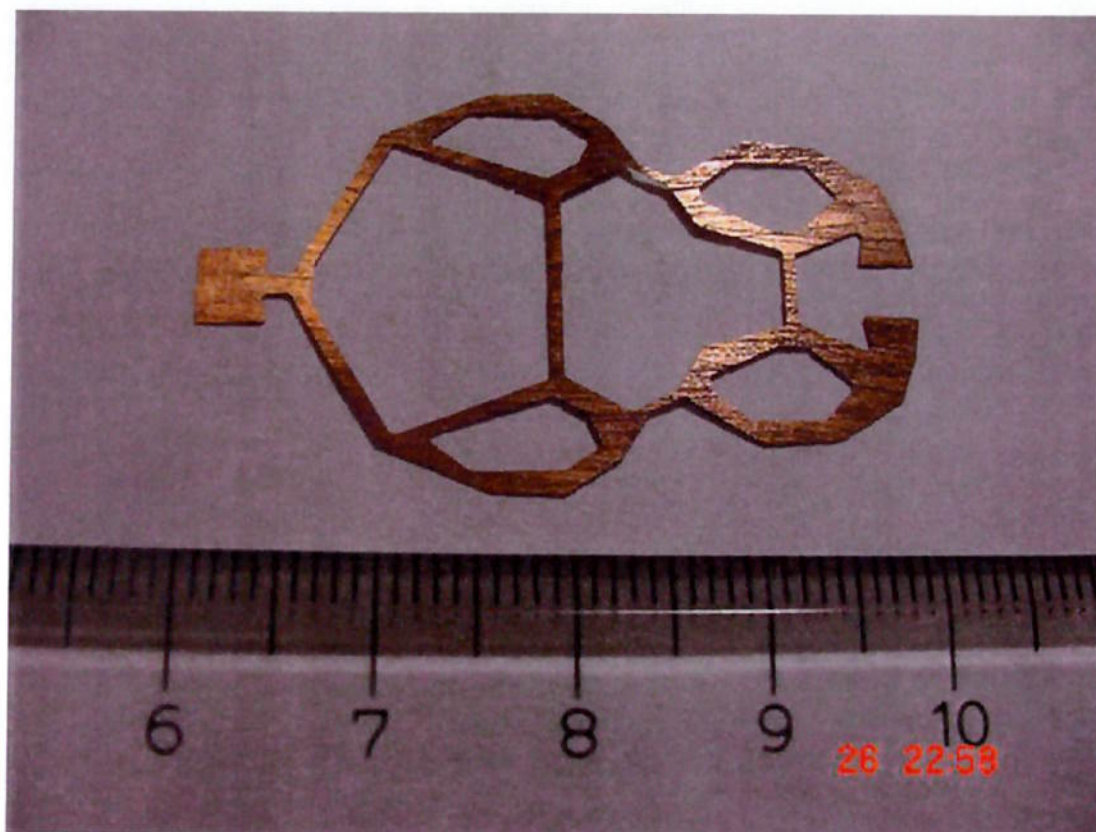


Figura 5.60 – Peça fabricada por litografia – garra3e

6 CONCLUSÃO

O software modificado neste trabalho para realizar a tarefa desejada e utilizado no projeto de micro-manipuladores flexíveis se mostrou uma ferramenta muito útil e eficaz no processo. Infelizmente, ainda não se trata de uma ferramenta prática, que pode ser utilizada por qualquer tipo de usuário. É necessário ter um conhecimento elevado sobre o processo de otimização e discretização do domínio, utilizados no programa e ainda sobre a forma como o programa está estruturado. Com estas dificuldades, obter os resultados da otimização tomou um certo tempo.

As peças fabricadas no laboratório em Campinas, o LNLS, evidenciam bem as características dos micro-mecanismos. Com a fabricação e posterior teste das peças no laboratório da Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, verificou-se a eficiência do processo utilizado aqui. As peças, testadas manualmente, apresentaram deformação no sentido de deslocamento desejado.

Como trabalho futuro, as peças desenvolvidas aqui podem ser projetadas em software próprio para atuação piezolétrica e ainda realizar testes com 'comb-drives', de atuação capacitiva.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ANANTHASURESH, G. K., FRECKER, M. I., “Optimal Synthesis with Continuum Models”. In: HOWELL, L. L., “Compliant Mechanisms”, John Wiley & Sons, 2001, cap.9.
- ANANTHASURESH, G. K., KOTA, S., GIANCHANDANI, Y., 1994, “A Methodical Approach to the Design of Compliant Micromechanisms”, Solid-state Sensor and Actuator Workshop, pp. 189-192.
- BENDSØE, M. P., 1995, “Optimization of Structural Topology, Shape and Material”, Springer – Verlag, New York.
- BENDSØE, M. P., 1989, “Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem”, Structural Optimization, 1, pp. 192-202.
- BENDSØE, M. P., KIKUCHI, N., 1988, “Generation Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71, pp. 197-224.
- DANTZIG, G. B., 1963, “Linear Programming and Extensions”, Princeton, New Jersey.
- HAFTKA, R. T., GANDHI, R. V., 1986, “Structural Shape Optimization – A survey”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 57, pp. 91-106.
- HANSON, R. J., HIEBERT, K. L., 1981, “A Sparse Linear Programming Subprogram”, Sandia National Laboratories, Technical Report SAND81-0297.
- HOWELL, L. L., “Compliant Mechanisms”, John Wiley & Sons, 2001, cap.1.
- ISHIHARA, H., ARAI, F., FUKUDA, T., 1996, “Micro Mechatronics and Micro Actuators”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Nagoya, Japan, vol.1, no.1, pp. 68-79.
- LARSEN, U. D., SIGMUND, O., BOUWSTRA, S., 1997, “Design and Fabrication of Compliant Mechanisms and Structures with Negative Poisson’s Ratio”, Journal of Micro Electro Mechanical Systems “MEMS”, 6(2), pp. 99-106.

- LIMA, C. R. Projeto de Mecanismos Flexíveis usando o Método de Otimização Topológica. 2002. 146p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- MOAVENI, S., “Finite Element Analysis”, New Jersey, Prentice Hall, 1999, cap.1, pp. 1-18.
- NISHIWAKI, S., SAITOU, K., MIN, S., KIKUCHI, N., 2000, “Topological Design Considering Flexibility under Periodic Loads”, *Struct Multidisc Optim*, Springer-Verlag, 19, 4-16.
- NISHIWAKI, S., FRECKER, M. I., MIN, S., KIKUCHI, N., 1998, “Topological Optimization of Compliant Mechanisms using the Homogenization Method”, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol. 42, pp.535-559.
- NISHIWAKI, S., MIN, S., YOO, J., KIKUCHI, N., 1998, “Optimal Structural Design Considering Flexibility”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Ann Arbor, USA.
- SIGMUND, O., 1999, “A 99 line Topology Optimization Code Written in Matlab”, *Struct Multidisc Optim*, Springer-Verlag, 21, pp. 120-127.
- SIGMUND, O., 1999, “Topology Synthesis of two Phase Compliant Actuators”, *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada, USA, pp.12-15.
- SIGMUND, O., 1996, “On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization”, Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics, Lyngby, Denmark, pp. 1-28.
- SILVA, E. C. N., NISHIWAKI, S., FONSECA, J. S. N., KIKUCHI, N., 1999, “Optimization Methods Applied to Material and Flextensional Actuator Design using Homogenization Method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 172, pp. 241-271.
- THOMAS, H. L., VANDERPLAATZ, G. N., SHYY, Y. K., 1992, “A Study of Move Limit Adjustment Strategies in the Approximation Concepts Approach to Structural Synthesis”, *AIAA-VMA Engineering*, pp. 507-512.