

MURILO CAMPANA SOUTO  
VINÍCIUS SOARES NASCIMENTO

ANÁLISE DE TENSÕES NUM COMPONENTE DE UMA MÁQUINA DE  
COMPRESSÃO DE PÓ

Parte escrita do Projeto de Graduação dos alunos Murilo Campana Souto e Vinicius Soares Nascimento, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção de grau em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Dr Carlos Friedrich Loeffler Neto.

VITÓRIA

2004

MURILO CAMPANA SOUTO  
VINICIUS SOARES NASCIMENTO

ANÁLISE DE TENSÕES NUM COMPONENTE DE UMA MÁQUINA DE  
COMPRESSÃO DE PÓ

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof Dr Carlos Friedrich Loeffler Neto

Orientador

---

Prof Dr Ângelo Gil P. Rangel

---

Prof Dr Fernando César M. Menandro

Vitória, 26 de Abril de 2004

## **AGRADECIMENTOS**

- Primeiramente a DEUS que iluminou toda a nossa caminhada;
- Aos nossos pais e familiares que em todo momento estiveram do nosso lado nos apoiando;
- A Milton de Oliveira Junior técnico de manutenção, e Marcos de Andrade Lopes engenheiro de manutenção da empresa CELLOFARM;
- Aos professores Drs Carlos Friedrich Loeffler Neto e Fernando César Meira Menandro, que nos ajudaram neste trabalho.

“Porque melhor é a sabedoria do que os corais, e mesmo todos os outros  
agrados não se podem igualar a ela.”

Provérbios 8:11

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.3.1 – Fator tamanho de conversão .....	29
Tabela 5.3.2 – Fator confiabilidade de conversão.....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Foto da máquina em operação .....	10
Figura 2.1.1 – Conjunto onde se situa a peça .....	12
Figura 2.1.2 – Perspectiva explodida da peça .....	13
Figura 2.1.3 – Vista isolada da peça .....	14
Figura 2.1.4 – Vista superior da peça .....	14
Figura 2.1.5 – Peça montada na máquina.....	15
Figura 2.1.6 – Foto da máquina em operação .....	16
Figura 2.3.1 – Foto da máquina em operação .....	17
Figura 3.2.1 – Modelo de Viga Apoiado .....	19
Figura 4.1.1 – Peça dividida em nós.....	26
Figura 4.1.2 – Peça com distribuição de tensões de Von Mises .....	27
Figura 4.1.3 – Detalhe da distribuição de tensões.....	27
Figura 5.3.1 – Gráfico de tensão alternante.....	30

## LISTA DE SIGLAS

E – Modulo de elasticidade

$K_a$  - Fator de acabamento superficial

$K_b$  - Fator de tamanho

$K_c$  - Fator de confiabilidade

$K_d$  - Fator de temperatura

$K_e$  - Fator de concentrações de tensões

$K_f$  - Fator de efeitos diversos

SRT – Tensão de escoamento

P – Força aplicada na peça

$\nu$  - Coeficiente de poisson

$\sigma_{\min}$  - Tensão mínima

$\sigma_{\max}$  - Tensão máxima

$\sigma_m$  - Tensão média

$\sigma_a$  - Tensão alternante

## SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULO .....</b>	<b>9</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
1.2 MOTIVAÇÃO .....	10
1.3 OBJETIVO .....	11
<b>2. CAPÍTULO .....</b>	<b>12</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DA PEÇA.....	12
2.2 ESFORÇOS SOBRE A PEÇA .....	16
2.3 RUPTURA DA PEÇA .....	16
<b>3. CAPÍTULO .....</b>	<b>18</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
3.2 MODELO ANALÍTICO PRELIMINAR.....	18
3.3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO .....	19
<b>4. CAPÍTULO .....</b>	<b>26</b>
4.1 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS .....	26
<b>5. CAPÍTULO .....</b>	<b>29</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
5.2 ANÁLISE DA REGIÃO CENTRAL .....	29
5.3 ANÁLISE DA REGIÃO DO OLHAL.....	29
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>34</b>



## RESUMO

O seguinte trabalho trata dos estudos feitos em uma peça de uma máquina de compressão de pó da empresa CELLOFARM, que freqüentemente vem falhando. Inicialmente foram tiradas as medidas da peça, em seguida duas análises foram feitas: a primeira de forma analítica e a outra de forma computacional, utilizando o programa ANSYS. Comparando os dois resultados, chegou-se a conclusão que o projeto original da peça não suportava os esforços de operação.

# 1. CAPÍTULO

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Recentemente instalou-se no Espírito Santo (TIMS – cidade industrial situada em carapina) a empresa CELLOFARM, que atua no ramo de fabricação de produtos farmacêuticos. Uma multinacional que adotou este estado como um potencial econômico de grande valor.

A maioria de seus produtos está sendo fabricada em fase experimental (projeto piloto), pois os mesmos precisam de um grande controle de qualidade. Procurando atender as exigências dos órgãos competentes a este controle, a maior preocupação da empresa é com a higiene do local de fabricação para não ocorrer possíveis contaminações.

Um destes projetos piloto é a fabricação de uma determinada série de comprimidos, que compacta pós de granulometria variável, e utiliza uma máquina de compressão de pó trabalhando a alta pressão, que é em sua maioria de funcionamento mecânico, capaz de produzir centenas de cápsulas por minuto.

Esta máquina de fabricação indiana possui uma peça importante para o seu funcionamento, com formato difícil de dimensionar, que segundo os registros de manutenção cedidos pelo técnico responsável da empresa, está falhando por ruptura freqüentemente quando submetida a uma carga igual ou maior a 5000 Kgf.



Figura 1.1.1

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O presente trabalho é motivado pela necessidade analisar o projeto estrutural desta peça da máquina de compressão de pó, pois a mesma não suporta tal esforço de 5000 Kgf.

Ao término dos cálculos espera-se saber quais são as regiões críticas onde atuam tensões superiores à resistência dada pelo material da peça, conseqüentemente pode-se propor outro material para suportar este esforço, ou propor modificações nas dimensões da peça. Isto reduz as tentativas de reparos na máquina, pois uma vez conhecido o material que suporta tal tensão, ou qual formato melhor se encaixa ao modelo, pode-se resolver tal problema de uma única vez, não precisando trocar ou reparar a peça várias vezes.

### **1.3 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo realizar dois tipos de análise para o problema de falha na peça da máquina de compressão de pó. O primeiro método de forma analítica, e o segundo de forma computacional através do programa ANSYS.

O método analítico visa examinar o comportamento da peça junto ao orifício central. A metodologia numérica examinou a concentração de esforços junto ao orifício da extremidade, onde não há teorias analíticas capazes de prever a distribuição de tensão com boa exatidão.

## 2. CAPÍTULO

### O PROBLEMA FÍSICO

#### 2.1 CARACTERÍSTICAS DA PEÇA

A peça em questão se situa como um componente primordial no processo de compactação de pó de medicamento para transformá-lo numa cápsula de comprimido. É através dela que seu dispositivo pneumático exerce o esforço de compressão do pó. A figura (2.1.1) ilustra o conjunto onde se situa a peça com o código J-33:

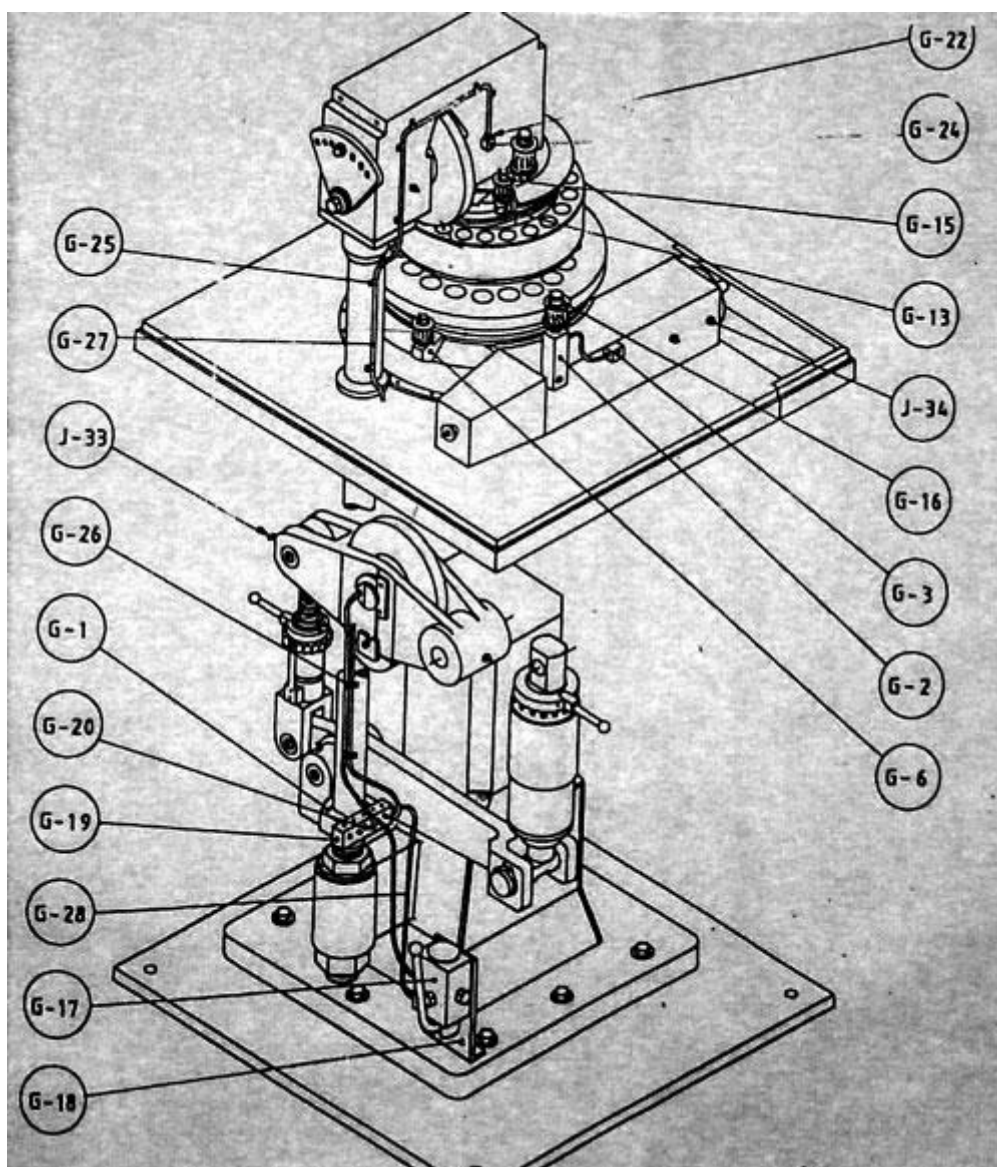


Figura (2.1.1)

No desenho a seguir é mostrada a perspectiva explodida da peça. Agora se pode perceber que esta é formada por duas partes simétricas, integradas por um olhal soldado posterior (E-23) e uma alma de reforço na parte imediatamente colocada após o orifício em que se acopla o pino E-34.

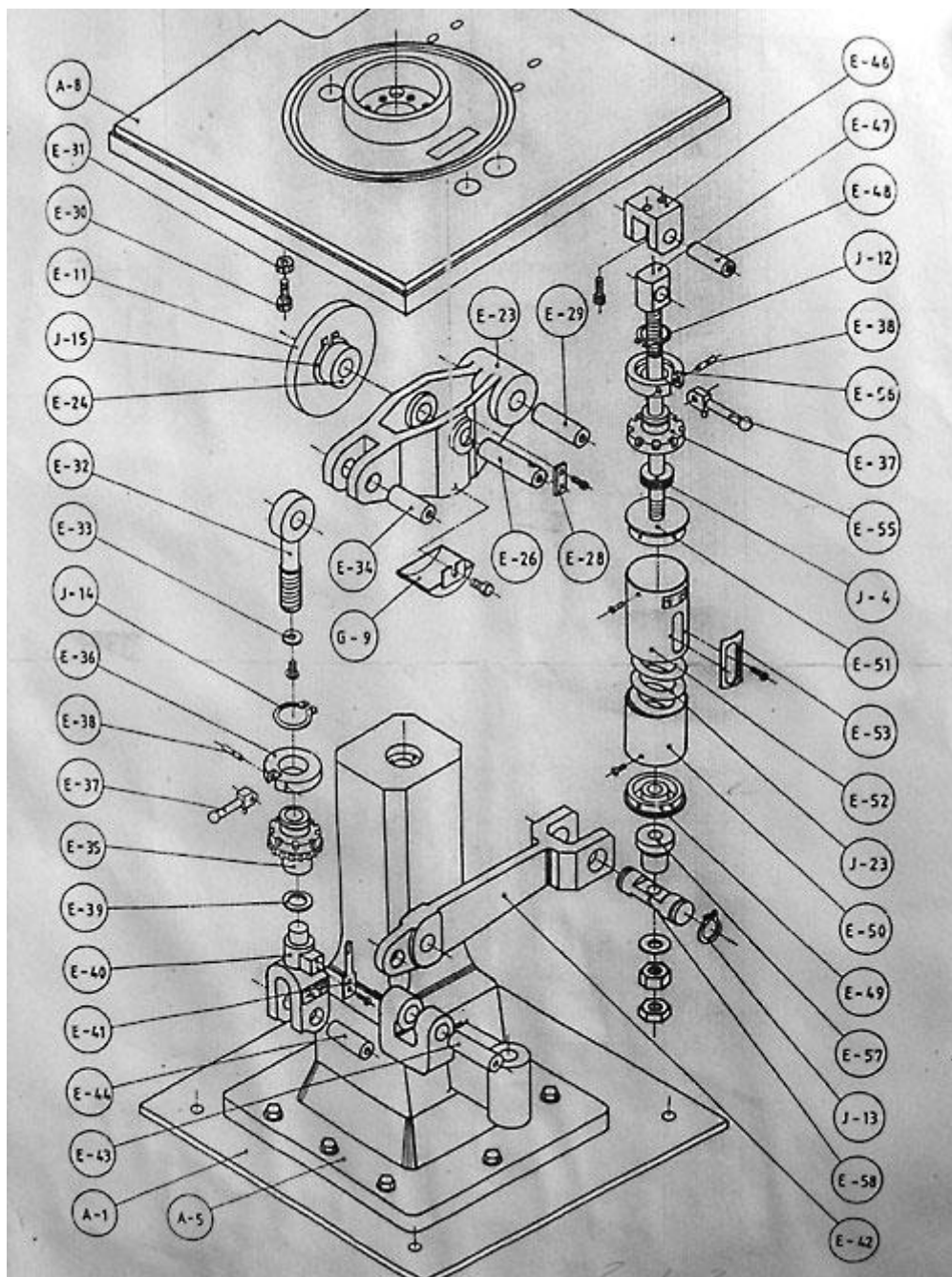


Figura (2.1.2)

A foto a seguir apresenta a peça isolada do conjunto, quando for submetida à análise metrológica.



Figura 2.1.3 vista isolada da peça antes da montagem

Na fotografia a seguir pode-se perceber melhor sua forma tridimensional e fato de se compor de duas partes simétricas.

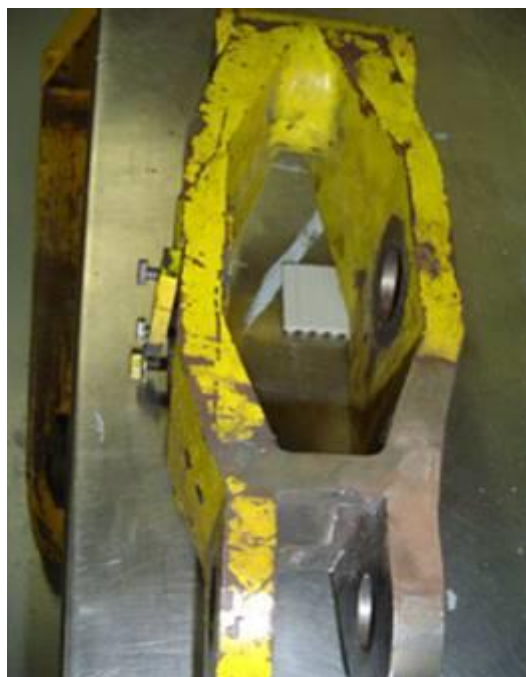


Figura 2.1.4

Na foto seguinte pode ser vista a peça montada no conjunto da máquina, onde se detecta a biela que acopla os dois olhais paralelos, partes estas onde já se pode identificar a formação de macrotrincas e ruptura.

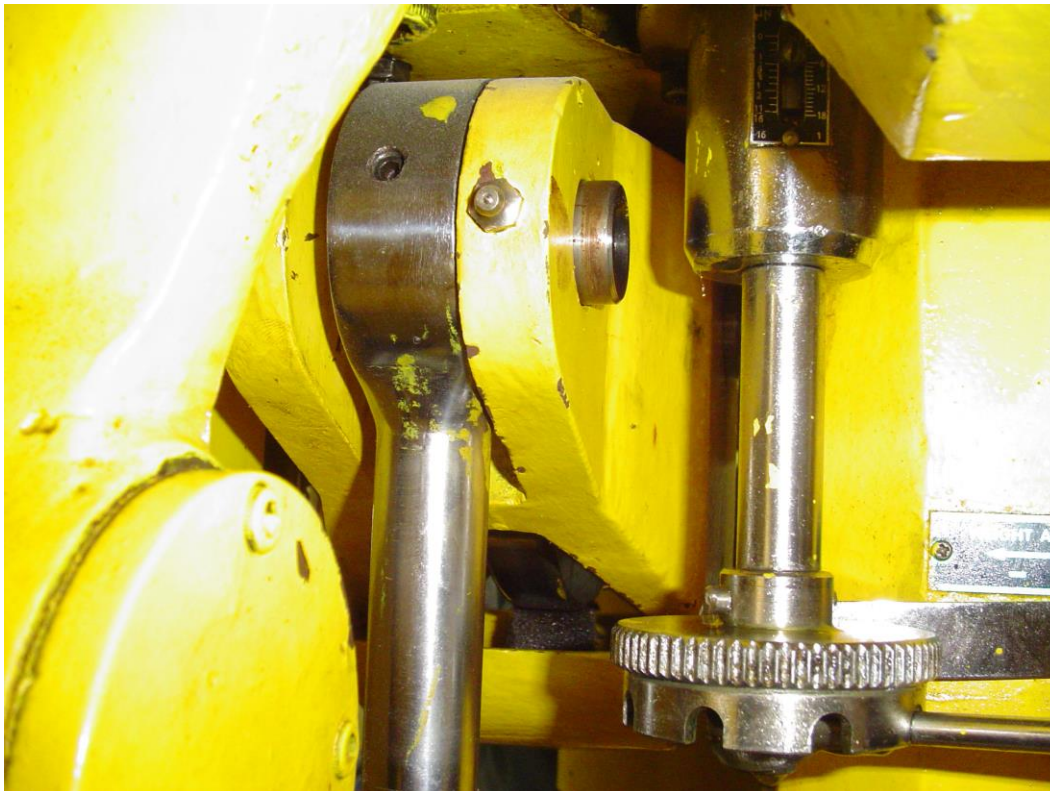


Figura 2.1.5 Peça Montada na máquina.

Nesta foto posterior pode-se ver a máquina num instante de operação



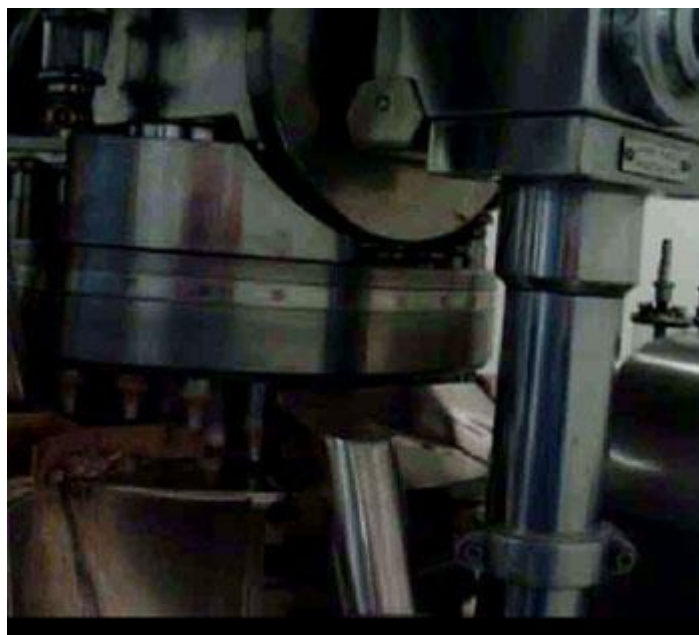


Figura 2.1.6

## 2.2 ESFORÇOS SOBRE A PEÇA

A peça trabalha sob condições dinâmicas significativas, conforme se pode observar in loco. Questões de impacto e propagação de ondas não podem ser ignoradas e devem majorar em muito os resultados de uma análise estática preliminar.

Também a repetição do carregamento produz inevitavelmente ações de fadiga no material da peça. Segundo dados dos técnicos da empresa, a máquina fabrica 105000 comprimidos por hora.

Também de acordo com os técnicos a peça estudada neste trabalho trabalha com uma força central de 5000 Kgf, e é feita de ferro fundido que possui as seguintes propriedades:  $E=110\text{GPa}$ .  $\nu = 0,21$ ,  $SRT = 251\text{ Mpa}$ . (Figura 2.1.2)

## 2.3 RUPTURA DA PEÇA

A peça em apreço já rompeu diversas vezes. Na última delas rompeu junto ao menor orifício das extremidades apoiadas, e não junto à seção central. A figura a seguir mostra a peça em questão já reparada exatamente no local onde ocorreu à ruptura.



Figura 2.3.1 Região onde houve a ruptura do material.

Este tipo de trinca que parece ter principiado na superfície do olhal sugere a ação do fenômeno de fadiga. Apesar disso, preliminarmente serão feitas análises estáticas da peça para melhor avaliação dos esforços nas partes da peça. Posteriormente será implementada uma análise de fadiga.

### **3. CAPÍTULO**

#### **ANÁLISE PELA TEORIA DE VIGAS**

##### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.**

Segundo indicações dos técnicos, a peça já falhou diversas vezes. Assim sendo, apesar do local da última falha ter se localizado no olhal, será feita a seguir uma análise pela teoria de vigas de seção variável para se examinar a intensidade das tensões nesta parte central da peça, que possui um entalhe de grandes proporções e também ostenta o maior valor do momento fletor atuante.

##### **3.2 MODELO ANALÍTICO PRELIMINAR**

A peça é composta de duas partes iguais que se comportam como vigas em paralelo. Assim sendo, é possível tratar aproximadamente a peça como uma viga única na qual a carga é reduzida à metade ou então possui resistência dobrada.

A peça também pode ser considerada aproximadamente como uma viga bi-apoiada nos orifícios situados nas extremidades, sustentando uma carga máxima que atua no orifício central. Um modelo preliminar de análise que pode ser adotado nesse caso é o de uma viga de seção variável, na qual se escolhe a seção central da peça onde atua o maior momento fletor.

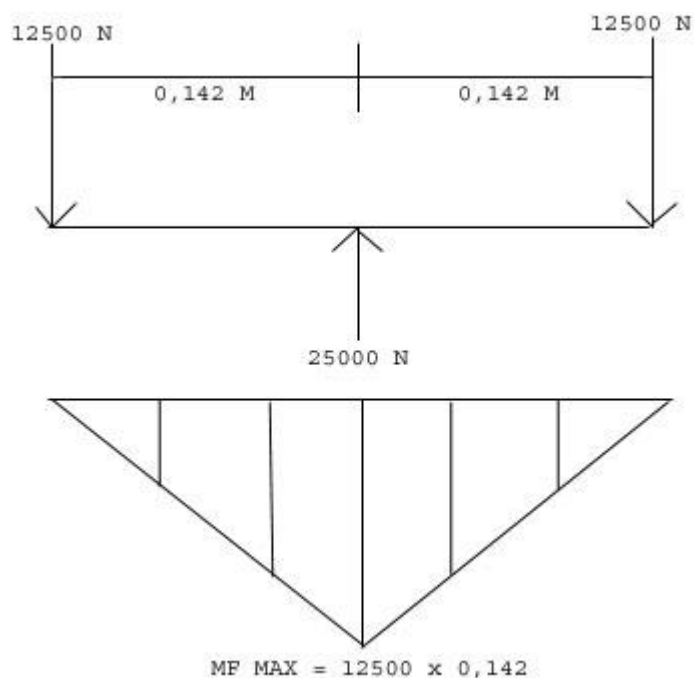


Figura 3.2.1 Modelo de Viga Bi-Apoiada

Segundo este modelo, os efeitos locais nos apoios serão ignorados e apenas os efeitos da variação da seção e redução da seção reta devido ao orifício central serão considerados.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

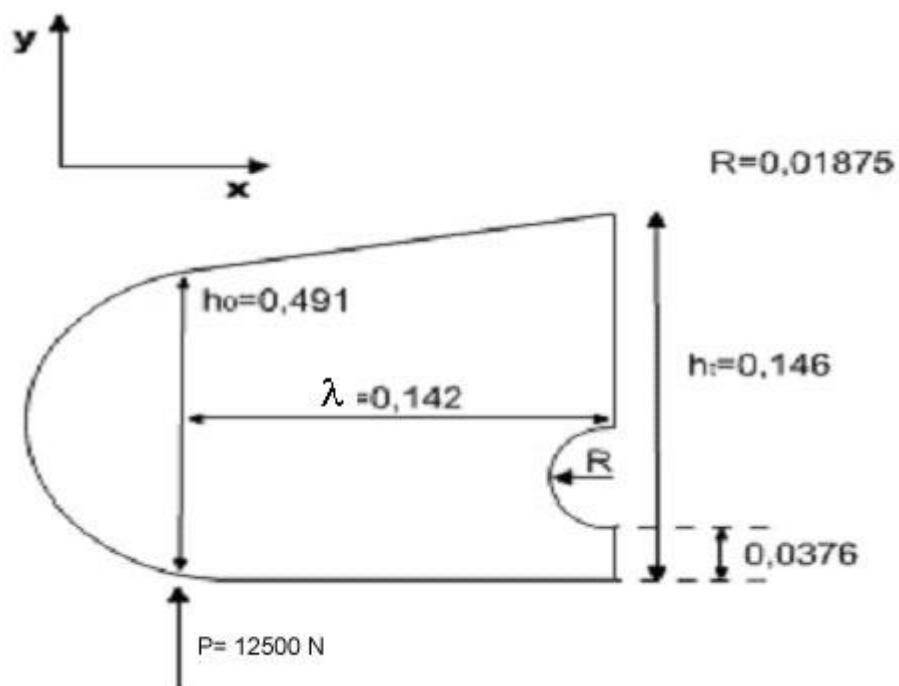
A teoria de vigas de seção constante pode ser estendida para os casos onde há variação da seção resistente apenas se essa variação for suave e não for apreciável. Caso haja uma significativa mudança na seção resistente da viga, não basta apenas corrigir o valor da área resistente e do seu momento de inércia. Questões de equilíbrio implicam no surgimento de tensões cisalhantes significativas no mesmo ponto onde as tensões normais de flexão são máximas. Timoshenko [TIMOSHENKO,1971] e Oden [ODEN,1968] propuseram ambas teorias em que são mantidas as fórmulas usuais para o cálculo de tensões normais devido à flexão e obtidas fórmulas para as tensões cisalhantes empregando a equação de equilíbrio em um paralelepípedo elementar.

As fórmulas de Oden são as seguintes:

$$\sigma_{xx} = \frac{6Px}{bh_0^3(1+\beta x)^3} [2\xi - h_0(1+\beta x)] \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{6P\xi}{bh_0^3(1+\beta x)^3} [h_0(1-\beta^2 x^2) - \xi(1-2\beta x)] \quad (2)$$

onde:



Onde:

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\ell}$$

$$\mu = \frac{h_t}{h_0}$$

$$\xi = h_t$$

Não é difícil colocar as expressões anteriores numa forma mais simplificada, nas quais se calculem as tensões em  $x = \ell$ .

Considerando que:

$$h_0 = (1 + \beta u) = h_t$$

$$x = \ell$$

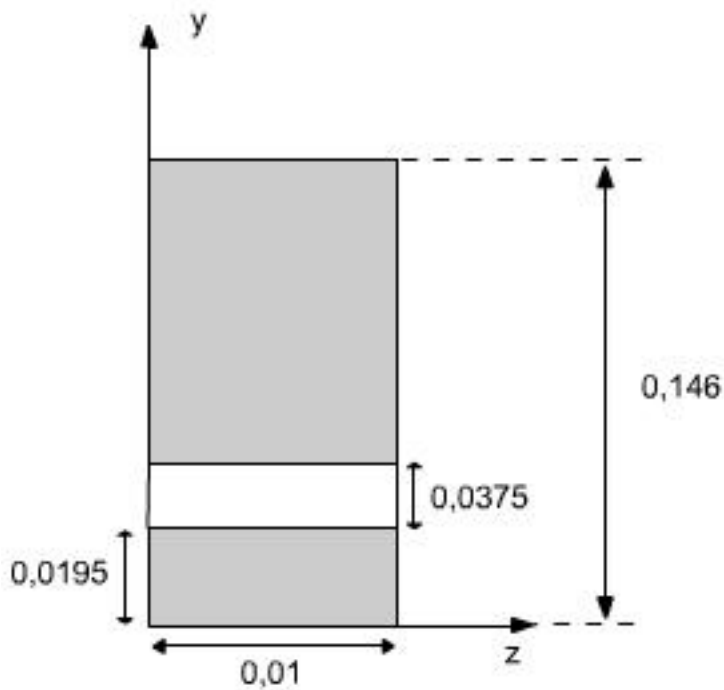
Substituindo em 1 e 2, tem –se:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{6P\ell}{bh_t} [2h_t - h_t] = \frac{12P\ell[h_t/2]}{bh_t^3} = \frac{P\ell(h_t/2)}{I} \\ \sigma_{xy} &= \frac{6Ph_t}{bh_t^3(1-\beta\ell)^3} \times \frac{[h_0(1-\beta^2x^2) - h_t(1-2\beta\ell)]}{(1+\beta\ell)} = \\ &= \frac{Ph_t}{bh_t^3/12} \times \frac{1}{2} \frac{[h_0(1-\beta^2\ell^2) - \xi(1-2\beta\ell)]}{(1+\beta\ell)} = \\ &= \frac{Ph_t}{I} \times \frac{1}{2} \frac{[h_0(1-\beta^2\ell^2) - \xi(1-2\beta\ell)]}{(1+\beta\ell)} \end{aligned}$$

Estas fórmulas estão particularizadas para os pontos extremos superiores ou inferiores de uma viga de seção contínua.

No caso em questão, há um orifício no meio da seção.

Considerando essa descontinuidade, é preciso calcular o centróide e os valores do momento de inércia com relação ao eixo Z.

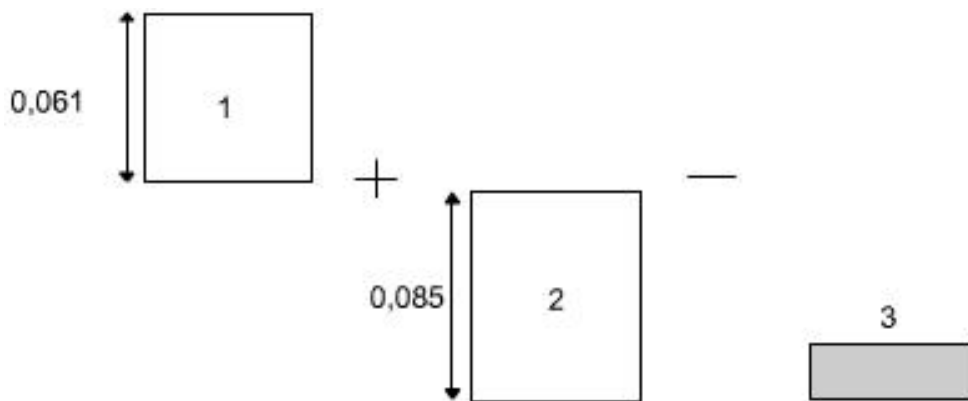


Cálculo do centróide:

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$\bar{y} = \frac{0,146 \times 0,073 - 0,0383 \times 0,0375}{0,146 - 0,0375} = 0,085$$

Cálculo do momento de inércia: tomando como referência o novo centróide  $(\bar{x}, \bar{y})$ ; e percebendo que a largura da viga é uma grandeza comum, determinam-se os valores de  $i'$ , que são os momentos de inércia por unidade de largura.



$$I_T = I_1 + I_2 - I_3$$

$$I_1 = \frac{h_1^3}{3} = 756 \times 10^{-7} m^3$$

$$I_2 = \frac{h_2^3}{3} = 2047 \times 10^{-7} m^3$$

$$I_0 = (0,035 / 2)^3 / 12 = 35 \times 10^{-7}$$

$$I_3 = I_0 + AR^2 = I_0 + (0,035) \times (0,048)^3 = 841 \times 10^{-7}$$

$$I_T = 1962 \times 10^{-7}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{P\lambda h^*}{I_t} = \frac{12500 \times 0,142 \times 0,085}{0,01 \times 1962 \times 10^{-7}} = 76,9 \times 10^6 Pa$$



$$\sigma_{xy} = \frac{Ph_t}{I_t} \times \frac{1}{2} \left[ \frac{0,0491(1 - 1,97^2) - 0,146(1 - 2 \times 1,97)}{2,97} \right]$$

$$\mu = \frac{0,146}{0,0491} = 2,97, \quad \beta = \frac{2,97 - 1}{0,142} = 13,87, \quad \beta\lambda = 1,97$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= \frac{12500 \times 0,146}{0,01 \times 1962 \times 10^{-7}} \times \frac{1}{2} [-0,0491 \times 2,88 - 0,146 \times 2,94] = \\ &= \frac{12500 \times 0,146}{0,01 \times 1962 \times 10^{-7}} \times \frac{1}{2} \times 0,288 = 53,57 \times 10^7 \text{ Pa} = 133,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Os valores obtidos podem ser comparados em sua magnitude com aqueles obtidos pela teoria de corte puro. Nesta última tem-se:

$$\sigma_{xy} = \frac{F}{A} = \frac{12500}{0,01(0,146 - 0,037)} = 11,47 \text{ MPa}$$

Nota-se que a teoria de Oden apresenta valores bastante elevados para as tensões cisalhantes nestes casos de vigas de seção variável.

As tensões principais são:

$$\begin{aligned} \sigma_{I,II} &= \frac{307,6}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{307}{2}\right)^2 + 35^2} = \frac{307,6}{2} \pm 556 = \\ &= 177,5 \text{ MPa} \text{ e } -100,5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Considerando o limite de ruptura do material (SRT = 251 MPa) vê-se que o coeficiente de segurança é:

$$\eta = \text{SRT} / \sigma_1 = 251 / 177,5 = 1,4$$

Esse valor é baixo considerando os efeitos impactantes de carga. Naturalmente ao incluir o efeito da fadiga a falha na peça será inevitável.

No caso de um material frágil, o critério da máxima tensão normal deve ser aplicado. Neste caso, a tensão principal anteriormente calculada deve ser comparada diretamente com a tensão de ruptura do material.

Já no caso de um material dúctil, é preciso adotar um outro critério de resistência. O critério de Von Mises é o mais usado. Neste caso, determina-se a tensão equivalente pela fórmula:

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \sigma_{II})}$$

$$\sigma' = \sqrt{(355^2 + 201^2 - 355 \times 201)}$$

$$\sigma' = 119,45 \text{ MPa}$$

Este valor é comparado com o limite de escoamento do material, obtido nas condições de ensaio uniaxial.

## 4. CAPÍTULO

### ELEMENTOS FINITOS

#### 4.1 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Para poder realizar este estudo foi utilizado o ANSYS, um programa que permite encontrar todas tensões críticas em uma peça submetida a qualquer tipo de esforço.

Inicialmente a peça foi desenhada em três dimensões usando o programa, respeitando as dimensões originais. Em seguida foi dividida no seu eixo de simetria, e depois em 23316 elementos tetraédricos de dez nós, totalizando 37112 nós. (ver figura 4.1.1)

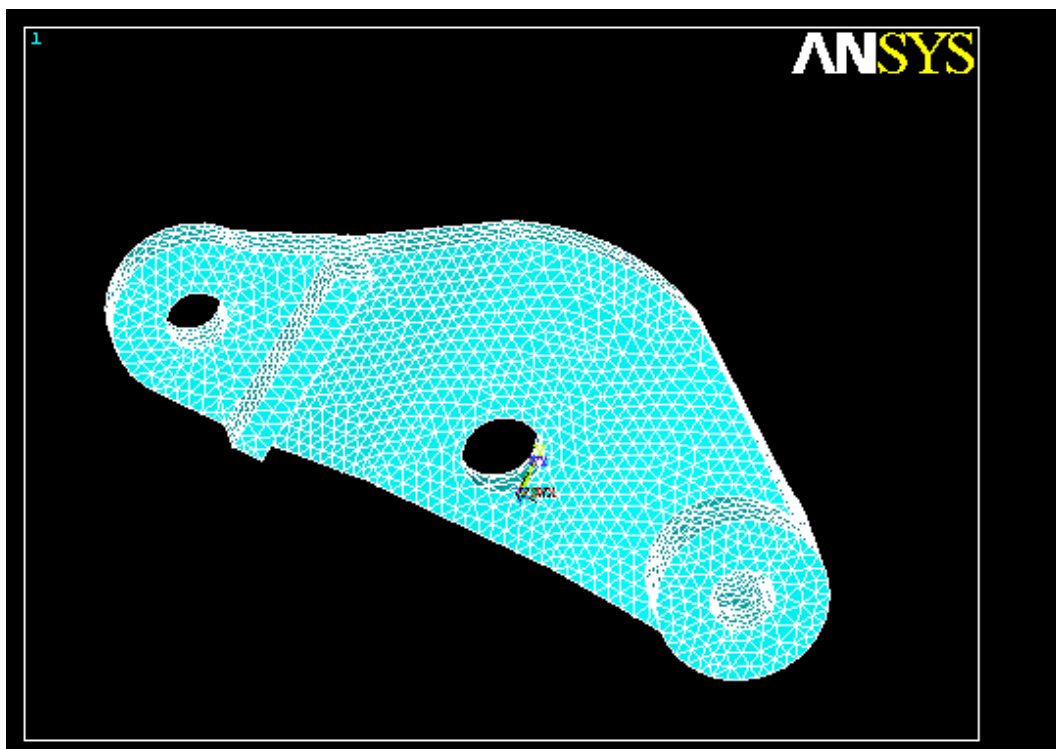


Figura 4.1.1

Após desenhar a peça entramos com os valores de  $E$ ,  $\nu$ , e a força de 5000 Kgf, e podemos ver a figura (figura 4.1.2) com a distribuição de tensões de Von Mises.

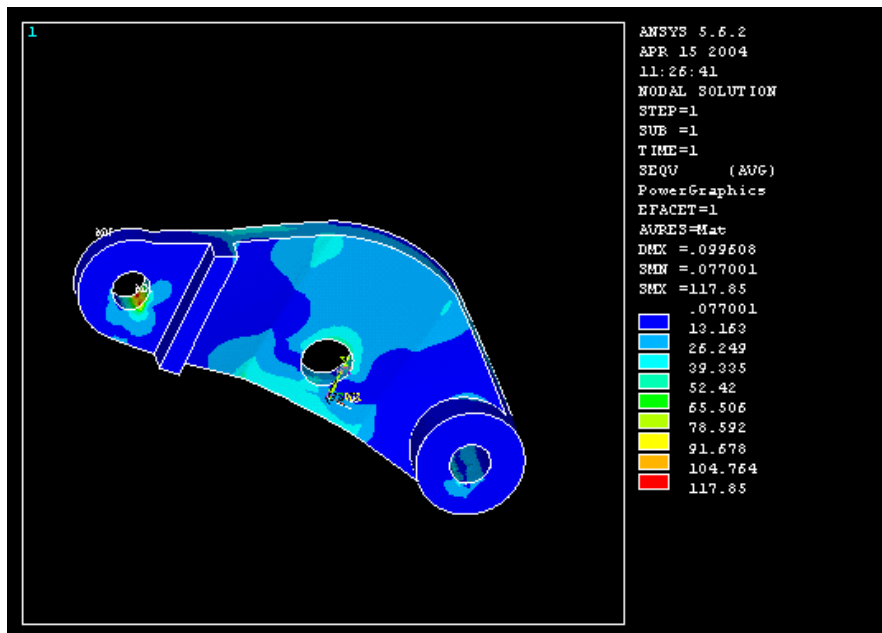


Figura 4.1.2

Note que a região de altas tensões aparece na parte superior da região central da viga, conforme preconizado pela teoria de Vigas.

No local onde aparece a maior tensão foi justamente onde houve a ruptura. Ver figura 2.3.1

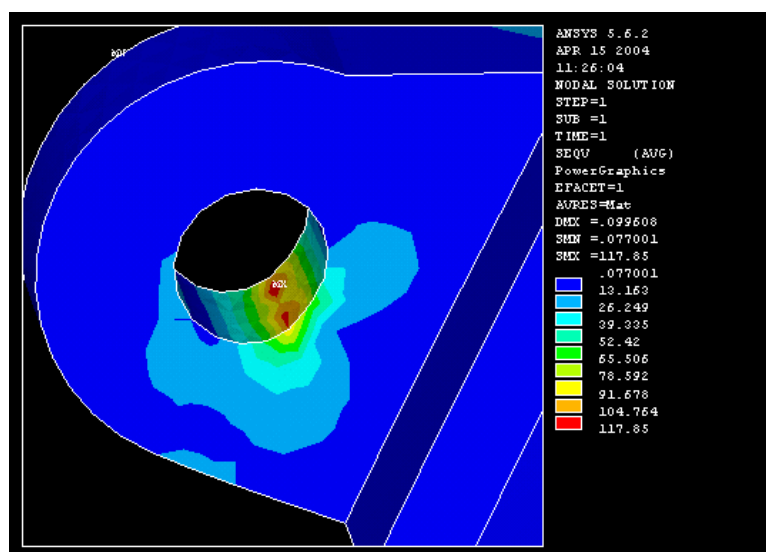


Figura 4.1.3

Pela figura mostrada anteriormente se pode concluir que a tensão máxima que atua na peça é de 117,85 MPa, mas é preciso que desconsiderar os efeitos locais da malha de elementos finitos das reações do apoio. Para isso, serão ignorados os valores mais elevados de tensão, correspondentes as áreas em vermelho, e considerados apenas como valor crítico a tensão máxima de 91Pa.

## **5. CAPÍTULO**

### **ANÁLISE CONSIDERANDO A FADIGA**

#### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo será feita uma análise resistiva considerando os efeitos do carregamento variável, que induz ao efeito da fadiga.

Vale ressaltar que o efeito dinâmico da carga, em relação ao impacto não foi a priori considerado.

#### **5.2 ANÁLISE DA REGIÃO CENTRAL**

Pelo método da teoria de vigas analisou-se apenas a seção central, na qual pode-se concluir que as tensões já eram por demais elevadas, considerando a análise estática e o carregamento também estático. Pode-se concluir que a peça não agüenta tal esforço, pois o valor do coeficiente de segurança é muito baixo.

Pode-se concluir que se a peça não falhasse na extremidade apoiada, certamente falharia na parte central, devido aos elevados esforços atuantes na parte central.

#### **5.3 ANÁLISE DA REGIÃO DO OLHAL**

Pelo método de elementos finitos, a análise de tensões efetuada não mostrou índices de tensão suficientes para a falha estática. Assim sendo, será feita uma análise considerando o fenômeno da fadiga.

Considerando as tensões como tensões pulsantes (vide figura 5.3.1):

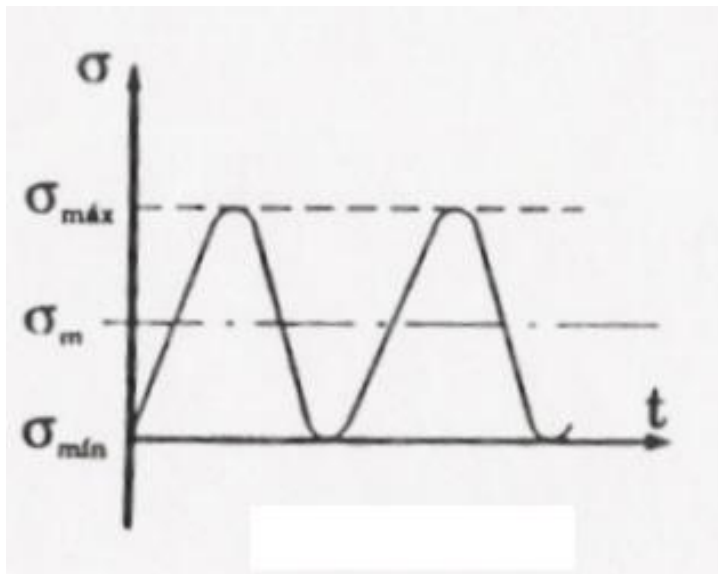


Figura 5.3.1

$$\sigma_{mín} = 0, \quad \sigma_m = \sigma_{máx} / 2 \quad \sigma_a = \sigma_{máx} / 2 \quad (\sigma_{máx} = 91 \text{MPa})$$

Sabe-se que:

$$\sigma_f = K_a K_b K_c K_d K_e K_f \sigma_{f0}$$

$K_a$  - Fator de acabamento superficial (shigley, 1981);

$K_b$  - Fator de tamanho (Tabela 5.3.1);

$K_c$  - Fator de confiabilidade (Tabela 5.3.2);

$K_d$  - Fator de temperatura (A peça trabalha em Temperatura ambiente);

$K_e$  - Fator de concentrações de tensões [Peterson];

$K_f$  - Fator de efeitos diversos [Peterson].

$$\sigma_{f0} = \text{SRT}/2 = 251/2 = 125,5 \text{ MPa}$$

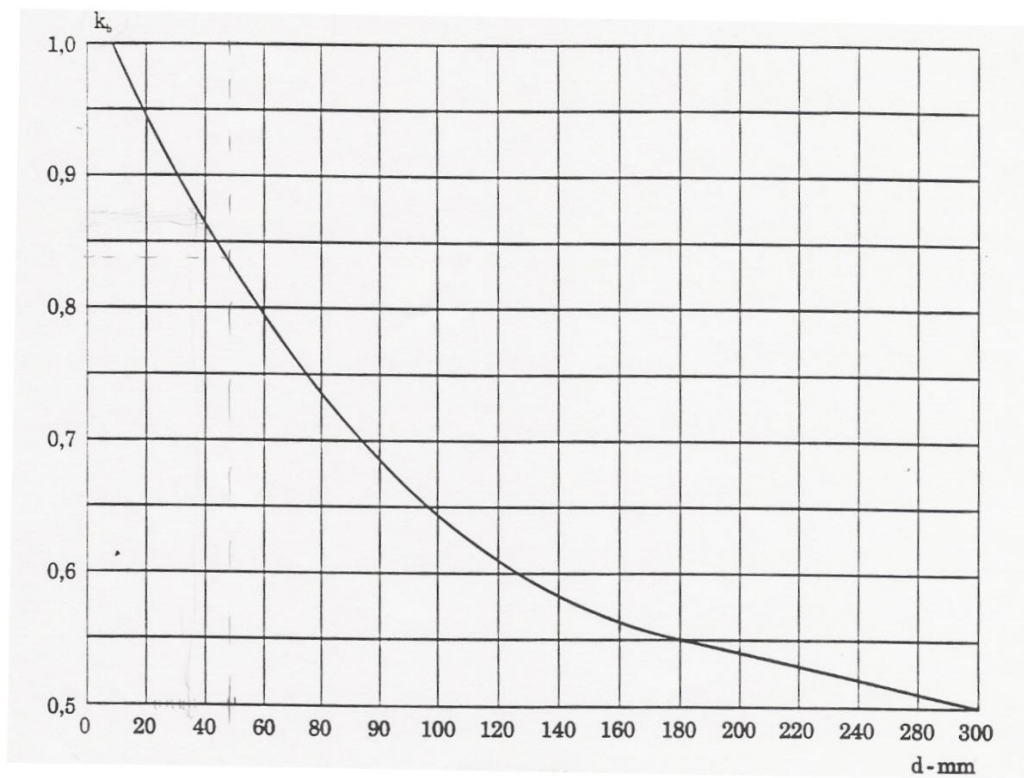


Tabela 5.3.1

<b>R</b>	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,91	0,92
$z_0$	1,00	- 0,25	- 0,53	- 0,84	- 1,29	- 1,34	- 1,41
$k_c$	1,000	0,980	0,958	0,933	0,897	0,893	0,887
<b>R</b>	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
$z_0$	- 1,47	- 1,55	- 1,64	- 1,75	- 1,88	- 2,05	- 2,33
$k_c$	0,882	0,876	0,869	0,860	0,850	0,836	0,814

Tabela 5.3.2



$$K_a = 0,55;$$

$$K_b = 0,95;$$

$$K_c = 0,9;$$

$$K_d = 1;$$

$$K_e = 1;$$

$$K_f = 0,7.$$

$$\sigma_f = 0,55 \times 0,95 \times 0,9 \times 1 \times 1 \times 0,7 \times 125,5 = 41,31 \text{MPa}$$

$$\sigma_a = 91 / 2 = 45,5 \text{MPa}$$

Como  $\sigma_a > \sigma_f$  conclui-se que a peça falha por fadiga.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos cálculos feitos acima, pode-se concluir que a peça estudada rompeu por fadiga no local onde o programa ANSYS detectou a maior tensão.

Através da teoria de vigas de seção variada conclui-se que se a peça não falhasse na extremidade apoiada, certamente falharia na parte central, não suportando os altos esforços atuantes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEER, B. F.; JOHNSON, E. R.Jr. Resistência dos Materiais. 3.Ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

ODEN, G. Mechanics of Elastic Structures. 1968.

PETERSON, R. E. Stress Concentration Factors. Willey Interscience Publication.

SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquina I. Ao Livro Técnico, 1981.

TIMOSHENKO, S. Resistência dos Materiais I e II. Rio de Janeiro: Livro Técnicos e Científicos, 1968.