


# TÉCNICAS DE PROJETO PARA APLICAÇÃO DE GRANITO SINTÉTICO EM ESTRUTURA DE MICROSCÓPIO ÓPTICO



Eng. Fernando de Moraes Mendonça Ribeiro

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036174

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquerio

SÃO CARLOS  
JULHO de 1998

Class.	<i>Lese-</i>
Cutt.	<i>4773</i>
Tombo	<i>T216/88</i>

*31100036174*

*st 0987783*

TÉCNICAS DE PROJETO PARA APLICAÇÃO  
DE GRANITO SINTÉTICO EM ESTRUTURA  
DE MICROSCÓPIO ÓPTICO



**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

R484t Ribeiro, Fernando de Moraes Mendonça  
Técnicas de projeto para aplicação de granito  
sintético em estrutura de microscópio óptico /  
Fernando de Moraes Mendonça Ribeiro. -- São  
Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Benedito de Moraes  
Purquerio.

1. Microscópio óptico. 2. Granito sintético.  
3. Técnicas de projeto. 4. Moldes. 5. Granito  
polimérico. I. Título.



## FOLHA DE APROVAÇÃO

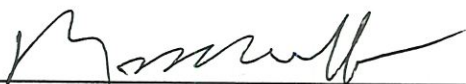
Candidato: Engenheiro **FERNANDO DE MORAES MENDONÇA RIBEIRO**

Dissertação defendida e aprovada em 25-08-1998  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Tit. **BENEDITO DE MORAES PURQUÉRIO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Tit. **ROSALVO TIAGO RUFFINO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Tit. **VANDERLEI SALVADOR BAGNATO**  
(Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



---

**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico esta dissertação  
aos meus avôs, Léo e  
Fernando.

## ***Agradecimentos***

Ao Prof. PhD. Benedito de Moraes Purquerio pela orientação, apoio, conselhos e dedicação que tornaram possível esse trabalho.

Ao Prof. PhD. Vanderlei Salvador Bagnato pela excelente coorientação e conselhos.

A minha esposa Adriana pelo carinho, compreensão e incentivo nos momentos difíceis, e a minha filha Beatriz por me trazer sempre alegria.

Aos meus pais pela orientação, incentivo e carinho durante meu caminho.

Aos amigos da Oficina de Óptica do IFSC pela amizade, apoio e aprendizado.

Aos técnicos da Oficina Mecânica do IFSC sem os quais não seria possível a execução deste trabalho em sua totalidade.

Aos amigos Paulo Wrege, Carlos Alberto Fortulan, Rogério Akihide Ikegami, Leonardo G. Garcia, Raul Habesch e Yashiro Yamamoto pelo apoio amizade e incentivo durante este trabalho.

Ao Eng. Volnei Titta pela orientação durante a análise por elementos finitos.

Ao meu irmão Léo pela ajuda na análise de custos.

Aos estagiários do SENAI pelo auxílio técnico.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia pelo uso das instalações e equipamentos.

A Sra. Yara Gianfaldoni Volponi pela ajuda fora do âmbito deste trabalho que poderiam afetar o bom andamento dele.

A FAPESP, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento deste trabalho e profissionalismo.

A CAPES/PADCT pelo apoio financeiro dedicado ao projeto do microscópio óptico de precisão.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Histórico.....	5
2.1.1 Introdução.....	5
2.1.2 A história da lente.....	5
2.1.2.1 Escritas antigas em óptica.....	6
2.1.2.2 Evidências no passado do uso da óptica.....	7
2.1.2.3 A invenção dos óculos.....	8
2.1.3 O primeiro microscópio composto.....	8
2.1.3.1 Os microscópios Royal Jansen.....	10
2.1.3.2 A expansão rápida do conhecimento.....	11
2.1.4 Microscópios do século 17.....	11
2.1.5 Melhorias mecânicas do século 18.....	21
2.1.6 A lente acromática e outras melhorias ópticas.....	24
2.1.7 Os microscópios do século 19.....	29
2.2 Modelos de Microscópios Ópticos Atuais .....	33
2.3 Descrição do Microscópio OTI-1.....	36
3 MÉTODOS E MATERIAIS.....	43
3.1 Estudo do Microscópio OTI-1.....	43
3.2 Influências Ambientais no Projeto de Equipamentos Ópticos.....	46



3.2.1	Temperatura.....	47
3.2.2	Pressão.....	49
3.2.3	Tensões estáticas.....	49
3.2.4	Vibrações.....	50
3.2.5	Impactos.....	51
3.2.6	Umidade.....	52
3.2.7	Corrosão.....	53
3.2.8	Contaminação.....	54
3.2.9	Fungos.....	54
3.3	Novas Técnicas de Projeto.....	55
3.3.1	Projeto para montagem (DFA).....	55
3.3.2	Análise do efeito e modo de falhas (FMEA).....	58
3.4	Materiais Avançados – Granito Sintético.....	60
3.4.1	Rigidez estática.....	65
3.4.2	Rigidez dinâmica.....	66
3.4.3	Estabilidade térmica.....	67
3.4.4	Resistência a agentes químicos.....	69
3.4.5	Processamento de peças em granito sintético.....	69
3.4.6	Projeto de moldes.....	75
3.4.7	Insertos.....	79
3.4.8	Processamento do material.....	81
3.4.8.1	Britagem e classificação do granito natural.....	81
3.4.8.2	Otimização do empacotamento da britas.....	84
3.4.8.3	Cálculo da quantidade de britas e resina.....	86
3.4.8.4	Adequação do processo de moldagem.....	88
3.4.9	Resinas.....	90
4	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO MICROSCÓPIO OTI-1.....	92
4.1	Projeto e Fabricação de Uma Base em Granito Sintético.....	92
4.1.1	Otimização do empacotamento das britas para base.....	97
4.1.2	Cálculo da quantidade de britas e resina para base.....	99
4.1.3	Adequação do processo de moldagem para base.....	100



4.2 Novo Projeto Estrutural do Microscópio OTI-1.....	102
4.2.1 Análise estrutural por elementos finitos.....	104
4.2.2 Projeto do molde.....	113
4.2.3 Moldagem da peça.....	119
5 RESULTADOS.....	124
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	129
BIBLIOGRAFIA.....	133
ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Microscópio OTI-1.....	2
Figura 2.1	Lente de Lanyard. (JONES,1998).....	6
Figura 2.2	Zacharias Jansen. (JONES,1998).....	9
Figura 2.3	Óptica do microscópio de Jansen.....	11
Figura 2.4	Sistema de três lentes.....	12
Figura 2.5	Microscópios italianos provavelmente utilizados por Malpighi, no século 17. (JONES,1998).....	14
Figura 2.6	Microscópio italiano provavelmente utilizado por Galileo. (JONES,1998).....	14
Figura 2.7	“Micrographia” de Robert Hooke, 1665. (OCTAVO,1998).....	15
Figura 2.8	Cortiça utilizado em trabalhos de Hooke. (POLLY,1995)	15
Figura 2.9	Microscópio ilustrado por Hooke. (POLLY,1995).....	16
Figura 2.10	Microscópio estilo tripé esboçado em um diário, 1631. (JONES,1998).....	17
Figura 2.11	Microscópio estilo tripé de Yarwell, 1683. (JONES,1998).....	18
Figura 2.12	Antoni Van Leeuwenhoek (cerca de 1670). (POLLY,1995).....	19
Figura 2.13	O microscópio Leeuwenhoek. (BLANJAAR,1997).....	20
Figura 2.14	Microscópio de John Marshall, 1704. (JONES,1998).....	22
Figura 2.15	Microscópio de John Cuff, 1742. (JUSTIN,1998).....	23
Figura 2.16	Microscópio de George Adams, 1746. (JONES,1998)....	24
Figura 2.17	O problema de aberração cromática.....	25
Figura 2.18	A lente acromática.....	25
Figura 2.19	Um microscópio Truley/Lister de lentes corrigidas. (JONES,1998).....	27
Figura 2.20	Microscópio tipo Lister de Andrew Ross. (JONES,1998)	28
Figura 2.21	Microscópio de Andrew Ross segundo especificações de Lister, 1837. (JUSTIN,1998).....	30

Figura 2.22	O microscópio Trunnion de Spencer, 1855.....	31
Figura 2.23	Microscópio Zeiss de 1908. (BOWMAN,1997).....	32
Figura 2.24	Faixas de operação de microscópios e objetos de interesse. (HABESCH,1998).....	33
Figura 2.25	Modelos de microscópios ópticos.....	35
Figura 2.26	Esquema do microscópio OTI-1.....	37
Figura 2.27	Base do microscópio OTI-1.....	38
Figura 2.28	Sistema de iluminação do microscópio OTI-1.....	39
Figura 2.29	Coluna e mesa (platina) do microscópio OTI-1.....	40
Figura 2.30	Revólver das objetivas do microscópio OTI-1.....	41
Figura 2.31	Angular e binocular do microscópio OTI-1.....	42
Figura 3.1	Deformação em microscópio – vista lateral.....	44
Figura 3.2	Deformação em microscópio – vista frontal.....	45
Figura 3.3	Peças da base e coluna do microscópio OTI-1.....	57
Figura 3.4	Esquema do projeto após a aplicação do DFA.....	58
Figura 3.5	Composição do granito sintético. (SYNCONCRETE,1993).....	61
Figura 3.6	Aplicação de granito sintético em máquinas ferramentas. (SYNCONCRETE, 1993).....	61
Figura 3.7	Aplicação de granito sintético em equipamentos de metrologia. (BURTON, 1997).....	62
Figura 3.8	Aplicação de granito sintético em bancadas ópticas (LAMAFAE-USP).....	62
Figura 3.9	Aplicação de granito sintético em dispositivos de fixação. (WIEKE,1998).....	63
Figura 3.10	Comparação entre o granito sintético, ferro fundido e alumínio.....	64
Figura 3.11	Espessuras em peças de granito sintético e alumínio.....	65
Figura 3.12	Comparação entre vibrações. (GRANITAN,s.d.).....	66
Figura 3.13	Resposta em frequência do granito sintético (GRANISIN) e ferro fundido. (PENTEADO, 1993).....	67



Figura 3.14	Curvas Temperatura-Tempo do granito sintético e ferro fundido. (GRANITAN, s.d.).....	68
Figura 3.15	Resistência do granito sintético a agentes químicos. (GRANITAN, s.d.) .....	69
Figura 3.16	Características de desmoldagem de peças injetadas e de granito sintético.....	71
Figura 3.17	Molde em madeira para granito sintético com reforços...	72
Figura 3.18	Fluxograma do processamento de peças em granito sintético.....	74
Figura 3.19	Elementos posicionadores de insertos.....	77
Figura 3.20	Conceitos de projeto de moldes para granito sintético....	78
Figura 3.21	Exemplos de insertos para estruturas de granito sintético.....	80
Figura 3.22	Esquema de funcionamento de um triturador mecânico.	82
Figura 3.23	Peneiras e mesa vibratória usadas para classificação de britas de granito natural.....	83
Figura 3.24	Peneiras com britas de granito natural separadas após vibração.....	84
Figura 3.25	Triângulo de FERET. (BUENO, 1995).....	86
Figura 3.26	Representação do volume de britas e dos espaços vazios.....	87
Figura 3.27	Exemplos de preenchimento de um molde.....	90
Figura 4.1	Parte interna do microscópio OTI-1 fundida em alumínio.....	93
Figura 4.2	Parte interna do microscópio OTI-1 moldada em granito sintético.....	93
Figura 4.3	Modelo em CAD do projeto da base do microscópio OTI-1.....	94
Figura 4.4	Modelo em CAD do projeto do molde da base.....	95
Figura 4.5	Usinagem da chapa inserida na base do microscópio....	96
Figura 4.6	Molde para moldagem da base do microscópio.....	96
Figura 4.7	Triângulo de FERET. (BUENO, 1995).....	97

Figura 4.8	Gráfico das densidades de mistura de britas.....	98
Figura 4.9	Base do microscópio moldada em granito sintético.....	101
Figura 4.10	Microscópio OTI-1 montado em uma base de granito sintético.....	102
Figura 4.11	Esquema do novo sistema estrutural.....	103
Figura 4.12	Modelo de peça em granito sintético para análise por elementos finitos.....	107
Figura 4.13	Modelo com malha de elementos gerada.....	108
Figura 4.14	Cargas aplicadas ao modelo para análise por elementos finitos.....	109
Figura 4.15	Resposta gráfica de deformação estrutural do microscópio em elementos finitos.....	110
Figura 4.16	Resposta gráfica da distribuição de tensão na estrutura do microscópio em granito sintético.....	111
Figura 4.17	Resposta gráfica da distribuição de tensão na estrutura do microscópio em alumínio.....	112
Figura 4.18	resposta gráfica de deformação estrutural do microscópio em alumínio.....	113
Figura 4.19	Modelo em CAD do molde do sistema estrutural do microscópio.....	114
Figura 4.20	Estudo do caminho percorrido pelo granito sintético durante a moldagem.....	116
Figura 4.21	Elemento posicionador externo.....	117
Figura 4.22	Buchas roscadas inseridas nas partes do molde.....	118
Figura 4.23	Molde do sistema estrutural do microscópio.....	118
Figura 4.24	Esquema da tampa para acabamento da peça.....	119
Figura 4.25	Primeira etapa de preenchimento.....	120
Figura 4.26	Segunda etapa de preenchimento.....	121
Figura 4.27	Excesso de material na tampa do molde.....	122
Figura 4.28	Sistema estrutural final do microscópio moldado em granito sintético.....	123
Figura 5.1	Bolhas de ar formadas entre a peça e o molde.....	126



Figura 5.2	Deslocamento de material pela lateral do molde.....	127
Figura 5.3	Microscópio montado com o novo sistema estrutural.....	128

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1	Propriedades do granito sintético. (SYNCONCRETE, s.d.).....	64
Tabela 3.2	Materiais para moldes de granito sintético.....	76
Tabela 3.3	Composição química média e propriedades do granito cinzento utilizado na confecção da peça. (PENTEADO, 1996).....	81
Tabela 3.4	Propriedades da resina Araldite M e do endurecedor HY 956. (CIBA, s.d.).....	91
Tabela 4.1	Densidades para diferentes misturas de britas.....	98
Tabela 4.2	Resposta numérica obtida pela análise estrutural do microscópio em granito sintético por elementos finitos...	111
Tabela 4.3	Resposta numérica obtida pela análise estrutural do microscópio em alumínio por elementos finitos.....	113
Tabela 5.1	Comparativo entre materiais estruturais.....	125

**LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS**

$d$	Distância mínima	mm
$\lambda$	Comprimento de onda	nm
$\theta$	Ângulo de cone claro	°
$n$	Abertura numérica	
$V_e$	Volume da mistura de britas	ml
$V_P$	Volume de granito sintético na peça	ml
$m_{gn}$	Massa de granito natural	g
$d_{gn}$	Densidade do granito natural	$g/cm^3$
$V_R$	Volume real de granito natural	ml
$V_V$	Volume de vazios	ml
$d_R$	Densidade da resina	$g/cm^3$
$m_R$	Massa da resina	g

## **RESUMO**

RIBEIRO, F. (1998) *Técnicas de projeto para aplicação de granito sintético em estrutura de microscópio óptico*. São Carlos. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A microscopia óptica desponta hoje como uma área de instrumentação extremamente importante, dada a demanda existente por esta técnica em diferentes setores. Devido a este fato e tendo como base o microscópio OTI-1 já existente, este trabalho propõe a utilização do granito sintético como principal material estrutural do microscópio. No presente trabalho são expostos a metodologia e técnicas de projeto para a aplicação do granito sintético em estruturas de equipamentos de precisão de pequeno porte. São apresentadas e discutidas técnicas de projeto de moldes e peças de granito sintético, bem como a metodologia utilizada no processamento do material. Este trabalho destaca a importância de ferramentas de projeto como CAD, CAE, DFA e FMEA, na concepção, estudo e análise de um projeto desta natureza.

Palavras-chave: Microscópio óptico; granito sintético; técnicas de projeto; moldes, granito polimérico.

## **ABSTRACT**

RIBEIRO, F. (1998) *Design techniques for the polymer concrete application in a optical microscope structure*. São Carlos. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de, Universidade de São Paulo.

The optical microscopy is nowadays an important instrumental area to the high demand for this technique in almost all technology fields. Due to this fact and based on the existing microscope OTI-1, this work proposes the use of polymer concrete as an option for its structure. This work presents the design techniques and the methodology for the polymer concrete application in precision equipments of small sizes. The design techniques for moulds and polymer concrete parts are introduced and discussed as well as the methodology for the material processing. The work highlight the importance of the design tools as CAD, CAE, DFA and FMEA used in investigations and design analysis of this kind.

Key-Words: Optical microscope, polymer concrete, design techniques, moulds.



## **1. INTRODUÇÃO**

A microscopia óptica desponta hoje como uma área de instrumentação extremamente importante, dada a demanda existente por esta técnica nas áreas de saúde pública, ecologia, biologia, medicina, engenharia e pesquisas em outras áreas como a física, química e materiais.

O estágio científico e tecnológico do mundo atual mostra claramente que o próximo século será marcado de forma dramática pela biologia e nanotecnologia. A biologia (engenharia genética, virologia, etc.) constitui uma forma de preservar os recursos e aperfeiçoar fontes de alimentos, controles de poluição e controle de doenças. Na nanotecnologia reside a solução para computadores mais eficientes e telecomunicações que satisfaçam as necessidades modernas. Estas importantes áreas são fortes usuárias da microscopia óptica, que tem sido merecedora de um destaque especial nos dias de hoje.

Tendo em vista este panorama, o Ministério de Educação e Cultura (MEC) e o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) desde o início da década de 80, têm procurado incentivar o ensino da matéria, equipando as escolas, através da importação de lotes de microscópios. Além desta iniciativa, o MEC e o MCT deram início a um projeto importante denominado "Projeto do Vidro Óptico", dentro do qual constava um item específico para proporcionar a fabricação do microscópio óptico brasileiro.

O projeto do microscópio óptico brasileiro constituiu-se portanto, num esforço conjunto do MEC e MCT com a empresa DF Vasconcelos. O MEC

adquiriu da empresa alemã Carl Zeiss Jena - RDA a tecnologia para a fabricação do microscópio Laboval 3, hoje denominado OTI-1 (Figura 1.1), bem como máquinas e peças para fabricação das lentes do microscópio. Também foram aplicados recursos para o treinamento do pessoal técnico envolvido.

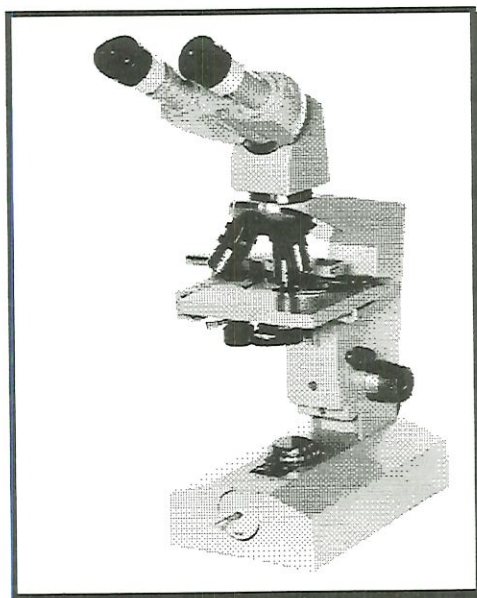


Figura 1.1 – Microscópio OTI – 1.

Por razões diversas, a empresa que deveria ter viabilizado todo o investimento desistiu do projeto. Por quase dez anos todos os equipamentos, peças e documentação adquiridos ficaram precariamente armazenados na empresa. Em julho de 1994 o Instituto de Física de São Carlos - USP (IFSC/USP) recebeu do MEC e MCT a incumbência de verificar o estado em que se encontrava esse investimento. A equipe destinada para essa investigação, sensibilizada pela situação e baseada na experiência prévia que o IFSC/USP tem na área de óptica, resolveu trazer para São Carlos tudo que se encontrava na DF Vasconcelos e dar o melhor andamento possível ao projeto. A documentação, peças e máquinas foram transportadas para o IFSC/USP e foi dado início à montagem de 100 microscópios pré-fabricados (o que teria sido a primeira etapa do projeto antigo). Iniciaram-se a produção de lentes e partes mecânicas menores e, em fevereiro de 1995, foram entregues ao MEC 100 unidades do

microscópio OTI-1, que foram imediatamente distribuídas a várias universidades federais. Com a construção das primeiras 100 unidades (a custo adicional nulo), adquiriu-se o conhecimento básico que está permitindo dar continuidade ao projeto, de uma forma própria e perfeitamente viável. Com os equipamentos adquiridos, e agora em condições de uso, foi proposto pelo Grupo de Óptica do IFSC/USP o desenvolvimento de uma linha piloto de produção de microscópios que deverá culminar com a produção de cerca de 200 unidades.

No seu contexto tecnológico, o projeto do microscópio envolve não somente a parte óptica como também as partes mecânicas que necessitam de adaptações aos processos de fabricação existentes nas oficinas do IFSC e do Laboratório de Máquinas Ferramentas (LAMAFE), visando particularmente a simplificação do projeto e a diminuição do custo do produto.

Com o objetivo de diminuir o custo e adequar as tecnologias já conhecidas e desenvolvidas no LAMAFE, propõe-se com o presente trabalho, estudar o uso do granito sintético como alternativa de material estrutural no projeto do microscópio.(objetivo)

Tendo como base o microscópio OTI – 1 já existente, pretende-se avaliar uma alternativa de material estrutural no sentido de melhorar seu desempenho e custo bem como aplicar novas técnicas de projeto visando um produto otimizado.

O desenvolvimento do microscópio foi feito em duas frentes de trabalho: a fabricação de componentes baseado no projeto já existente e o novo projeto do microscópio visando a aplicação de novos materiais a um custo mais baixo de produção.



Este trabalho foi feito em conjunto com o Grupo de Óptica do Instituto de Física de São Carlos, o qual tem grande experiência na área de óptica e dispõe de uma Oficina de Óptica de Precisão a qual é responsável pela fabricação dos componentes ópticos do microscópio. Juntamente com a Oficina de Óptica, o IFSC dispõe de uma Oficina Mecânica que está responsável pela fabricação dos componentes mecânicos e estruturais do microscópio segundo o projeto original (OTI – 1).

O LAMAFE (Laboratório de Máquinas Ferramentas) tem a sua participação no desenvolvimento deste microscópio fundamentada na experiência em projeto de máquinas e no desenvolvimento de novos materiais, no caso, o granito sintético.

Este trabalho, caracterizado pelo relacionamento interunidades, acrescenta uma característica igual ao seu contexto por estar intrinsecamente relacionado com tecnologias diferentes, as quais não poderiam ser aproveitadas na íntegra se fosse desenvolvido somente em uma unidade institucional.

## **2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

Para ser completo, o desenvolvimento deste trabalho necessita de uma verificação do desenvolvimento do microscópio durante sua história, bem como um estudo dos modelos atuais e suas características, para obter uma proposta com as reais especificações que um microscópio deve ter.

### **2.1. Histórico**

O microscópio óptico se tornou em um dos símbolos mais reconhecíveis de ciência, sendo um instrumento de grandes descobertas desde muito tempo atrás até hoje.

#### **2.1.1. Introdução**

O papel do microscópio na história começou na antiguidade com o uso de uma lente simples para o primeiro microscópio em aproximadamente 721-705 AC, e a partir daí, até os microscópios do século 19.

#### **2.1.2. A História da lente**

O primeiro uso de uma lente é de certa forma pouco conhecido, mas até agora acredita-se que uso de lentes é mais atual que previamente pensado.



A Figura 2.1 ilustra a Lente de Lanyard descoberta por Lanyard, em aproximadamente 721-705 AC. Foi pensado por muito tempo que esta tenha sido a primeira lente plano-convexa. No último século porém, um estudo detalhado desta lente mostrou que a superfície encurvada é de fato facetada, e não arredondada como uma lente comum. Além disto, um estriamento opaco no interior da lente ocasionava uma baixa qualidade de imagem. É de comum acordo agora que esta lente está muito mais próxima de um ornamento do que de uma lente propriamente; e, de um lado mais prático, sabe-se que as lentes começaram a serem usadas há pouco tempo.



Figura 2.1 – Lente de Lanyard. (JONES,1998)

#### 2.1.2.1. Escritas antigas em óptica

Vários manuscritos antigos fornecem a dimensão de tempo de alguns conceitos de óptica dentro dos quais se destacam os seguintes.

- Século 2 AC. Claudius Ptolemy descreveu o fenômeno da difração que uma vara ao ser introduzida em uma piscina de água, aparenta dobrar-se. Registrou com precisão os ângulos de difração para esta relação, bem como calculou a refração com muita precisão para a água.

- Século 1 DC. Seneca descreveu a ampliação atual descrita por um globo de água. Ele escreveu o seguinte: "Cartas, com letras pequenas, são lidas aumentadas e mais claramente através um globo de vidro cheio de água".
- 962-1038 DC. O estudioso árabe Alhazen escreveu o primeiro trabalho óptico para a principal Enciclopédia de Óptica, onde não só discutiu os princípios ópticos, mas descreveu a anatomia do olho e como a lente do olho foca uma imagem na retina.
- 1267 DC. Bacon relatou descrições definidas de ampliação simples pela perspectiva dele. Citou: "Grandes coisas podem ser executadas através de visão refratada. Se as páginas de um livro, ou qualquer objeto minucioso, são vistas através de um segmento de uma esfera de vidro ou cristal, eles aparecerão melhores e mais perto."

Enquanto os especialistas dão um vislumbre do conhecimento óptico no passado, é importante perceber que este conhecimento era limitado provavelmente aos cientistas instruídos e filósofos. Não eram tão grandiosos até a invenção dos espetáculos que a óptica mostra hoje.

#### 2.1.2.2. Evidência do uso da óptica no passado

É sabido que óculos estavam em uso na China antes que eles fossem conhecidos no ocidente. Porém, estudos dos óculos chineses demonstram que freqüentemente as lentes eram planas, sem poder corretivo, e as pessoas podem ter usado estes óculos coloridos para propósitos de estética e não para a correção de problemas de visão.

Há uma descrição muito antiga de um uso isolado de óculos. Pliny escreveu o seguinte em 23-79 D.C.:

" Esmeraldas são normalmente côncavas de forma que elas podem concentrar os raios visuais. Nero, o Imperador, assistia através de uma esmeralda, os combates de gladiadores."

Esta citação parece ser a primeira descrição relativa ao uso de monóculos para corrigir uma visão míope. Estranhamente, embora isto deva ter sido trabalhado muito, e muitas pessoas devem ter lido esta passagem, não há nenhuma outra evidência de uso de óculos durante mais de doze séculos.

### 2.1.2.3. A invenção dos óculos

A reinvenção dos óculos modernos aconteceu entre 1280 e 1285 em Florença, na Itália. Enquanto é incerto quem era o inventor, está bastante claro que óculos ficaram bem comuns naquela cidade, e o uso deles esparramou para o resto do mundo em poucos anos. Considerando a grande porcentagem das pessoas com problemas visuais, não é difícil de entender por que havia tal entusiasmo naquela época.

Estranhamente, não é certo que os primeiros óculos tenham tido feitos em Florença. Alguns dão crédito a um nobre chamado Amati que morreu em 1317. Dizem que ele é autor da invenção, mas contou só para alguns dos amigos mais íntimos.

### 2.1.3. Primeiro microscópio composto

A história do primeiro microscópio composto (mais de 1 lente) é bem interessante. Com as lentes de óculos difundidas, e suas propriedades de ampliação óbvias, era só uma questão de tempo antes de alguém reunir duas delas para fazer o primeiro microscópio composto. Realmente, isto provavelmente estava acontecendo já com telescópios de fabricantes de



óculos holandeses que estavam experimentando o uso de múltiplas lentes. Considerando-se que um microscópio pode ser feito invertendo-se um telescópio; isto pode ser de onde se originou a idéia.

Há uma grande e maravilhosa quantidade de desinformação sobre o inventor do microscópio. Referências bastante respeitáveis dizem que Galileio inventou o microscópio logo após inventar o telescópio. Isto não é bem assim, pois Galileio não fez seu primeiro telescópio antes de 1607. Muitas pessoas acreditam que Leeuwenhoek inventou o primeiro microscópio. Isto também é muito incorreto, pois os microscópios dele eram muito simples e ele começou fazendo microscópios muito tempo depois de modelos mais elaborados.

Os créditos para o primeiro microscópio normalmente são dados a Zacharias Jansen, ilustrado na Figura 2.2, em Middleburg, Holanda, ao redor do ano 1595. Considerando que Zacharias estava muito jovem naquela época, é possível que seu pai, Hans, tenha feito o primeiro, mas Zacharias assumiu a produção dos demais.



Figura 2.2 – Zacharias Jansen. (JONES, 1998)

Detalhes sobre estes primeiros microscópios de Jansen não estão claros, mas há alguma evidência que permite fazer algumas suposições fundamentadas sobre eles.

Infelizmente, somente um único microscópio de Jansen sobreviveu até o presente, e se encontra agora em um museu de Middleburg. Alguns historiadores duvidam da origem deste microscópio, mas este corresponde bem com a descrição conhecida dos microscópios Royal Jansen, ou pelo menos é bem parecido aos microscópios de Jansen.

### 2.1.3.1. Os microscópios Royal Jansen

Afortunadamente, restou um microscópio de Jansen que sobreviveu o bastante para ser estudado. Como era habitual na ocasião, Jansen fez várias versões da nova invenção para presentear a realeza. Sabe-se que um desses microscópios foi enviado ao Príncipe Maurice de Orange, e um para o Arquiduque Albert da Áustria. Enquanto nenhum destes instrumentos sobreviveu em tempos modernos, o mais recente deles foi preservado até perto dos anos de 1600, quando o diplomata holandês e amigo de infância de Zacharias Jansen, chamado Cornelius Drebbel, examinou e registrou as observações dele.

Seria óbvio esperar-se um microscópio de apresentação real como sendo mais ornado e bem-feito que o habitual, contudo deveria ter uma configuração mecânica típica dos microscópios. Drebbel descreveu o instrumento real como composto de 3 tubos corrediços medindo aproximadamente 46 cm quando completamente estendido, e com 5 cm de diâmetro. Era muito ornado, com 3 golfinhos de metal na extremidade, formando os pés de um tripé. Além do tripé ornado, esta descrição é bastante semelhante ao microscópio descoberto na Holanda.

A Figura 2.3 representa o diagrama óptico do microscópio de Jansen. Nota-se que o microscópio, conforme esquematizado, contém duas lentes, e um diafragma entre os tubos. É dito que o microscópio no museu de Middleburg tinha uma ampliação de 3X quando completamente fechado, e 9X quando completamente estendido.

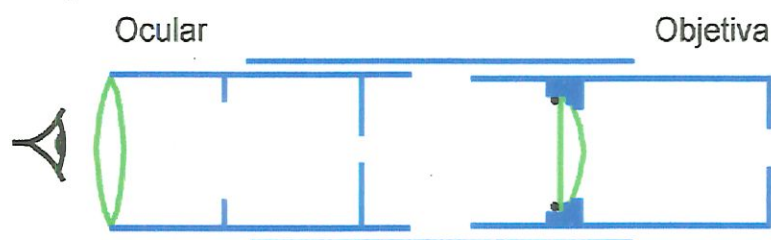


Figura 2.3 – Óptica do microscópio de Jansen.

Provavelmente, a melhoria principal em óptica de microscópio foi a introdução de um sistema de três lentes. Isto foi realizado, possivelmente por Robert Hooke (descrito adiante), usando duas lentes em uma ocular “Huygens”, que era de uso comum em telescópios.

#### 2.1.3.2. A expansão rápida de conhecimento

Depois da invenção de Jansen, essa idéia se tornou mundialmente conhecida. Dentro de poucos anos, haviam muitos fabricantes de microscópios na Europa, e homens instruídos, como Galileo, eram os usuários.

#### 2.1.4. Microscópios do Século 17

O décimo sétimo século foi um período de grande interesse em microscopia, como também de algumas outras descobertas. O palavra “Microscópio” foi registrada primeiro por sócios da *Accademia dei Lincei*, uma sociedade científica da qual Gallileo participava. Mas o microscópio não era somente uma ferramenta científica. Ao longo deste século bem como nos tempos vitorianos, microscópios foram adquiridos pela classe alta como brinquedos recreativos.



Como mencionado antes, o primeiro avanço técnico do microscópio depois de Jansen era uma revisão da óptica do sistema de duas lentes para o sistema de três lentes. A Figura 2.4 ilustra um diagrama deste sistema, onde B é a lente ocular, D é a lente de campo, e F é a lente objetiva; o olho situa-se no ponto A. Historiadores dizem que foi Robert Hooke o primeiro cientista a usar este sistema que permite uma melhor conservação da luz do objeto, enquanto evita uma lente ocular muito grande, que faz com que o olho fique a uma distância incômoda longe do aparelho. Esta três lentes constituem a configuração básica dos microscópios de hoje.

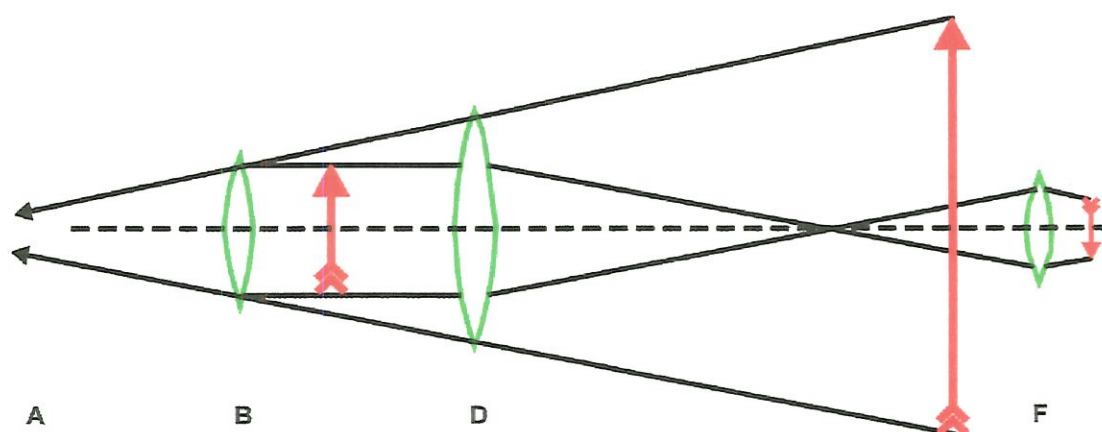


Figura 2.4 - Sistema de três lentes.

Em princípios do século 17, foram publicados alguns documentos sobre microscópicos, mas os dois documentos mais importantes vieram em 1660 e 1665, quando Marcello Malpighi provou as teorias de circulação de sangue de William Harvey, e Robert Hooke escreveu sua "Micrographia".

O significado destes trabalhos pode ser difícil de entender hoje, todavia eles deixam claro que o microscópio era útil para fazer descobertas científicas. Alguns pensaram que embora fosse interessante olhar as pernas minúsculas em uma pulga ou partes de outros insetos, não seria possível fazer nenhuma descoberta nova com tal dispositivo. Não foi apreciado que olhando coisas para o fim acima descrito, poder-se-ia ver qualquer coisa realmente diferente a uma pequena distância. Este pensamento pode ser entendido, por exemplo, considerando o exame do leite debaixo de um

microscópio: nada realmente novo fica visível à ampliação envolvida. Estes pensadores não tiveram nenhuma idéia de quão importante eram as estruturas dos tecidos presentes em todos os seres vivos e que estavam dentro do alcance de microscópios, ou sejam, as células.

Marcello Malpighi, foi um dos primeiros grandes microscopistas, e até hoje é considerado o pai da embriologia e da histologia. A primeira descoberta dele com o microscópio foi de monumental importância para a fisiologia animal.

Durante vinte e um anos, William Harvey trabalhou no ambiente acadêmico e médico e publicou seu artigo *De motu cordis & sanguinis in animalibus*, no qual ele apresentou prova experimental e lógica que o sangue, na verdade, viaja em um movimento circular saindo do coração, para o corpo, e retorna ao coração. Neste tempo, tal idéia considerada radical, deveria ter sido premiada com o banimento, contudo a posição importante de Harvey, como médico da realeza e também com a prova teórica, lógica e meticulosa, fez o mundo científico parar e considerar isto. Mas, como convencimento do argumento dele, sua teoria requereu alguma forma de conexão entre as artérias e as veias que ninguém poderia ver.

Em 1660, 3 anos depois da morte de Harvey, Marcello Malpighi usou um microscópio para ver os vasos capilares, comprovando assim a teoria de Harvey.

Os dois microscópios da Figura 2.5 são do tipo daquele que foram construídos na Itália, quando Malpighi fez seu trabalho. São equipamentos a serem segurados utilizando as mãos e mediam aproximadamente de 12 a 20 cm de altura, em real contraste com os instrumentos equivalentes de 60 cm de altura que foram feitos na Inglaterra no mesmo período. Na Figura 2.5, o microscópio da esquerda foi feito por Giuseppe Campani (1635-1715) e o da

direita foi feito por Eustachio Divini (1610-85.). Vários destes microscópios passaram pela vida de Malpighi, e não é completamente certo quais microscópios foram por ele usados. Seus documentos pessoais mencionam a compra de um microscópio de Divini, provavelmente o mostrado a direita na Figura 2.5.

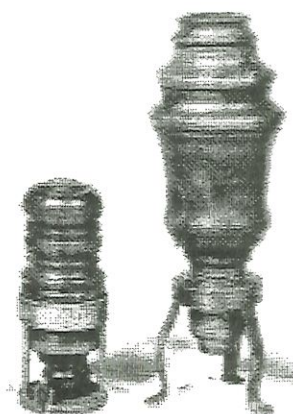


Figura 2.5 – Microscópios italianos provavelmente utilizados por Malpighi, no século 17. (JONES, 1998)

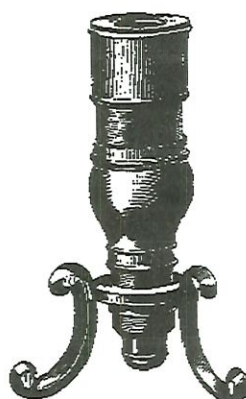


Figura 2.6 - Microscópio italiano provavelmente utilizado por Galileo. (JONES, 1998)

O microscópio da Figura 2.6 apresenta um outro estilo italiano simples e foi feito nos anos de 1600. Provavelmente Galileo tenha usado esse tipo de microscópio. É interessante notar que os microscópios italianos permaneceram menores e mais simples durante algum tempo, enquanto os fabricantes de microscópio ingleses permaneciam na fabricação de microscópios de 60 cm de altura com muitas inovações mecânicas.







propriedades. Ele verificou que a sua composição era principalmente de bolsas de ar. Hooke nomeou estas bolsas de “células” de ar.

O microscópio usado por Hooke foi ilustrado em suas anotações (Figura 2.9). Hooke não fez os próprios microscópios; eles foram feitos em Londres pelo fabricante Christopher Cock, a quem Hooke assessorou durante seu projeto. Em retorno, o sucesso do livro de Hooke fez de Cock um fabricante de microscópio muito famoso.

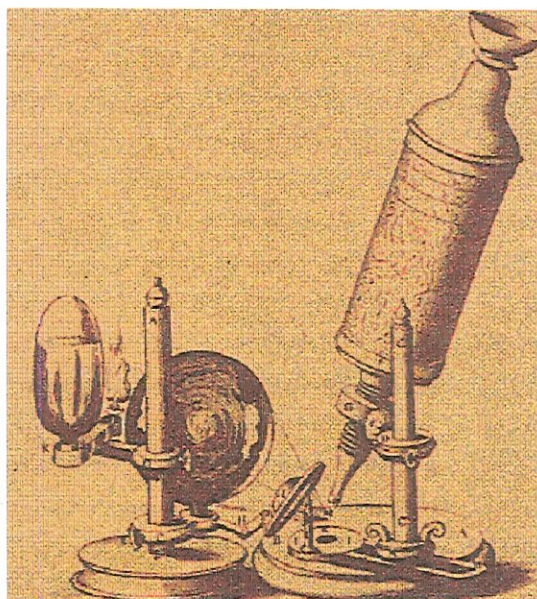


Figura 2.9 – Microscópio ilustrado por Hooke.(POLLY,1995)

Esses microscópios eram instrumentos grandes, às vezes com quase 60 cm de altura. O tubo principal muito grande era fixado na coluna por um parafuso, e através da sua rotação, um objeto poderia ser trazido ao foco. O objeto sob exame era colocado em uma haste e era iluminado por cima. O aparato de iluminação mostra uma chama de óleo, um globo e uma lente para focar a luz, os quais foram feitos pelo próprio Hooke.

Obviamente, o peso de um tubo de 60 cm e os filetes do parafuso feitos naquela época, ocasionavam muita oscilação associada com a focalização. Os modelos mais recentes feitos por Christopher Cock tiveram mais estabilidade.

Depois do século 17, ocorreu uma mudança morfológica nos microscópios, provavelmente devido a instabilidade do pilar lateral fino e do parafuso de foco pequeno que sustentavam o tubo enorme do microscópio do estilo de Cock e Hooke. O modelo inglês tipo tripé ficou popular nessa época. A evidência mais antiga de um microscópio inglês de estilo tripé consta no diário de um professor holandês, Isaac Beeckman que o desenhou em 1631. Esse microscópio é ilustrado na Figura 2.10.

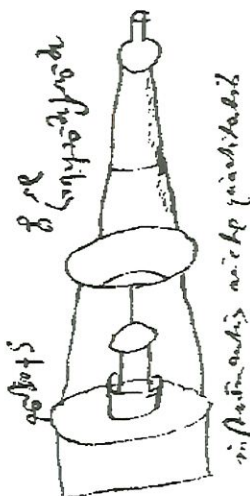


Figura 2.10 – Microscópio estilo tripé esboçado em um diário, 1631.

(JONES, 1998)

John Yarwell, que provavelmente era o maior fabricante de microscópios na época, divulgou seu microscópio em um panfleto comercial em 1683 (Figura 2.11). Este microscópio é semelhante em tamanho, forma do tubo, e enfoque das lentes ao modelo de pilar lateral de Cock. O avanço desse microscópio relativamente aos anteriores consistia de um tripé mais robusto que sustentava diretamente o tubo.



Figura 2.11 – Microscópio estilo tripé de Yarwell, 1683. (JONES,1998)

No final do século 17, algo bastante inesperado aconteceu na microscopia. Através de microscópios de uma única lente minúscula projetados e utilizados por Leeuwenhoek, um cientista amador, foram feitas descobertas incríveis. Leeuwenhoek, ilustrado na Figura 2.12, começou a escrever artigos à Sociedade Real em Londres em 1673, onde descrevia experiências que poderiam ser executadas com microscópios simples. Leeuwenhoek fez as primeiras descrições de protozoários, bactérias, e espermatozoides que ele chamou de *animalicules* bem como as primeiras descrições detalhadas das células vermelhas do sangue.





Figura 2.12 - Antoni Van Leeuwenhoek, cerca de 1670. (POLLY,1995)

Na época, pareceria incrível o que um amador que usava instrumentos simples de sua própria fabricação pudesse fazer fora da comunidade científica, mas as razões para o êxito de Leeuwenhoek são simples. As lentes usadas no século 17 eram bastante cruas, frequentemente feitas pelo polimento de vidro fundido entre pedaços de madeira. Por causa de problemas ópticos tais como a aberração cromática e esférica (descritos a seguir) as imagens com ampliações modestas (mais de 40 ou 50X) eram pouco nítidas, com bordos coloridos. Quando lentes múltiplas são usadas, este erro é significativamente aumentado. Usando uma única lente de alto poder e qualidade, Leeuwenhoek conseguiu obter imagens mais claras que as dos microscópios compostos.

Recentes estudos dos microscópios de Leeuwenhoek mostraram que as ampliações poderiam ser da ordem de de 50X ou mais de 200X, com resoluções tão boas quanto 2 micrometros. Nessa época, por volta de 1800, os microscópios compostos tinham resolução da ordem de 5 micrometros.



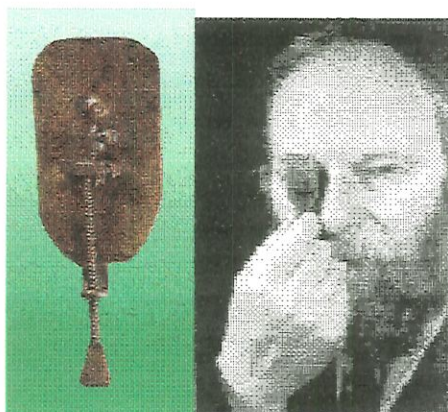


Figura 2.13 - O microscópio Leeuwenhoek.( BLANJAAR, 1997)

A Figura 2.13 ilustra um microscópio de Leeuwenhoek. Esse microscópio tem aproximadamente de 7 a 10 cm de altura. Possui um orifício pequeno no qual é montada uma minúscula mas poderosa lente. Na parte de trás, um parafuso com uma agulha provê um suporte para colocar o objeto de exame, que também permite a focalização.

O método de Leeuwenhoek de fabricação das lentes minúsculas de grande poder e de alta qualidade foi mantido em segredo. Um estudo recente feito em algumas cópias restantes dos microscópios de Leeuwenhoek, mostrou que algumas das lentes podem ter sido feitas através de lapidação e polimento, enquanto que as melhores foram sopradas. Leeuwenhoek aprendeu que quando um bulbo de vidro é soprado, uma gota pequena de material com formas espessadas se forma no fundo do bulbo (muito parecido com uma gota que se forma no fundo de uma bolha de sabão). Quebrando cuidadosamente o excesso de vidro, esta gota minúscula pode ser usada como uma lente.

Em 1747, dois anos depois da morte de Leeuwenhoek, mais de 500 destes microscópios pequenos foram leiloados, e 26 desses microscópios de prata especiais foram doados à Sociedade Real de Londres. Deste número, são conhecidos somente nove microscópios existentes até hoje. Até mesmo os 26 instrumentos de prata que se tornaram parte de uma coleção grande e

famosa, de alguma maneira desapareceram. Os nove microscópios de Leeuwenhoek ainda existentes possuem um valor inestimável e são mantidos sob segurança. Somente uma réplica está em exibição para o público.

Depois dos sucessos incríveis de Leeuwenhoek, os microscópios simples recuperaram o lugar deles como complementos aos microscópios compostos. De fato, até princípios do século 19, alguns dos melhores microscópios poderiam ser usados ambos como microscópios simples ou combinados. Quando George Adams construiu um microscópio de apresentação para o Rei George III, ao término do século 18, ele constituía de fato de dois microscópios completos acoplados: um microscópio simples, e um microscópio composto.

#### 2.1.5. Melhorias Mecânicas do Século 18

No século 18 ocorreram várias melhorias mecânicas aos microscópios, que proporcionaram maior estabilidade, facilidade da focalização fina, e outras facilidades de uso. Este também foi o século em que o telescópio, foi opticamente melhorado com a descoberta das lentes acromáticas. O microscópio, infelizmente, não se beneficiou significativamente dessa descoberta durante este século.

Por volta de 1690, os dois principais fabricantes de microscópios eram John Yarwell e John Marshall. Ambos os fabricantes estavam tentando gerar dinheiro com a descoberta de Malpighi de vasos capilares em 1660, fazendo modelos novos e os anunciando por observar a circulação de sangue pelos vasos capilares em rabos de peixe. Marshall conseguiu uma grande vantagem quando seu microscópio foi anunciado no primeiro dicionário técnico, o *Léxico de Harris Technicum*, publicado em 1704. Esse anúncio é mostrado na Figura 2.14. Estes modelos se tornaram muito

populares, e podem ainda ser achados ocasionalmente nas casas de leilões, onde recentemente um foi vendido recentemente nos E.U.A por volta de \$30,000.

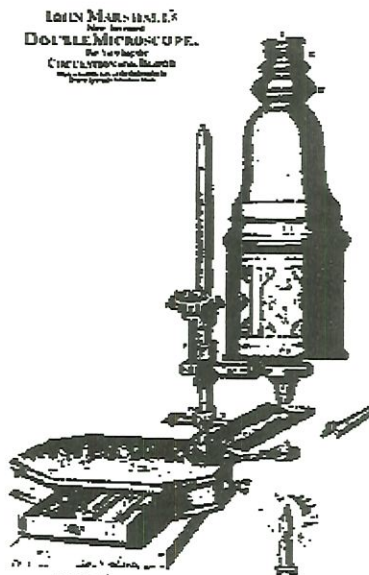


Figura 2.14 - Microscópio de John Marshall de 1704. (JONES, 1998)

Um outro microscópio que se tornou popular foi o de Cuff, mostrado na Figura 2.15. Muitos usuários da época consideraram este microscópio como o primeiro a oferecer um pouco mais de facilidade ao usuário. A característica principal deste microscópio é que dispunha de um tubo bem menor que os estilos anteriores permitindo desta forma uma maior estabilidade além de um pilar lateral mais rígido para sustentar o tubo e a amostra, com acesso fácil por todos os lados. O foco era feito através de um parafuso que efetuava um deslizamento suave do tubo de cima para baixo.





Figura 2.15 – Microscópio de John Cuff, 1742.(JUSTIN,1998)

O principal motivo pelo qual este modelo se sobressaia na competição pelo mercado era devido a publicidade feita através de um livro popular - só igualada a que fez a *Micrographia* para Cooke, e o *Léxico Technicum*, fez para Marshall. Henry Baker publicou um livro intitulado “The Microscope Made Easy” em 1742. Este livro dedicou um capítulo inteiro ao inventário de John Cuff dos microscópios disponíveis. O livro foi um grande sucesso e teve sua primeira edição vendida rapidamente, passando por várias reimpressões. As indústrias de instrumentos inglesas começaram rapidamente a copiar o estilo de Cuff, devido a alta demanda desse microscópio.

George Adams se tornou o maior fabricante de microscópios na segunda metade do século 19. Em 1746, 4 anos depois de Henry Baker publicar seu livro, George Adams escreveu o livro *Micrographia Illustrata*. Neste livro, Adams introduziu alguns dos seus modelos novos, como o microscópio da Figura 2.16. Este era um dos primeiros exemplos de um microscópio capaz de trocar as objetivas. Este microscópio podia ser usado como um microscópio simples (removendo o tubo), ou um microscópio composto. Outra inovação introduzida por Adams foi o parafuso de focalização fixado na base da amostra.





Figura 2.16 – Microscópio de George Adams, cerca de 1746. (JONES,1998)

#### 2.1.6. A lente acromática e outras melhorias ópticas

É importante destacar na história da evolução morfológica do microscópio, como as limitações ópticas foram superadas. Apesar de serem introduzidas algumas grandes melhorias mecânicas no século 18 para o microscópio, as imagens ainda permaneciam ruins com bordos coloridos ao redor dos objetos. Isto era em grande parte devido aos problemas de aberração cromática e esférica. A razão para tal problema era a utilização de várias lentes no microscópio composto. O microscópio de uma única lente era um tipo de sistema que proporcionava menos aberração porque a distorção aumenta com o número de lentes. Isto permitia que microscópios simples atingissem a resolução aproximada de 2 micrometros, enquanto os melhores microscópios compostos foram limitados a aproximadamente 5 micrometros.

O problema de aberração cromática é mostrado na Figura 2.17. Qualquer material que pode desviar luz (como o vidro de uma lente), desviará luz de comprimentos de onda diferentes (cores) em quantidades ligeiramente diferentes. Isto conduz ao fato que qualquer lente simples terá distâncias focais ligeiramente diferentes para cada cor. Se um objeto é

branco (composto de todas as cores), como mostrado acima, o componente vermelho entrará em foco em um lugar diferente do componente azul.

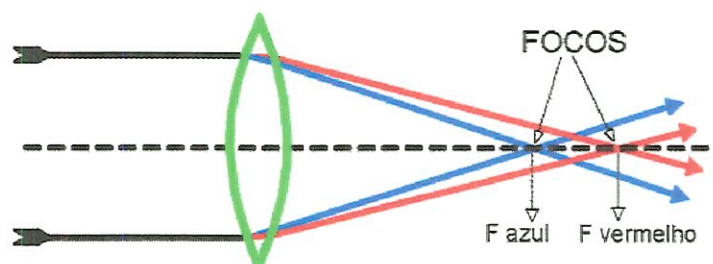


Figura 2.17 - O problema de aberração cromática.

A solução para este problema foi dada em torno de 1730, quando um advogado chamado Chester More Hall notificou a criação de um novo vidro “Flint Glass”, que parecia dispersar as cores mais que o vidro que era normalmente usado na mesma ampliação.

Ele concluiu que se usasse uma lente côncava deste vidro novo depois da lente de vidro “crown” (normalmente usado na época), ele poderia acabar com os desalinhamentos de foco para diferentes cores, sem perder a ampliação da primeira lente. Assim, a lente acromática nasceu, como mostrado na Figura 2.18.

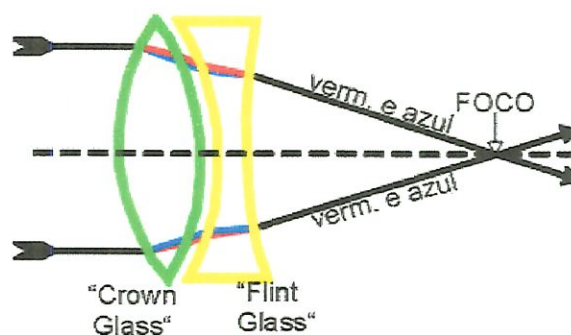


Figura 2.18 - A lente acromática.

Chester percebeu a grande importância desta descoberta e como os telescópios eram na época um grande negócio na Inglaterra, ele resolveu manter segredo da idéia até a sua comprovação final. Para tal, ele contratou duas fábricas de componentes ópticos diferentes, uma para fazer a lente de

vidro “crown” e a outra para a lente do novo vidro, para que assim eles não suspeitem qual era o fim das duas lentes. Infelizmente, ambos os fabricantes de lentes subcontrataram o trabalho para um mesmo fabricante de lentes, George Bass, que reuniu as duas lentes e percebeu o que Chester estava tentando fazer. Chester produziu o primeiro telescópio sem aberração cromática nos anos de 1730, porém sua invenção foi pouco reconhecida, e dela não tirou uma patente.

Enquanto a lente acromática se tornava um sucesso imediato para o telescópio, o mesmo não ocorria para as lentes objetivas minúsculas do microscópio para as quais era muito mais difícil de aplicar a mesma técnica. Por causa destas dificuldades, as primeiras objetivas de microscópio com correção de aberrações cromáticas não estavam disponíveis até ao redor 1800.

Após a solução do problema da aberração cromática, ainda restava a aberração esférica. Esta se constitui em uma distorção causada pela luz do objeto que atinge a extremidade da lente que não tem a mesma distância focal que a luz que passa pelo centro da lente. O problema pode ser diminuído usando aberturas muito pequenas ou diafragmas para limitar a passagem de luz ou fazendo as lentes com uma curvatura menor. Com lentes múltiplas utilizadas para aumentar o poder de ampliação, o erro nas lentes diferentes se somavam, e a imagem ficava pior.

Esse problema foi resolvido finalmente em 1830 por Joseph Jackson Lister (o pai de Joseph Lister, o cirurgião que descobriu técnica antiséptica). Em um artigo publicado nas Transações Filosóficas em 1830, ele mostrou matematicamente que se lentes múltiplas de baixo poder de ampliação forem colocadas a uma certa distância precisa uma da outra, ainda se adquire a aberração esférica da primeira lente, mas este problema não persiste somando-se os componentes seguintes. Como a quantidade de aberração na primeira lente pode abaixar a um mínimo, a aberração da série inteira se torna muito pequena, embora o poder de ampliação seja alto.



Lister era um microscopista, não um fabricante de microscópios. Depois que Lister publicou seu artigo, ele esperou que os fabricantes de Londres produzissem as novas objetivas. Depois de vários anos sem que ninguém mostrasse interesse por sua idéia, decidiu ele mesmo construir seu próprio invento. Lister trabalhou com a Tulley and Sons para produzir seu microscópio, mostrado na Figura 2.19, em meados de 1830. Os apoios adicionais na parte de trás do microscópio eram necessários para manter sua estabilidade.

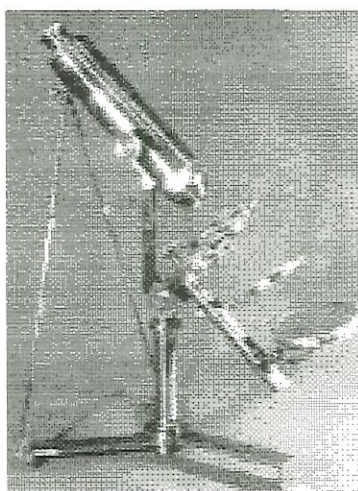


Figura 2.19 - Um microscópio Tulley/Lister de lentes corrigidas.  
(JONES,1998)

Alguns anos depois, o fabricante Andrew Ross produziu um microscópio de acordo com as especificações de Lister, conforme mostrado na Figura 2.20. Para melhorar a estabilidade, Ross introduziu uma guia de apoio de metal espessa de seção transversal triangular, e toda a parte óptica deslizava ao longo desta guia.



Figura 2.20 - Microscópio tipo Lister de Andrew Ross. (JONES, 1998)

Com o problema das aberrações cromática e esférica solucionados, restava mais um fator a ser resolvido: a abertura numérica. Relativamente a este tópico, Ernst Abbè publicou um artigo de leis físicas, em 1877, dizendo que a distância mínima ( $d$ ) é relacionado ao comprimento de onda de luz ( $\lambda$ ) dividido por um número conhecido como a abertura numérica ( $n$ ) que é proporcional ao ângulo do cone claro ( $\theta$ ) formado por dois pontos, um no objeto, e outro na imagem.

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \theta} \quad \text{Fórmula de Abbè.}$$

Embora esta fórmula não fosse conhecida durante muitas décadas, os fabricantes de microscópios, fazendo vários projetos de objetivas e mantendo os projetos que pareciam ter resolução melhor, fizeram com que a resolução dos microscópios melhorasse. Por volta dos anos de 1850, os grandes fabricantes de microscópios tinham alcançado o limite teórico de resolução sem a utilização da imersão em óleo. Conseqüentemente, nessa época, os microscópios poderiam distinguir entre dois pontos como diferentes se eles estavam pelo menos a 0,28 micrometros longe um do outro. Na verdade, o que eles estavam fazendo na época, era a maximização do ângulo da luz do objeto para a objetiva, mas eles não perceberam exatamente como isto estava ajudando.

Em 1870, experimentando objetivas de imersão em água, Ernst Abbè trabalhando com o fabricante alemão Carl Zeiss elucidou a fórmula que ele tinha desenvolvido, e trouxe Zeiss para a vanguarda da tecnologia de fabricação de microscópios. Por volta de 1880, usando objetivas de imersão em óleo e uma abertura numérica (N.A.) de 1,4 foi possível tornar os microscópios de transmissão capazes de distinguir dois pontos distante de 0,2 micrometros.

### 2.1.7. Os Microscópios do século 19

Foi no século 19 que os fabricantes de microscópio finalmente trabalharam na qualidade da imagem óptica. Foram corrigidos os problemas ópticos do passado pelo trabalho de Dolland e Lister nos anos de 1830, de forma que imagens claras finalmente estavam sendo produzidas. Nos anos de 1850, a resolução teórica máxima com objetivas ao ar (0,28 micrometros, com uma N.A. de 1,0) foi alcançada. As objetivas de imersão em óleo elevaram este limite para 0,20 micrometros posteriormente.

Uma grande seleção de microscópios foi feita nos anos de 1850. Os líderes em qualidade foram as três firmas inglesas Andrew Ross, Powell & Lealand, e R. & J. Beck. Outras firmas inglesas como Swift & Son e Watson & Sons ficaram muito importantes nesse século. Cary produzia modelos baratos e portáteis. As firmas francesas mais conhecidas eram Chevalier, Oberhauser, e Nacet. No final do século, as firmas alemãs Zeiss e Leitz se tornaram um provedor importante de microscópios à comunidade científica.

Este também foi o século em que a América começou a fazer microscópios. As atividades na área começaram com Charles Spencer em 1840, que ficou conhecido por fazer objetivas pelo menos tão boas quanto as firmas inglesas, a um preço mais razoável.



Andrew Ross fez história pois tornou-se no primeiro fabricante a produzir um microscópio de acordo com as especificações de Lister que reduziam a aberração esférica. Esse microscópio é ilustrado na Figura 2.21. Ele fazia outros microscópios antes disso, mas foi a associação dele com Lister no período de 1837-1841 que o tornou um líder no mercado.

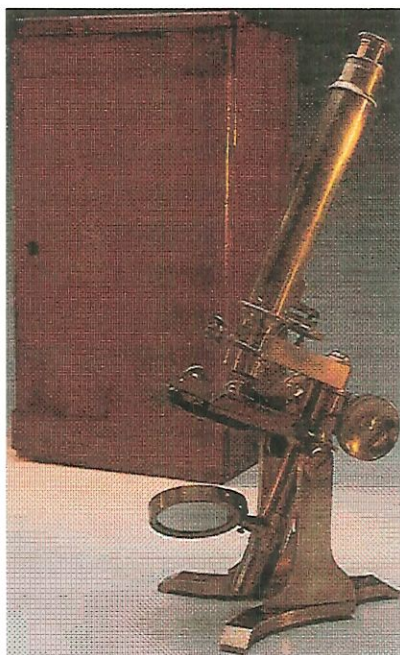


Figura 2.21 – Microscópio de Andrew Ross segundo especificações de Lister, 1837(JUSTIN, 1998).

James Smith, por outro lado, produziu um instrumento para J.J. Lister em 1826, e entrou em sociedade com Richard Beck, sobrinho de Lister, em 1847. Em 1851 Joseph Beck uniu o firma do irmão dele com a de Smith que se aposentou em 1865. Esta companhia com o nome de R&J Beck produziu alguns microscópios dos mais agradáveis da época.

Nos Estados Unidos, Charles Spencer começou a fazer microscópios nos anos de 1840. A Figura 2.22 mostra um dos microscópios Trunnion de Spencer feito em 1855, o qual teve várias melhorias mecânicas. De fato, haviam 20 fabricantes no E.U.A. em 1880, mas este número caiu para somente dois em 1902 (Spencer e Bausch & Lomb). A *Spencer Lens*

*Company* permaneceu no negócio por mais de 1 século, até que foi comprada pela *American Optical Company* nos anos de 1940.

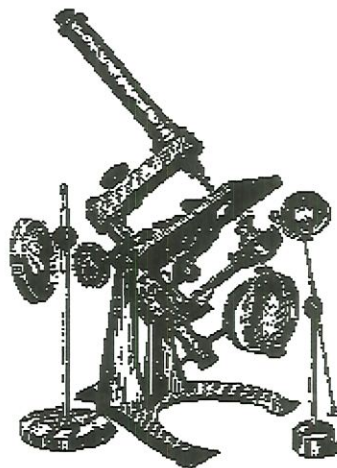


Figura 2.22 - O microscópio Trunnion de Spencer 1855.

Por outro lado, na Europa, Carl Zeiss da Alemanha começou a dominar o mercado de microscópios no final do século como resultado das importantes melhorias introduzidas. Com Ernst Abbe, abriram caminho para a obtenção da relação matemática entre resolução e abertura, exploraram o uso de lentes de imersão e desenvolveram a lente chamada de *apochromatic* que reduzia a aberração cromática.

A Figura 2.23 mostra um microscópio Zeiss da época, do “estilo continental”, que se tornou o estilo dominante no final do século. Este estilo tem a base em forma de ferradura de cavalo e um foco fino controlado na parte de trás do microscópio. A maioria dos fabricantes acabou usando este estilo no século 20.



Figura 2.23 – Microscópio Zeiss de 1908. (BOWMAN, 1997)

Essa figura mostra também o material estrutural que era utilizado naquela época, o latão. Latão era um metal caro na época, e consumia muito tempo para polir. Mais tarde, neste mesmo século, a competição pelo mercado fez do custo a preocupação mais importante, e os fabricantes de microscópio começaram a pintar de preto o latão ao invés de polir e envernizar. No século 20, tornou-se comum para a maioria dos microscópios a sua fabricação em ferro fundido, com somente as guias, tubos, e partes mecânicas feitas de latão. Hoje, a maioria dos microscópios são feitos com estruturas de alumínio fundido ou injetado, em sua maioria pintados ou anodizados.

Outro fabricante alemão, Leitz, começou a fabricar microscópios de qualidade semelhante à de Zeiss, e sobreviveu os tempos que tiraram a maioria dos fabricantes deste negócio na virada do século. Em princípios do século 20, Leitz estava vendendo um grande número de microscópios anualmente, e provavelmente era a fonte principal de microscópios da época.



Atualmente existem técnicas de microscopia que não utilizam luz visível (ultra-violeta, raios-X, microscópio eletrônico, microscópio acústico, microscópio de tunelamento e de força atômica, etc), que permitem, em alguns casos, atingir resoluções da ordem atômica, como mostra o gráfico da Figura 2.24. No entanto, o microscópio óptico continua sendo um instrumento prático e simples para observação de estruturas na faixa entre 1 centímetro e 1 micrometro, faixa de grande interesse na biologia, mineralogia, microeletrônica e outros campos (HABESCH, 1996).

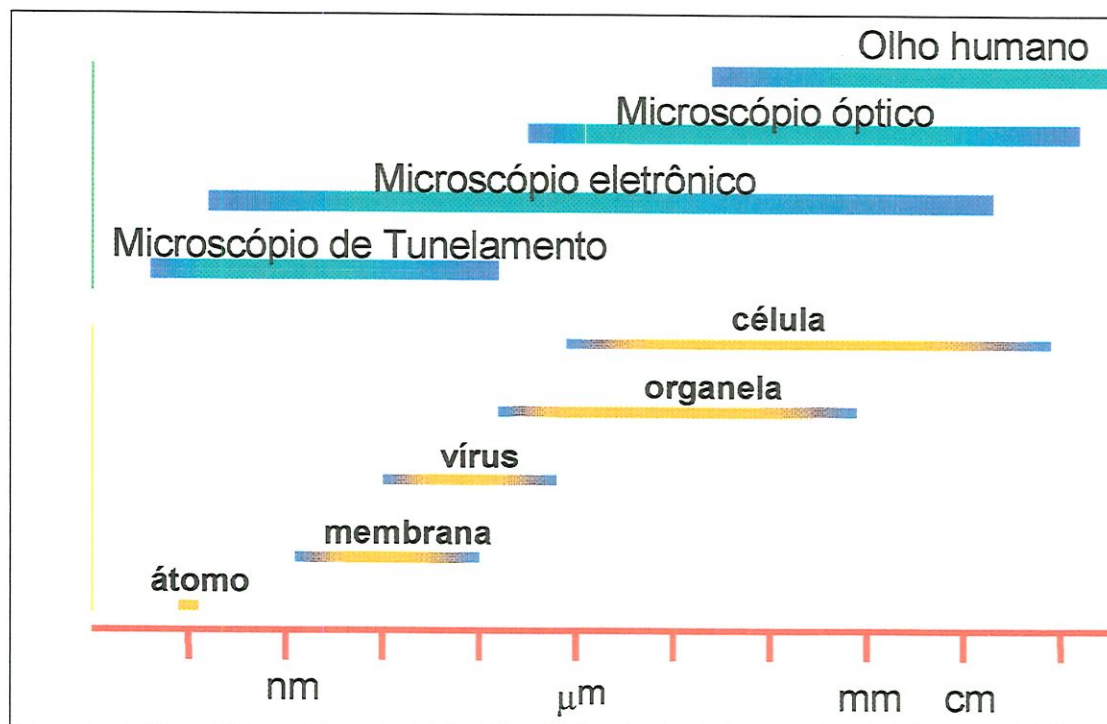


Figura 2.24 – Faixas de operação de microscópios e objetos de interesse. (HABESCH, 1996).

## 2.2. Modelos de Microscópios Óptico Atuais

Atualmente os microscópios são caracterizados por sua utilização, custo e aplicação. A Figura 2.25 ilustra esses modelos de microscópios discriminados por suas respectivas aplicações.

#### ◆ **Ensino ou Treinamento**

É um instrumento simplificado (conforme mostrado na Figura 2.25-a), de baixo custo, destinado ao ensino de 2° grau e algumas aplicações de rotina em consultórios médicos. Sendo um microscópio monocular, geralmente alcançam ampliações da ordem de 600 vezes. Apesar do seu projeto simplificado, este tipo de microscópio não deve apresentar baixa qualidade de imagem.

#### ◆ **Trabalhos de Rotina**

Com mais recursos que o modelo anterior, o microscópio mostrado na Figura 2.25-b é destinado a aplicações em hospitais, consultórios médicos e laboratórios de análise. Geralmente composto por 4 ou 5 objetivas, alcançam ampliações de até 2000 vezes.

#### ◆ **Trabalhos de Rotina com Alto Desempenho**

Conforme exemplificado na Figura 2.25-c, estes microscópios são desenhados para trabalhos rotineiros onde se necessita de mais recursos que o mostrado anteriormente. Este microscópio tem a possibilidade de se adicionar acessórios opcionais conforme a necessidade do usuário. Com 5 objetivas, este microscópio alcança ampliações de até 2000 vezes.

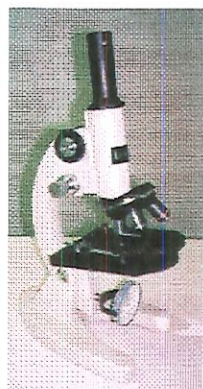
#### ◆ **Multiuso**

São microscópios versáteis que podem atender uma variedade grande de aplicações devido ao uso de diferentes técnicas de microscopia óptica, conforme mostrado na Figura 2.25-d.

#### ◆ **Multiuso de Alto Desempenho**

Os recursos deste microscópio, mostrado na Figura 2.25-e, permite que o usuário determine qual a melhor configuração que deve ter um microscópio para trabalhos repetitivos.

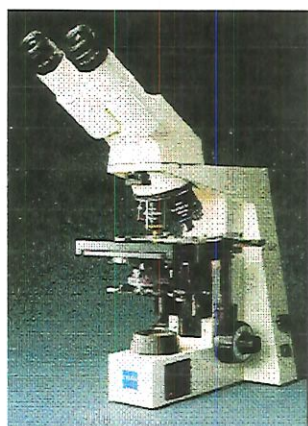




a)



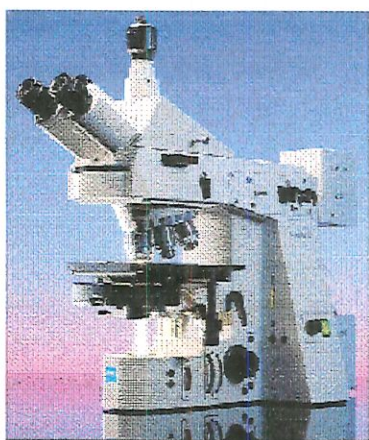
b)



c)



d)



e)



f)



g)

Figura 2.25 – Modelos de microscópios ópticos.



◆ **Análise de Materiais**

Este microscópio que usa o recurso de luz incidente, tem a finalidade de análise em laboratórios de materiais, indústrias, pesquisa e controle de qualidade. É ilustrado na Figura 2.25-f.

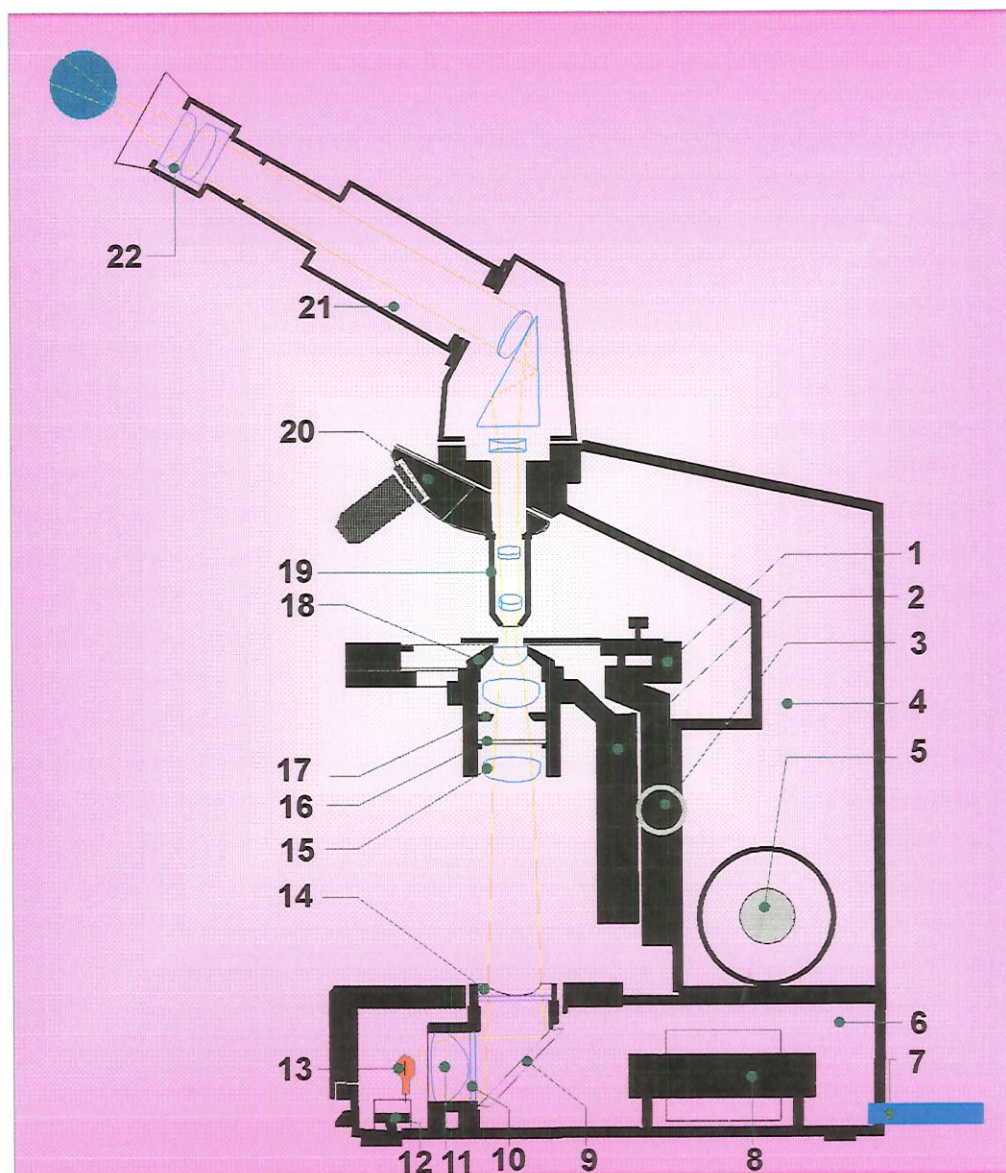
◆ **Inspeção ou Lupa**

São microscópios de baixo aumento mas com um grande campo de visão, conforme mostrado na Figura 2.25-g. Com características estereoscópicas, este microscópio permite uma noção tridimensional ao usuário; podendo ser usado no monitoramento de processos em indústrias, em metrologia, e observações de objetos em três dimensões.

### **2.3. Descrição do Microscópio OTI – 1**

O microscópio OTI-1, tema deste trabalho, se assemelha ao microscópio para trabalhos de rotina com alto desempenho (Figura 2.25-c) cujo esquema está mostrado na Figura 2.26.

Trata-se de um microscópio óptico por transmissão com aumento de até 1600x. Descritivamente pode ser dividido em 4 partes básicas: base, conjunto da coluna e mesa, revolver das objetivas, angular e binocular.



1	Platina (mesa) com charriot	12	Suporte da lâmpada
2	Suporte do condensador	13	Lâmpada
3	Ajuste de foco do condensador	14	Porta filtro
4	Estativa ou coluna	15	Lente de campo
5	Ajuste de foco macro e micrométrico	16	Porta filtro
6	Base	17	Diafragma íris do condensador ou abertura
7	Cabo de alimentação	18	Condensador
8	Transformador	19	Objetiva
9	Espelho	20	Revolver
10	Diafragma íris de campo	21	Binocular
11	Lente coletora	22	Ocular

Figura 2.26 – Esquema do microscópio OTI-1.



A base do microscópio, mostrada na Figura 2.27, é responsável pela estabilidade estática do microscópio e aloja o sistema de iluminação. Com um formato paralelepipedal, a base também acomoda todo sistema elétrico do microscópio, conforme ilustrado na Figura 2.28, responsável pela iluminação e bem como o sistema de iluminação em seu interior. O sistema de iluminação tem um ajuste de intensidade controlado por um potenciômetro fixado na parte traseira da base. A parte óptica deste sistema tem um desenho complexo, composto por vários componentes ópticos. A luz produzida por uma lâmpada halógena é coletada por uma lente anesférica e adequadamente colimada até atingir a lâmina que contém a amostra em análise. Além destes componentes o sistema de iluminação tem sistemas de ajuste e posicionamento do feixe de luz, composto por um obturador óptico regulável e cunhas que direcionam a luz.

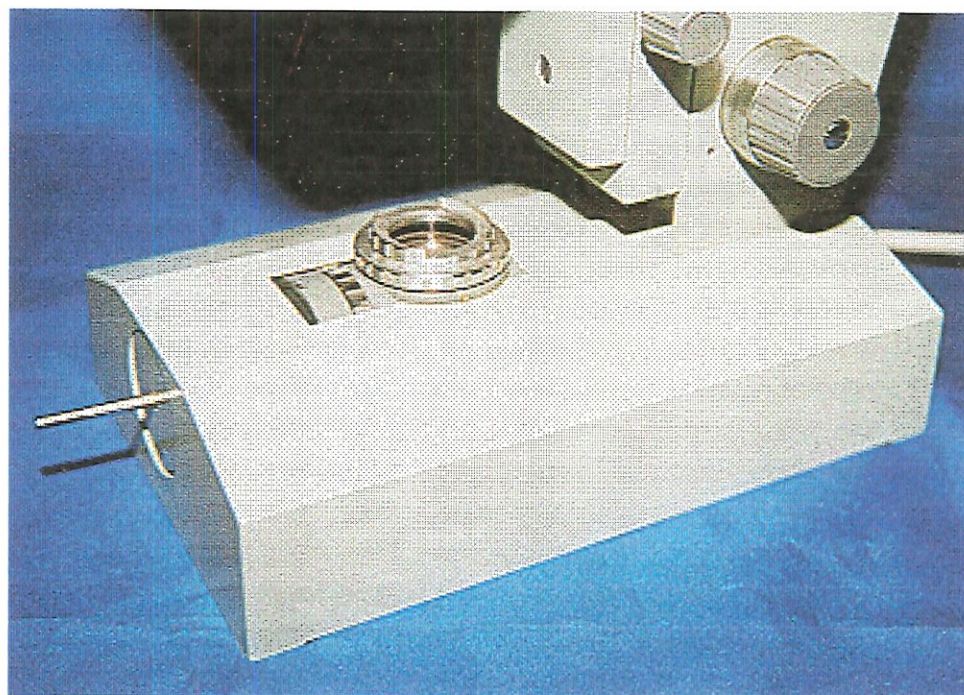


Figura 2.27 – Base do microscópio OTI-1.



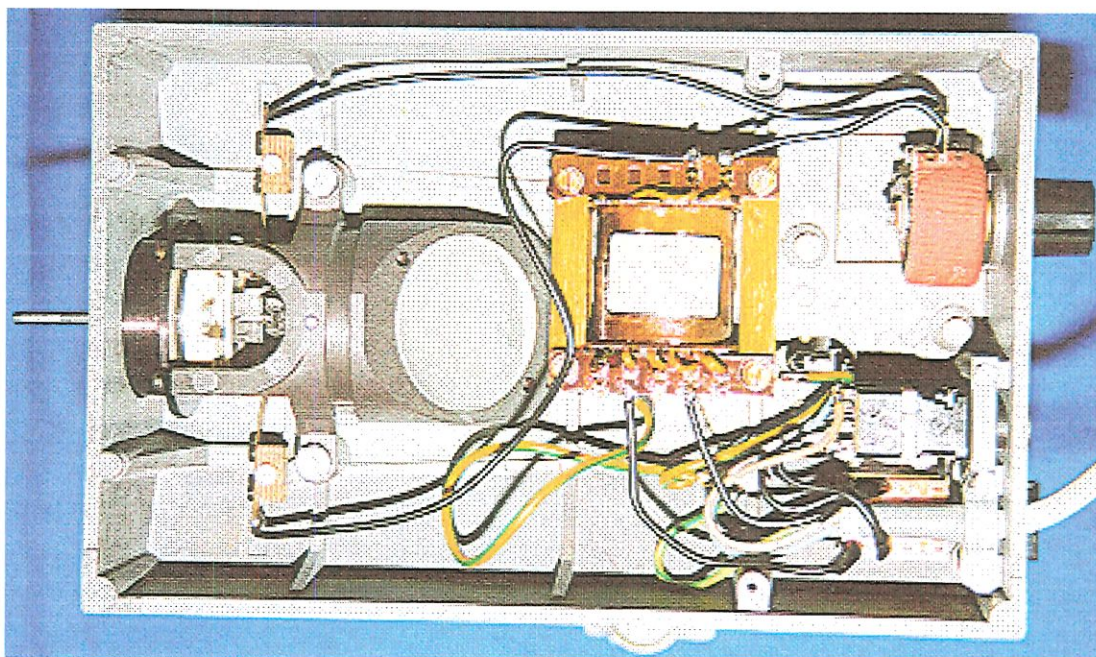


Figura 2.28 – Sistema de iluminação do microscópio OTI-1.

Na parte externa da base é fixada a coluna do microscópio. A coluna vertical e a mesa (platina), mostradas na Figura 2.29, contêm a maior parte das peças de precisão do microscópio. O movimento vertical da mesa (ajuste de foco grosso e fino) é feito através de um pinhão helicoidal especial, cremalheiras verticais e um conjunto de engrenagens que reduzem o deslocamento. O ajuste de foco grosso do objeto é feito pelo movimento rotacional do pinhão que ocasiona a movimentação do restante do conjunto; já o ajuste fino de foco é feito pela translação do mesmo pinhão por meio de uma rosca no sentido axial do mesmo. Como se trata de um pinhão helicoidal, este movimento axial ocasiona a movimentação do resto do conjunto. Além da mesa, a coluna suporta o sistema de ajuste do condensador, o qual é movimentado por um pinhão e uma cremalheira. Além disso, acoplado a mesa existe um sistema de movimentação da amostra no plano da mesa (movimento  $xy$ ) chamado “charriot” o qual permite um posicionamento preciso da amostra.



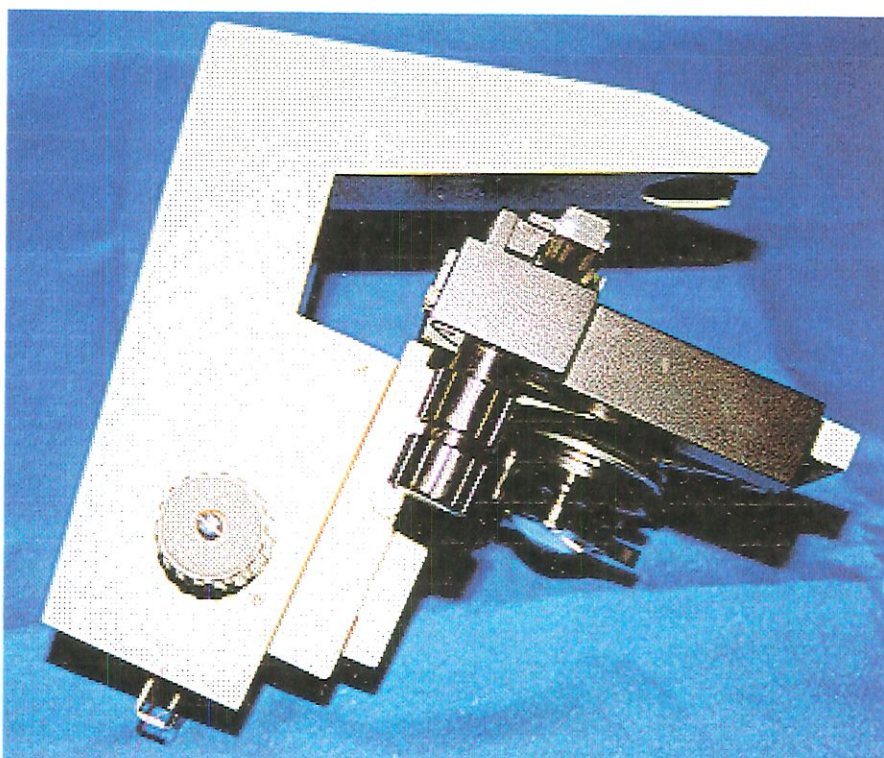


Figura 2.29 – Coluna de mesa do microscópio OTI-1

O revólver das objetivas é a peça na qual são montadas as quatro objetivas do microscópio (3,2x, 10x, 40x e 100x), ilustrado na Figura 2.30. Esta peça possui características mecânicas que permitem a mudança das objetivas sem sair do campo visual da amostra, além de passar do aumento de aproximadamente 40x até mais de 1000x praticamente em foco e no mesmo campo visual. Este sistema é apoiado em dois mancais de rolamento e cada objetiva é posicionada por uma lâmina de mola com uma ranhura que faz com que a calota de objetivas pare na posição correta. Cada lente objetiva é na verdade um elemento composto de várias lentes individuais de materiais de índices de refração diferentes, compondo uma ampliação com o mínimo de aberrações, distorções e curvatura de campo, características estas não desejáveis.



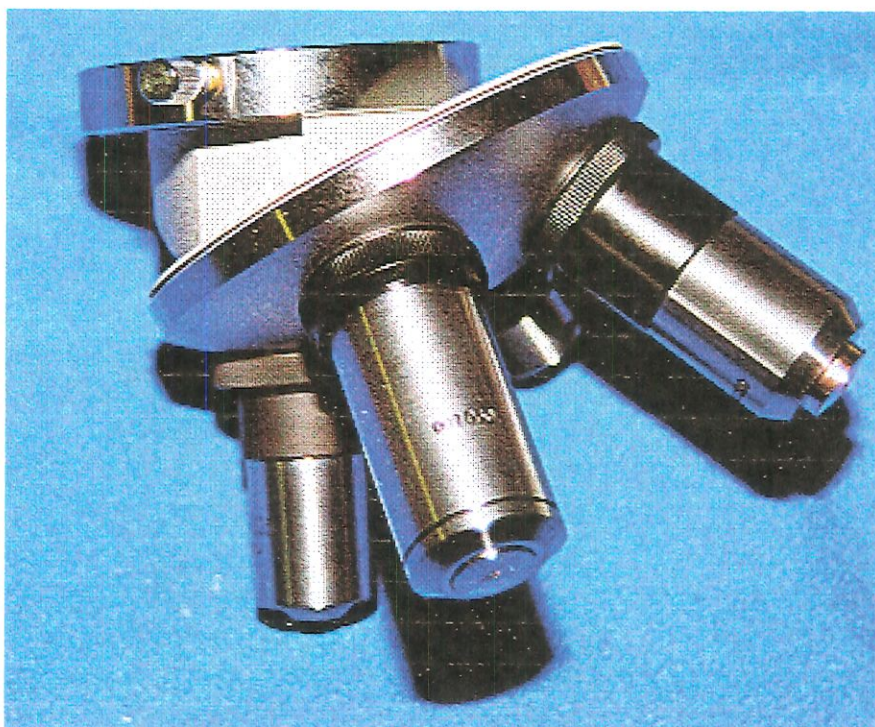


Figura 2.30 – Revólver das objetivas do microscópio OTI-1.

As objetivas de ampliação 3,2x e 10x deverão ser fabricadas no decorrer do projeto do microscópio óptico enquanto as de 40x e 100x serão adquiridas no exterior por exigirem um estágio de fabricação que será abordado futuramente.

A angular e a binocular, mostradas na Figura 2.31, constituem a parte superior do microscópio. Após passar pela objetiva, a luz passa por um prisma intermediário (angular) dentro do qual ocorre uma reflexão total na superfície inclinada numa superfície espelhada, produzindo um feixe que caminha até a binocular que finalmente leva a luz ao observador. Elementos compostos (prismas) colocados na binocular dividem o feixe de luz, permitindo a obtenção de um feixe paralelo até atingir as oculares (10x ou 16x). Este divisor de feixe permite uma adequação ergonômica da distância entre os olhos, fazendo com que cada ocular fique posicionada adequadamente para o usuário. A ocular é também composta de vários elementos ópticos e de fixação.



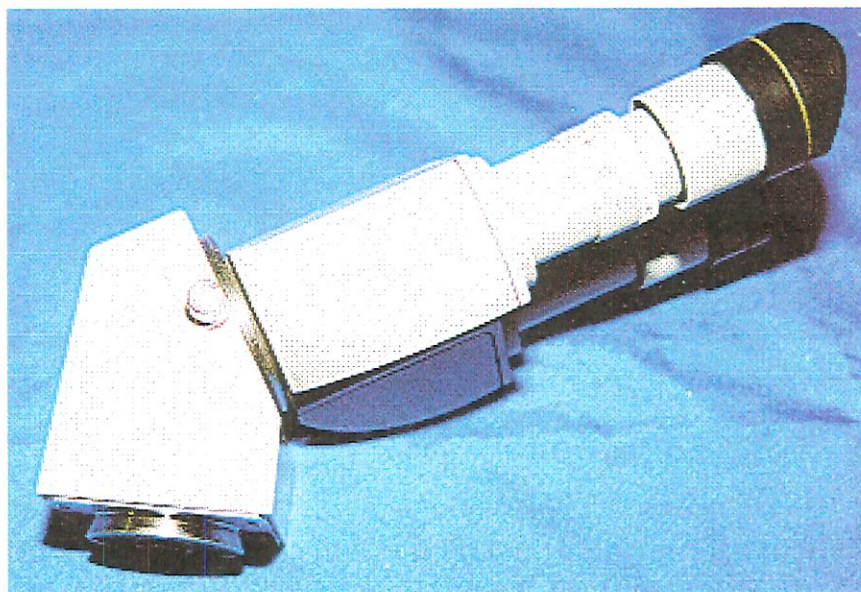


Figura 2.31 - Angular e binocular do microscópio OTI-1.

### **3. MÉTODOS E MATERIAIS**

Como o desenvolvimento deste trabalho fundamentou-se em um projeto de microscópio praticamente pronto adquirido pelo MEC, a primeira etapa efetivada foi o estudo do produto por intermédio da documentação técnica e do próprio produto, montado anteriormente. Com esta etapa concluída obtiveram-se informações de como cada peça poderia ser fabricada e quais modificações que poderiam ser feitas para simplificar o projeto, e como consequência, melhorar o produto.

#### **3.1. Estudo do Microscópio OTI-1**

Com base na documentação técnica adquirida pelo MEC e um microscópio modelo já montado, foi feito um estudo do projeto estrutural do microscópio OTI-1, objetivando a determinação das características que uma estrutura de um equipamento óptico deste tipo deve ter. Foram observadas e analisadas todas as características do projeto OTI-1 e com estes dados, propostas de mudanças para melhorar o produto puderam ser feitas.

O microscópio OTI-1 tem uma geometria conforme a mostrada na Figura 2.29 do capítulo anterior. Seu sistema estrutural é composto por uma base e uma coluna que sustentam todos os outros sistemas do microscópio.

Uma das principais características que um microscópio deve ter é a rigidez estrutural. Portanto, qualquer projeto de microscópio deve ser direcionado para satisfazer esta característica. A coluna de um microscópio

deve ser suficientemente rígida para evitar ao máximo as deformações que provoquem deslocamento entre a objetiva e a amostra a ser analisada. Este deslocamento pode ser quantificado em termos da quantidade que a extremidade superior da coluna se movimenta quando nela é aplicada uma pressão. Quando a extremidade superior de um microscópio se desloca todo o conjunto de peças a ela acoplados (normalmente as objetivas e oculares), também se desloca de uma quantidade maior que a própria extremidade. A representação gráfica destes deslocamentos indesejáveis estão mostradas nas Figuras 3.1 e 3.2.

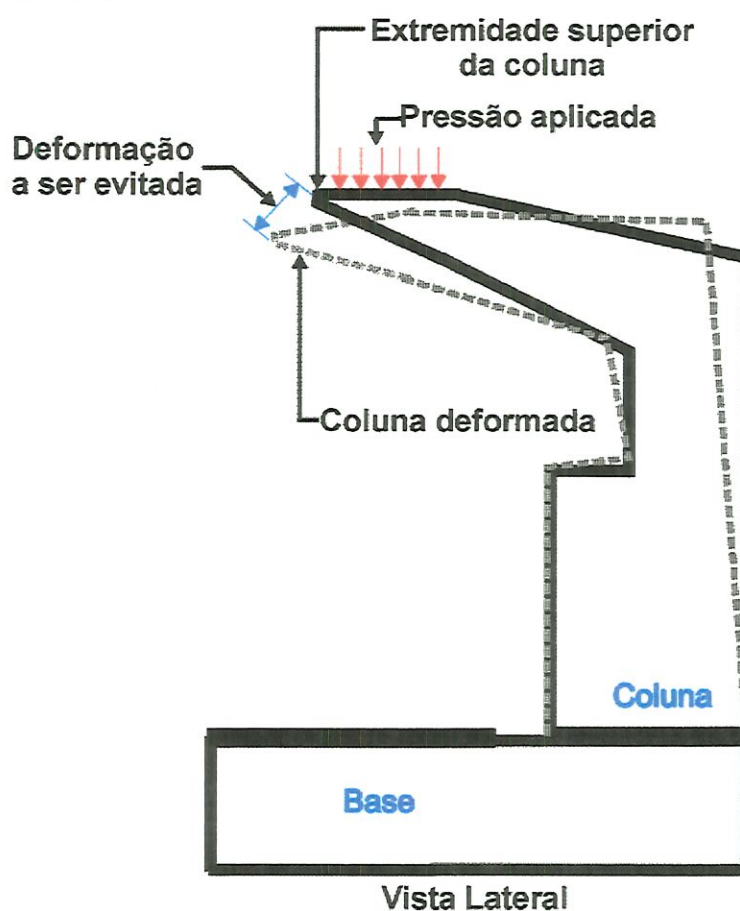


Figura 3.1 – Deformação em microscópio – vista lateral.



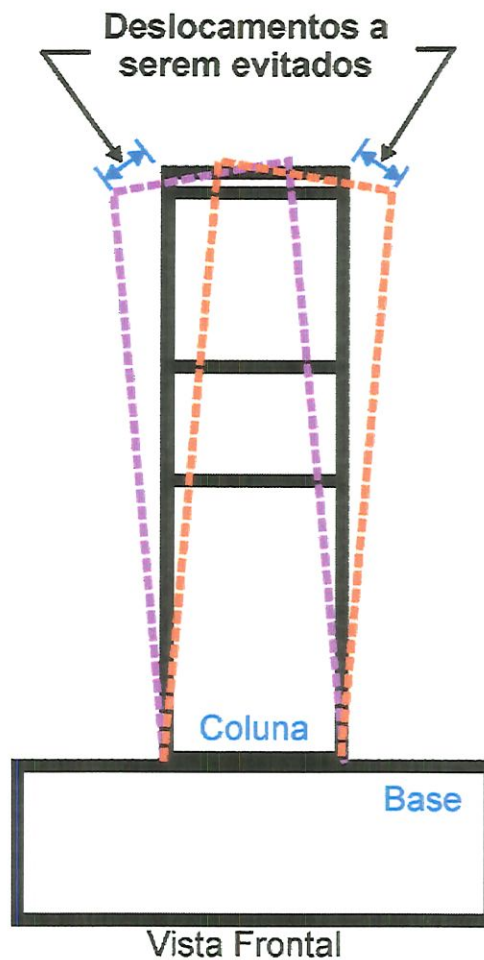


Figura 3.2 – Deformação em microscópio – vista frontal.

Os deslocamentos geralmente são causados pelo peso próprio das peças acopladas na parte superior da coluna ou pelo uso inadequado do equipamento. Estes deslocamentos podem ser frontal ou laterais. O deslocamento frontal, mais frequente, ocorre quando toda a coluna se move para frente devido a uma pressão em sua parte superior, conforme mostra a Figura 3.1; este deslocamento provoca um movimento angular da objetiva mudando sua posição original. O deslocamento lateral, menos frequente, ocorre quando toda a coluna se desloca lateralmente devido a algum componente lateral de força aplicado na parte superior da coluna, o que ocasiona também um movimento angular da objetiva. Pode ocorrer também uma composição de ambos os deslocamentos.

Uma variação angular da objetiva durante uma análise pode ser prejudicial, pois a leitura não ocorrerá mais no mesmo ponto. Se este deslocamento ocorrer durante uma mudança de objetivas (mudança de ampliação) ocorrerá uma variação da posição do objeto de visualização. Tal variação quando se está observando um objeto micrométrico é catastrófica, pois com o fator de ampliação do microscópio, uma pequena deformação da parte superior da coluna pode ocasionar a visualização de um campo totalmente diferente do que se esperava observar. Além deste problema descrito, este tipo de variação também pode causar um desalinhamento do feixe de luz proveniente da base do microscópio, causando uma má iluminação da amostra.

Outro fator a ser considerado no projeto estrutural do microscópio é sua estabilidade dimensional, que deve ser a melhor possível, pois se uma coluna deforma com o passar do tempo o alinhamento óptico é prejudicado e como consequência o microscópio deverá ser realinhado periodicamente.

### **3.2. Influências Ambientais no Projeto de Equipamentos Ópticos**

Um fator extremamente importante no projeto de qualquer equipamento óptico é o ambiente onde o aparelho será exposto durante sua utilização. Geralmente o meio ambiente tem diferentes condições para a operação do equipamento, armazenamento e para o transporte; também diferem com a intenção de uso do equipamento, seja em um laboratório com as condições ambientais controladas ou em um trabalho de campo.

Parâmetros ambientais, como por exemplo condições climáticas, devem ser estudados para o desenvolvimento correto de um projeto de equipamento óptico. Segundo YODER (1993) a disposição dos ambientes devem ser definidos tão completamente quanto possível bem como a

duração de cada efeito. Modos e efeitos de falhas devem ser identificados e características de falhas escondidas de projetos devem ser reveladas durante testes cuidadosamente planejados. Considerações antecipadas destes pontos mais uma apropriada revisão das consequências do projeto irá melhorar a possibilidade de sucesso do produto.

Seguem-se alguns fatores ambientais de projeto que devem ser considerados em instrumentos ópticos:

- temperatura,
- pressão,
- tensões estáticas,
- vibrações,
- impactos,
- umidade,
- corrosão,
- contaminação e
- fungos.

Cada um destes fatores deve ser considerado uma ou mais vezes durante o projeto do equipamento. Alguns podem ser descartados para alguns tipos de projeto, outros podem ser fatores que direcionam o projeto. Esses fatores são comentados a seguir.

### 3.2.1. Temperatura

A temperatura é um dos fatores ambientais que aparece em todas as análises. O calor de um corpo deve ser identificado como o nível de sua energia interna. A transferência de calor pode ocorrer por condução e ou convecção e ainda uma combinação de radiação e absorção. O calor é normalmente transferido de uma fonte para um outro corpo até que um equilíbrio entre os dois seja atingido.



Todos os modos de transferências de calor são de vital importância em projetos de equipamentos ópticos desde que é praticamente impossível para qualquer objeto ficar em completo equilíbrio térmico com seu ambiente. Gradientes de temperatura são comuns e podem causar expansão ou contração não uniforme entre as partes de um sistema. As leis da física mostram efeitos de expansão diferentes: para peças a temperaturas distintas ou peças feitas de material diferente na mesma temperatura. Expansões diferenciais podem causar desalinhamento óptico de magnitude suficiente para afetar o desempenho do sistema. Análises por elementos finitos podem antecipar estes desalinhamentos sob diferentes aplicações de calor que simulem as condições operacionais do equipamento.

Características básicas dos materiais que devem ser consideradas no projeto de equipamentos ópticos são: condutividade térmica, emissividade, calor específico e coeficiente de dilatação térmica. Todas estas características são listadas em *handbooks* de materiais. Segundo SPUR (1994), em geral as deformações térmicas são restringidas mecanicamente por componentes vizinhos, de modo que a deformação final é influenciada não apenas pelo coeficiente de dilatação térmica do componente, mas também pelo módulo de elasticidade e dimensões geométricas das partes constituintes do sistema. As deformações de componentes isolados resultam em deslocamentos de subconjuntos do equipamento, que causam movimentos relativos indesejáveis entre as suas peças.

Segundo YODER (1993), como exemplo da significância do efeito da temperatura no desempenho de alguns sistemas ópticos tem-se: uma lente de foco 203,2mm de material F2 usado em um comprimento de onda de  $10\mu\text{m}$  tem tolerância de  $\pm 0,0762\text{mm}$  no foco; usada em um ambiente de temperatura variável, essa lente poderá ter uma variação de temperatura somente de  $\pm 3^\circ\text{C}$  para manter sua tolerância.

### 3.2.2. Pressão

A pressão é um parâmetro que significa uma força por unidade de área. A maioria dos equipamentos ópticos são projetados para trabalharem sob pressão atmosférica, porém existem sistemas ópticos que trabalham a outras pressões, como por exemplo um periscópio de um submarino.

Uma das consequências mais importantes da variação de pressão em um sistema óptico mal selado é o efeito de “bombeamento” que ocorre em variações de pressão. Estas variações de pressão causam a entrada de vapor, sujeira, e outros componentes pelos orifícios do sistema, os quais podem causar condensação, corrosão, dispersão de luz, dentre outros problemas.

Outra consequência importante resultante é quando um componente óptico suporta uma pressão diferencial e se deforma. Este fator é de pequena importância se o componente é, por exemplo, uma janela plano paralela e o feixe de luz é colimado, mas deve ser levado em consideração para sistemas ópticos de alto desempenho. Em aplicações como por exemplo a litografia óptica em microcircuitos, a temperatura é controlada na faixa de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , mas geralmente não existe a preocupação com a pressão barométrica. Variações de pressão podem provocar alterações no índice de refração do ar suficientes para alterar o foco e a qualidade da imagem introduzindo assim erros de alinhamento entre sucessivas exposições. (YODER, 1993)

### 3.2.3. Tensões Estáticas

As tensões estáticas tornam-se importantes para variações dimensionais e de deflexões de materiais estruturais (metais, compósitos, plásticos, vidros, cerâmicas, etc.) e componentes ópticos (lentes, prismas, espelhos, janelas, etc.) produzidas por solicitações estáticas sejam elas



externas ou internas a estes corpos. Existem quatro tipos de carregamentos que podem implicar em tensões em um corpo, a saber:

- a) Carregamentos estáticos lentos. O carregamento é aplicado tão gradualmente que, instantaneamente, qualquer parte da peça permanece em equilíbrio. Em testes, o carregamento é feito progressivamente até que a falha ocorra. Em regime de trabalho, uma peça pode ser carregada de forma progressiva até um máximo e mantida nesse máximo por um período de tempo, não o suficiente para ocorrer a fadiga do material.
- b) Carregamentos estáticos de longa duração. Neste caso, o carregamento máximo é aplicado gradualmente e mantido por um tempo suficiente que permite prever seu efeito. O *creep* de um material e sua resistência são determinados por testes estáticos de longa duração e temperaturas predominantemente de condições de trabalho.
- c) Carregamento repetitivo. É quando um carregamento é aplicado e completa ou parcialmente removido ou revertido repetidamente. Este tipo de carregamento é importante quando grandes tensões são repetidas em poucos ciclos ou pequenas tensões são repetidas muitas vezes, as quais causam falhas por fadiga.
- d) Carregamento dinâmico. É quando as circunstâncias são tais que devem ser levadas em conta as mudanças de movimento das partes.

As estruturas de microscópios ópticos geralmente estão sujeitos a carregamentos estáticos.

#### 3.2.4. Vibração

O movimento oscilatório de um corpo elástico em resposta a uma força periódica pode ser chamada de natural, se a força é um resultado



apenas de deslocamentos do próprio material e forçada se provocado externamente. Em ambos os casos o movimento será amortecido se alguma resistência for oferecida, por exemplo o atrito. Fontes de forças induzidas por vibração incluem massas rotacionais não balanceadas ou movimento de alguma massa direta ou indiretamente acoplada ao corpo, certos tipos de deslocamento de fluidos e distúrbios de movimento do próprio corpo. Os microscópios ópticos podem estar sujeitos a fontes de forças oscilatórias externas.

Uma condição particular e importante ocorre quando a frequência das forças aplicadas correspondem a frequência natural do corpo. Exceto em efeitos amortecidos, a ressonância resultante induz amplitudes de vibração maiores que as produzidas por uma força aplicada, seja de alta ou baixa frequência. O sucesso de um projeto de equipamento óptico depende da experiência e habilidade do engenheiro em prever e compensar os problemas causados por ressonância. Isto deve ser feito projetando peças mais robustas ou com alta rigidez para que a frequência natural seja alta suficientemente para evitar ressonâncias provocadas por forças aplicadas. Medidas de vibração dos equipamentos, usando acelerômetros, podem ser feitas para garantir a funcionabilidade do projeto, onde o movimento oscilatório pode ser induzido por equipamentos acoplados ao corpo de teste capazes de forçar os movimentos de teste. Outro modo mais rápido e não destrutivo é a utilização de análise por elementos finitos de modelos dos equipamentos durante o projeto.

### 3.2.5. Impactos

Uma força aplicada repentinamente a um equipamento ou a uma parte dele induz a uma série de condições dinâmicas em sua estrutura. Deformações elásticas (ou as vezes inelásticas) ocorrem e podem implicar em movimentos inadequados entre as partes da estrutura. O alinhamento óptico pode ser prejudicado temporariamente ou permanentemente, e

componentes frágeis (como algumas lentes) podem ser tencionados até a deformação permanente ou ruptura.

Pode-se melhorar a resistência de equipamentos ópticos através do uso de subsistemas isolantes de choque, projetos que prevêm carregamentos e dissipam o quanto for possível o choque, uso de materiais e processos de fabricação adequados e projeto para uma massa mínima e adequação da resistência e rigidez de todos os componentes. No caso de equipamentos como o microscópio ou semelhantes, impactos geralmente ocorrem quando há queda do equipamento, ou uma massa qualquer bate de encontro a ele. A maioria dos casos de queda de equipamentos deste tipo, ocasiona a sua inutilização.

Especificações de choque geralmente são apresentadas em termos da aceleração "g" aplicada em uma direção específica. Em casos onde o choque durante o transporte é severo este fator deve ser levado em consideração nos projetos.

### 3.2.6. Umidade

A atmosfera encontrada na maioria das aplicações de equipamentos ópticos é formada por uma mistura de gases e vapores, incluindo em alguns casos o vapor superaquecido e o vapor saturado e as vezes a água vaporizada em nuvens neblina ou chuva.

A presença de água líquida ou vapor dentro de um instrumento óptico pode participar na degradação da superfície do componente óptico, oxidar componentes metálicos, atrapalhar a reflexão e a transmissão e espalhar a luz. Estes instrumentos geralmente devem ser projetados para serem protegidos da água e vapores com a aplicação de selantes, *o-rings*, etc. Segundo YODER (1993), em alguns casos utiliza-se pressurização interna com um gás seco (nitrogênio) em sistemas ópticos para evitar efeitos de



umidade. Outra técnica é o uso de cristais que absorvem umidade para secar a atmosfera sem implicar no uso de selantes ou mudanças de pressão. Certos componentes ópticos, como os poliméricos e os cristais solúveis em água, devem ser mantidos em condições extremamente protegidas de umidade para manter suas características ópticas.

Praticamente o pior constituinte de algumas atmosferas úmidas é o cloreto de sódio. Alta quantidade de sal em misturas em ambientes de equipamentos ópticos podem prejudicar rapidamente os filmes finos aplicados às lentes.

### 3.2.7. Corrosão

O método de prevenção mais eficiente para evitar os efeitos da corrosão em metais, vidros, plásticos, etc., usados em equipamentos ópticos é manter as partes livres dos agentes corrosivos. Embora geralmente seja impossível, isto é um objetivo válido. Certos filmes finos e revestimentos, podem ser aplicados a materiais sensíveis em alguns casos; mas podem deteriorar e perder sua característica protetora devido ao tempo ou alguma tensão térmica ou mecânica aplicada.

Uma explicação plausível para o mecanismo de corrosão que causa falha de um material é quando uma cratera formada pela corrosão é aberta por uma deformação do material e preenchida por contaminantes. Quando a tensão é diminuída e em seguida aumentada, ocorre um aumento de solitação e inicia-se a formação de uma trinca que se propaga até a falha total do material.

A corrosão em superfícies ópticas é também muito preocupante, embora falhas ocorridas por contaminação seja notada pela diminuição da reflexão ou transmissão ou degradação do contraste da imagem. Filmes



antirefletores também sofrem as condições ambientais perdendo assim suas características ópticas.

### 3.2.8. Contaminação

Todo equipamento óptico está sujeito a algum nível de contaminação por alguma partícula ou substância molecular durante a fabricação, armazenamento e uso. Para sistemas simples em ambientes normais, é sensato limpar as peças antes da montagem e os instrumentos devem ser mantidos limpos e livres de umidade.

Filmes finos antirefletivos ou com características de reflexão são geralmente resistentes, mas limpezas desnecessárias tendem a degradar as características destes filmes. Limpezas repetidas ou não necessárias devem ser evitadas. As fontes de contaminação mais comuns são: fumaça, impressões digitais, oleosidade da pele, condensação de água ou outros vapores sujeira e produtos da corrosão de filmes finos ou partes próximas. As condições da contaminação de uma superfície, a natureza do filme fino e de seu substrato e o ambiente onde esta sendo feita uma limpeza, podem afetar o sucesso de uma operação de limpeza.

### 3.2.9. Fungos

Quando componentes ópticos como por exemplo os encontrados em telescópios, binóculos, microscópios e câmeras fotográfica são expostos ao calor e umidade por longos períodos, fungos podem se desenvolver. Este problema piora em climas tropicais e estes contaminantes orgânicos diminuem o desempenho do componente induzindo espalhamento da luz e podem causar danos permanentes nas superfícies ópticas provocando micro-fissuras no componente.

Fungos podem crescer em superfícies ópticas mesmo se estas forem limpas de impressões digitais, sujeiras e oleosidade. Os esporos microscópicos do fungo podem estar em qualquer parte, e são capazes de armazenar nutrientes suficientes para suportar crescimento limitado. Alguns vidros com alta resistência ao clima e ácidos parecem não resistir bem ao fungo; outros por outro lado (como o SF4) parecem impedir o crescimento do fungo em alta umidade, porém são susceptíveis a condições climáticas e aos ácidos. (YODER,1993)

Os microscópios de modo geral estão sujeitos a várias destas condições ambientais, e em cada etapa de seu projeto deve ser pensado como cada influência das citadas acima pode prejudicar o desempenho do equipamento.

### **3.3. Novas Técnicas de Projeto**

Com o objetivo de otimizar o projeto original do microscópio OTI-1 foram aplicadas técnicas que auxiliam a obtenção de um projeto mais elaborado, com características de montagem e estudo de possíveis falhas melhorados.

#### **3.3.1. Projeto para montagem (DFA)**

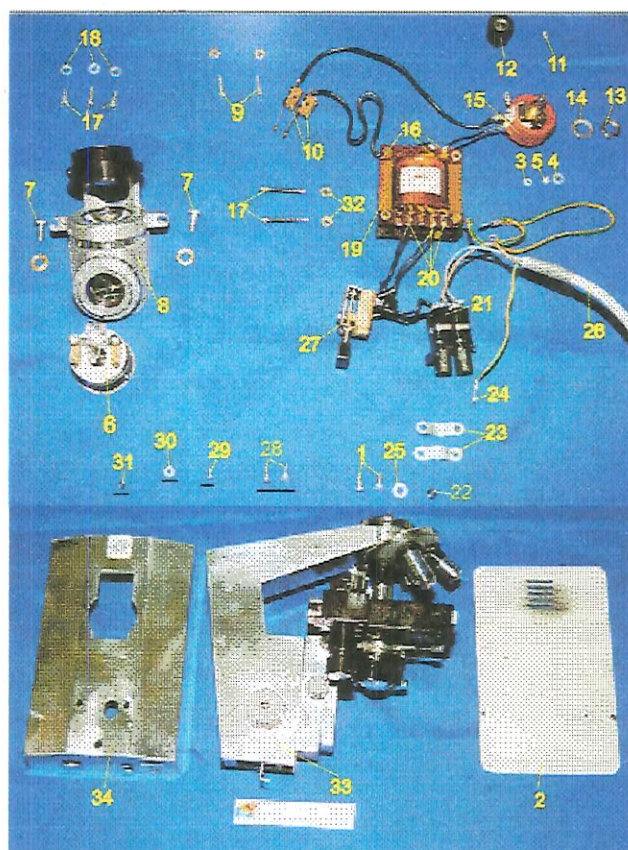
A técnica *Design for Assembly* (DFA) constitui uma poderosa ferramenta para atender às necessidades de mudanças, permitindo às empresas otimizarem tanto o projeto de seu produto quanto o seu processo produtivo.

As duas mais conhecidas metodologias de DFA, são o método de *Boothroyd* e *Dewhurst* e o método *Hitachi* (AEM - Método de avaliação da montabilidade). Para o presente trabalho foi utilizado o método *Boothroyd* e *Dewhurst*.

Este método se apresenta na forma de um *handbook* e é bastante utilizado pelas empresas. Após o preenchimento de tabelas que são propostas no *handbook*, é feita uma análise, onde pode-se quantificar um índice de eficiência para uma determinada montagem e desta forma avaliar se há necessidade ou não de um novo projeto para melhoria da mesma. As tabelas em questão estão exemplificadas no anexo deste trabalho.

O projeto original do OTI-1 é composto de um sistema de iluminação excessivamente complexo, tanto para montagem como para fabricação, e de um sistema estrutural, composto da base e da coluna, cuja montagem é muito difícil e demorada. Isto implica em diversos ajustes pós montagem para fazer o alinhamento óptico. As peças do sistema de iluminação e estrutural do projeto original são mostradas na Figura 3.3. Devido aos problemas citados, os sistemas de iluminação e estrutural são passíveis de melhorias advindas do DFA, e portanto estudadas neste trabalho.





1	Parafuso para fixação da tampa	18	Arruelas
2	Tampa	19	Transformador
3	Porca do fio terra	20	Soldas
4	Anel de pressão	21	Porta -fusível
5	Parafuso do fio terra	22	Espaçador
6	Suporte da lâmpada	23	Presilhas
7	Parafuso do Módulo de iluminação	24	Parafusos
8	Módulo de iluminação	25	Arruelas
9	Parafuso de contato	26	Cabo
10	Contato elétrico	27	Interruptor
11	Parafuso do knob	28	Parafusos
12	Knob	29	Parafuso de terra
13	Porca do potenciômetro	30	Arruela
14	Arruela do potenciômetro	31	Arruela de pressão
15	Potenciômetro	32	Arruelas
16	Soldas	33	Coluna
17	Parafuso do transf. e interruptor	34	Base

Figura 3.3 – Peças da base e coluna do microscópio OTI-1.

A análise do novo projeto através do uso do DFA tem como característica principal um novo sistema estrutural, composto de uma peça única da base e da coluna, evitando assim a necessidade de montagem da

coluna na base, bem como os ajustes a ela empregado. Outro ponto interessante é a eliminação do suporte da lâmpada, sendo esta fixada diretamente no módulo de iluminação. Como consequência da aplicação deste método, o número de peças a serem montadas diminuiu de 34 para 28, como mostrado no esquema da Figura 3.4.

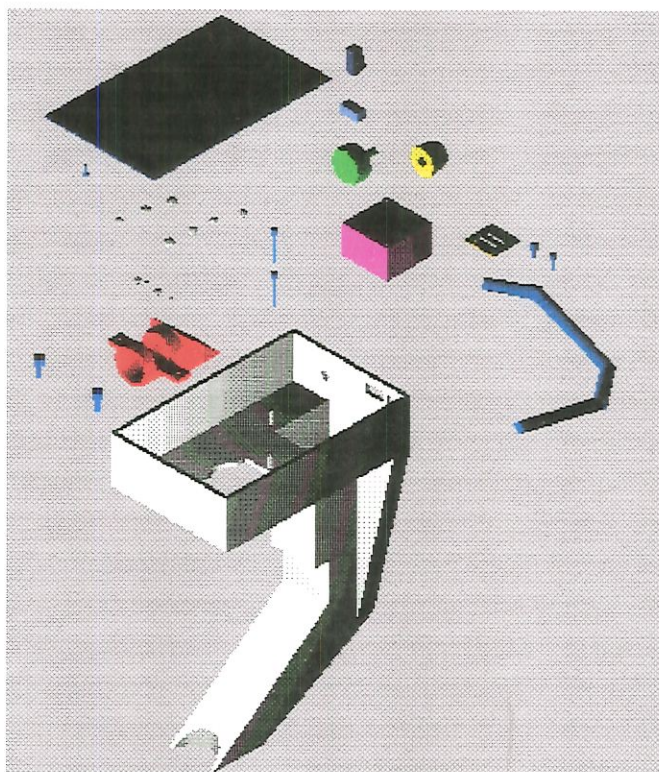


Figura 3.4 – Esquema do projeto após a aplicação do DFA.

### 3.3.2. Análise de efeito e modo de falha (FMEA).

A análise *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), é uma metodologia utilizada durante o desenvolvimento de um projeto de produto ou processo, para assegurar que todas as falhas possíveis e suas respectivas causas sejam analisadas e determinado o efeito de cada uma sobre o desempenho do sistema para que sejam tomadas ações no sentido de evitar que ocorram. Este estudo é feito mediante um raciocínio basicamente dedutivo. É um método analítico padronizado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa.



Uma vez completado o trabalho, a técnica FMEA acaba sendo uma referência para análise de outros produtos ou processos similares. Isso permite diminuir os custos de trabalhos futuros, uma vez que podem ser amortizados na análise de vários produtos (HELMAN, 1995).

A utilização do FMEA é feita de baixo para cima, procurando determinar o modo de falha de componentes mais simples, suas causas e de que maneira eles afetam os níveis superiores do sistema. Perguntas básicas que são feitas durante uma análise de FMEA são:

- De quais maneiras um componente pode falhar?
- Que tipos de falhas são observadas?
- Quais são os efeitos das falhas sobre o sistema?
- Qual a importância da falha?
- Como preveni-la?

Esta análise é basicamente dedutiva, e não requer cálculos mais sofisticados. Durante a aplicação deste método, é preenchido um formulário o qual é analisado e assim se obtém os resultados.

A importância da metodologia FMEA vem principalmente do fato de proporcionar uma forma sistemática de se catalogar informações sobre falhas dos produtos/processos, um melhor conhecimento dos problemas nos produtos/processos e ações de melhoria no projeto do produto/processo. Com a aplicação do método FMEA buscou-se examinar todas as formas pelas quais os diversos componentes do microscópio poderiam apresentar falhas, quer sejam de projeto ou de utilização. Assim, as modificações realizadas no produto também tiveram a intenção de minimizar a probabilidade de ocorrência de falhas, permitindo ao fabricante monitorar as causas e efeitos de cada falha. Um exemplo de aplicação do método utilizando o formulário está no anexo a este trabalho.



### 3.4. Materiais Avançados – Granito Sintético

Um microscópio para ser verdadeiramente confiável deve ter estabilidade estrutural extremamente boa. A parte óptica de um microscópio é um sistema de inspeção totalmente dependente da rigidez da estrutura mecânica que o suporta. Qualquer vibração entre o que se está analisando e o corpo do microscópio deve ser reduzida a um mínimo, pois tal vibração será ampliada pelo fator de ampliação do microscópio. Segundo PAYNE (1954), em muitos outros instrumentos científicos, uma vibração da ordem de amplitude  $1\mu\text{m}$  entre peças seria completamente desprezível, mas se esta vibração acontecesse entre o objeto observado e o corpo do microscópio, esta condição seria intolerável. Assim, a base e a coluna de um microscópio devem ter a maior rigidez possível, suficiente para resistir às vibrações normais de qualquer laboratório ou manuseio. Em função dessas necessidades da estrutura de um microscópio, optou-se pelo estudo de aplicação do granito sintético como material estrutural para a confecção da base e da coluna do microscópio.

O granito sintético é um material estrutural composto pela mistura de agregados de granito de alta qualidade e resina Epoxi ou Fenólica , conforme mostrado na Figura 3.5. Com excelentes qualidades de amortecimento interno, estabilidade dimensional e menor custo comparados com materiais tradicionais, este material vem sendo muito utilizado em estruturas de máquinas ferramentas de grande precisão (Figura 3.6), equipamentos de metrologia (Figura 3.7), bancadas de equipamentos ópticos (Figura 3.8) e dispositivos de fixação para usinagem (Figura 3.9). As primeiras aplicações do granito sintético datam de 1876.







Figura 3.5 – Composição do granito sintético.  
(SYNCONCRETE, 1993)

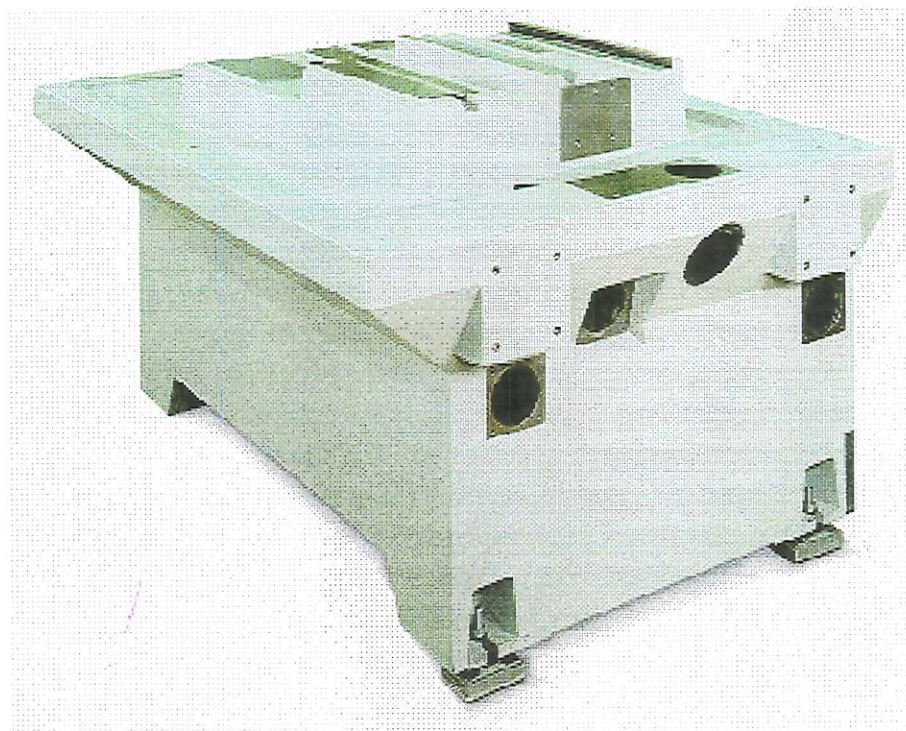


Figura 3.6 – Aplicação de granito sintético em máquinas ferramentas.  
(SYNCONCRETE, 1993)





Figura 3.7 – Aplicação de granito sintético em equipamentos de metrologia.  
(BURTON, 1997)



Figura 3.8 - Aplicação de granito sintético em bancadas ópticas (LAMAFE-  
USP).





Figura 3.9 – Aplicação de granito sintético em dispositivos de fixação.  
(WIEKE, 1998)

As principais características que o granito sintético apresenta como material estrutural são as seguintes:

- simplificação do processo de fabricação, como fresamento, furação, retificação, etc, os quais são substituídos pela moldagem;
- fabricação de grandes máquinas em uma planta fabril pequena;
- custos de transporte e ajustes reduzidos;
- alta capacidade de amortecimento interno;
- baixo custo comparado aos materiais estruturais tradicionais;
- não é afetado pela umidade, alcalóides, ácidos e óleos hidrocarbonetos;
- facilidade de coloração;
- facilidade de utilização de insertos;
- possibilidade de moldagens sucessivas em uma mesma peça;
- possibilidade de colagem de uma ou mais peças.

As propriedades que caracterizam o granito sintético como bom material estrutural estão mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do granito sintético.

PROPRIEDADE	Alumínio	Ferro Fundido	Granito Sintético
Densidade [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,7	7,15	2,45
Módulo de elasticidade [kN/mm <sup>2</sup> ]	30	90	36-42
Resistência a tração [N/mm <sup>2</sup> ]	180	195	12-18
Resistência a compressão [N/mm <sup>2</sup> ]	180*	720	100-120
Coefficiente de dilatação térmica [m/mK]	24	10	12-14x10 <sup>-6</sup>
Condutibilidade térmica [W/mK]	209,5	50	1,2-2
Capacidade térmica [J/kgK]		500	1250

O granito sintético comparado com outros materiais utilizados em sistemas estruturais tais como o ferro fundido e o alumínio apresenta inúmeras vantagens, conforme ilustra a Figura 3.10.

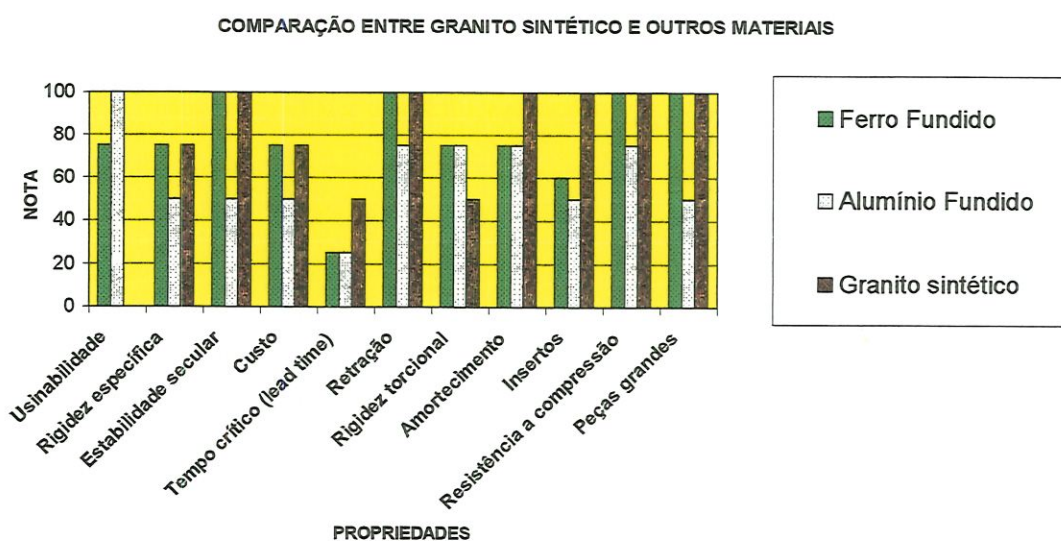


Figura 3.10 – Comparação entre o granito sintético, ferro fundido e alumínio.



### 3.4.1. Rigidez estática

A rigidez estática dos materiais é determinada pelo módulo de elasticidade e o momento de inércia da seção transversal da peça. Embora algumas propriedades específicas do granito sintético sejam inferiores às de outros materiais, sistemas estruturais obtidos com este material são produzidos sem sacrifício nenhum de rigidez, usando paredes mais espessas, o que não implica em aumento de peso, devido a sua densidade baixa. Espessuras da ordem de 3 ou 4 vezes maiores que materiais tradicionais (ferro fundido ou alumínio) são comuns para aplicação de granito sintético, conforme mostrado na Figura 3.11.

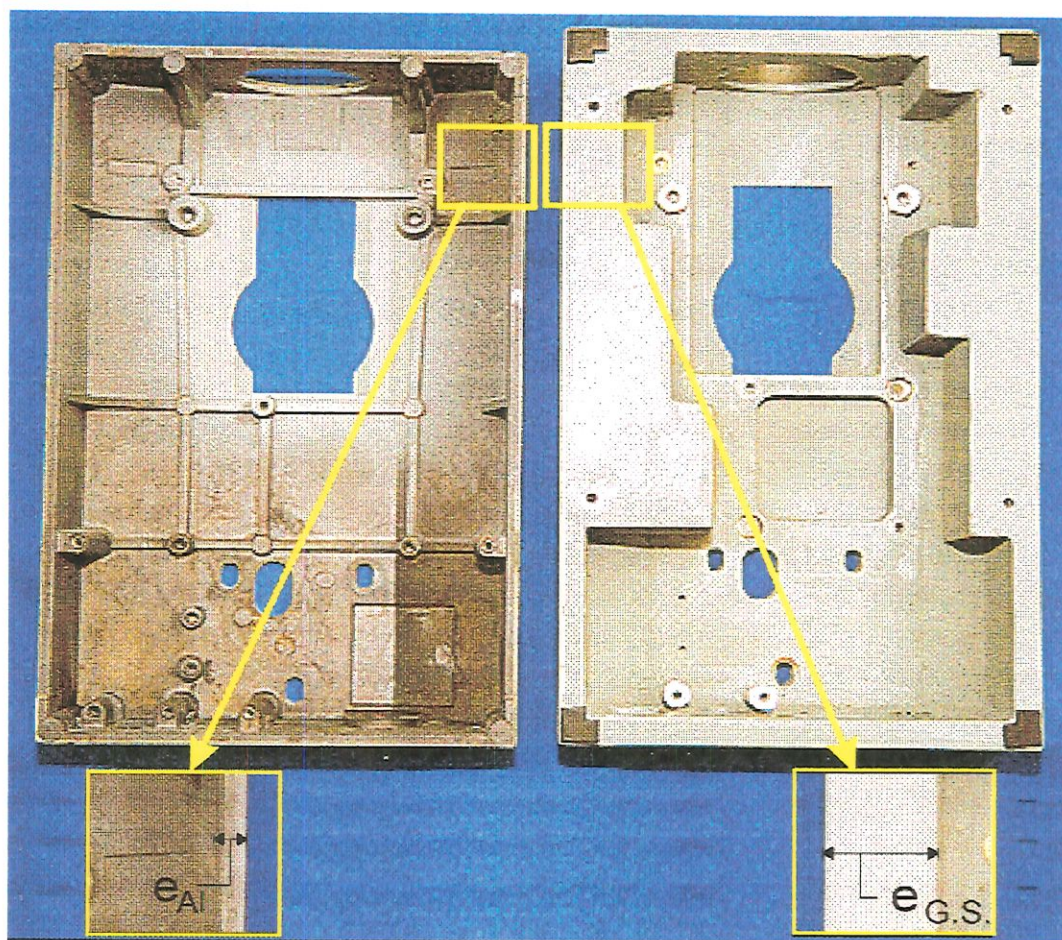


Figura 3.11 – Espessuras em peças de granito sintético e alumínio.



### 3.4.2. Rigidez dinâmica

As estruturas de granito sintético apresentam um amortecimento interno de 6 a 8 vezes melhor do que o ferro fundido (GRANITAN,s.d.). Sistemas estruturais de máquinas geralmente são compostos por vários componentes com diferentes funções. Assim sendo, qual seria a influência da alta capacidade de amortecimento do granito sintético no comportamento de uma peça estrutural? Estudos comparativos feitos em máquinas ferramentas mostram que frequências de ressonância inferiores a 100Hz são eliminadas e frequências da ordem de 170Hz são bem reduzidas, conforme mostrado na Figura 3.12.

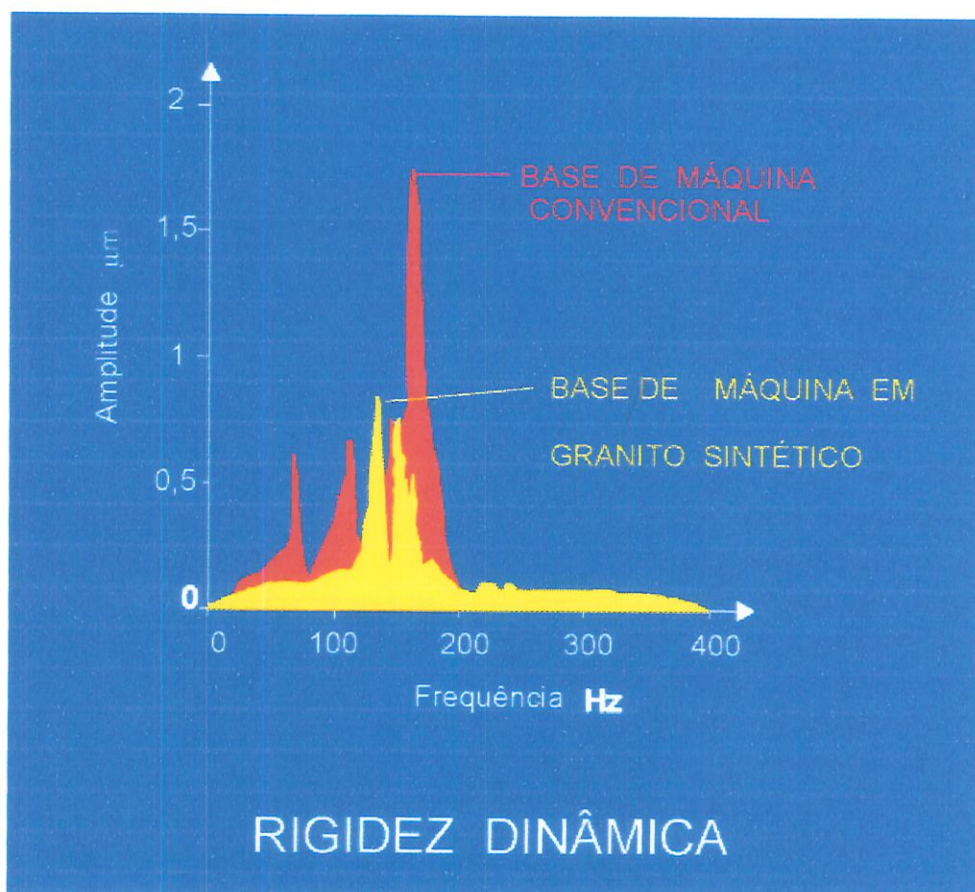


Figura 3.12 – Comparações entre vibrações (GRANITAN,s.d.).

A comparação entre o amortecimento interno do granito sintético e do ferro fundido obtidos através de corpos de prova idênticos sobre condições idênticas de ensaios é mostrada na Figura 3.13. O gráfico desta Figura mostra claramente a superioridade do granito sintético quando comparado com o ferro fundido.

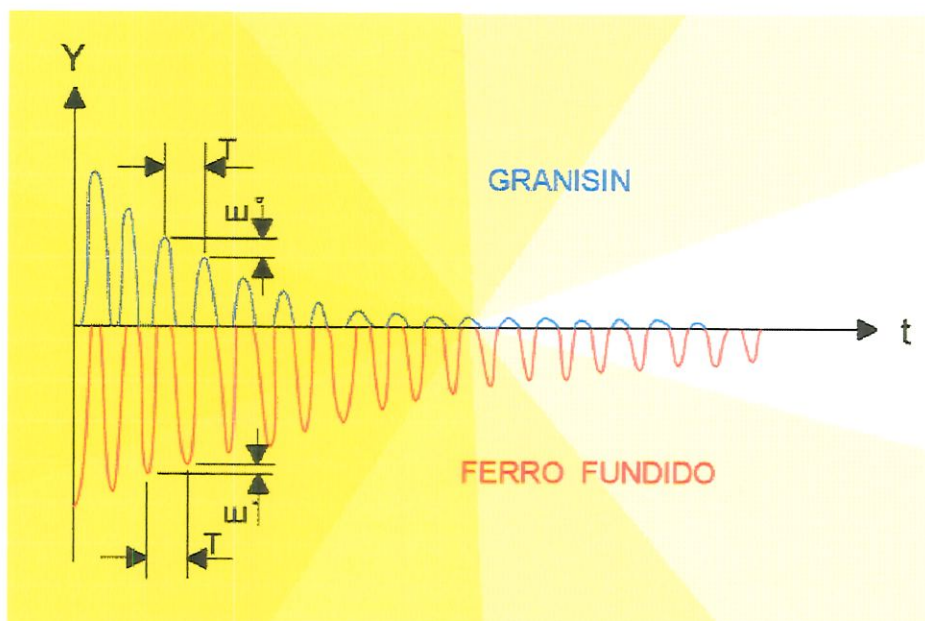


Figura 3.13 – Resposta em frequência do granito sintético (GRANISIN) e ferro fundido (PENTEADO, 1993).

### 3.4.3. Estabilidade térmica

Equipamentos de precisão de um modo geral, devem ser concebidos para serem imunes a variações térmicas, sejam elas provenientes de algum motor, operação de corte, sistema de iluminação ou qualquer outro sistema que emita calor. Materiais metálicos são bem sensíveis a variações térmicas, sendo que de acordo com as leis físicas qualquer mudança de temperatura implica em uma variação dimensional. Os efeitos da temperatura sobre esta variação dimensional e portanto perda de precisão são determinados pelas propriedades de capacidade térmica, condutibilidade térmica e coeficiente de expansão térmica. O fato de peças

feitas de granito sintético terem paredes espessas, resulta em uma elevada inércia térmica, o que é vantajoso no caso alterações de temperatura.

Com um coeficiente de expansão térmica do granito sintético comparável ao do ferro fundido, sua capacidade térmica é cerca de 100% maior e a condutividade térmica 30 a 40 vezes menor. Isto resulta num material que reage muito menos a variações térmicas.

As curvas da Figura 3.14 mostram a vantagem do granito sintético comparado ao ferro fundido em um ambiente de temperatura variável. Uma oscilação da temperatura em um período de duas horas mostra que as mudanças no granito sintético são da ordem de três vezes menor que o outro material. Além disso, a resposta à mudança de temperatura para o granito sintético também é lenta, tendo como resultado, um material mais estável termicamente.

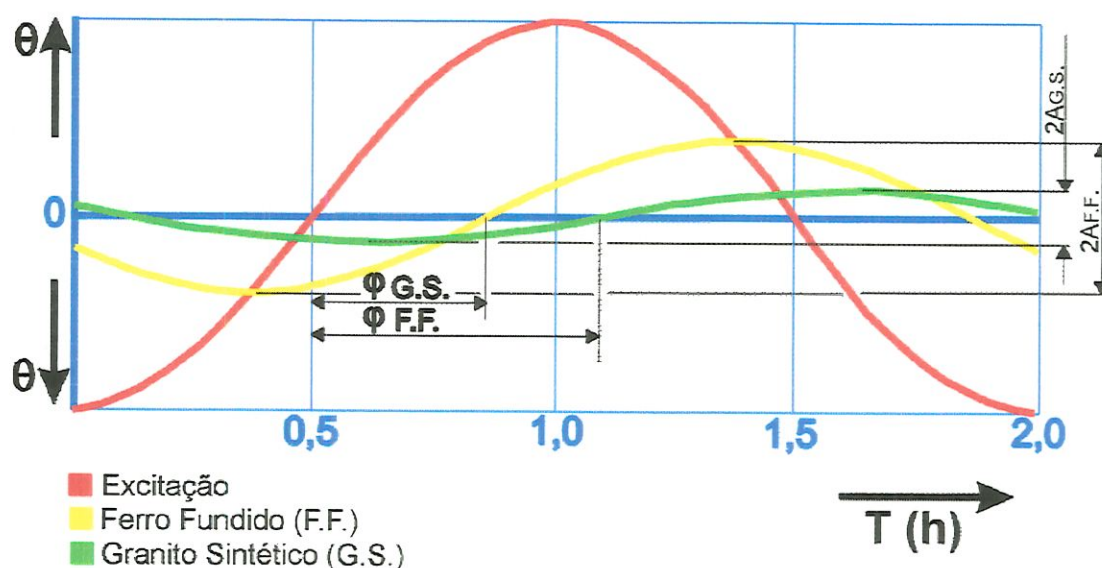
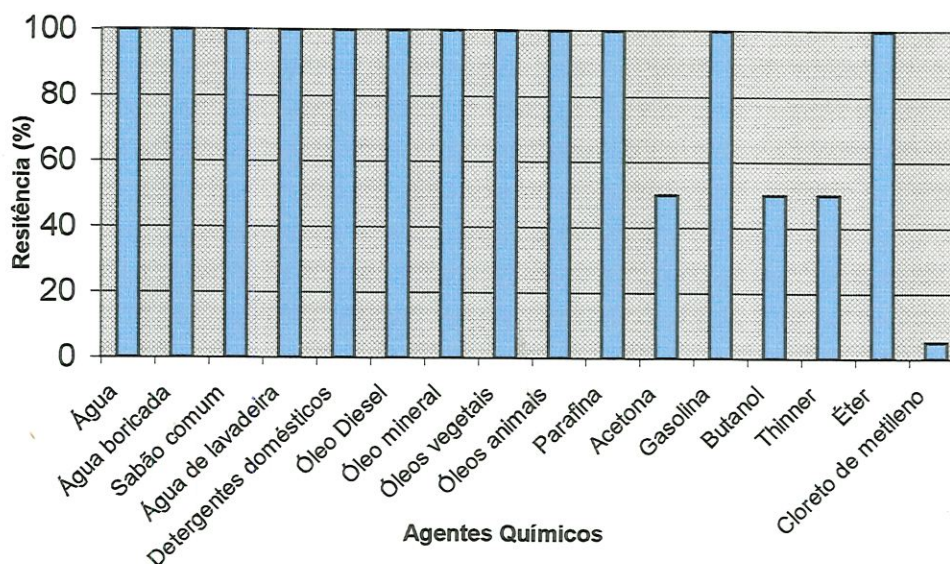


Figura 3.14 – Curvas Temperatura - Tempo do granito sintético e ferro fundido. (GRANITAN,s.d.)



### 3.4.4. Resistência a agentes químicos

Sendo o granito sintético um material composto, a presença de agentes químicos pode trazer complicações para um ou outro dos componentes principais do material ou ambos. Estudos feitos pela Studer GRANITAN (s.d.), mostram que este tipo de material é bem resistente a uma grande quantidade de solventes comuns conforme ilustra a Figura 3.15, que mostra a resistência deste material frente a alguns agentes químicos



comuns.

Figura 3.15 – Resistência do granito sintético a agentes químicos.  
(GRANITAN,s.d.)

### 3.4.5. Processamento de peças em granito sintético

A obtenção de peças feitas em granito sintético é de certa forma bem particular. Suas características de projeto, fabricação de moldes, preparação

do material, moldagem e desmoldagem, fazem do granito sintético um material com processamento não muito comum.

O projeto de uma peça em granito sintético tem uma metodologia parecida com a de peças injetadas ou moldadas, porém com características particulares que as distinguem dos outros métodos. No caso do granito sintético existem algumas liberdades de geometria que não são encontradas em peças injetadas ou moldadas.

Do mesmo modo que as peças injetadas ou moldadas, o projeto de uma peça em granito sintético deve ser feito paralelamente com o projeto de seu molde, visando sempre o procedimento de preenchimento das cavidades e sua posterior desmoldagem. A geometria de uma peça em granito sintético deve ser tal que favoreça suas características mecânicas de material e requisitos de projeto. Como dito anteriormente (item 3.4.2), para se atingir características mecânicas normalmente desejadas em peças estruturais de granito sintético, a espessura das paredes de uma peça neste material é maior que em materiais comuns. As características de desmoldagem de peças injetadas ou moldadas (ângulo de saída), não são necessariamente observadas em peças feitas em granito sintético, pois seu molde geralmente é desmontado na operação de desmoldagem, características estas mostradas na Figura 3.16. Esta característica de desmoldagem faz com que o projetista tenha uma certa liberdade na escolha da geometria a ser reproduzida em granito sintético.



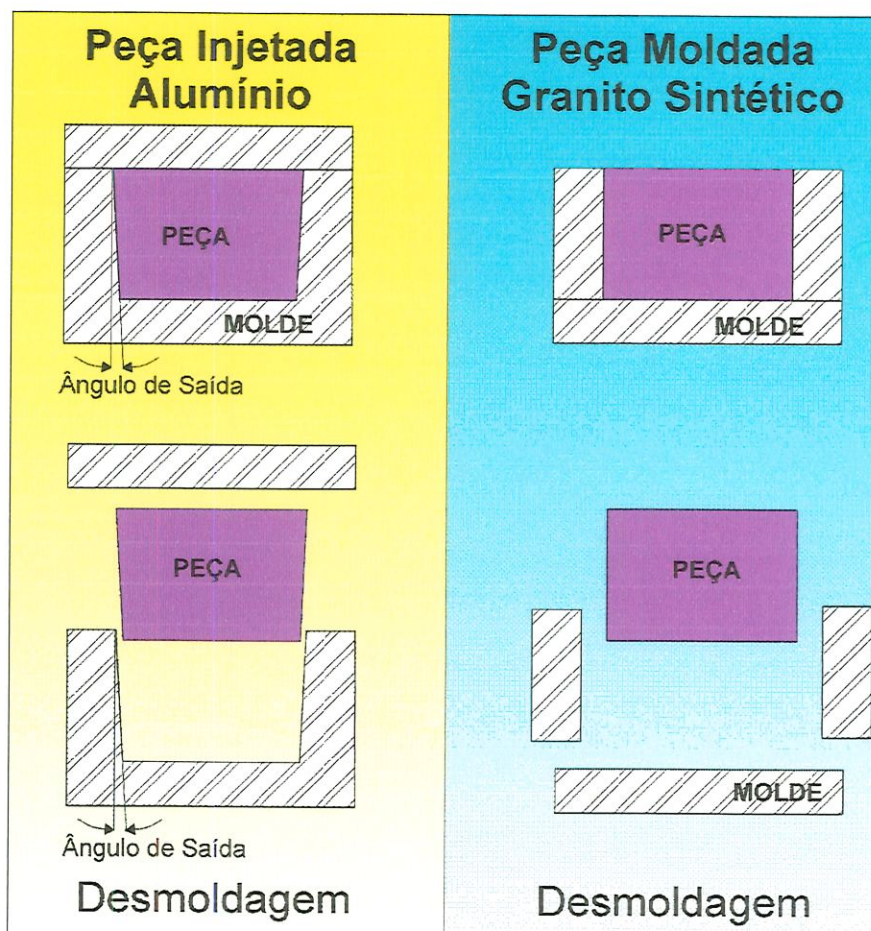


Figura 3.16 – Características de desmoldagem de peças injetadas e de granito sintético.

Outro fator interessante é que a moldagem de uma peça em granito sintético é feita a frio e sem pressão. Este fator propicia projetos de moldes menos sofisticados sem grandes preocupações com frestas entre peças do molde, além da utilização de materiais e processos mais simples para a confecção de moldes. Embora a moldagem do granito sintético seja a frio e sem pressão, os moldes devem ser os mais rígidos possíveis para evitar deformações durante a moldagem devido ao peso próprio do material. Estas deformações podem ser evitadas pela adição de nervuras e reforços nos moldes com a intenção de melhorar a rigidez das paredes dos moldes, reforços são mostrados na Figura 3.17.



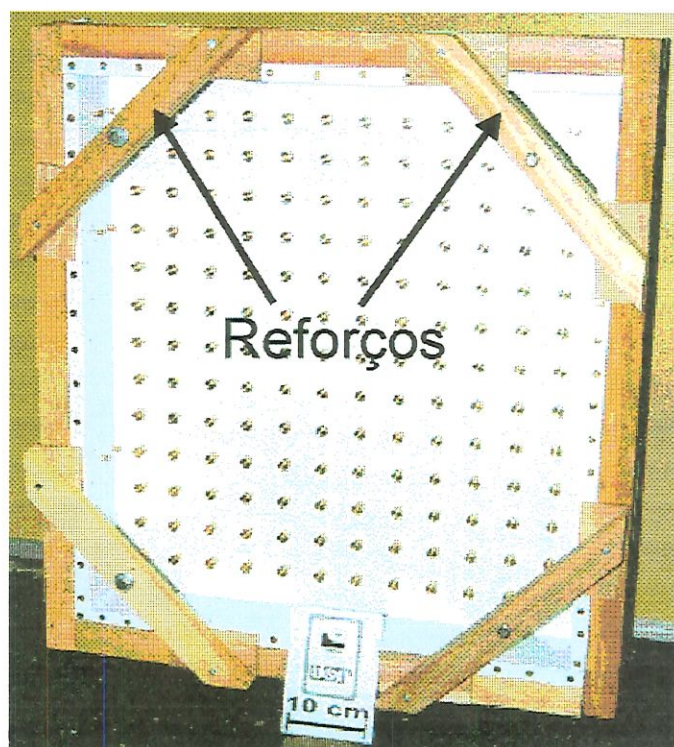


Figura 3.17 – Molde em madeira para granito sintético com reforços.

Ângulos de saída devem ser usados em machos de molde que não podem ser desmontados para desmoldagem da peça, e estas peças devem ter acabamento superficial bom para facilitar a desmoldagem.

A fixação de outros elementos nas estruturas de granito sintético, tais como insertos roscados, guias, reforços externos, é sempre feita durante a sua moldagem. A fixação de elementos externos às estruturas de granito sintético são normalmente fixadas através desses insertos providos de rosca.

Uma vez definida a geometria da peça a ser moldada em granito sintético, o seu projeto deve ser desenvolvido paralelamente com o projeto do molde para garantir a fidelidade deste, a facilidade de desmoldagem da peça e o posicionamento dos insertos. Somente após a conclusão deste estudo, a fabricação do molde e insertos pode ser viabilizada. Cuidados

devem ser tomados durante a fabricação do molde relativamente ao acabamento superficial das partes que reproduzirão as superfícies externas de granito sintético, pois a peça moldada reproduz fielmente o acabamento superficial do molde. Esta necessidade de controle de rugosidade do molde não é necessária no caso dos insertos, pelo contrário, quanto maior o número de imperfeições na superfície do inserto a entrar em contato com o granito sintético, melhor será a sua fixação.

Paralelamente a fabricação do molde e dos insertos é procurada a composição dos materiais componentes do granito sintético com o intuito de obter uma mistura economicamente eficiente e com as propriedades mecânicas desejadas. Com base nas propriedades físicas, geométricas e granulométricas do granito natural, propriedades químicas e térmicas da resina e geometria do molde, é elaborada a quantidade de cada componente constituinte do granito sintético.

Uma vez concluída a fabricação do molde e insertos e os materiais especificados, a moldagem da peça é feita com o auxílio de uma mesa vibratória, e em vinte e quatro horas a peça pode ser desmoldada. Um fluxograma do processamento de uma peça exemplo feita em granito sintético é mostrado na Figura 3.18.

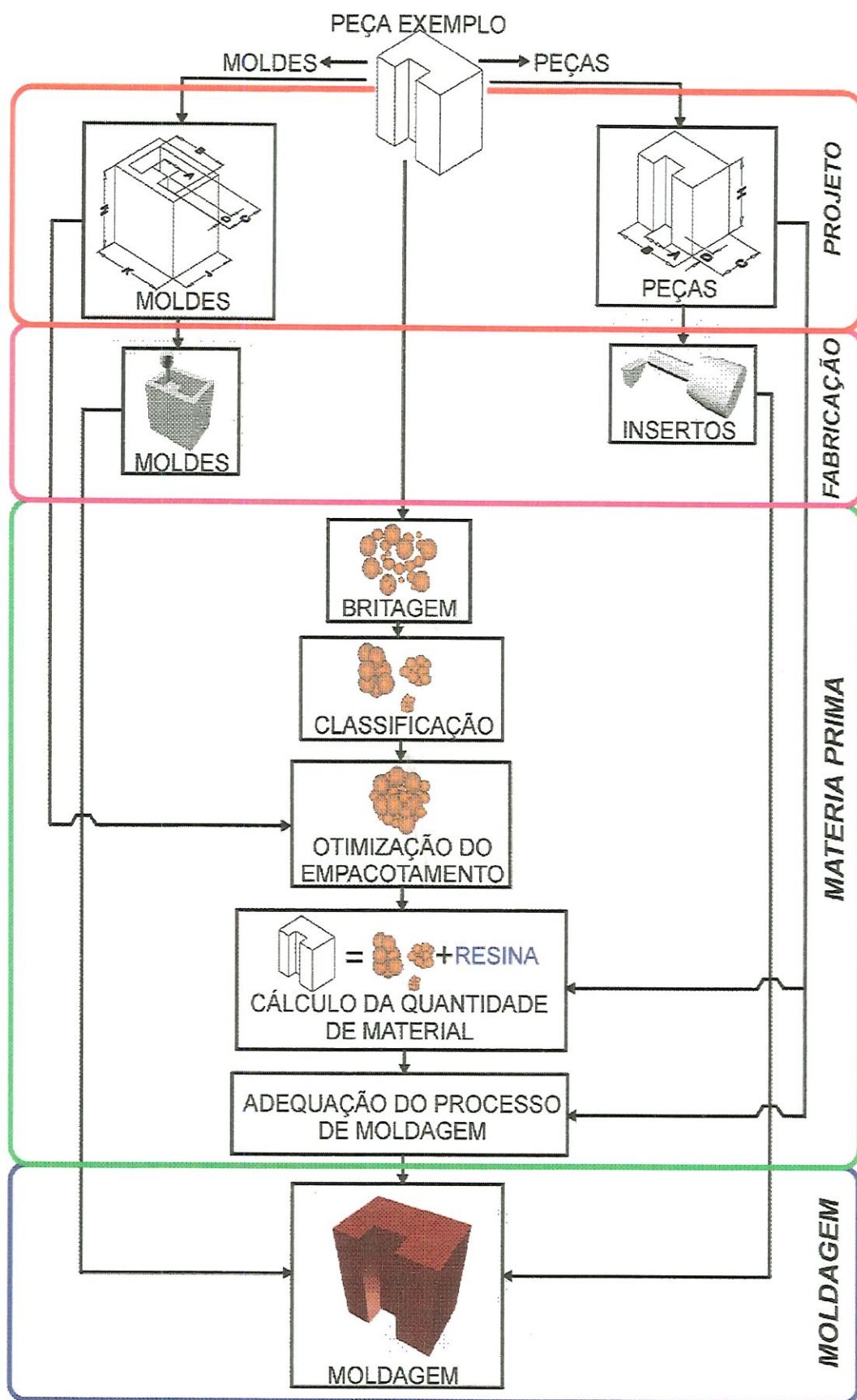


Figura 3.18 – Fluxograma do processamento de peças em granito sintético.



### 3.4.6. Projeto de moldes

O projeto de um molde de granito sintético, independente do processo ou material a que se refere, é de certa forma trabalhoso, pois o projetista deve raciocinar pelo negativo da peça. O desenvolvimento do projeto de um molde deve seguir o projeto da peça, e vice versa, pois para se obter um produto otimizado tanto no processo de fabricação como no produto em si, é necessário que durante a concepção da peça seja visualizado como esta será moldada para que sejam evitadas falhas, erros, distorções durante a moldagem e para que o molde não seja desnecessariamente caro.

Vários materiais podem ser utilizados na fabricação de moldes, cada um com suas características positivas e negativas. Os principais materiais e suas características usados na confecção de moldes para processamento de granito sintético estão mostrados na Tabela 3.2.

O molde para fabricação de uma peça de granito sintético deve propiciar rigidez alta para evitar deformações e ser suficientemente bem montado para não desmontar ou afrouxar durante a moldagem em uma mesa vibratória.

Quando existem tolerâncias estreitas entre dois insertos da peça estrutural e o molde, não é necessário repassar essa tolerância para o molde. Elementos controladores de tolerâncias entre peças podem ser adicionados ao conjunto do molde para que sirvam de posicionadores entre insertos, podendo ou não fazer parte da peça. Quando estes elementos não fazem parte da peça, estes devem ficar fora da cavidade a ser preenchida pelo granito sintético. O exemplo mostrado na Figura 3.19, mostra a necessidade de perpendicularismo entre as faces dos insertos A e B fundidos em um molde de madeira (pouco preciso), cuja tolerância foi mantida com a utilização de um elemento posicionador de tolerâncias definidas para garantir o perpendicularismo desejado.

Tabela 3.2 – Materiais para moldes de granito sintético.

MATERIAL	APLICAÇÃO	VOLUME DE PRODUÇÃO	CUSTO
Materiais metálicos (aço, alumínio)	Deve ser usado para moldes de alta produção ou que necessitem de grande precisão dimensional da peça e de posicionamento dos insertos. O uso deste material implica no uso de desmoldantes.	Destinado a um alto volume de produção, pois sua durabilidade e repetibilidade é muito grande.	Custo elevado devido as várias etapas de fabricação do molde e do material utilizado. O custo é minimizado pelo número de peças feitas com o mesmo molde
Madeira	Geralmente usada na forma de chapas, este material não promove uma precisão dimensional da peça nem de posicionamento dos insertos. O uso deste material implica no recobrimento das partes em contato com o granito sintético e o uso de desmoldantes.	Recomendado para baixos volumes de produção e lotes unitários, pois o material não tem muita durabilidade e repetibilidade após algumas peças moldadas.	Custo relativamente baixo, podendo variar com a complexidade do molde.
Nylon®	Geralmente usados em moldes complexos com precisão dimensional da peça e posicionamento dos insertos estreitos. Este material não necessita do uso de desmoldantes pois é incompatível com a resina.	Recomendado para produções de médias a altas, pois para projetos bem elaborados este molde pode ter uma vida longa e grande repetibilidade das peças moldadas.	Custo elevado devido às várias etapas de fabricação do molde e do material utilizado. O custo é minimizado pelo número de peças feitas com o mesmo molde



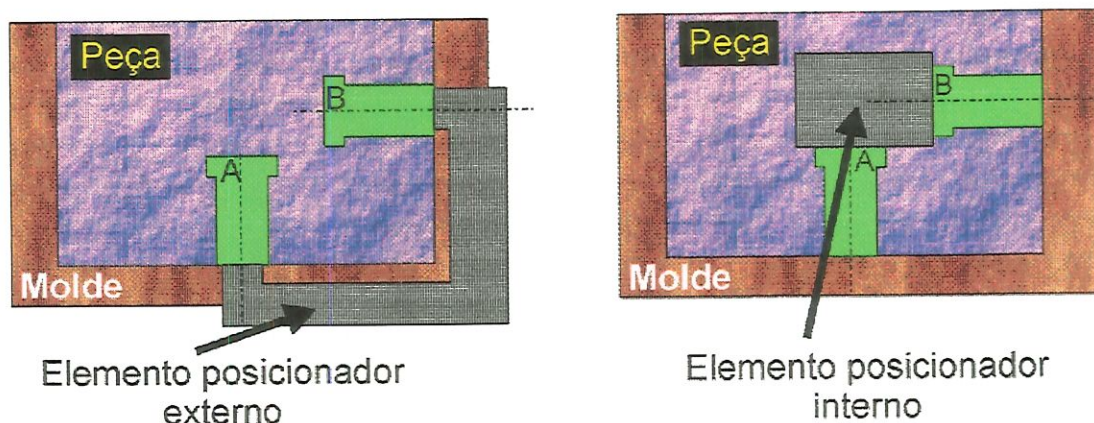


Figura 3.19 – Elementos posicionadores de insertos.

Geralmente, os moldes feitos para a moldagem de granito sintético são desmontáveis para facilitar a desmoldagem da peça, o que dá maior liberdade na geometria da mesma, pois sua geometria é totalmente dependente de como a peça pode ser desmoldada. Moldes para alta produção devem ser projetados de forma tal que sua desmontagem não implique em problemas para a montagem posterior. Para garantir a precisão deste tipo de molde durante moldagens sucessivas, é necessário a adição de pinos guias para uma perfeita montagem entre as partes do molde.

Quando se necessita de estruturas com alta rigidez torcional ou de baixo peso, o processo de moldagem do granito sintético permite a adição de elementos que preencham o interior da peça, sem função estrutural e adição de peso. Deste modo a estrutura fica com características de uma caixa fechada, promovendo alta rigidez torcional para a peça. Materiais como Poliuretano ou Poliestireno expansível podem servir como elementos geradores de vazios para caixas fechadas.

Projetos flexíveis podem ser obtidos com conceitos de peças modulares, onde elementos pré acabados são colados uns aos outros formando peças de variada complexidade. Este conceito de projeto reduz o custo e complexidade dos moldes para uma produção de peças semelhantes mas de geometria flexível. Para produção de peças menos



flexíveis e de moldes complexos pode-se optar em fazer moldes modulares (WIEKE, 1998). Este tipo de conceito divide a peça complexa em partes de forma que seus respectivos moldes sejam mais simples. Após as desmoldagens, as peças são coladas ou unidas de outra forma para formar uma única peça complexa. Outra opção normalmente utilizada é a de moldes especiais para cada tipo diferente de peça. Os tipos de conceito de moldes citados acima podem ser observados na Figura 3.20.

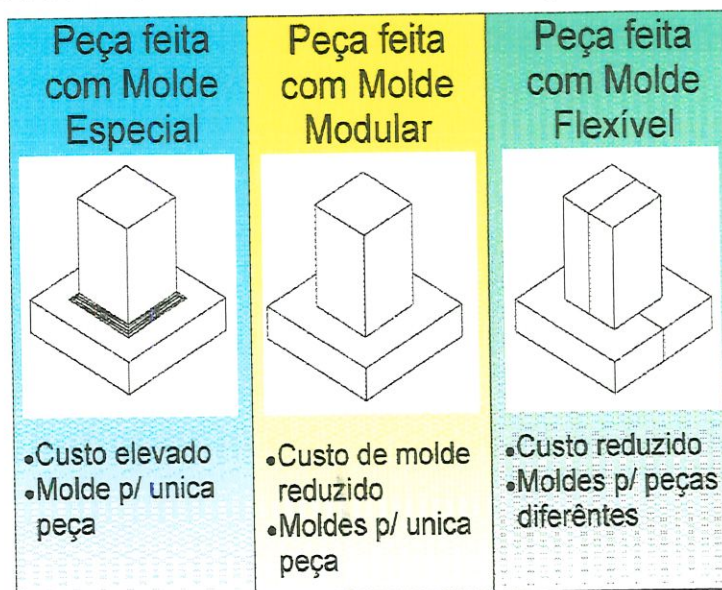


Figura 3.20 –Conceitos de projeto de moldes para granito sintético.

Do mesmo modo que peças podem ser coladas, moldagens sucessivas podem ser feitas a fim de colocar algum acessório ou nova parte em uma estrutura de granito sintético semi pronta.

Após a remoção do molde, o granito sintético pode ser usinado com ferramentas diamantadas apropriadas, contudo esta operação só é necessária em último caso, ou seja, se ocorreu algum erro de projeto ou moldagem da peça, pois a função do molde é dar as características exatas finais que a peça deve ter. Tolerâncias normais da ordem de 0,08mm podem ser alcançadas diretamente com o uso apropriado do molde. Para precisões maiores, materiais apropriados para os moldes ou insertos controladores de tolerâncias podem ser utilizados. (PURQUERIO, 1988)

### 3.4.7. Insertos

A tecnologia aplicada para a conformação de granito sintético permite a utilização de insertos pré-fabricados que são fixados às paredes ou ao fundo do molde, os quais se aderem a peça após a moldagem. Materiais metálicos e não metálicos podem ser inseridos no granito sintético sem problemas, porém a geometria da sua superfície deve ser adequada para a perfeita adesão do inserto ao granito sintético.

A geometria do inserto é dependente da função mecânica a que ele é destinado. Seja de fixação, apoio, guia ou estética, estes insertos devem ser ancorados corretamente à peça, conforme os carregamentos a que estarão sujeitos, evitando assim deslocamentos de rotação ou translação com relação ao granito sintético. Exemplos de insertos normalmente utilizados em estruturas de granito sintético estão mostrados na figura 3.21.

A montagem dos insertos em um molde deve prever um espaçamento mínimo para que não ocorram falhas de preenchimento do material. Este espaçamento depende do tamanho máximo da brita de granito natural que fará parte da mistura a ser moldada. Insertos que necessitam ser montados muito perto um do outro ou das laterais da peça, devem ser feitos na mesma peça, formando um único inserto.

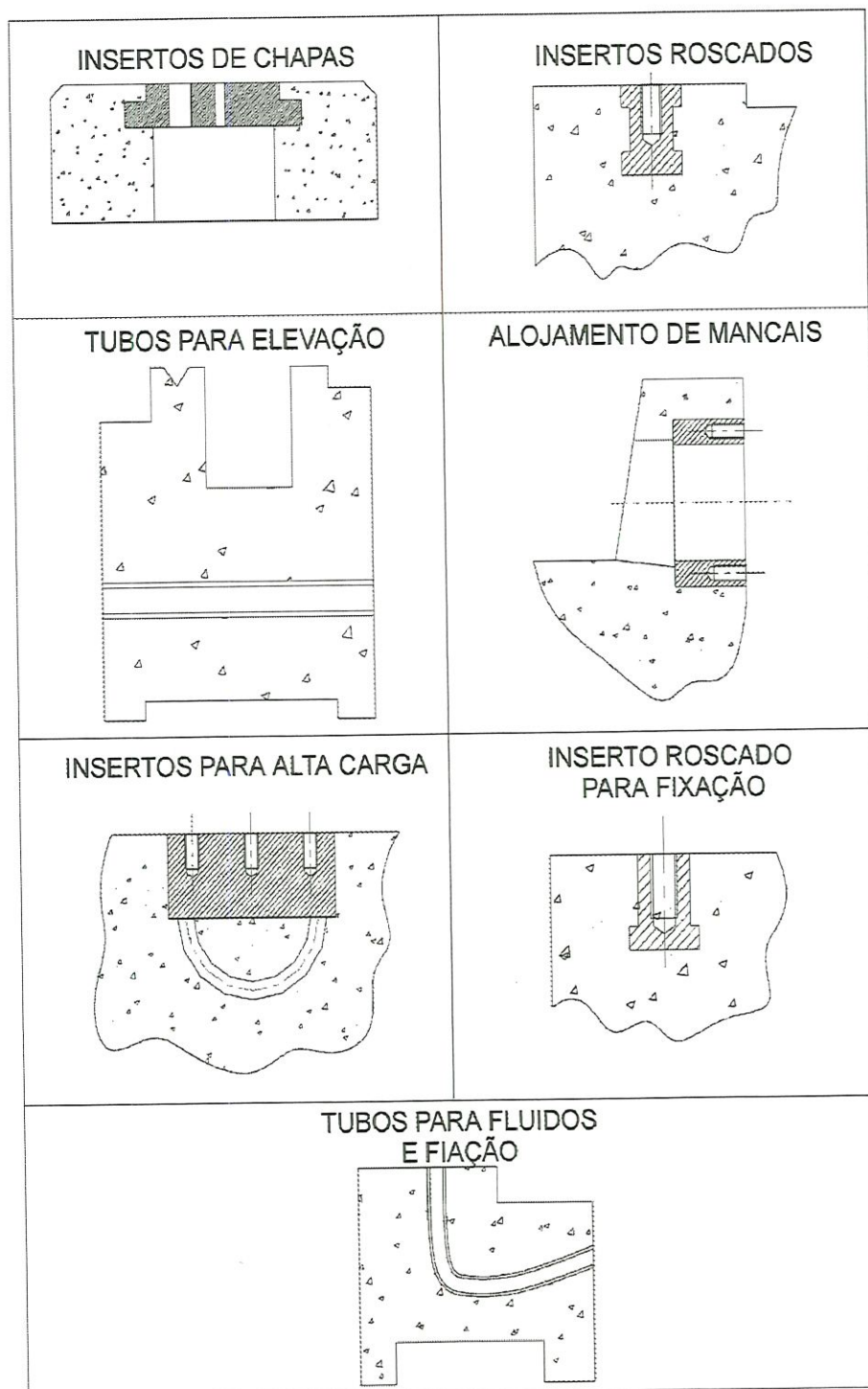


Figura 3.21 – Exemplos de insertos para estruturas granito sintético.



### 3.4.8. Processamento do Material

A obtenção do granito sintético passa por várias etapas de processamento, até estar pronto para a moldagem. As fases para obtenção do material para moldagem são:

- britagem e classificação do granito natural;
- otimização do empacotamento;
- cálculo da quantidade de material;
- adequação do processo de moldagem.

#### 3.4.8.1. Britagem e classificação do granito natural

O processamento do granito sintético começa com aquisição da matéria prima, o granito natural. Este é geralmente obtido de empresas especializadas do ramo e pode ser comprado em várias formas, sendo a mais comum a forma de cacos, ou seja, restos de material já trabalhado os quais tem custo bem baixo e já vem em tamanho apropriado para ser britado. Existem vários tipos e tonalidades de granito natural. O tipo usado na presente aplicação é o granito cinzento, cujas características estão mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição química média e propriedades do granito cinzento utilizado na confecção da peça. (PENTEADO, 1996).

COMPONENTE	PORCENTAGEM	PROPRIEDADES	
SiO <sub>2</sub>	73,23	Dureza Shore	95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,41		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,56		
FeO	3,12	Porosidade (%)	0,7
Na <sub>2</sub> O	3,27	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,7
K <sub>2</sub> O	2,67		
MgO	0,11	Res. a compres. (Kg/cm <sup>2</sup> )	148
CaO	1,67		
Outros	1,96		

A britagem do granito natural é feita através de um triturador mecânico, cujo esquema é mostrado na Figura 3.22. A pedra de granito natural é inserida no triturador que a partir de um movimento oscilatório de uma mandíbula quebra o material em tamanhos menores. O menor tamanho de brita obtida pelo triturador é proporcional a sua abertura, a qual pode ser regulada. Britagem sucessivas podem ser feitas, caso o tamanho da brita não seja adequado para o processamento.

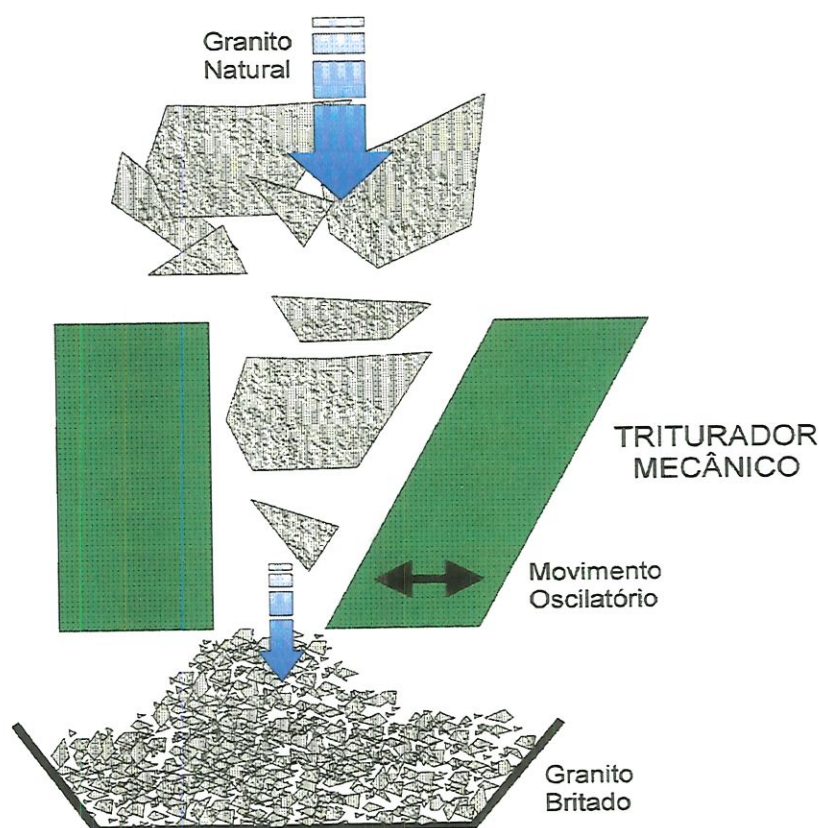


Figura 3.22 – Esquema de funcionamento de um triturador mecânico.

Após a britagem é feita a classificação granulométrica do material. A separação das britas é feita através de peneiras padronizadas segundo a norma NBR 5734-98, cujas aberturas em mm são: 12,70; 7,93; 4,75; 2,00; 1,19 e 0,59. Estas peneiras classificam o granito natural britado pelo seu tamanho equivalente, isto é, se uma brita passa por uma peneira de 12,70 e



é retido por uma peneira de 7,93 de abertura, considera-se que a brita tem um diâmetro equivalente de 12,70 (PENTEADO, 1996).

O processo de separação das britas é feito empilhando-se as peneiras padronizadas em ordem crescente de tamanho de abertura, uma encaixada sobre a outra e todas dentro de uma caixa para reter o material restante da última peneira (pó). Todo o conjunto, peneiras e caixa, é colocado em cima de uma mesa vibratória que vibra com uma frequência de 80 Hz, conforme mostra a Figura 3.23.

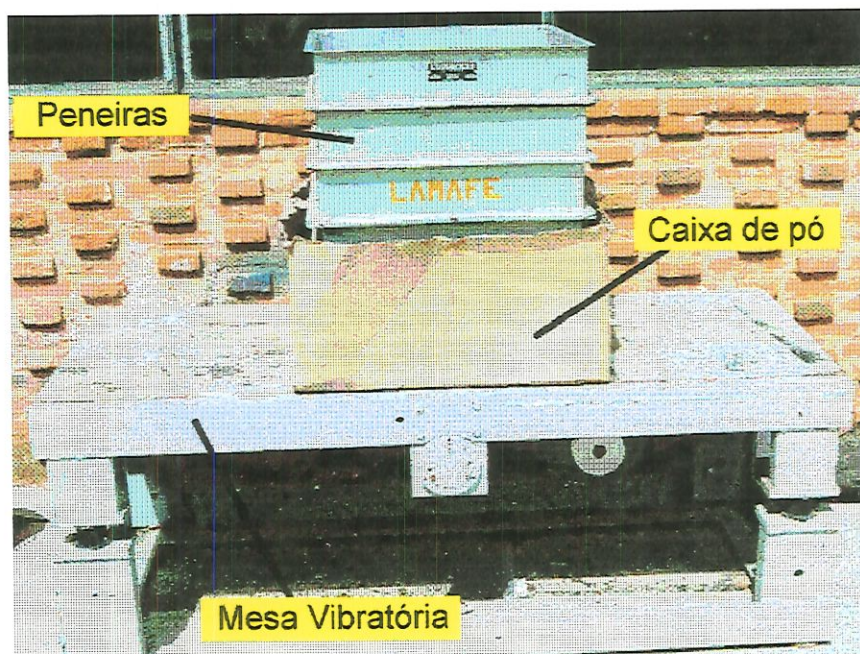


Figura 3.23 – Peneiras e mesa vibratória usadas para classificação de britas de granito natural.

Para efetuar a separação, o material britado é colocado na peneira superior e a mesa vibratória é ligada. Depois de algum tempo de vibração, que depende da quantidade de material, o material separado fica retido nas peneiras, conforme mostrado na Figura 3.24. Após a separação o material é acondicionado em recipientes ao abrigo de umidade.



A quantidade de cada tamanho de brita separada é dependente de como e quantas vezes ela sofreu a britagem. Britagem sucessivas com regulagem de mandíbula pequena produz maior quantidade de britas pequenas. Contrariamente, em uma única britagem com regulagem de mandíbula grande, ocorre a produção de uma maior quantidade de britas grandes.

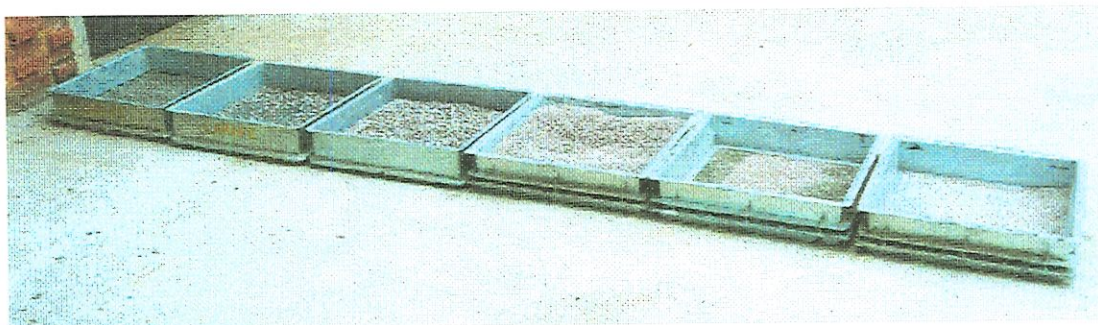


Figura 3.24 – Peneiras com britas de granito natural separadas após vibração.

Após a classificação do granito natural, é necessário separar quais os tamanhos de britas que podem ser usados para a aplicação desejada. A definição do tamanho das britas a serem usadas na moldagem é feito com base no tamanho da menor cavidade a ser preenchida no molde. A maior das britas para uma determinada aplicação não deve ser maior que a metade da menor cavidade a ser preenchida pelo material durante a moldagem.

#### 3.4.8.2. Otimização do empacotamento das britas

O melhor coeficiente de empacotamento a ser utilizado na moldagem tem relação direta com o desempenho e custo da peça a ser obtida, pois a resina tem um custo 100 vezes maior que o granito e é responsável pela característica de amortecimento interno da peça. Por sua vez, e o granito natural é o responsável pela rigidez da peça. Para se obter um material economicamente eficiente, é necessário uma ponderação, a melhor possível, da quantidade de cada um dos componentes do granito sintético.

Para se conseguir tal característica deve-se estudar diferentes porcentagens dos componentes a fim de obter o melhor coeficiente de empacotamento do material, e como consequência um material economicamente eficiente. O coeficiente de empacotamento é função dos vazios que ficam dentro de uma mistura compactada de britas de granito natural, vazios estes preenchidos pela resina durante a moldagem do granito sintético. A mistura de britas de granito natural que ocupar o menor volume, corresponde a mistura de maior empacotamento, portanto menos espaços vazios, e quanto menor o volume de vazios, menor a quantidade de resina e portanto, o menor custo dos materiais envolvidos, particularmente a resina.

A otimização do coeficiente de empacotamento é feito segundo o procedimento que se segue:

- definir as porcentagens em massa de cada tamanho de brita que participará da composição, de modo que os componentes sempre totalizem uma massa de 250g;
- colocar as britas dentro de um recipiente e misturá-las com intensidade;
- colocar a mistura dentro de um proveta graduada e agitar a proveta 10 vezes para que as britas se misturem;
- fixar a proveta em uma mesa vibratória e vibrar o conteúdo em uma frequência de 50 Hz por um minuto;
- esperar o assentamento do pó e fazer a leitura na proveta e verificar o volume que ocupam os 250g de granito; essa leitura deve ser feita na altura média dos picos das britas que estão por cima na proveta;
- repetir todo o procedimento com uma nova porcentagem em massa de cada tamanho de brita seguindo o triângulo de FERET da Figura 3.25, até que se consiga uma mistura com menor volume possível, sendo esta a mistura considerada como a de maior empacotamento.



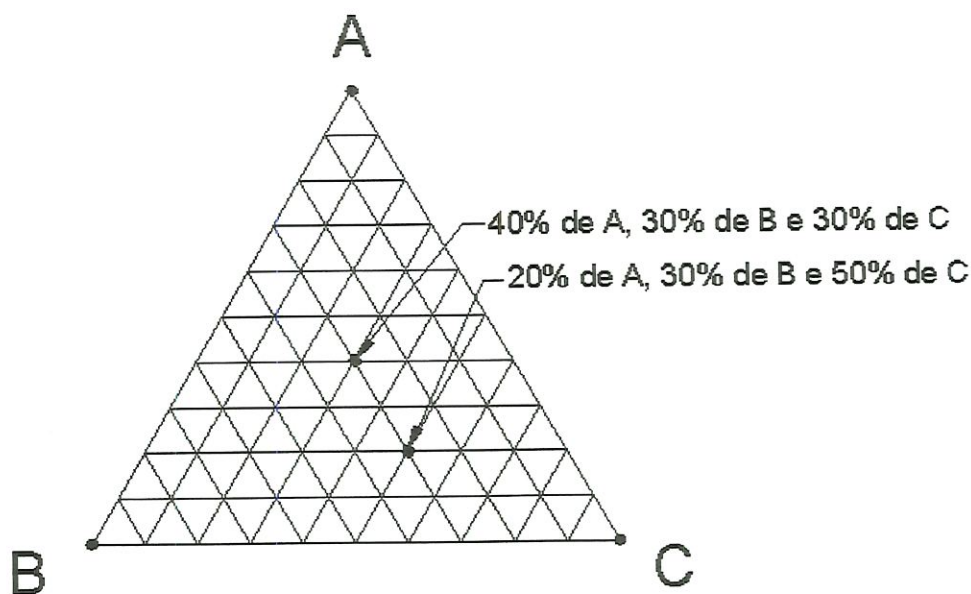


Figura 3.25 – Triângulo de FERET. (BUENO, 1995)

O triângulo de FERET, mostrado na Figura 3.25, auxilia a obtenção do melhor empacotamento de uma mistura de três tipos diferentes de britas. Cada ponto marcado no interior do triângulo representa uma porcentagem de diferentes tamanhos de britas (A, B e C), sendo que a soma das porcentagens deve ser sempre de 100%. Com a aquisição dos volumes referentes as porcentagens obtidas pelo triângulo de FERET percebe-se que em uma determinada área do triângulo fica localizado o menor volume. Assim, consegue-se mais rapidamente encontrar a mistura de menor volume e como consequência, o melhor empacotamento.

#### 3.4.8.3. Cálculo da quantidade de brita e resina.

O cálculo da quantidade dos componentes do granito sintético deve ser feito corretamente para evitar desperdícios e problemas durante a moldagem da peça. Este cálculo de material tem como base o valor de volume obtido no item 3.4.8.2 (Otimização do empacotamento das britas)  $V_e$ , a porcentagem de cada tamanho de brita e o volume da peça a ser moldada em granito sintético  $V_p$ .



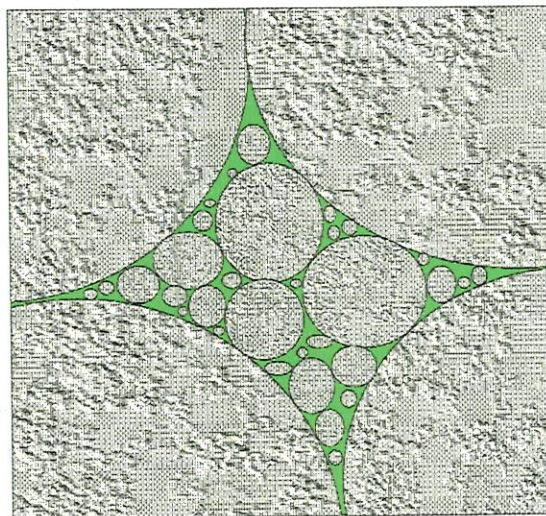
Com base no valor do  $V_e$ , em peso (250g) e o valor de  $V_p$ , é possível calcular a massa de granito natural da mistura de granito sintético  $m_{gn}$ . Com o valor de  $m_{gn}$  e as porcentagens em peso de cada tamanho de brita obtida no item 3.4.8.2, tem-se a massa de cada brita para a peça a ser moldada.

O cálculo da resina (resina mais endurecedor) é feito com base na densidade do granito natural (Tabela 3.3),  $d_{gn}$ . O volume real de granito natural para 250g é dado por:

$$V_R = \frac{250}{d_{gn}}$$

Com este valor ( $V_R$ ) e o valor de  $V_e$  obtém-se o volume de vazios que deve ser ocupado pela resina  $V_v$ , cujo esquema está representado na figura 3.26.

$$V_v = V_e - V_R$$



- Espaços vazios -  $V_v$
- Granito natural -  $V_e$

Figura 3.26 – Representação do volume de britas e dos espaços vazios.

Com o valor de  $V_v$  e com a densidade da resina usada no granito sintético,  $d_R$ , obtém-se a massa de resina para 250g de britas.

$$m_R = V_V \times d_R$$

Com o valor de  $m_R$  e os 250g de britas pode-se calcular a porcentagem em peso de cada elemento (resina e britas) para a mistura selecionada no item 3.4.8.2. Assim sendo, a partir do peso  $m_{gn}$  e  $m_R$  pode-se calcular a quantidade de resina para a moldagem da peça. A quantidade final de resina e endurecedor depende da resina usada e da formulação indicada pelo fabricante. Com os valores em massa da resina, endurecedor e a massa de cada brita, o material pode ser separado para a moldagem.

#### 3.4.8.4. Adequação do processo de moldagem.

Do mesmo modo que peças podem diferir uma das outras, o processo de moldagem de peças distintas também é diferente. Devido às diferentes geometrias das peças, os processos de enchimento devem se adequar para evitar problemas de preenchimento e uniformidade da mistura durante a moldagem da peça.

Durante o projeto da peça e do molde, o projetista deve sempre que possível facilitar ao máximo o processo de preenchimento do molde pelo granito sintético, mas isso nem sempre é possível, e nestes casos é necessário um cuidado especial durante a moldagem no sentido de se evitar falhas. De modo geral, o processo de moldagem de peças segue as seguintes etapas:

- a) Calcular a massa de resina com um acréscimo de 10% para garantir um completo e bom acabamento superficial da peça, pois a resina restante adicionada ao molde no final da moldagem forma uma camada lisa na superfície do molde envasado.
- b) Pesar e misturar as britas da mistura até atingir uma distribuição homogênea.

- c) Pesar, preparar e misturar a resina e o endurecedor. A partir desta etapa até a conclusão do envasamento, o tempo gasto não deve ser superior a 30 minutos.
- d) Juntar a resina e as britas lentamente e com o auxílio de uma espátula, misturar os materiais até que as britas atinjam um molhamento total.
- e) Acionar a mesa vibradora com uma frequência da ordem de 70Hz.
- f) Envasar o molde com o auxílio de uma espátula para que o material espalhe bem no molde.
- g) Moldar gradativamente o restante do material.
- h) Manter o molde vibrando por aproximadamente 30 minutos para extrair as bolhas de ar que eventualmente possam se formar no interior da mistura de material.

As ordens das etapas citadas acima podem variar de acordo com a peça, e a mistura de britas escolhidas. Peças com difícil acesso ou locais que possam causar problemas de enchimento devem ter seu preenchimento feito por etapas, devendo uma ou mais das etapas serem efetuadas com mais cuidado ou com tamanhos diferentes de britas. A Figura 3.27 mostra um exemplo de preenchimento difícil onde é necessário uma variação no enchimento do molde para evitar falhas.





Tabela 3.4 – Propriedades da resina Araldite M e do endurecedor HY 956.  
(CIBA, s.d.)

<b>CARACTERÍSTICAS INICIAIS</b>		
Cor da Resina		Incolor
Cor do Endurecedor		Amarelo transparente
Viscosidade da mistura	cPs	800 - 1000
Densidade da Resina	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,10 – 1,15
Densidade do Endurecedor	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,00 – 1,05
Tempo de endurecimento	Horas	10 - 14

A resina Epoxi Araldite M da CIBA-GEIGY® endurece com a adição de um endurecedor que no caso é a HY – 956 do mesmo fabricante, o que especifica uma proporção de endurecedor de 20% em peso do total de resina. A correta proporção destes componentes é necessária para que as características mecânicas desejadas sejam atingidas.

## **4. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO MICROSCÓPIO OTI – 1**

Após a conclusão do estudo do projeto antigo do microscópio OTI – 1 por intermédio de sua documentação técnica e do próprio produto, juntamente com os dados obtidos da aplicação das técnicas de DFA e FMEA já relatados, verificou-se que uma solução otimizada seria a de um sistema estrutural composto por uma base e uma coluna feitos de granito sintético.

Com a aquisição de conhecimento suficiente das técnicas utilizadas no projeto e fabricação de peças em granito sintético, optou-se primeiramente pela fabricação de uma base de granito sintético o mais semelhante possível a base do projeto original. Desta forma, tal peça poderia ser usada como elemento comparativo entre o material do projeto original e da nova proposta de material (granito sintético).

### **4.1. Projeto e Fabricação de uma Base em Granito Sintético**

Durante o projeto da base utilizando granito sintético como principal material estrutural, procurou-se seguir o máximo possível a geometria da mesma peça feita em alumínio. A geometria externa da peça foi preservada porém a parte interna sofreu modificações, pois a utilização do granito sintético implica em conceitos de projeto diferentes aos utilizados com materiais metálicos.



Peças metálicas como a estudada, feitas em alumínio, geralmente são fundidas ou injetadas. O próprio material e seu processamento conduz o projeto para uma peça com paredes finas e reforçadas por dentro, fazendo da parte interna uma geometria complexa, conforme mostrado na Figura 4.1. Estes conceitos de projeto não são verificados quando se utiliza o granito sintético como material estrutural. As paredes finas são substituídas por paredes espessas para garantir a rigidez da peça sem adição de reforços. A não utilização de reforços é devida a limitação do granito sintético a geometrias complexas conforme mostrado na Figura 4.2.

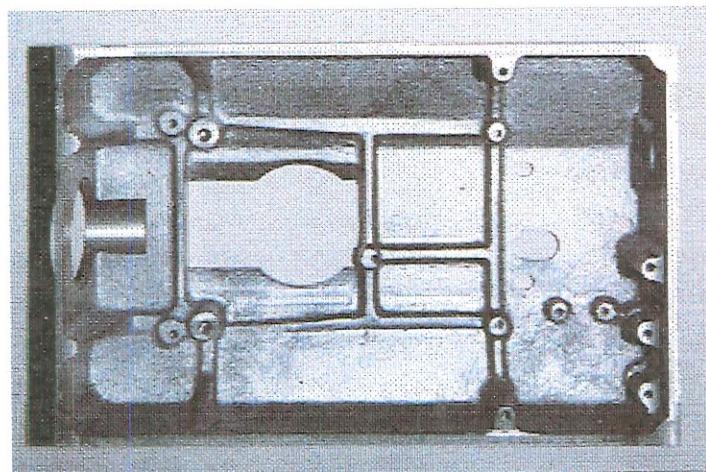


Figura 4.1 – Parte interna da base do microscópio OTI-1 fundida em alumínio.

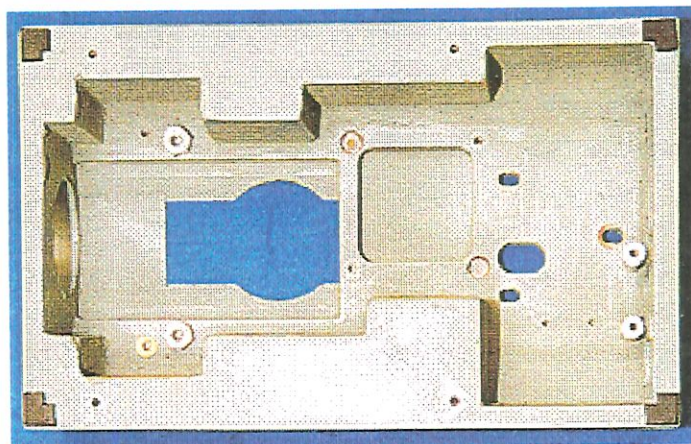


Figura 4.2 - Parte interna da base do microscópio OTI-1 moldada em granito sintético.

O projeto da base de granito sintético foi feito utilizando a tecnologia de CAD (Computer Aided Design) para a modelação da peça, no cálculo de algumas características geométricas e nos desenhos para a fabricação do molde.

O projeto da peça baseou-se principalmente da distribuição dos componentes internos da base de microscópio enfatizando a sua melhor localização para formar a sua geometria interna, deixando somente o espaço suficiente para as peças, prevendo a facilidade da sua montagem. A geometria externa foi obtida seguindo, o quanto fosse possível, o projeto original para que comparações pudessem ser efetuadas. O modelo em CAD utilizado no projeto é mostrado na Figura 4.3.

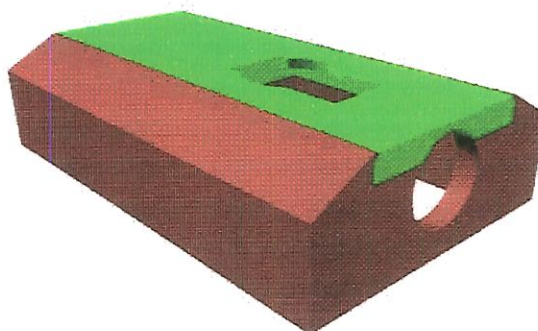


Figura 4.3 - Modelo em CAD do projeto da base do microscópio OTI-1.

Uma vez definido o modelo da peça em CAD, passou-se ao projeto do molde, o qual foi feito a partir do modelo sólido mostrado na Figura 4.3. O molde foi concebido aplicando-se operações booleanas no modelo da Figura 4.3 (peça) e em um modelo de um bloco (molde). Subtraindo-se a peça do bloco (maior em tamanho que a peça), foi obtido a geometria exata do molde (cavidades), como mostrado na Figura 4.4.



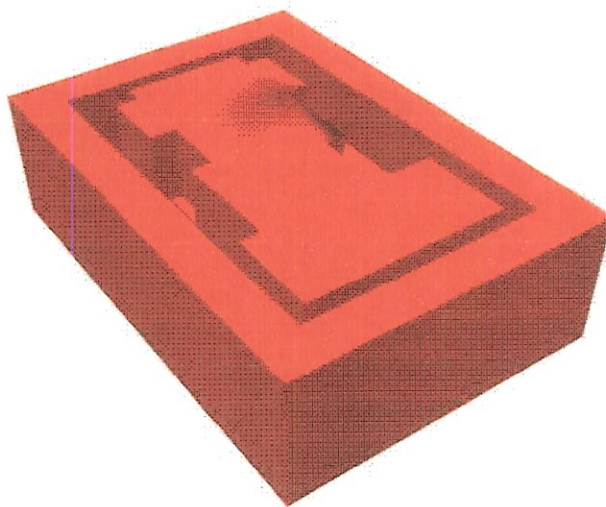


Figura 4.4 – Modelo em CAD do projeto do molde da base.

Com a peça e o molde definidos, passou-se então ao detalhamento das partes do molde e dos insertos da peça a ser moldada. O material escolhido para a fabricação do molde foi o Nylon<sup>®</sup>, devido às suas características citadas na Tabela 3.2. A fabricação das partes do molde foi feito, em quase sua totalidade, em uma fresadora por se tratarem de peças de formato prismático. O mesmo ocorreu com os insertos da peça, conforme mostrado na Figura 4.5. A fabricação do molde culminou na peça mostrada na Figura 4.6.



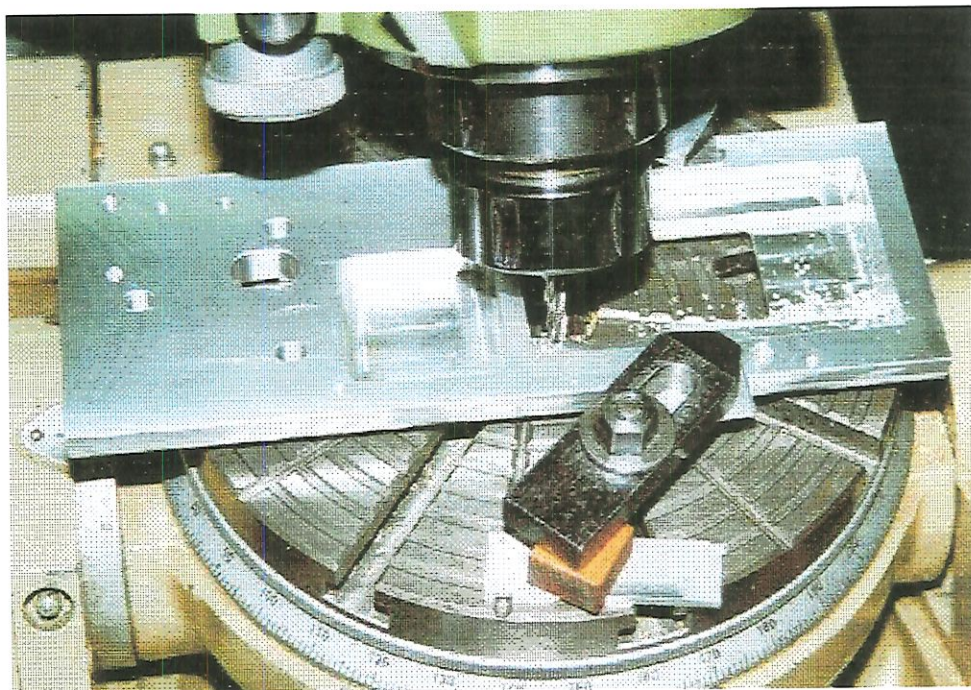


Figura 4.5 – Usinagem da chapa inserida na base do microscópio.

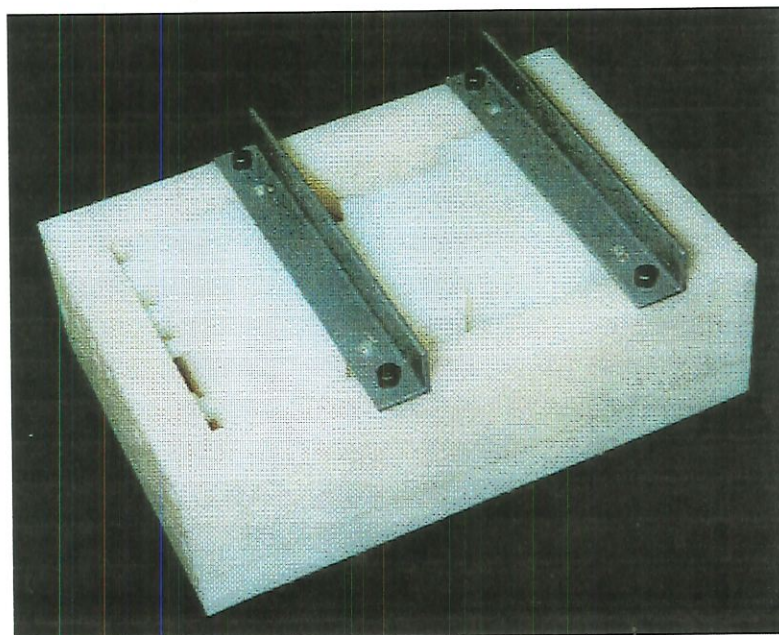


Figura 4.6 – Molde para moldagem da base do microscópio.

Com o molde concluído, seguiu-se o processamento do material, o qual foi feito segundo o item 3.4.8 do capítulo anterior. Paralelamente, com o material previamente britado e separado, foi feita a otimização do empacotamento das britas.

#### 4.1.1. Otimização do empacotamento das britas para a moldagem da base

Seguindo a sequência descrita no item 3.4.8.2 foi feito um estudo das cavidades a serem preenchidas pelo granito sintético e conclui-se que o tamanho máximo das britas seria de 4,76mm de diâmetro equivalente. Utilizando-se três tamanhos diferentes de britas: pó, 2,00 e 4,75, utilizou-se o triângulo de FERET, mostrado na Figura 4.7, e conseguiram-se as medidas de volume e densidade das britas a serem utilizadas as quais são mostradas na Tabela 4.1.

A: Pó    B: Diam. equiv. 2,00    C: Diam. equiv. 4,76

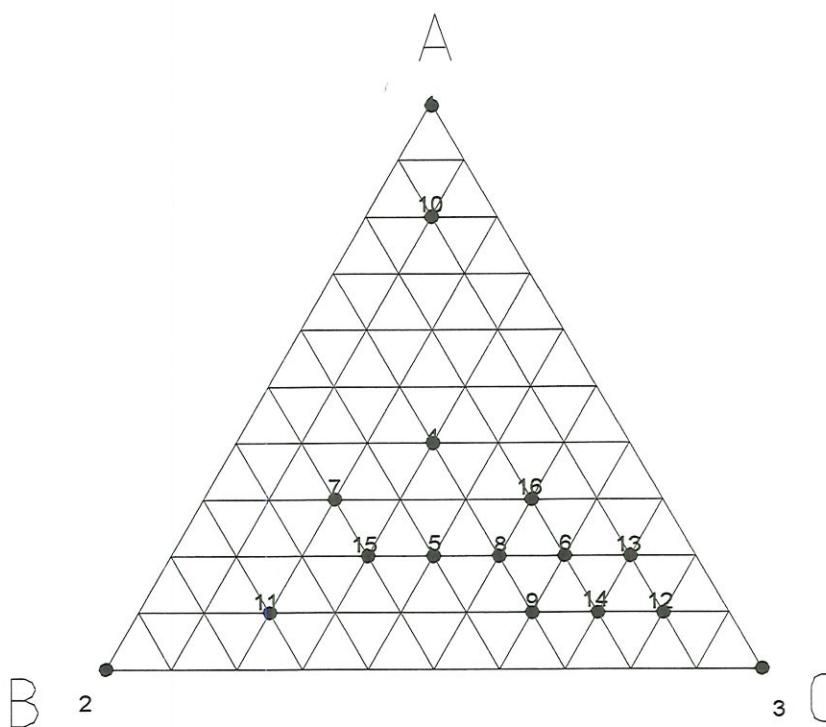


Figura 4.7 – Triângulo de FERET (BUENO, 1995).



Tabela 4.1 – Densidades para diferentes misturas de britas.

Mistura	% de A	% de B	% de C	Volume - $V_e$ (ml)	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )
1	100	0	0	285	0,88
2	0	100	0	180	1,39
3	0	0	100	173	1,45
4	40	30	30	175	1,43
5	20	40	40	165	1,52
6	20	20	60	163	1,53
7	30	50	20	167	1,50
8	20	30	50	160	1,56
9	10	30	60	167	1,50
10	80	10	10	243	1,03
11	10	70	20	173	1,45
12	10	10	80	171	1,46
13	20	10	70	165	1,52
14	10	20	70	170	1,47
15	20	50	30	165	1,52
16	30	20	50	165	1,52

Tendo por base a Tabela 4.1, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 4.8, onde pode ser observada a mistura de maior densidade. A mistura 8 foi a que proporcionou uma maior densidade, e portanto um melhor coeficiente de empacotamento para as britas selecionadas.

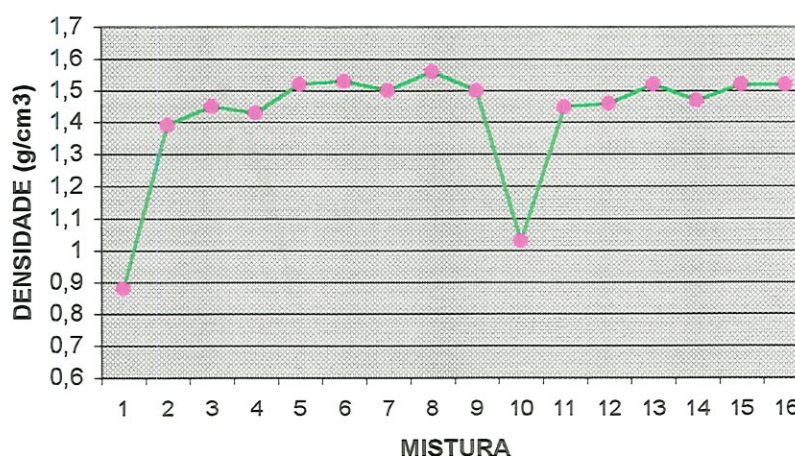


Figura 4.8 – Gráfico das densidades de misturas de britas.



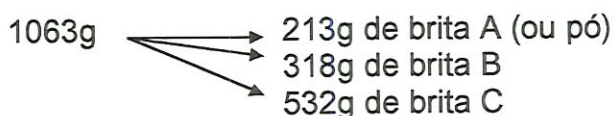
#### 4.1.2. Cálculo da quantidade de britas e resina

Com base na sequência descrita no item 3.4.8.3 do capítulo anterior, o valor de volume obtido no item anterior  $V_e$  (160ml) e o volume de granito sintético na peça  $V_p$  (680ml) calculado usando o modelo em CAD mostrado na Figura 4.3, pode-se quantificar o material utilizado na moldagem da peça.

- *Cálculo das britas.*

Com base no volume  $V_e$  da mistura 8 (160ml em 250g), para moldar uma peça de 680ml, tem-se 1063 g ( $m_{gn}$ ) de britas no total.

Para as 1063g de mistura 8, tem-se 20% de brita A, 30% de brita B e 50% de brita C. Ou seja:



- *Cálculo da resina.*

O cálculo da quantidade de resina e endurecedor segue as etapas abaixo.

Densidade do granito cinzento ( $d_{gn}$ ):  $2,7\text{g/cm}^3$

Volume real de granito para 250,0g de mistura:  $d=m/V \rightarrow V=m/d$ ,

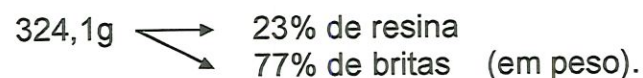
$$V_R = 250,0/2,7 = 92,6\text{ml.}$$

Volume de vazios,  $V_V = 160,0-92,6 = 67,4$  ml de vazios.

Densidade da resina,  $d_R = 1,1\text{g/cm}^3$ .

$$M = V \cdot d \rightarrow M = 67,4 \cdot 1,1 = 74,1\text{g de resina.}$$

$$\text{Peso total} = 250,0 + 74,1 = 324,1\text{g}$$



Para o molde de 1063g, e as porcentagens citadas acima tem-se que:

$$\text{massa de resina, } m_R = 318\text{g}$$

Usando a formulação de 5 partes de resina para uma parte de endurecedor, tem-se: 256g de resina para 64g de endurecedor.

Item	Massa	
BRITAS	213g	brita A
	318g	brita B
	532g	brita C
RESINA	256g	resina Araldite® M
	64g	endurecedor HY 956

#### 4.1.3. Adequação do processo de moldagem ao molde da base do microscópio.

Devido a geometria complexa do molde da base do microscópio, foi adotada uma mistura de britas de granito e resina específica para o preenchimento dos locais críticos desse molde. Com britas de tamanho menor e resina e com o auxílio de uma pequena espátula conseguiu-se uma moldagem de partes críticas com maior facilidade evitando-se assim vazios indesejáveis. Com base na mistura selecionada e utilizando o molde e insertos fabricados foram moldadas duas bases do microscópio, como a mostrada na Figura 4.9.



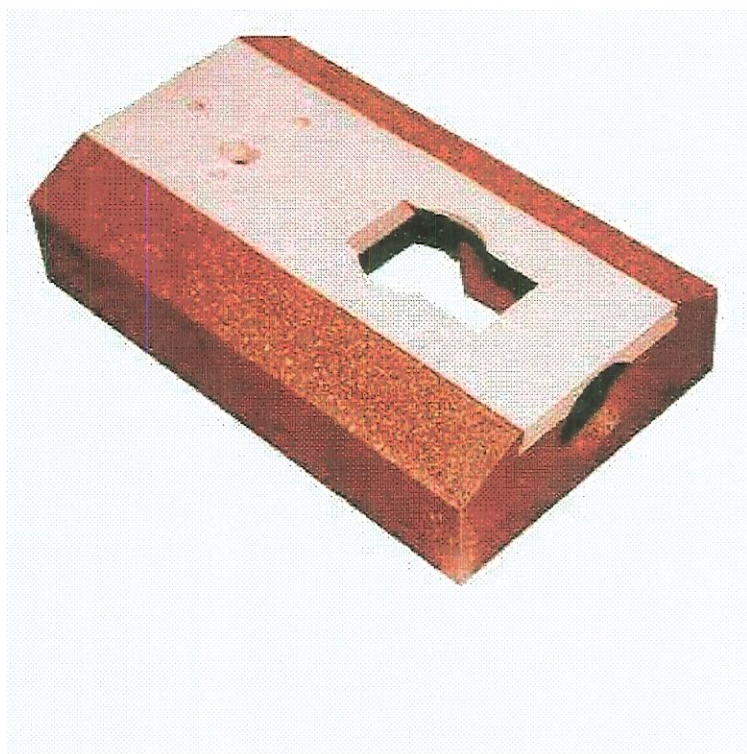


Figura 4.9 – Base do microscópio moldada em granito sintético.

A base da Figura 4.9 foi utilizada na montagem de um microscópio completo, conforme ilustra a Figura 4.10, o qual mostrou a viabilidade técnica da utilização deste material como material estrutural para equipamentos deste gênero.



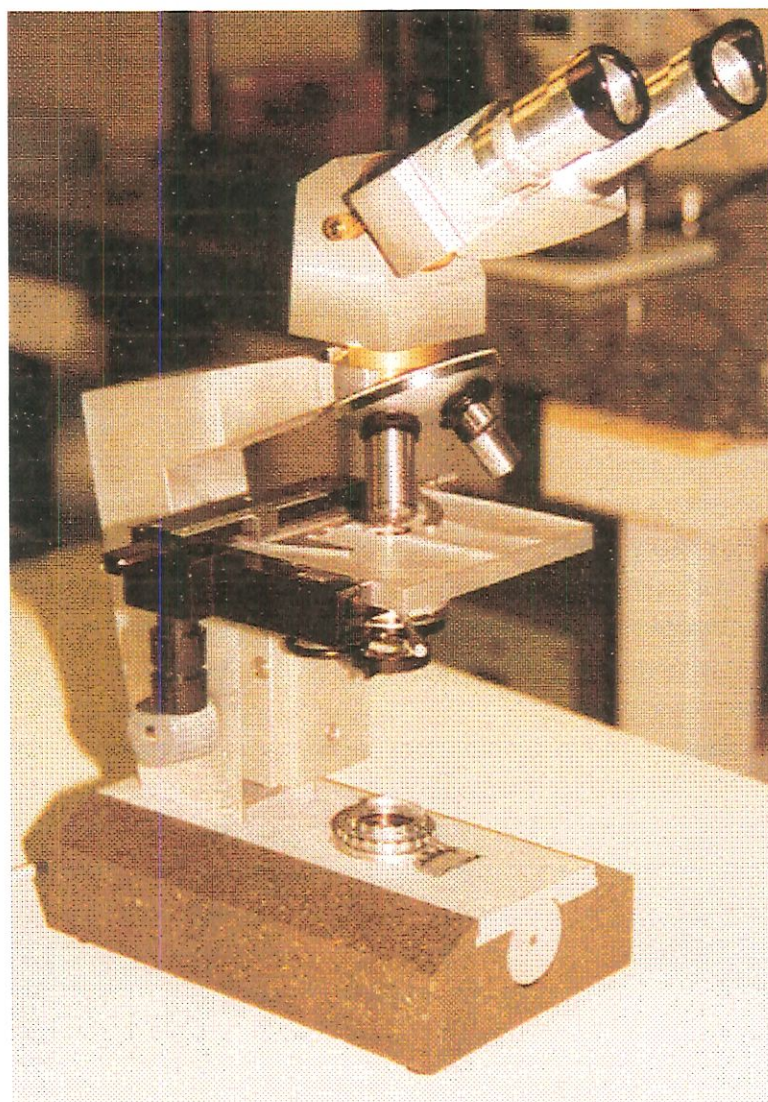


Figura 4.10 – Microscópio OTI-1 montado em uma base em granito sintético.

Após a verificação da aplicabilidade do granito sintético como material estrutural para o microscópio, seguiu-se o estudo da aplicação do granito sintético de modo mais extensivo para o sistema estrutural deste equipamento óptico.

#### **4.2. Novo Projeto Estrutural do Microscópio OTI-1.**

Com a experiência adquirida na construção de moldes e nas moldagens acima citadas, procurou-se dar continuidade aos estudos

relativamente ao projeto de um sistema estrutural para o microscópio óptico totalmente feito em granito sintético. Tendo por base o estudo do projeto original do microscópio e os resultados obtidos da aplicação das técnicas de projeto DFA (Projeto para Montagem) e FMEA (Análise de Efeito e Modo de Falha) já relatados, chegou-se a conclusão de que o melhor sistema estrutural para o microscópio seria agrupar sua base e coluna em uma única peça suficientemente rígida para evitar deformações, e que evitasse ao máximo eventuais vibrações. A partir destes dados elaborou-se um desenho, utilizando recursos do CAD, do que seria o novo sistema estrutural do microscópio. Os estudos efetuados conduziram a um sistema estrutural composto de uma base de forma piramidal e uma coluna também piramidal, moldada em uma peça única de granito sintético com alguns insertos de alumínio. A Figura 4.11 ilustra o resultado desse estudo. Nessa figura, as partes em marrom são de granito sintético e as lilases são insertos de alumínio.

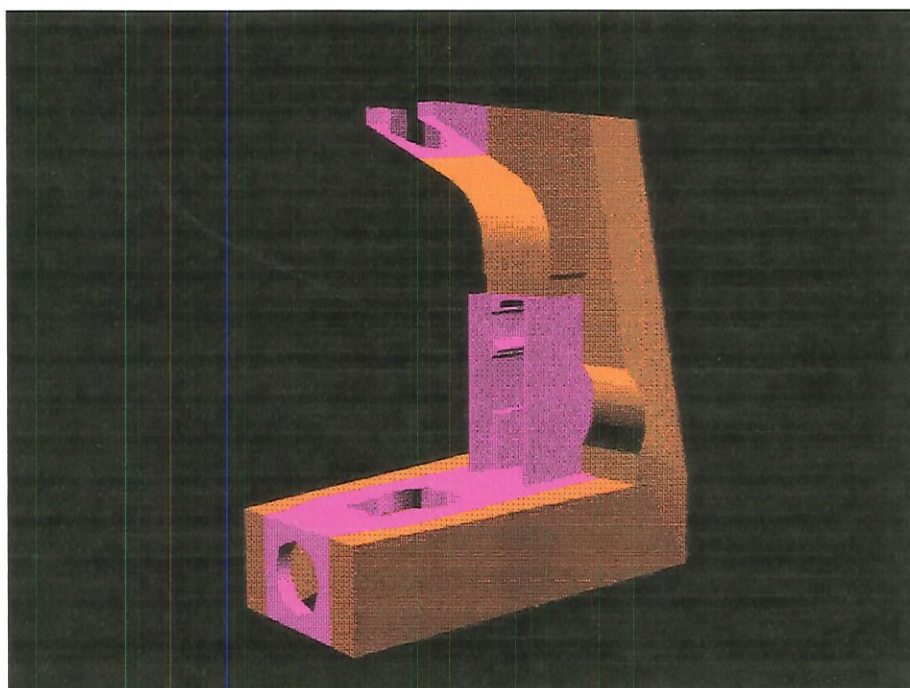


Figura 4.11 – Esquema do novo sistema estrutural.

Com o novo desenho definido passou-se para o desenho de conjunto do microscópio, onde utilizou-se a tecnologia de modelagem de sólidos em



CAD na confecção de um modelo tridimensional da peça desejada. Este modelo serviu para avaliação de aspectos estéticos e dimensionais bem como para observação da peça muito antes da sua finalização. Com o modelo pronto, uma análise por elementos finitos foi feita de modo a verificar as características de resistência e deformação da peça.

#### 4.2.1. Análise estrutural por elementos finitos.

Após o desenho da parte estrutural do microscópio, foi necessária sua análise estrutural para verificar se o novo material empregado e o novo desenho se adequariam a utilização proposta. Para tal estudo utilizou-se o *Software Ansys*, versão 5.2 para a análise estrutural, através da técnica de elementos finitos.

A análise por elementos finitos é um método numérico utilizado para a obtenção de soluções aproximadas de uma grande variedade de problemas de engenharia, inclusive a análise estrutural relatada neste trabalho. Em muitos problemas de engenharia ocorre a necessidade de se obter soluções aproximadas ao invés de soluções exatas, como por exemplo a obtenção da capacidade de carga de uma chapa com rigidez variada em vários pontos e vários furos irregulares, poluentes durante condições atmosféricas não uniformes ou o fluxo de algum líquido que passa por um orifício de formato arbitrário. Através de estudos, podem ser obtidas as equações e as condições de contorno que compõem o problema, embora nenhuma solução analítica simples possa ser encontrada. A aparente dificuldade mostrada nos exemplos citados advém do fato de que a geometria ou outra característica qualquer do problema é irregular ou arbitrária. Soluções analíticas para estes casos existem, e estes são os tipos de problemas típicos enfrentados por engenheiros e cientistas atualmente.

Possibilidades de resolução de problema deste tipo, existem. Uma possibilidade bastante empregada é a de assumir simplificações, ignorar



algumas dificuldades e reduzir o problema a algo que possa ser trabalhado de forma mais simples. Algumas vezes esta possibilidade de solução funciona, mas na maioria das vezes não é aplicável, ocorrendo imprecisão dos resultados, respostas incorretas ou indefinidas. Atualmente, encontra-se uma grande variedade de computadores acessíveis para resolver problemas desta natureza, e uma alternativa mais viável seria não simplificar os problemas ou dificuldades e obter uma solução numérica aproximada (HUEBNER, 1982).

Vários métodos de análise numérica foram desenvolvidos durante as últimas décadas, e um dos mais recentes e aplicados métodos em problemas de engenharia é o método dos elementos finitos, que foi usado neste trabalho. O método dos elementos finitos enfoca a solução de um problema como se a peça sob análise fosse construída por várias pequenas partes ou elementos interconectados. Um modelo em elementos finitos fornece uma aproximação das equações para cada elemento. Uma premissa básica do método em questão é a de que a solução de um problema pode ser analiticamente modelada ou aproximada, colocando-se no lugar do problema uma montagem de elementos. Como estes elementos podem ser unidos através de uma grande disponibilidade de modos, eles podem representar uma grande variedade de formas complexas.

Relativamente a funcionalidade do método dos elementos finitos pode-se comentar o seguinte.

Em uma região do espaço onde ocorre um problema de qualquer dimensão, as variáveis (pressão, temperatura, deslocamento, tensão ou outra variável qualquer) podem atingir infinitos valores pois são dependentes de cada ponto genérico do corpo ou problema. Conseqüentemente, o problema tem um número infinito de valores desconhecidos. A discretização em elementos finitos faz reduzir o problema em um número finito de valores desconhecidos, dividindo a região da solução em elementos e expressando

o campo de variáveis desconhecidas em termos de aproximações de funções em cada elemento. As aproximações de funções, chamadas de funções de interpolação, são definidas em termos de valores dos campos de variáveis em pontos específicos chamados nós. Assim sendo, a natureza da solução e o grau de aproximação buscado depende não somente do tamanho e número de elementos, mas também da função de interpolação selecionada. A solução de um problema usando o método dos elementos finitos segue uma ordem passo-a-passo, como se segue.

- ◆ Discretizar a região a ser solucionada, ou seja dividir a região em elementos.
- ◆ Selecionar as funções de interpolação, designando os nós para cada elemento e escolhendo o tipo de função interpolação que irá representar cada elemento.
- ◆ Encontrar as propriedades dos elementos.
- ◆ Reunir as propriedades dos elementos para obter as equações do sistema, combinando a matriz das equações que expressam o comportamento dos elementos que formam a matriz das equações que expressam o comportamento do sistema.
- ◆ Solucionar o sistema de equações.
- ◆ Fazer outros cálculos usando a solução da equação para fazer cálculos adicionais.

Com essa ferramenta computacional e a partir da geometria da peça, a estrutura do microscópio, modelada em CAD, pode ser construído um novo modelo no *software* de análise por elementos finitos com as características geométricas muito semelhantes ao feito em CAD.



O primeiro modelo gerado para a estrutura do microscópio óptico foi o de um sistema estrutural formado por dois materiais diferentes: granito sintético e insertos de alumínio. Os diferentes materiais estão mostrados na Figura 4.12, em lilás o granito sintético e em azul o alumínio. Para o material granito sintético a modelagem foi feita em sólidos (lilás) por se tratar de partes maciças e em quase todos os insertos em alumínio (azul) a modelagem foi feita em casca, exceto no inserto superior. A escolha entre diferentes métodos de modelagem é devida as características geométricas das peças em questão (insertos metálicos e partes em granito sintético). O modelo foi gerado com a preocupação de que cada parte modelada estivesse perfeitamente conectada às partes adjacentes, de modo que a peça como um todo pudesse ser considerada como uma peça única, conforme o projeto detalhado anteriormente.

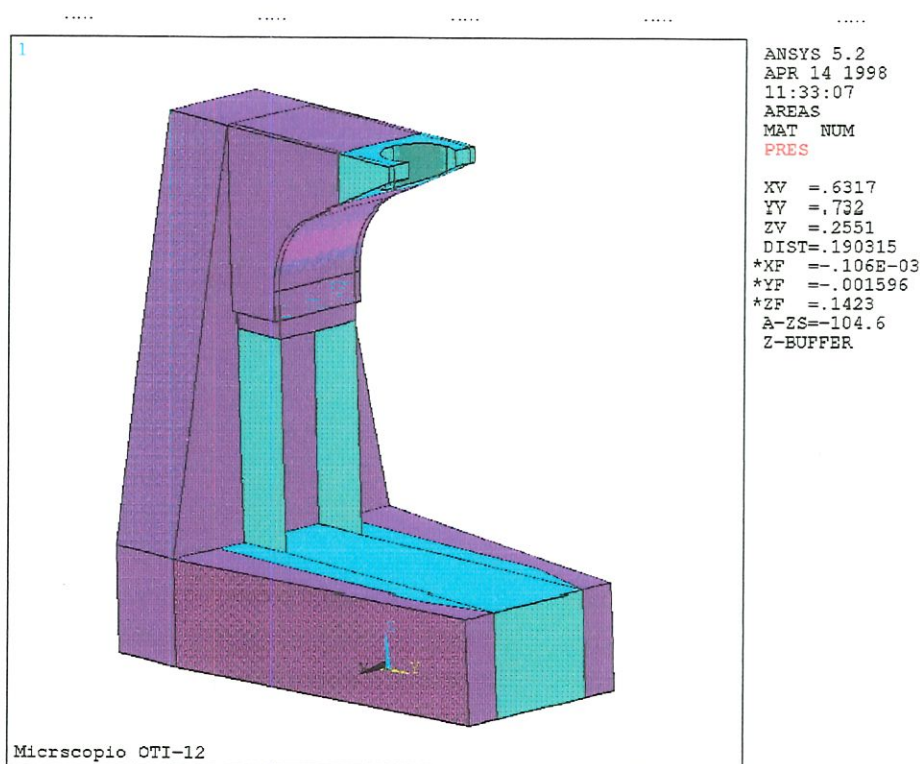


Figura 4.12 – Modelo de peça em granito sintético para análise por elementos finitos.



Com o modelo pronto e revisado, foram adicionadas as características dos materiais utilizados e gerada a malha de elementos para futura análise. Na etapa de geração de malhas foram utilizados elementos hexaédricos e tetraédricos para as partes em sólido e elementos quadriláteros para as partes em casca, os quais foram escolhidos devido às suas características de análise para os materiais utilizados e o tipo de modelo (sólido ou casca). A malha gerada para este modelo está mostrada na Figura 4.13.

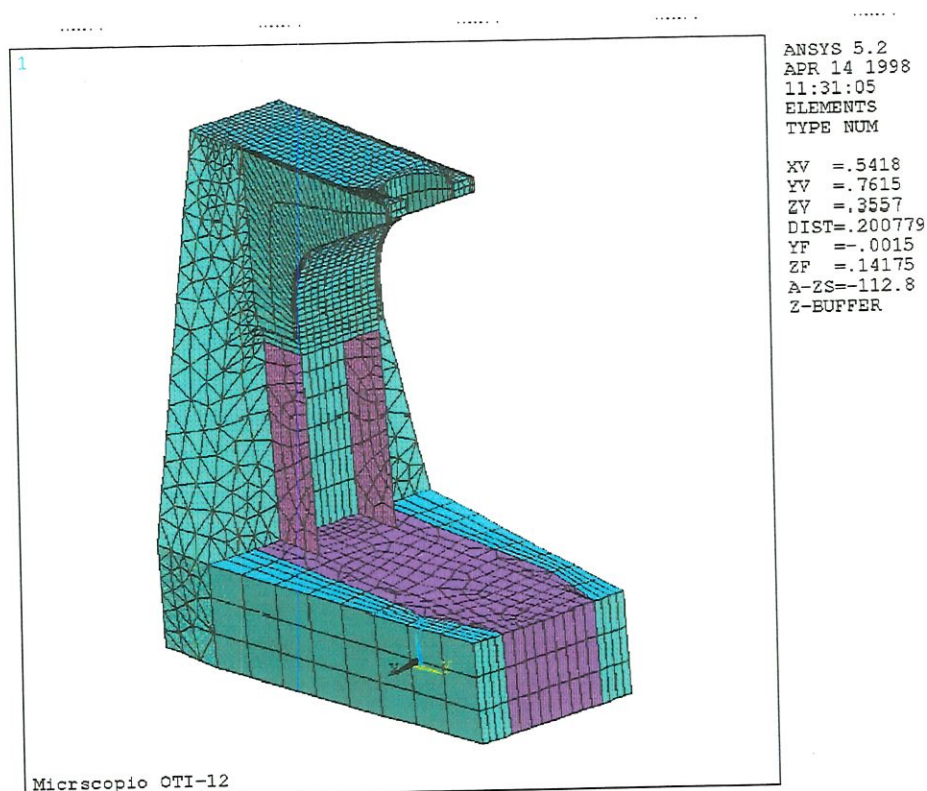


Figura 4.13 – Modelo com malha de elementos gerada.

Depois de gerar as malhas do modelo foram aplicadas as cargas a que um microscópio óptico eventualmente possa estar sujeito. Para este caso foi aplicada uma carga distribuída de 50N no inserto superior referente ao peso próprio da angular, binocular, revólver das objetivas e acessórios tais como câmaras CCD ou máquina fotográfica, acrescido de um coeficiente de segurança três vezes maior devido a uma possível utilização incorreta do microscópio pelo usuário. Juntamente com a carga no inserto superior foi aplicado um momento distribuído de 1,5 Nm no inserto da coluna, referente

ao peso próprio do sistema de ajuste de foco, mesa, condensador, *charriot* e, um coeficiente de segurança de uma e meia vezes maior. As vinculações foram aplicadas somente na parte inferior da peça, ou seja, a base. Um esquema das cargas aplicadas está mostrado na Figura 4.14.

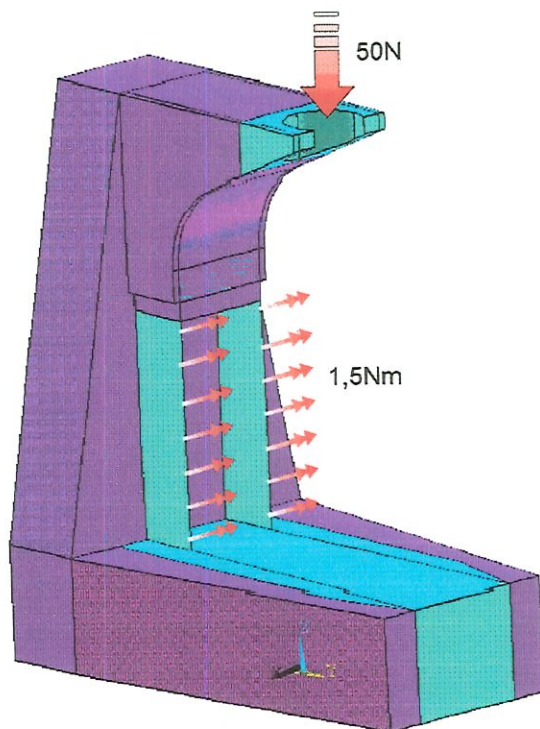


Figura 4.14 – Cargas aplicadas ao modelo para análise por elementos finitos.

Após a aplicação das cargas, seguiu-se a execução da rotina do programa para a solução do problema. Foram obtidas duas respostas gráficas para o problema, uma em deformação e outra em distribuição de tensão do sistema estrutural. A resposta da deformação sofrida pela estrutura do microscópio está mostrada na Figura 4.15, a qual mostra os dois casos, com e sem deformação, porém fora de escala, pois a deformação é imperceptível a olho nu. A resposta gráfica da distribuição de tensão na peça está mostrada na Figura 4.16, que ilustra uma distribuição por zonas de tensão delimitada por cores. Os resultados numéricos correspondentes a essas figuras estão mostrados na Tabela 4.2.

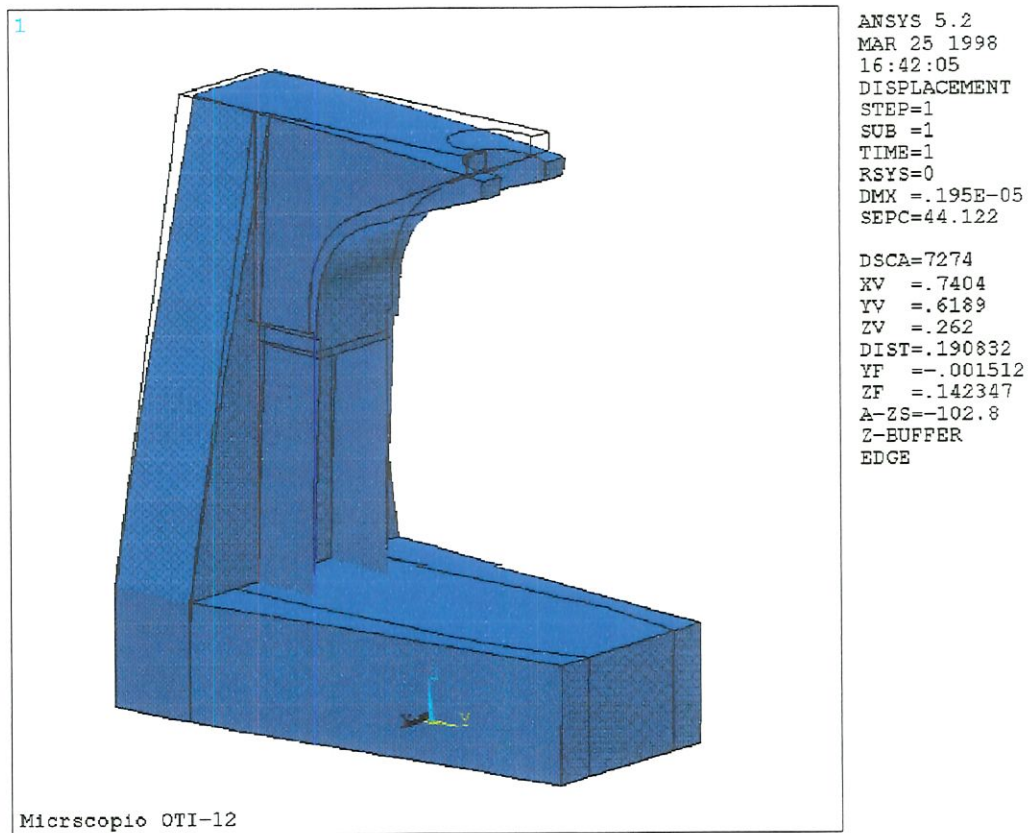


Figura 4.15 – Resposta gráfica de deformação estrutural do microscópio em granito sintético.



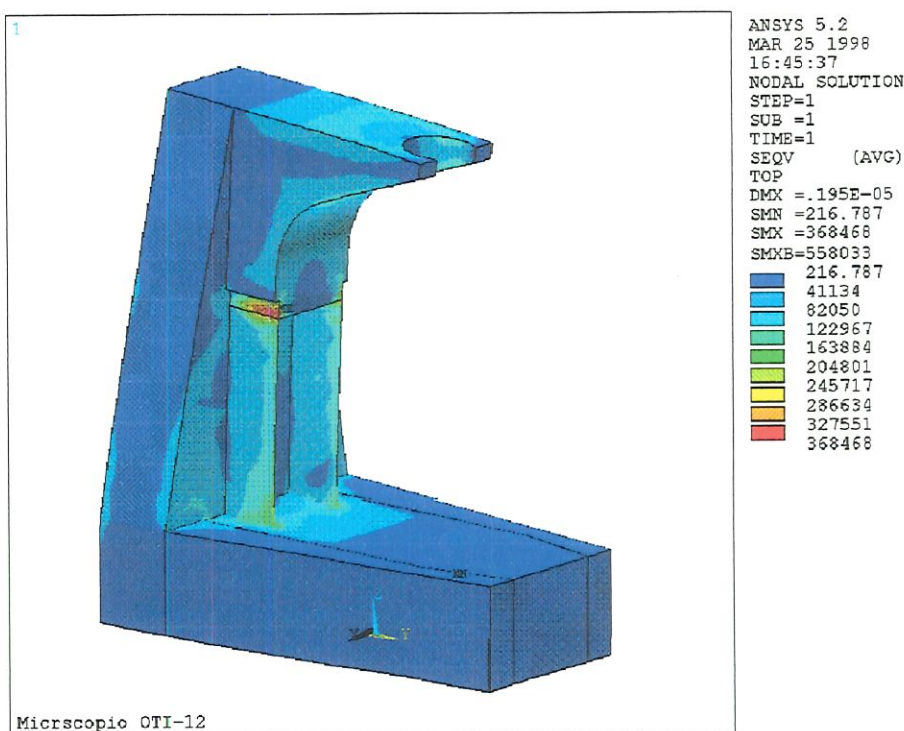


Figura 4.16 – Resposta gráfica da distribuição de tensão na estrutura do microscópio em granito sintético.

Tabela 4.2 – Resposta numérica obtida pela análise estrutural do microscópio em granito sintético por elementos finitos.

PROPRIEDADE	RESPOSTA
Tensão máxima (compressão)	0,37MPa
Deformação máxima	1,95 $\mu$ m

Para uma melhor avaliação da utilização do granito sintético como material estrutural, foi feita uma comparação da análise acima descrita com uma outra análise de uma peça equivalente com a mesma geometria porém feita de alumínio (material original do microscópio OTI-1).

Conceitualmente, uma estrutura de microscópio feita em alumínio deve ser fundida ou injetada, porém com a geometria proposta, a solução

viável seria fundida. Além disso, a proposta mais economicamente correta é a de uma peça com espessura constante de parede (casca).

Baseado nestes conceitos, foi modelada uma peça utilizando modelagem em casca, com espessura constante de 4mm para toda a estrutura. A este modelo foram dadas as características do alumínio, gerada a malha correspondente, aplicadas as mesmas cargas e vinculações do modelo anterior e rodada a rotina de solução do *software*. As respostas numéricas desta análise estão mostradas na Tabela 4.3 e as suas respostas gráficas de distribuição de tensões e deformação estão mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18.

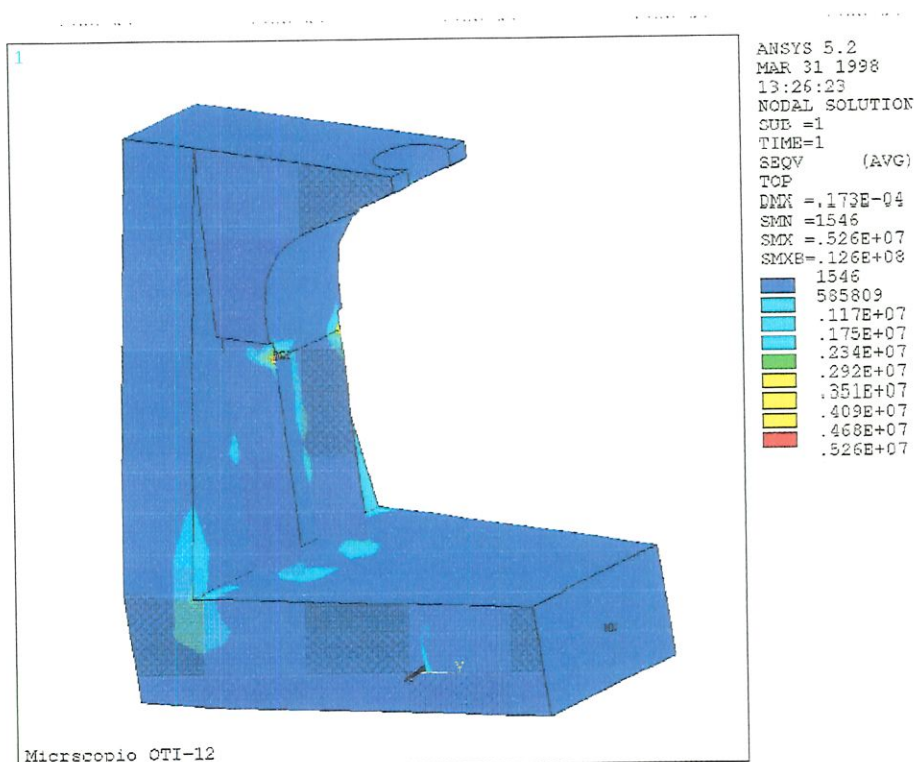


Figura 4.17 - Resposta gráfica da distribuição de tensão na estrutura do microscópio em alumínio.

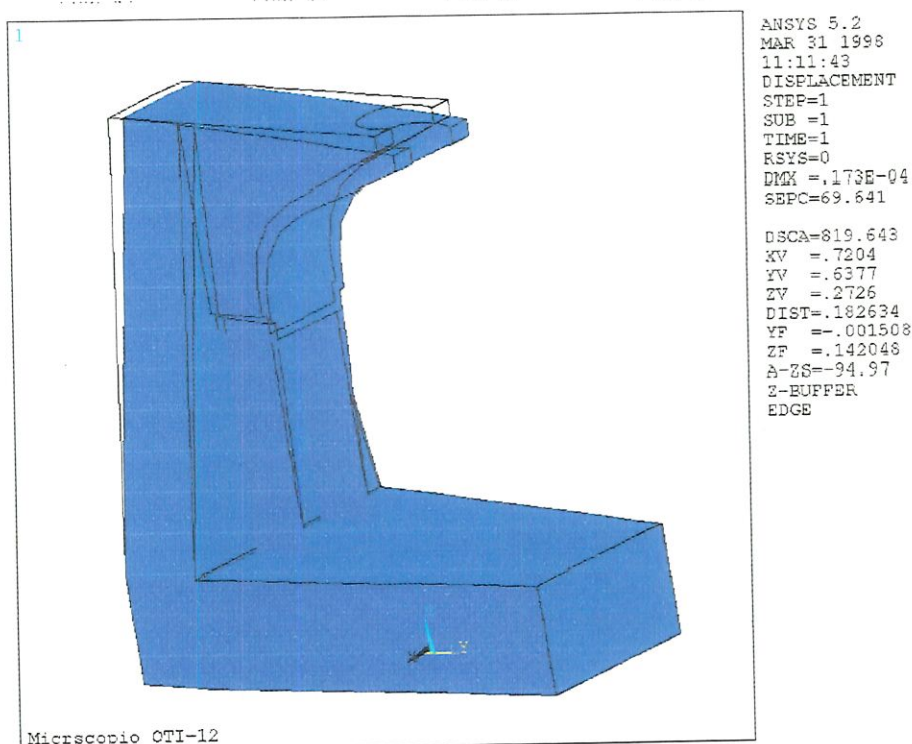


Figura 4.18 – Resposta gráfica de deformação estrutural do microscópio em alumínio.

Tabela 4.3 - Resposta numérica obtida pela análise estrutural do microscópio em alumínio por elementos finitos.

PROPRIEDADE	RESPOSTA
Tensão máxima (compressão)	5MPa
Deformação máxima	17,3 $\mu$ m

#### 4.2.2. Projeto do molde

No projeto do molde, devido a sua complexidade, necessitou-se da aplicação de técnicas de modelagem de sólidos por computador para uma melhor visualização das cavidades a serem preenchidas pelo granito sintético e avaliação da viabilidade técnica da moldagem da peça. Como o granito sintético tem características próprias de moldagem, um cuidadoso estudo do percurso a ser percorrido pelo material durante o preenchimento do molde foi efetuado. Para tal utilizou-se o modelo tridimensional descrito



anteriormente e um novo modelo composto por um cubo sólido ambos gerados em CAD. Foram aplicadas operações booleanas em ambos os sólidos de modo que o sólido da peça desejada fosse subtraído do sólido correspondente ao cubo, podendo obter-se desta forma a cavidade exata a ser preenchida pelo granito sintético na moldagem conforme mostra a Figura 4.19.

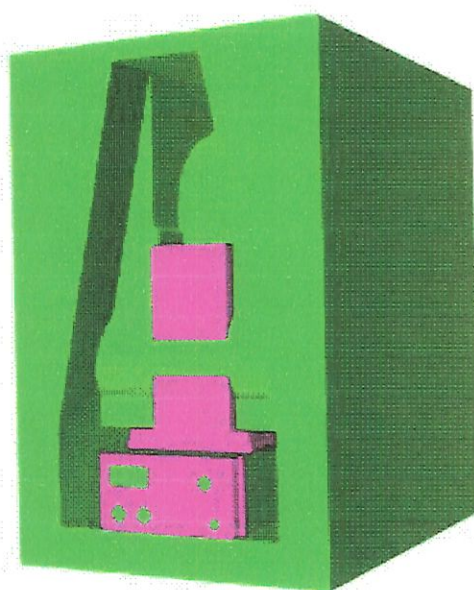


Figura 4.19 – Modelo em CAD do molde do sistema estrutural do microscópio.

Com o modelo sólido obtido, a ele foram aplicados vários cortes transversais usando a mesma técnica, de modo que pudesse ser analisado o percurso do material na moldagem, como mostrado na Figura 4.20. Após a verificação do percurso do material no molde e feitas as correções necessárias para a sua otimização, passou-se para a divisão do molde em partes com a finalidade de detalhar todas as suas peças constituintes.

O detalhamento das partes do molde foi feito de modo a facilitar ao máximo a desmoldagem da peça. Para que isso se efetivasse, durante o detalhamento seguiu-se uma lógica de desmontagem do molde para que suas partes soltassem, sem dificuldades da peça moldada. Além disso, um cuidado especial foi tomado para que o molde tivesse possibilidade de ser montado e desmontado várias vezes sem danificá-lo. Os desenhos de todas as partes do molde foram feitos utilizando CAD e todas elas foram construídas a partir de chapas de Nylon de 25mm de espessura.

A estrutura composta do microscópio em estudo foi moldada com insertos de alumínio, com uma tolerância de posição estreita entre eles. Para garantir um posicionamento controlado dimensionalmente foi projetado e fabricado um elemento posicionador externo mantenedor da tolerância entre dois desses insertos (superior e da coluna) que permitiu a obtenção da tolerância de perpendicularismo necessária entre as duas superfícies dos insertos. Este elemento posicionador está mostrado na Figura 4.21.

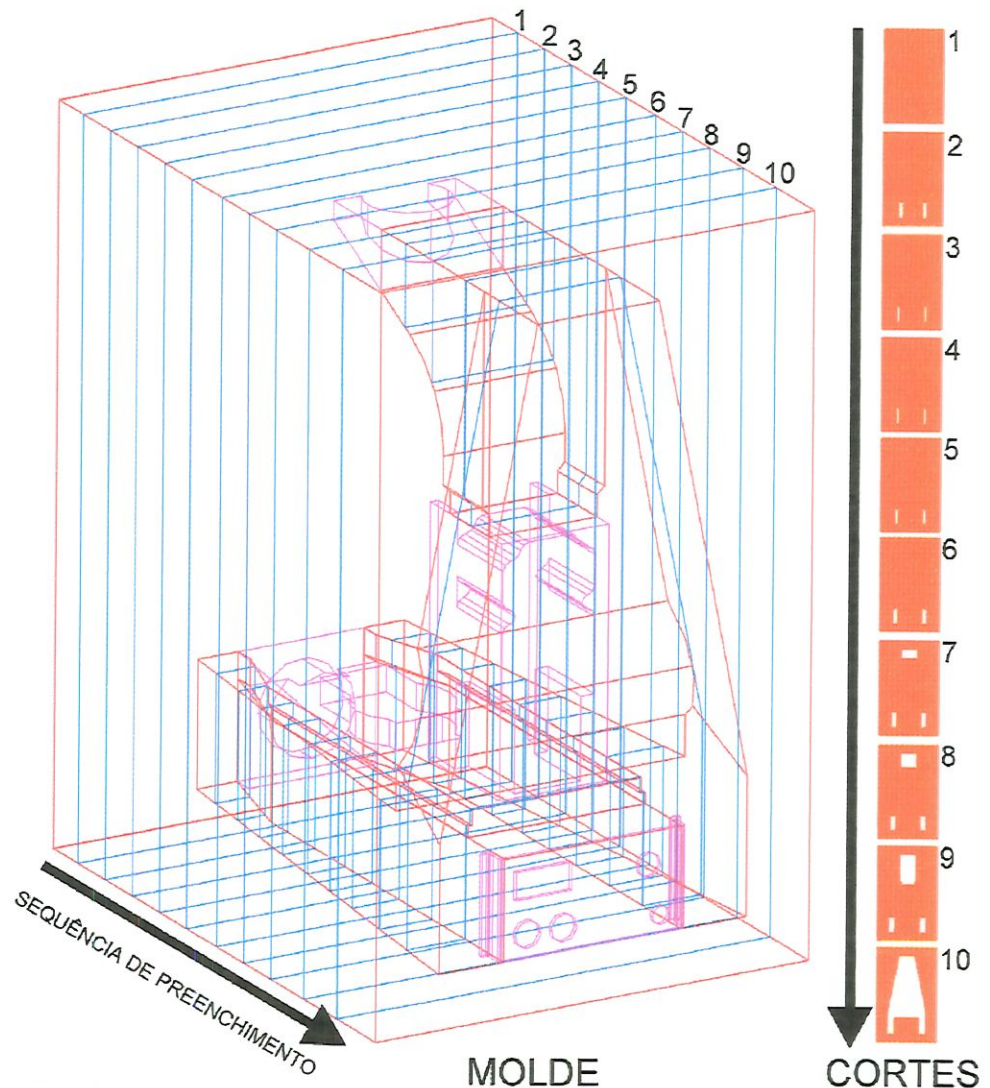


Figura 4.20 – Estudo do caminho percorrido pelo granito sintético durante a moldagem.



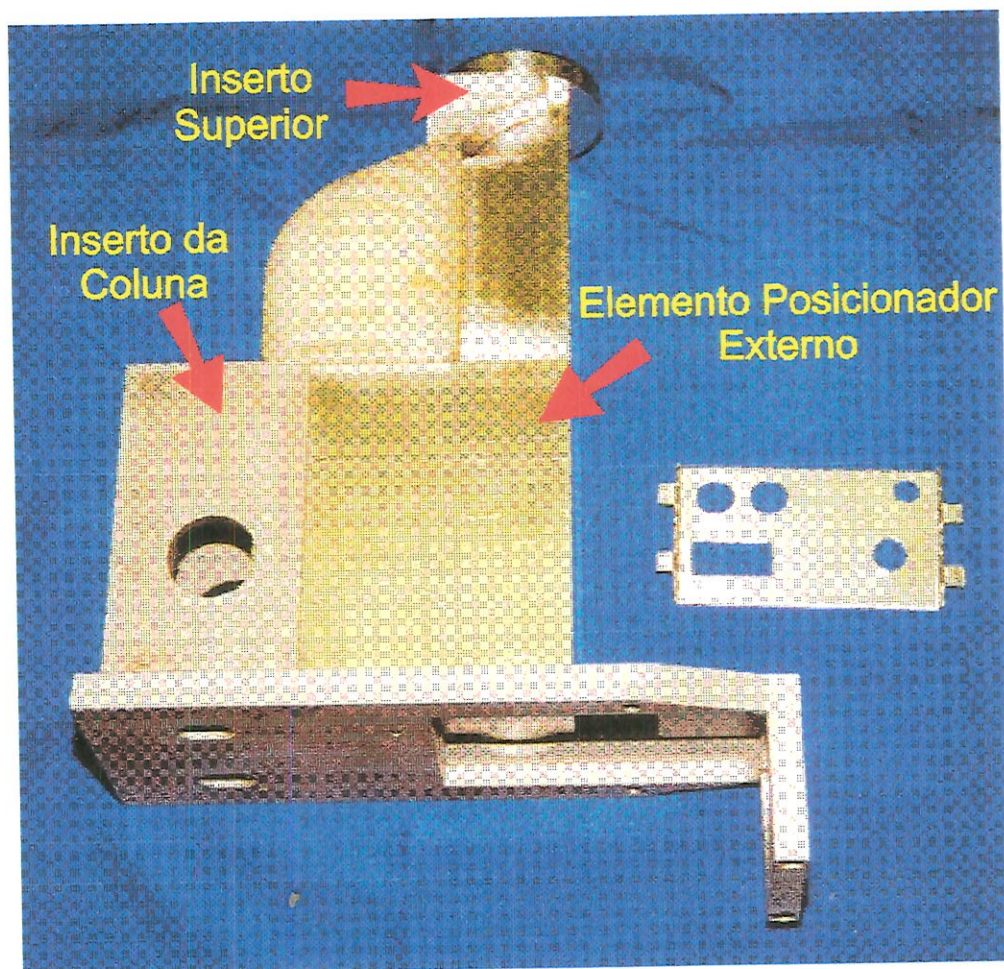


Figura 4.21 – Elemento posicionador externo.

Para que a desmoldagem fosse facilitada, foi utilizado graxa de silicone como desmoldante nos locais onde o molde entra em contato com o granito sintético. Por outro lado, a montagem e desmontagem do molde teve o auxílio de parafusos e buchas roscadas inseridas nas partes em Nylon<sup>®</sup>, mostradas na Figura 4.22. O molde, depois de montado é ilustrado pela Figura 4.23.





Figura 4.22 – Buchas roscadas inseridas nas partes do molde.

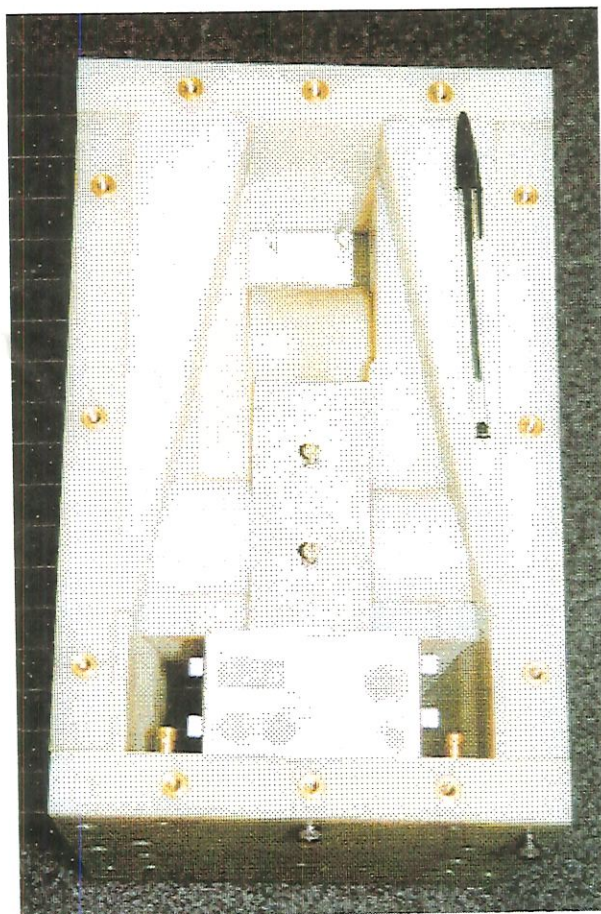


Figura 4.23 – Molde do sistema estrutural do microscópio.

As peças moldadas em granito sintético, raramente conseguem acabamento igual em todas as faces, pois o lado da peça por onde ocorre o vazamento fica exposto ao ambiente, não reproduzindo portanto nenhuma superfície do molde. Como a estrutura em estudo é moldada preenchendo

as cavidades pelo lado de trás da estrutura e esta face da peça é externa quando da montagem do microscópio, a desigualdade de acabamento entre esta e as outras superfícies do microscópio seria indesejável. Para evitar este problema foi idealizado uma tampa com furos cônicos para prover esse acabamento da face de enchimento do molde. Foi então adicionando um excesso predeterminado de material no molde durante a moldagem e a referida tampa foi prensada através de parafusos para fornecer o devido acabamento à esta face e o material em excesso pode ser extraído do interior do molde através dos furos cônicos, conforme ilustrado no esquema da Figura 4.24.

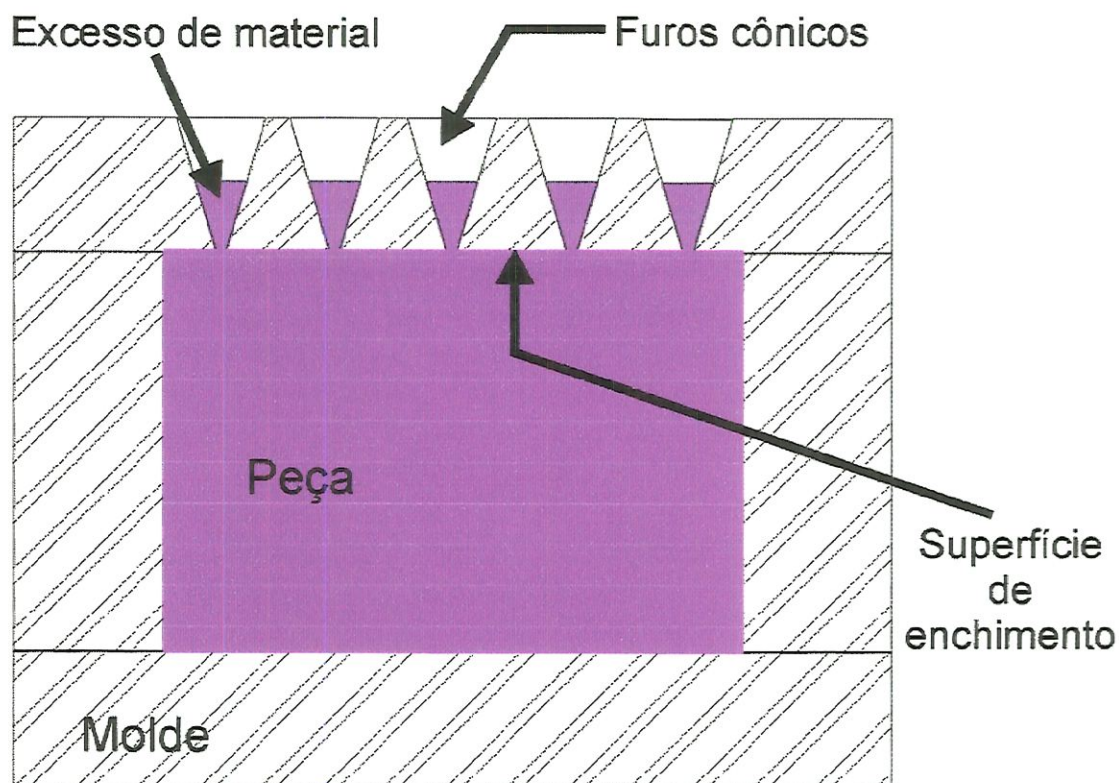


Figura 4.24 – Esquema da tampa para acabamento da peça.

#### 4.2.3. Moldagem da peça

Com o molde montado e adequadamente fixado na mesa vibratória, procedeu-se a moldagem da peça por etapas. Primeiramente foi feita uma mistura de britas pequenas (2mm), pó e resina. Com a mesa vibratória



ligada, esta mistura foi vazada em locais de possível falha de preenchimento, conforme mostrado na Figura 4.25. Após esta etapa, utilizando-se a mistura empregada na moldagem da base relatada no item 4.1, foi preenchido o restante do molde, deixando aproximadamente 1mm para ser preenchido com a mistura final. Esta etapa de preenchimento foi feita com o auxílio adicional de um vibrador manual conforme mostrado na Figura 4.26. A mistura final, destinada a dar o acabamento da parte de trás da peça foi feita com pó e resina. Adicionada em excesso, a mistura final foi prensada pela tampa perfurada por intermédio de parafusos de modo que o excesso de material saísse pelos furos cônicos feitos na tampa, conforme mostrado na Figura 4.27.

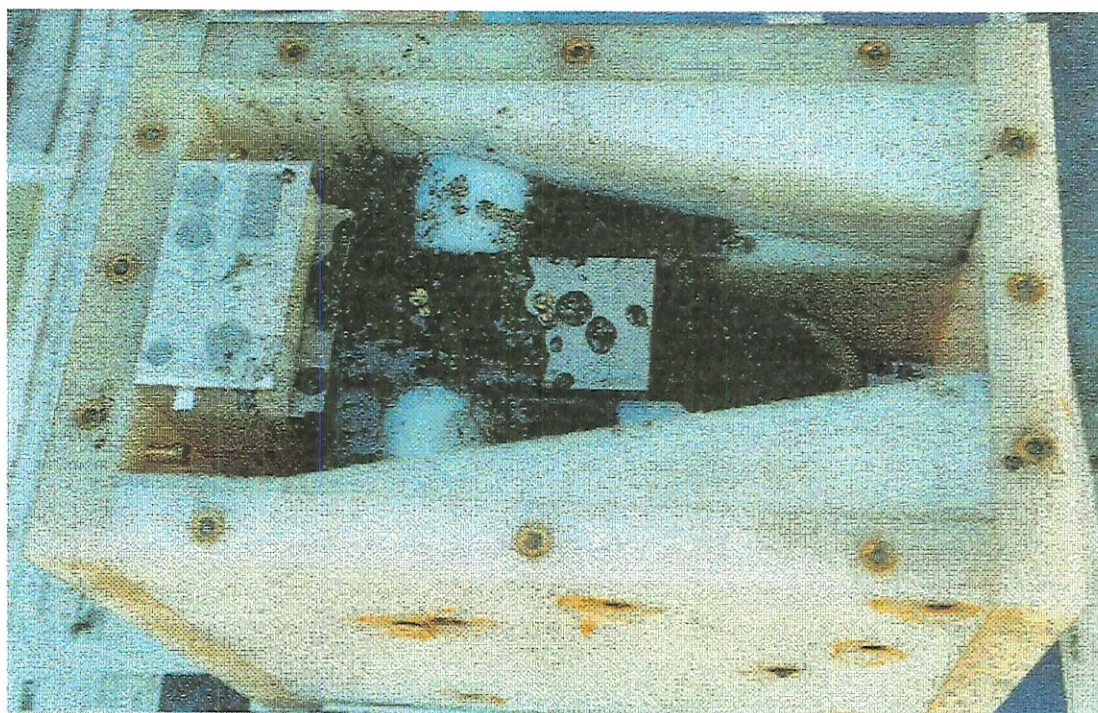


Figura 4.25 – Primeira etapa de preenchimento.



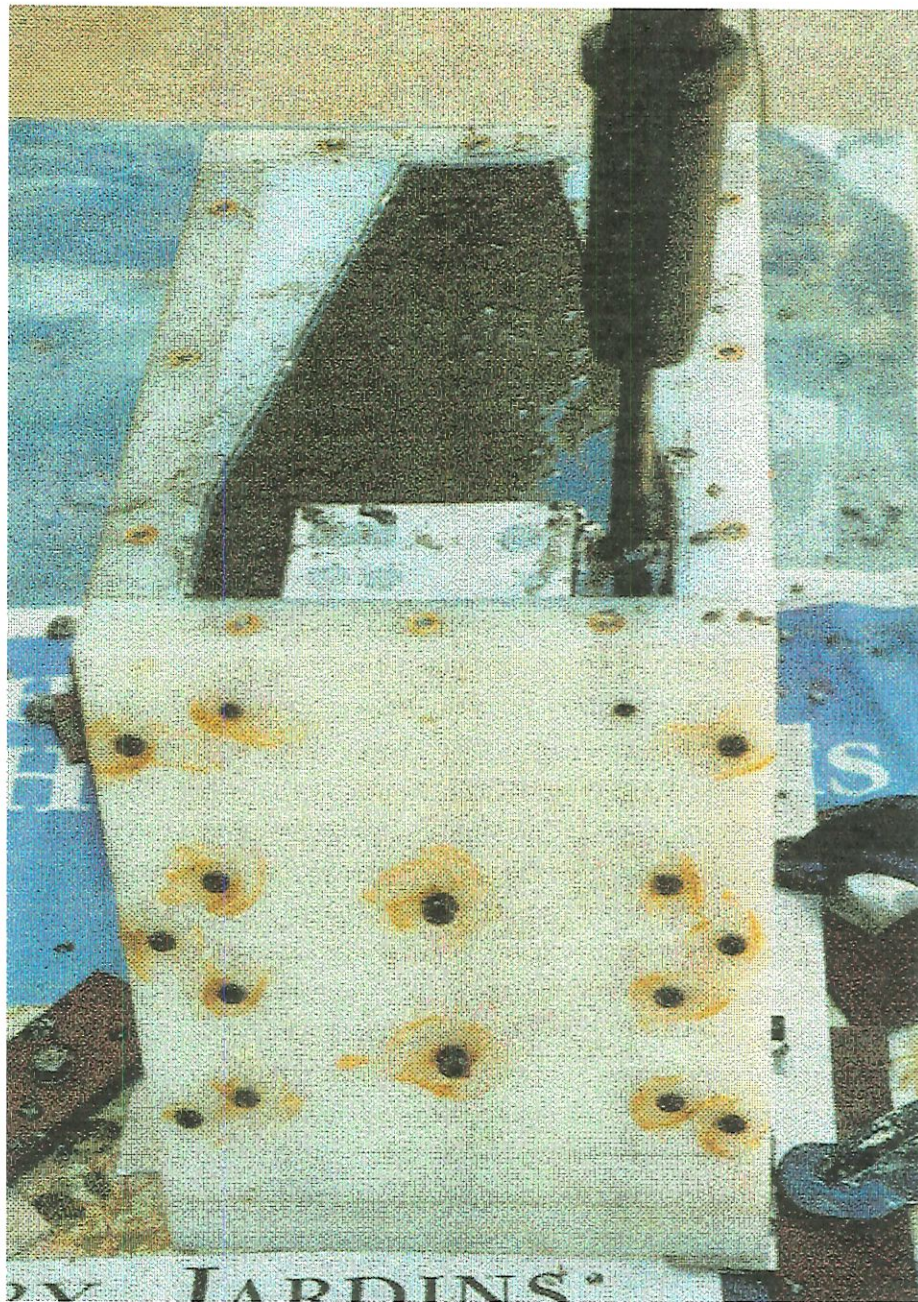


Figura 4.26 – Segunda etapa de preenchimento.



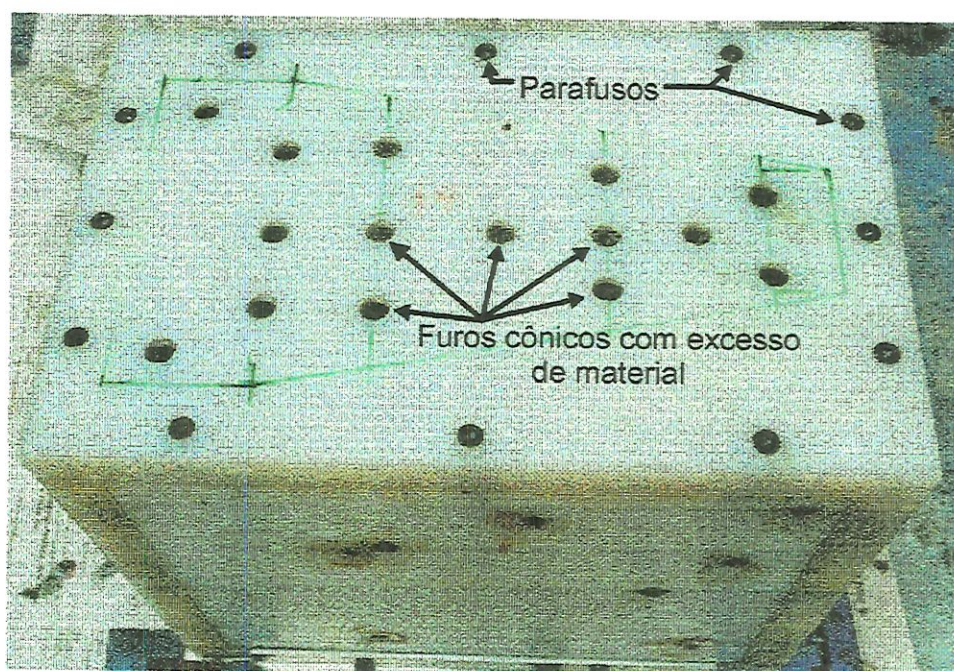


Figura 4.27 – Excesso de material na tampa do molde.

A mesa vibratória permaneceu vibrando durante aproximadamente 40 minutos, tempo suficiente para que as bolhas de ar saíssem do molde e após um tempo de cura de 24 horas, a peça foi desmoldada. Após alguns retoques de preenchimento a peça apresentou o acabamento como mostrado na Figura 4.28.





Figura 4.28 – Sistema estrutural final do microscópio moldado em granito sintético.

## **5. RESULTADOS**

A aplicação do granito sintético como material estrutural para o microscópio OTI-1 foi feita de modo gradual. Primeiramente, o material foi somente aplicado na confecção da base do microscópio, com o intuito de verificar a possibilidade da sua utilização para tal fim, bem como analisar a viabilidade da moldagem de peças pequenas com geometria complexa.

A primeira base moldada apresentou algumas falhas relacionadas com o processamento do material utilizado, pois nela não foi utilizado o vibrador adicional durante a moldagem. Além disso, o projeto do macho tinha certa complexidade que dificultou ainda mais sua desmoldagem. Na segunda peça moldada utilizou-se uma nova formulação de resina, porém a dificuldade de desmoldagem devido a complexidade do macho persistiu, pois o projeto do molde não foi modificado.

As duas peças moldadas mostraram todavia a viabilidade da moldagem de peças pequenas de geometria complexa, e com a posterior montagem de microscópios utilizando estas bases verificou-se que o granito sintético constitui um excelente substituto para o alumínio fundido, usado normalmente nessas aplicações, relativamente às vantagens desse material já comentadas. As características de funcionamento dos microscópios com as bases de granito sintético se mantiveram e a sua estabilidade dimensional melhorou sensivelmente.

Com esses resultados promissores passou-se para a extensão do uso do granito sintético em toda a estrutura do microscópio, ou seja, a moldagem

da base e coluna em uma única peça. O projeto do sistema estrutural do microscópio óptico foi feito com o suporte do método de elementos finitos que proporcionou um estudo comparativo entre a utilização do granito sintético e do alumínio como materiais estruturais da peça sob estudo.

Este estudo mostrou promissora a viabilidade de uso de ambos os materiais para a nova estrutura proposta, com várias características positivas a favor da utilização do granito sintético. Os dados da Tabela 5.1 mostram os valores numéricos resultantes da análise por elementos finitos das duas estruturas, granito sintético e alumínio, bem como as características dos materiais utilizados.

Tabela 5.1 – Comparativo entre materiais estruturais.

CARACTERÍSTICA	GRANITO SINTÉTICO	ALUMÍNIO
Tensão de compressão máxima	0,37MPa	5MPa
Resistência a compressão	100MPa (GRANITAN, s.d.)	180Mpa*
Tensão de tração máxima	desprezível	desprezível
Resistência a tração	15MPa (GRANITAN, s.d.)	0,9MPa
Deslocamento máximo	1,9 $\mu$ m	17 $\mu$ m

\* Valor de resistência a tração (inferior ao de resistência a compressão).

Os resultados mostrados na Tabela 5.1 confirmam uma boa segurança com relação à ruptura de ambos os materiais, e uma superioridade do granito sintético com relação a deformação máxima obtida na extremidade superior da peça. Destacando-se, o granito sintético apresentou uma deformação 88,8% menor do que a do alumínio, característica esta de extrema importância para estruturas de instrumentos ópticos de precisão, no caso, o microscópio.

Até a conclusão deste trabalho foi moldado um único sistema estrutural do microscópio formado pela base e coluna em uma única peça. A experiência anterior no projeto do molde da base e suas consequências de



desmoldagem ajudaram sobremaneira a concepção deste novo sistema o qual não apresentou nenhuma dificuldade de desmoldagem, mostrando um bom desenvolvimento no projeto do molde desde a primeira base moldada.

A parte de trás do microscópio (face de enchimento) foi moldada de modo que somente as extremidades dos furos cônicos devessem ser retocados. Os furos cônicos todavia, não foram suficientes para a retirada total do ar de dentro do molde, ocorrendo a formação de algumas bolhas grandes de ar entre a peça e a tampa perfurada, conforme mostrado na Figura 5.1. Após a desmoldagem da peça estas falhas foram corrigidas com o preenchimento dos vazios com o mesmo material.

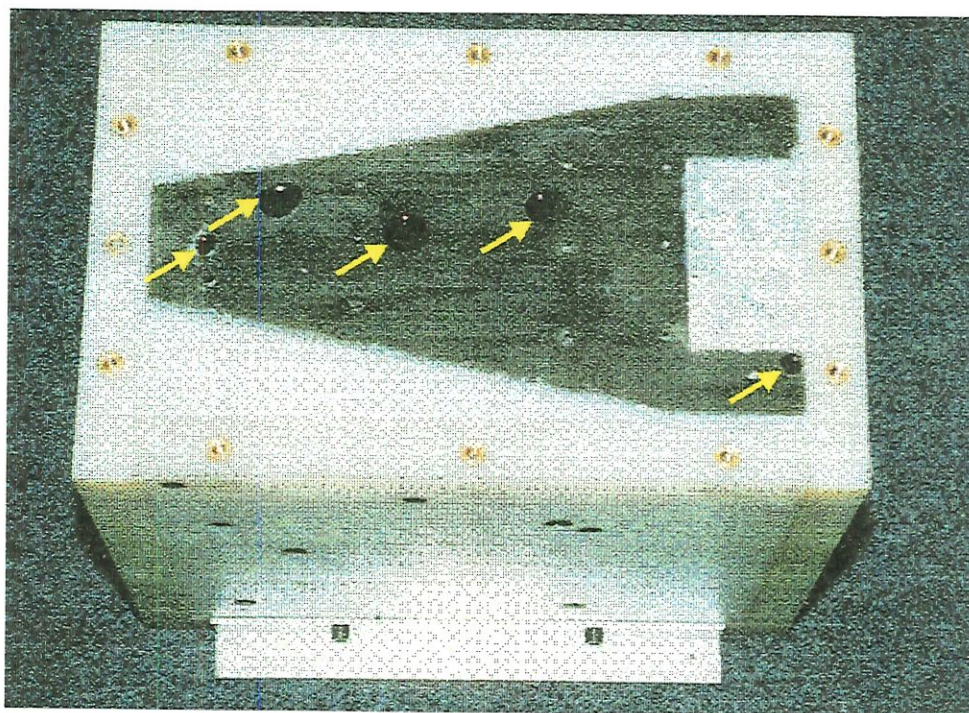


Figura 5.1 – Bolhas de ar formadas entre a peça e o molde.

Um outro fator observado foi que a prensagem da tampa perfurada com o excesso de material fez com que parte deste excesso fosse deslocada de forma irregular pela lateral do molde, dando uma aparência de concentração e coloração diferentes a esta superfície da peça, conforme mostrado na Figura 5.2. Estas diferenças não prejudicam de forma alguma a



estrutura moldada e pode ser minimizada e até evitada com cuidados relativamente à quantidade de material utilizado na fase final da moldagem.

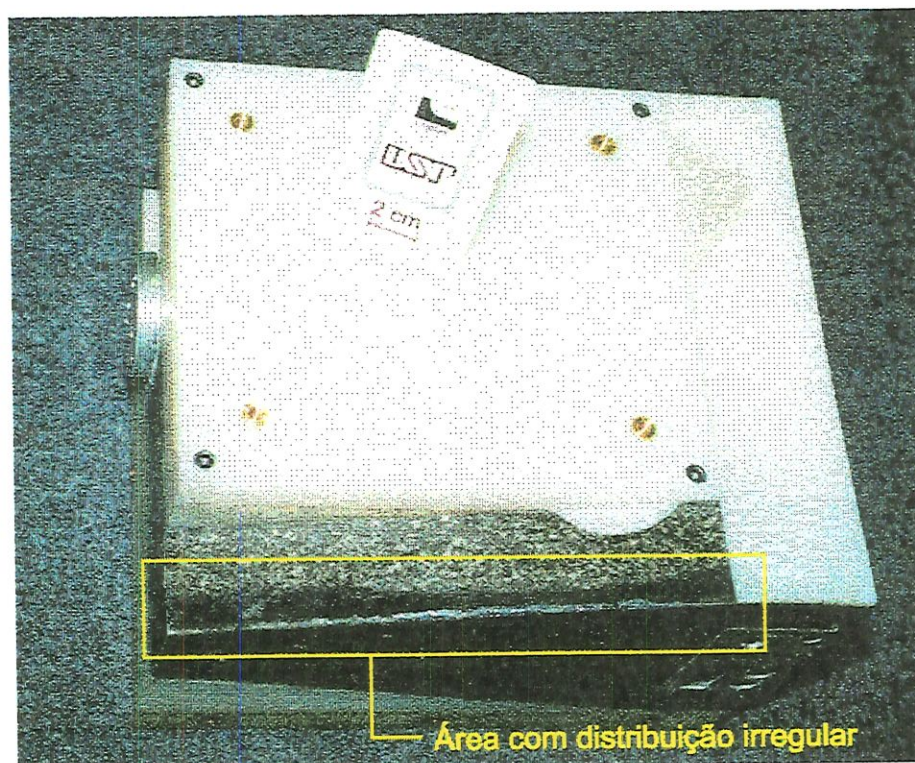


Figura 5.2 – Deslocamento de material pela lateral do molde.

Com a peça estrutural, base e coluna, pronta, ou seja desmoldada, nela foi montada a ultima versão do microscópio OTI-1. Durante essa fase, foi possível comprovar as características de montagem relatadas no item 3.3.1 (Projeto para Montagem – DFA), mostrando principalmente a maior rapidez de montagem devido a exclusão do alinhamento entre a base e coluna do projeto antigo.

Outra característica visivelmente comprovada foi a melhor estabilidade e rigidez obtidas para o novo microscópio montado. Sua estrutura robusta deu características estéticas melhoradas ao produto,

tornando-o assim um microscópio mais atraente que o antigo, conforme ilustra a Figura 5.3.



Figura 5.3 – Microscópio montado com o novo sistema estrutural.

Testes básicos de utilização e funcionamento foram efetuados após a sua montagem que comprovaram as suas características funcionais e qualidade de alinhamento óptico. Os testes foram realizados em períodos e ambientes variados e mantiveram os mesmos resultados.



## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Com o conhecimento adquirido durante o curso de pós graduação, na pesquisa bibliográfica, na experiência obtida na condução da parte experimental e na elaboração da parte dissertativa deste trabalho, foi possível chegar às conclusões deste trabalho bem como às sugestões para trabalhos futuros, ambas relacionadas ao projeto, produção e aplicação de granito sintético em equipamentos de precisão de um modo geral e em particular em microscópios ópticos.

Procurou-se neste trabalho apresentar a tecnologia e a metodologia da aplicação, projeto e análise de um sistema estrutural de um microscópio feito de granito sintético. Baseado em um projeto quase pronto adquirido pelo MEC/MCT, buscou-se a adequação de tecnologias já conhecidas, materiais e processos de fabricação desenvolvidos pelo grupo de pesquisa envolvido neste projeto de forma a otimizar o produto já existente, dando-lhe características melhoradas e únicas.

A análise das características construtivas do microscópio original revelou grande complexidade construtiva em alguns de seus sistemas bem como uma grande dificuldade relativa à sua montagem e ajuste para funcionamento. A aplicação da técnica de projeto para montagem (DFA), utilizada neste projeto, mostrou um aumento de eficiência em montagem de 10,3 pontos percentuais para a nova proposta do sistema estrutural. Isso foi comprovado durante a montagem do microscópio na sua versão final, mostrando a utilidade da técnica DFA e a eficiência de montagem do novo sistema projetado. Juntamente com o DFA, a aplicação da técnica de análise

de efeitos e modos de falhas mostrou a grande fonte de falhas que pode ter o produto que depende muito de ajustes pós montagem para seu funcionamento.

Durante o projeto das peças em granito sintético, ficou clara a utilidade das tecnologias CAD adquiridas e aplicadas no desenvolvimento dos sistemas avaliados. O projeto peça/molde foi promissora e facilitado bem como a sua precisão foi melhorada com o uso de modelagem de sólidos em CAD, mostrando uma grande eficiência em tempo de projeto.

Juntamente com as facilidades do CAD, a utilização de análise estrutural por elementos finitos como ferramenta computacional de projeto, simulou e antecipou a funcionalidade do primeiro protótipo do sistema estrutural do microscópio. Com esta técnica de simulação computacional pode ser feita uma comparação entre o material estrutural usado no projeto antigo (alumínio) e o granito sintético, cujas respostas comprovaram a superioridade do novo material.

A metodologia de concepção e projeto dos moldes desde a primeira base até o sistema estrutural completo, mostrou um desenvolvimento contínuo e satisfatório, culminando em uma peça de geometria bastante complexa porém sem dificuldades de moldagem e desmoldagem. A moldagem da peça por etapas através de misturas de composição diferentes, mostrou ser uma alternativa rápida e garantida para preenchimento de partes complexas e de moldagem difícil, dando ao projetista uma liberdade maior na escolha da geometria da peça a ser moldada.

Na última moldagem efetuada foi obtido um protótipo do sistema estrutural conforme esperado e simulado pelos métodos computacionais. Sua característica robusta mostrou ser uma peça rígida o suficiente para evitar deformações indesejadas para o microscópio como um todo, dando



maior confiabilidade e atratividade ao produto. O microscópio montado mostrado em sua versão final, sob este contexto, mostrou um alinhamento óptico perfeito e com maior facilidade de obtenção, fazendo com que o microscópio funcionasse corretamente.

O presente trabalho certamente constitui o primeiro passo comprovadamente positivo que confirma a aplicabilidade do granito sintético para estruturas de equipamentos ópticos de precisão. Trabalhos futuros nessa direção são certamente necessários e devem ser recomendados a fim de expandir e melhorar esse tipo de aplicação. Assim sendo, seguem-se sugestões de estudos relacionados aos seguintes tópicos.

- ◆ Desenvolvimento de técnicas de projeto de moldes e moldagem de peças em granito sintético para produção em grande escala.
- ◆ Conceituação e procedimentos para produção em série de peças feitas em granito sintético.
- ◆ Desenvolvimento de técnicas computacionais para obtenção de um empacotamento otimizado para obtenção de peças mais uniformes.
- ◆ Comparação entre ensaios e os dados obtidos pela simulação em elementos finitos.
- ◆ Análise dinâmica por elementos finitos e respectivos ensaios para estudos da influência do amortecimento interno do material no desempenho do produto.
- ◆ Estudo ergonômico e funcional detalhado, com auxílio de usuários do produto.

- ◆ Propostas de novas técnicas de moldagem para obtenção de peças com acabamento superficial igual em todas as faces, inclusive a face de enchimento.
- ◆ Investigação de uma gama maior de resinas e suas respectivas análises de peças.
- ◆ Investigação de pigmentos para o granito sintético, para obtenção de peças coloridas prontas, sem a necessidade de pintura posterior.
- ◆ Investigação de componentes a serem adicionados ao material antes da moldagem com a finalidade de facilitar sua moldagem e evitar o aparecimento de bolhas de ar no interior da peça.



## **BIBLIOGRAFIA:**

BEYER H. e RIESENBERG H - *Handbuch der mikroskopie*. BEB Verlag Technik, Berlin.

BEYER, H. - *100 Jahre ABBEsche Mikroskop-theorie und ihre bedeutung für die praktische mikroskopie*. Jenaer Rdsch, 18 19973 s. 159-163.  
Feingerätetechnik 22 (1973) S. 147-150.

BLANJAAR. (1997) *Universiteitmuseum – Universiteit Utrecht*.  
<http://www.museum.ruu.nl/bzkinfo.html>.(20 abr.).

BOWMAN, I. A.(1997) *Microscope gallery – Makers and their instruments*.  
<http://www.utmb.edu/mml/scopes/makers.htm>

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. (1995); *Mecânica dos solos*, Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos. /Apostila/

BURTON, P. (1997) *Talyrond 262*. <http://burton.digiweb.com/prod03.htm>. (23 abr.)

CIBA ESPECIALIDADES QUÍMICAS LTDA. *Araldite® resinas epoxi para ferramentas*, São Paulo, s.d., 4p.

CIBA-GEIGY QUÍMICA S.A. *Aspects*, Santo Amaro, jan. 1991, 24p.

CRANFIELD MOULDED STRUCTURES LIMITED. *Granitan S100 for machine structures*, Cranfield, England, Cranfield Institute of Technology, s.d., 7p.

DESIGNING machines in granite composites. *Engineering material & design*, v.31, n.6, p. 46-48, Jun. 1987.

GARDNER J.W. e HINGLE H. T. - *From instrumentation to nanotechnology*, Gordon and Breach Publishers, v.1, 1997.

- GRANITAN ENGINEERING. *Sinthetic granite GRANITAN*. Thun, Switzerland, s.d. 20p.
- HABESCH, R. *Curso de manutenção em microscópio óptico*, Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1996.
- HELMAN, H.; ANDERY, P.R.P. *Análise de falhas (aplicação dos métodos FMEA-FTA)*. Fundação Chistiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 156p., 1995.
- HEUBNER, K. H.; THORNTON, E.A. *The finite element method for engineers* New York, USA, WI Publishing, cap.1, 1982.
- HOECHST. *Especialidades ALPOLIT®*, Resinas poliéster não saturadas, s.d., 4p.
- JONES, E. T. (1998). *History of the light microscope*.  
[http://www.utmem.edu/personal/thjones/hist/hist\\_mic.htm](http://www.utmem.edu/personal/thjones/hist/hist_mic.htm) (1 abr.).
- JUSTIN, V. (1998). *The Gemmary*.  
<http://www.gemmary.com/reb/instcat/micro.htm>. (20 abr.).
- KINGSLAKE, R. *Applied optics and optical engineering*, Academic Press, New York, USA, 1967.
- KÖHLER, H. - *A modern presentation of Abbe's theorie of image formation in the mikroscope*. Zeiss- Inform.,. Obrkochen 26(1982) S.36-39 e (1983) s. 14-17.
- NICKLAU, R.-G. *Reaktionsharzbeton für den Werkzeugmaschinenbau*. Carl Hanser Verlag, München, Alemanha, 1987.
- NIEMANN, G. (1971) *Elementos de máquinas*. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, v.1, 220p.
- OCTAVO, C. (1998). *Robert Hooke Micrographia*.  
<http://www.octavo.com/collection/hkemic.html>. (20 abr.).
- OLLIVER, C.W. *The inteligent use of the microscope*, Chapman & Hall Ltd, London, UK, 1951.



- PAYNE, B. O. *Microscope design and construction*, Cook, Troughton & Simms LTD, York, England, 1954.
- PENTEADO L.A.A.; PURQUERIO B. de M. *Aplicação de granito polimérico na engenharia mecânica de Precisão*. ENCUESTRO ARGENTINO DE CERAMICO Y REFRACTÁRIOS,2. San Carlos de Bariloche, Argentina.1993.
- PENTEADO, L. A .A . (1996)*Torno de ultraprecisão: revisão de projeto mecânico e estrutural*. São Carlos,. Dissertação - EESC - USP.
- POLLY, D.; GURALNICK, R. P. (1995). *Enter evolution: theory and history*. <http://www.ucmp.berkeley.edu/history/evolution.html>. (21 abr.).
- PURQUERIO, B. de M. *Granito sintético para estruturas de máquinas e equipamentos de precisão*. CONGRESO BRASILEIRO DE POLÍMEROS,1. São Paulo, 1991.
- PURQUERIO, B. M.; *Granito sintético*, São Carlos, LAMAFE, 1988. /Apostila/
- SALJÉ, E.; GERLOFF, H.; MEYER, J. *Comparision of machine tool elements made of polymer concrete and cast iron*. Annales of the CIRP, vol. 37, p. 381-384, jan. 1988.
- SCHULZ, H. *Reaktionsharzbeton im machinenbau*. Carl Hanser Verlag, München, Alemanha, 1988.
- SHIGLEY, J. E. MISCHIQUE, C. R. *Mechanical engineering design*, McGraw-Hill, 5° ed., 1989.
- SLOCUM, A. H. *Precision machine design* Prentice Hall, New Jersey, USA, 1992.
- SMITH, S. T. e CHETWIND D. G.- *Ultraprecision mechanism design*. Gordon and Breach Publishers,v.2, 1992.
- SPUR, G. *Otimização térmica através de projeto e técnicas compensatórias*. Trad. por Norberto p. Lima. Máquinas Ferramentas , p. 46-67. set. 1994.
- STEWING. *Polymert<sup>®</sup> mineral cast in machine construction*, Raunhein, s.d.,3p.

- STRONG, J. *Procedures in applied optics*, Marcel Dekker Inc. New York, USA, 1989.
- SYNCONCRETE ENGINEERING & CONSULTING A G. (1993). *The invention*, Interlaken Schweiz, Switzerland, 9p.
- SYNCONCRETE ENGINEERING & CONSULTING A G. (1994). *The revolution in machine construction*, Business, Interlaken Schweiz, Switzerland, 2p.
- SYNCONCRETE ENGINEERING & CONSULTING A G. (s.d.) *Mineral cast – facts and figures*, Castin machine tools, Interlaken Schweiz, Switzerland, s.d., 9p.
- ULLMAN, D.G.; *The Mechanical Design Process*, McGraw-Hill nc., 1992.
- WIEKE, H.; GROPP, H.; GEßLER, W. (1998) *O concreto polimérico já é usado também em estruturas de dispositivos de fixação*. Máquinas e Materiais, p18-26, jan.
- YODER, P. R. *Opto mechanical system design*. Marcel Dekker Inc., New York, USA, 2° ed., 1993.



## **Anexos**

Exemplo de uma tabela de DFA utilizado no projeto do microscópio.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	Nome da Montagem
No. da Peça	Número de vezes que a operação é feita consecutivamente	Código de Manuseio Manual (dois dígitos)	Tempo de manuseio manual por componente	Código de inserção manual (dois dígitos)	Tempo de inserção manual por componente	Tempo de operação (segundos) (2) x [ (4) + (6) ]	Custo de operação 0,4 x (7)	Estimativa do número mínimo de peças	Nome da peça
1	1	33	2,51	08	6,5	9,01	3,604	1	Tampa
2	2	60	4,8	07	6,5	22,6	9,04	2	Parafuso do Módulo de iluminação
3	1	30	1,95	08	6,5	8,45	3,38	1	Módulo de iluminação
4	1	00	1,13	00	1,5	2,63	1,052	1	knob
5	1	40	3,6	01	2,5	6,1	2,44	1	Porca do potenciômetro
6	1	30	1,95	08	6,5	8,45	3,38	1	Potenciômetro
7	7	60	4,8	96	12	117,6	47,04	7	Solda
8	1	30	1,95	08	6,5	8,45	3,38	1	Transformador
9	4	60	4,8	96	12	67,2	26,88	4	Soldas
10	1	60	4,8	07	6,5	11,3	4,52	1	Parafuso de terra
11	2	60	4,8	07	6,5	22,6	9,04	2	Parafusos da placa
12	1	83	5,6	00	1,5	7,1	2,84	1	Placa de fusível
13	1	01	1,43	00	1,5	2,93	1,172	1	Cabo
14	1	30	1,95	08	6,5	8,45	3,38	1	Interruptor
15	1	30	1,95	00	1,5	3,45	1,38	1	Base principal
16	1	30	1,95	08	6,5	8,45	3,38	1	Tomada
17	2	60	4,8	07	6,5	22,6	9,04	2	Parafuso de transformador
						337,37	134,95	29	Eficiência: 3*NM/TM=0,257 25,7%



Exemplo de uma tabela de FMEA utilizado no projeto do microscópio.

ITEM	NOME DO COMPONENTE/ PROCESSO	FUNÇÃO DO COMPONENTE/ PROCESSO	FALHAS POSSÍVEIS			ATUAL				AÇÃO CORRETIVA		RESULTADO					
						CONTROLES ATUAIS	ÍNDICES					RECOMENDAÇÕES	TOMADA	ÍNDICES REVISTOS			
			MODO	EFEITO(S)	CAUSA(S)		O	G	D	R	O			G	D	R	
1	Coluna	Suportar a mesa, o sistema de foco, revolver, angular e binocular	Deformação	Desalinhamento óptico	Espessura de parede inadequada	Nenhum	4	10	9	800	Análise FEA	Mudança no projeto	2	10	9	100	Fernando
				Iluminação inadequada	Material inadequado	Nenhum	5	10	8	800	Alteração do material	Nova especificação de material	2	10	8	200	Benedito
				Qualidade de imagem ruim	Carga subestimada	Nenhum	3	10	4	800	Análise das cargas	Cargas analisadas	1	10	4	400	Luis
					Uso inadequado	Nenhum	8	10	9	900	Treinamento do cliente	Elaboração de manual	6	10	9	500	Fernando
			Fratura	Inutilização do equipamento	Espessura de parede inadequada	Nenhum	4	10	10	100	Análise FEA	Mudança no projeto	2	10	10	100	Fernando
					Carga subestimada	Nenhum	3	10	4	800	Análise das cargas	Cargas analisadas	1	10	4	100	Luis
					Material inadequado	Nenhum	5	10	8	800	Alteração do material	Nova especificação de material	2	10	8	100	Benedito
					Uso inadequado	Nenhum	8	10	9	900	Treinamento do cliente	Elaboração de manual	6	10	9	500	Fernando
<b>Probabilidade de Ocorrência (O)</b>			<b>Gravidade (G)</b>			<b>Probabilidade de Detecção (D)</b>				<b>Risco (R)</b>							
Muito remota 1			Apenas perceptível 1			Muito alta 1				Baixo 1a135							
Muito pequena 2			Pouca importância 2,3			Alta 2,3				Moderado 136a500							
Pequena 3			Moderadamente grave 4a6			Moderada 4a6				Alto 501a1000							
Moderada 4,5,6			Grave 7,8			Pequena 7,8											
Alta 7,8			Extremamente grave 9,10			Muito pequena 9											
Muito alta 9,10						Remota 10											