*Uso do Método dos Elementos Finitos
na Avaliação das Propriedades
Mecânicas de um Fixador Externo*

*Autor: Cláudio César Rodrigues Vilarinho
Orientador: Prof. Dr. José Batista Volpon
2000*

**BIOENGENHARIA
USP**

Curso de Pós-Graduação Interunidades Bioengenharia

*Escola de Engenharia de São Carlos
Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto
Instituto de Química de São Carlos*

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
FACULDADE DE MEDICINA DE RIBEIRÃO PRETO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

**USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE UM FIXADOR EXTERNO**

CLAUDIO CESAR RODRIGUES VILARINHO

Ribeirão Preto

2000

Class.	TESE-EESC
Curr.	6259
Tombo	T0258/00

At 1176588

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

Vilarinho, Claudio Cesar Rodrigues

Uso do Métodos dos Elementos Finitos na avaliação das propriedades
mecânicas de um fixador externo.

Dissertação (Mestrado). – Área Interunidades em Bioengenharia da
EESC/FMRP/IQSC – Universidade de São Paulo, 2000

Orientador: Prof. Dr. José Batista Volpon

1. Biomecânica. 2. Elementos Finitos. 3. Fixador Externo.

I. Título.

Universidade de São Paulo
Curso de Pós-Graduação Interunidades Bioengenharia
Escola de Engenharia de São Carlos
Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto
Instituto de Química de São Carlos

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO ALUNO CLÁUDIO CÉSAR RODRIGUES VILARINHO APRESENTADA AO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERUNIDADES BIOENGENHARIA -
EESC/FMRP/IQSC-USP, EM 26/09/2000.

Prof. Dr. José Batista Volpon (orientador) FMRP-USP

Prof. Dr. José Baptista Portugal Paulin – FMRP-USP

Dr. Antônio Carlos Shimano – FMRP-USP

*A minha esposa Anacy, ao meu filho Arthur e
aos meus pais e irmãos pelo incentivo deste
trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao *Dr. Antônio Carlos Shimano*, pelo incentivo, presteza, amizade e pelas informações fundamentais para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. *José B. Volpon*, pela orientação, paciência e pelo exemplo de respeito e profissionalismo;

Ao Prof. Dr. *José B. P. Paulin*, pelos ensinamentos e pela recepção no laboratório;

Ao colega *Jorge Kim*, pela valiosa oportunidade de freqüentar o curso de elementos finitos;

Ao aluno *Adriano Holanda*, pela amizade, companheirismo e por grandes auxílios nos programas computacionais;

Ao aluno *Marcos Shimano*, pelo auxílio com a máquina de testes universal;

Aos funcionários do laboratório: Eng. *Moro, Francisco, Luiz Henrique, Terezinha e Sônia*, pela colaboração e amizade;

Aos alunos *Renato, Luiz Carlos, Vitor, Flávio, Ricardo e Édson*, pela amizade;

Às secretárias do laboratório de Bioengenharia da EESC-USP, D. *Marielza Roma e Janete dos Santos*, pela presteza no atendimento aos pós-graduandos;

Muito obrigado a todos!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	1
1.1.1 Rigidez.....	1
1.1.2 O sistema Métodos dos Elementos Finitos (MEF).....	4
1.2 FIXADOR EXTERNO.....	5
1.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ÁREA MÉDICA.....	7
1.4 OBJETIVO.....	8
2 MATERIAL E MÉTODO.....	9
2.1 MATERIAL.....	9
2.2 METODOLOGIA.....	11
2.2.1 Ensaios Mecânicos.....	11
2.2.1.1 Ensaio de Flexo-compressão.....	11
2.2.1.2 Ensaio de Flexão Ântero-Posterior.....	12
2.2.1.3 Ensaio de Flexão Lateral.....	12
2.2.2 Máquina Universal de Ensaio (MUE).....	13
2.2.3 Programa de análise por elementos finitos ANSYS®.....	14
2.2.4 Modelamento 3D.....	15
2.2.5 Organização da topografia.....	15
2.2.6 Geração da Malha.....	16
3 RESULTADOS.....	20
3.1 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (1).....	20
3.2 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (2).....	22
3.3 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (3).....	24
3.4 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (4).....	26
3.5 ENSAIO DE FLEXÃO ÂNTERO-POSTERIOR (5).....	28
3.6 ENSAIO DE FLEXÃO LATERAL (6).....	30
3.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA MUE E NO MEF.....	32
4 DISCUSSÃO.....	36
5 CONCLUSÃO.....	40
ANEXOS.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Desenho explodido do fixador externo e madeiras.....	10
FIGURA 2 - Configuração dos quatro ensaios de flexo-compressão mostrando a direção, sentido e intensidade do carregamento e o vínculo estrutural.....	11
FIGURA 3 - Configuração do ensaio de flexão ântero-posterior mostrando a direção sentido e intensidade do carregamento e o vínculo estrutural.....	12
FIGURA 4 - Configuração do ensaio de flexão lateral mostrando a direção e sentido do carregamento e o vínculo estrutural.	13
FIGURA 5 - Ensaio de Flexo-compressão realizado no fixador externo: 1) célula de carga, 2) relógio comparador, 3) conjunto a ser testado.	14
FIGURA 6 - Modelo do fixador externo dividido em volumes regulares pronto para receber a malha constituída por elementos finitos.	16
FIGURA 7 - Barra constituída de elementos finitos.....	17
FIGURA 8 - Conexão constituída por dois tipos de elementos finitos	18
FIGURA 9 - Haste de fixação composta por elementos finitos.....	18
FIGURA 10 – Modelo do fixador externo fixado em madeira.....	19
FIGURA 11 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 1 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	20
FIGURA 12 - Imagem do modelo deformado no ensaio 1 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	21
FIGURA 13 - Imagem do gráfico carga x deformação do ensaio 1	21
FIGURA 14 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 2 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	22
FIGURA 15 - Imagem do modelo deformado do ensaio 2 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	23
FIGURA 16 - Imagem do gráfico carga x deslocamento do ensaio 2.....	23

FIGURA 17 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 3 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	24
FIGURA 18 - Imagem do modelo deformado do ensaio 3 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	25
FIGURA 19 Imagem do gráfico carga $\times$ deslocamento do ensaio 3.	25
FIGURA 20 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 4 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	26
FIGURA 21 - Imagem do modelo deformado do ensaio 4 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	27
FIGURA 22 - Imagem do gráfico carga $\times$ deslocamento do ensaio 4.	27
FIGURA 23 - - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 5 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	28
FIGURA 24 - Imagem do modelo deformado do ensaio 5 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	29
FIGURA 25 - Imagem do gráfico carga $\times$ deformação do ensaio 5.	29
FIGURA 26 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 6 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	30
FIGURA 27 - Imagem do modelo deformado do ensaio 6 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.	31
FIGURA 28 - Imagem do gráfico carga $\times$ deformação do ensaio 6.	31
FIGURA 29 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 1.	32
FIGURA 30 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 2.	32
FIGURA 31 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 3.	33
FIGURA 32 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 4.	33
FIGURA 33 - Comparação entre as curvas carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 5.	34

FIGURA 34 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 6.....	34
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Rigidez apresentada pelos ensaios obtidos na MUE e no MEF.....	35
TABELA 2 – Deslocamentos dos dois modos (MEU e MEF) de ensaio para valores de carregamento iguais.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSYS	- <i>Analysis Systems</i>
CAD	- <i>Computer Aided Design</i>
E	- Módulo de Elasticidade
IGES	- <i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
kgf	- Kilograma-força
MEF	- Método dos Elementos Finitos
min	- Minuto
mm	- Milímetros
MUE	- Máquina Universal de Ensaio
N	- Newton
v	- Coeficiente de <i>Poisson</i>

RESUMO

Este trabalho avaliou, utilizando o Método dos Elementos Finitos, o comportamento mecânico em seis ensaios, quatro de flexo compressão com variação apenas no comprimento da haste de fixação, um de flexão ântero-posterior e um de flexão lateral, em um modelo tridimensional de fixador externo construído com auxílio do computador. Para a validação desses ensaios os mesmos testes também foram realizados na máquina universal de ensaio e depois comparados com o método dos elementos finitos.

A rigidez no ensaio de flexão lateral obtida no método dos elementos finitos apresentou um valor 106% maior do que o obtido na máquina universal de ensaio, possivelmente por ocorrência de afrouxamento entre as partes adjacentes do fixador externo no ensaio mecânico, e no ensaio de flexo compressão (número 1) a rigidez obtida pelo método dos elementos finitos foi 7,39% menor do que a obtida na máquina universal de ensaio.

No ensaio número 4 (flexo-compressão) os deslocamentos obtidos, correspondentes a aplicação de uma carga de 15,4 N, utilizando tanto o método dos elementos finitos como a máquina universal de ensaio, divergiram em 8,5%. Já no ensaio número 5 (flexão ântero-posterior) a divergência foi de 0,9%, para os deslocamentos correspondentes a aplicação de uma carga de 14,4 N.

O Métodos dos Elementos Finitos é um eficiente método para prever comportamento mecânico de estruturas complexas.

Palavras-Chave: Biomecânica, elementos finitos, fixador externo

ABSTRACT

This work evaluates the mechanical behavior of an external device on a CAD (Computer Aided Design) 3D model in six testes, four of them of flexion-compression with a single variation of the external device stick length, one of longitudinal flexion and one of lateral flexion. They all were carried out applying the Method of the Finite Elements (MFE). For the comparison with the MFE the same mechanical testes were made.

The stiffness achieved in the MFE showed a value 106% greater than that of the mechanical test. The test number one of flexion-compression showed a value 7,39% smaller in the MFE than that of the mechanical test.

In the test number four (flexion-compression) the corresponding displacement after the application of a 15,4 N working stress showed a difference of 8,5%. The variation of the number five test was of 0,9% for the displacement after the application of a 14,4N working stress.

The MEF showed efficient to evaluate the behavior of complex mechanical structures.

Keywords: biomechanics, finite elements, external device

1 INTRODUÇÃO

1.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

As limitações da mente humana são tais que ela não consegue compreender o comportamento dos sistemas ao seu redor e os fenômenos em uma só operação. É próprio da mente humana querer subdividir os sistemas em seus elementos mais básicos. Assim, surge a idéia de que, a partir do entendimento do comportamento de cada elemento, é possível entender o funcionamento do conjunto, por mais complexo que possa parecer ou seja, reconstruir o todo, entendida as partes. Para um pesquisador, este é um caminho natural para a abordagem dos problemas. Este raciocínio tem implicações, também, nos métodos matemáticos utilizados para a descrição do comportamento dos sistemas (RODAMAKER, 1983).

Em muitas situações, a identificação dos componentes de um sistema, ou mais particularmente de uma estrutura, parece uma tarefa quase óbvia. Por exemplo, para uma estrutura espacial metálica constituída apenas por vigas, é natural identificar os componentes individuais de vigas ou elementos, que conectados entre si somente nas juntas ou nós estruturais, constituirão o conjunto estrutural.

1.1.1 Rigidez

Outra idéia bastante comum, e que se torna fundamental na Análise Estrutural é a idéia de rigidez.

Todos temos a idéia de rigidez desde as primeiras aplicações com os elementos elásticos (ou molas) da Física básica. O conceito de mola equivalente (ou rigidez equivalente) a um conjunto de molas, também faz parte do contexto. Assim ocorre também ao abordar-se a Análise Estrutural. A rigidez da estrutura depende da rigidez

de cada um de seus elementos. Pode-se compor a rigidez da estrutura a partir da rigidez de cada elemento (BISMARCK-NASR, 1993).

Esta é a primeira idéia do Método dos Elementos Finitos: as estruturas, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos) que são conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados nós. A estrutura pode ser representada como uma montagem de elementos que constitui um modelo matemático, também chamado de modelo estrutural ou idealização estrutural (ZAGOTTIS, 1975).

Do ponto de vista prático, os programas de análise por Elementos Finitos oferecem uma biblioteca com diversos tipos de elementos, cada um tentando representar um diferente comportamento físico conhecido da mecânica estrutural (placas, cascas, membranas, sólidos, vigas etc.). Este comportamento é descrito por intermédio de funções matemáticas que, em última análise, contabilizam a rigidez daquele elemento individual. Mesmo para um simples elemento de viga, essa rigidez apresenta diversos componentes diferentes, como rigidez axial, rigidez à flexão, ao cisalhamento e à torção (RODAMAKER, 1983).

A forma mais compacta e elegante de representar essas características dos elementos no computador é por intermédio da álgebra matricial. Daí decorre o conceito de matriz de rigidez de um elemento. Assim como a rigidez de uma mola é contabilizada por intermédio da relação força-deslocamento para a mola, em um elemento finito a idéia é a mesma, porém em caráter mais amplo. Dessa forma, os diversos componentes de rigidez de um elemento estão relacionados aos diversos componentes de força e deslocamentos presentes (ARGYRIS, 1957).

Dispondo da biblioteca de elementos, podemos montar a matriz de rigidez da estrutura a partir da matriz de rigidez de cada elemento que, em última análise, contabiliza a rigidez da estrutura inteira.

Depois de montado o modelo estrutural, podemos determinar a configuração deformada da estrutura no computador, por intermédio dos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. Estamos, então, em condições de determinar o estado de tensões na estrutura e fazer a avaliação de sua resistência mecânica (BISMARCK-NASR, 1993).

O MEF tem sido mais associado a aplicações estruturais como análise linear de estruturas, vibrações livres e forçadas, análise não linear envolvendo grandes deformações, grandes deflexões, plasticidade e instabilidade estrutural. As técnicas de discretização de sistemas contínuos que têm fornecido comprovado sucesso no âmbito da Análise Estrutural são mais gerais e podem ser aplicadas em outras áreas de engenharia e análise. Elas acabam sendo poderosas ferramentas para resolver problemas em física e matemática, tais como: transferência de calor, escoamento de fluidos, ondas eletromagnéticas e hidrodinâmica.

Assim, o Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta extremamente valiosa para ajudar as equipes de engenharia em uma das tarefas mais importantes no desenvolvimento de um produto, que é determinar o seu comportamento estrutural e garantir que não haverá falha tanto em condições normais de operação, como em situações críticas, por intermédio da determinação do panorama de tensões no componente.

A análise de tensões é um passo intermediário e uma das informações para tomar decisões sobre a definição das características estruturais do produto (espessuras, materiais, geometria e condições de trabalho). Para executar uma eficiente análise estrutural deve-se atender a alguns pré-requisitos:

- Entendimento claro do problema físico a ser simulado;
- Conhecimento do comportamento estrutural desejado (critério de projeto);
- Propriedades dos materiais envolvidos;
- Características dos elementos finitos envolvidos na análise;
- Definição da região objeto de interesse, definindo a extensão do modelo de análise;
- Condições de Contorno - Cargas e Vínculos da Estrutura.

A representação adequada do fenômeno físico que se quer estudar passa inicialmente pelo conhecimento do fenômeno, o que deveria ser até certo ponto óbvio. Satisfeita esta condição, o modelo proposto deve representar trecho a trecho o que ocorre na estrutura real. Essa representação só poderá ser feita se o analista estrutural conhecer o comportamento dos elementos finitos disponíveis e identificar

na estrutura objeto de análise esse comportamento, de sorte a utilizar o elemento adequado para a cada aplicação.

Os programas de elementos finitos não são ferramentas mágicas, que independem do julgamento do analista; constituem um auxílio ao analista, na solução numérica da enorme quantidade de equações algébricas que são geradas, decorrentes do processo de montagem dos elementos para representar a estrutura inteira (ALVES FILHO, 1999).

1.1.2 O sistema Métodos dos Elementos Finitos (MEF)

A abordagem do sistema MEF deve contemplar os principais recursos que são necessários para a resolução dos problemas de modelagem estrutural no cotidiano do pesquisador. Deve abordar os aspectos importantes MEF, estabelecendo os procedimentos básicos de referência para sua utilização. Qualquer outra análise a ser efetuada é importante escolher alguns exemplos controlados, para confrontar as expectativas de resposta com os resultados obtidos no MEF.

Deve-se focalizar a metodologia operacional do sistema MEF através da resolução completa e passo a passo de um exemplo de estrutura em que são utilizados os diversos elementos finitos, identificando a seqüência básica de etapas na aplicação do método dos elementos finitos. Não é necessário o conhecimento de todos os recursos visuais do programa que são inúmeros.

Dessa forma, as aplicações práticas do programa de elementos finitos deve ser efetuada cobrindo-se todas as etapas de uma análise estrutural com os recursos do MEF:

- Problema Estrutural;
- Planejamento do Modelo em Elementos Finitos;
- Elaboração da Malha de Elementos Finitos;
- Condições de contorno (restrições e carregamentos);
- Solução e verificação dos resultados.

Para consolidar a tecnologia MEF pode-se efetuar um trabalho semelhante a um exemplo real de produto, com a finalidade de aplicar efetivamente o método e visando aos resultados práticos que tenham repercussão no produto final.

Deve-se ter em mente que a aplicação dos recursos de MEF não se limita a uma aplicação de cálculos baseados em um programa de Elementos Finitos.

Para fazer sentido e apresentar utilidade prática o uso do Método dos Elementos Finitos deve ser feito a partir de um procedimento geral de análise, fundamentado no que se pode chamar de critério de projeto. Nesse critério todas as hipóteses formuladas para a concepção do modelo de cálculo - relativas a cargas, condições de contorno, propriedades mecânicas do material, geometria da peça - devem ser estabelecidas, servindo como embasamento da delicada tarefa de interpretação dos resultados.

É dentro desses conceitos que se deve abordar a Metodologia de Implantação, de forma que o grupo envolvido em um programa desse tipo consolide o treinamento efetuado, participando ativamente da modelagem e da análise por elementos finitos de produtos do âmbito da pesquisa.

Essa etapa é fundamental, pois a tecnologia MEF é parte integrante da Metodologias de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto, já que a análise de tensões e, como consequência, o comportamento estrutural otimizado do componente, depende desse procedimento.

1.2 FIXADOR EXTERNO

A utilização da fixação externa no tratamento de fraturas é um método amplamente difundido na prática médica e veio para complementar o tratamento conservador (MORO, 1992).

O conhecimento das propriedades mecânicas do fixador externo é muito importante porque elas influenciam na forma da consolidação óssea (McKIBBIN, 1978; RAHN, 1982). Já GILBERT et al. (1989) concluíram que a relevância da rigidez do sistema de fixação externa utilizado no tratamento de fratura é indeterminada.

ILIZAROV (1988) e CAMBRAS (1987) idealizaram fixadores externos multiplanares onde se concluiu que existia, independentemente da direção da carga aplicada, maior estabilidade na montagem.

Muito tem sido relatado sobre a rigidez dos fixadores externos. Portanto, estudos em geral, se concentram focalizados nas características geométricas dos componentes e nas configurações do fixador externo, já que estes elementos são os que mais influenciam na rigidez do aparelho. Outro aspecto, alvo de investigação, é a verificação das tensões na interface do osso com o pino de fixação (FINALY et al., 1987).

Dentre os componentes do fixador externo, o pino de fixação é o menos rígido (CHAO et al., 1979). E os maiores deslocamentos ocorrem em função de sua flexão (KEMPSON e CAMPBELL, 1981).

EGAN & SHEARER (1987) concluíram que fixadores externos com configurações angulares de pinos e com separação maior entre eles pela barra possibilita maior estabilidade da fratura quando houver esforço de flexão independentemente de sua direção, como também, maior estabilidade quando houver esforços de compressão.

O afrouxamento dos pinos e também a rigidez dos fixadores externos têm sido investigados (RYBICKI e SIMONEN, 1977; CHAO et al., 1982; KASMAN e CHAO, 1982; OONISHI et al., 1984; KOTZAR et al., 1990). Os deslizamentos das partes adjacentes é uma das principais causa do afrouxamento nas interfaces dos componentes que compõem a montagem do aparelho.

A maior parte dos fixadores externos avaliada incorpora uma geometria na qual os pinos de fixação encontram-se em um mesmo plano. Isso faz com que a rigidez seja muito maior para flexões ocorridas no plano dos pinos do que a rigidez ocorrida perpendicularmente ao plano dos pinos (CHAO et al., 1982; KEMPSON e CAMPBELL, 1981; McCOY et al., 1983; SELIGSON et al., 1981).

1.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ÁREA MÉDICA

O método dos elementos finitos utilizado no estudo do comportamento mecânico de próteses vem se destacando graças aos avanços computacionais.

O despertar da comunidade científica para o assunto deu origem à primeira publicação, em 1972, após mais de uma década em que o método dos elementos finitos iniciou uma verdadeira revolução na análise das estruturas dentro da Engenharia Mecânica, quando BREKELMANS et al. (1972) publicaram o primeiro trabalho abordando a biomecânica.

As ferramentas matemáticas utilizadas para avaliar as análises de tensões dentro da mecânica clássica não eram muito adequadas para a biomecânica devido ao alto grau de irregularidades das propriedades estruturais dos ossos. O método dos elementos finitos começou a ganhar grande importância devido à sua capacidade de poder avaliar as tensões, condições de carregamento e comportamento do material em estruturas altamente complexas (HUISKES e CHAO, 1983).

MEF começou a ser utilizado dentro da biomecânica com a finalidade de investigar as tensões relacionadas com a arquitetura dos ossos e o processo de remodelamento dos ossos, de testar e otimizar as configurações das articulações artificiais e instrumentos de fixação (HUISKES e CHAO, 1983).

Autoridades do governo europeu estão se movimentando no sentido de responsabilizar tanto o cirurgião como o fabricante pelo desempenho das próteses por eles prescritas. Isto tem levado alguns fabricantes a buscar soluções para avaliar o comportamento mecânico destas próteses por meio de modelos virtuais que são exaustivamente ensaiados. Esses ensaios permitem, com grande facilidade, a variação de parâmetros geométricos, de propriedades mecânicas do material e de geometria no modelo virtual contribuindo com a economia de tempo para obter previsões de resultados (VICECONTI et al., 1997).

A variedade de próteses hoje existente é muito grande e, mesmo assim, não atendem variadas de formas anatômicas dos pacientes, especialmente as próteses de quadril, onde se utiliza cimento cirúrgico, não apenas para fixação, como também

para preenchimento dos espaços existente entre a prótese e a medula (VICECONTI et al., 1997).

Os fixadores externos são caros e na grande parte do mundo ortopédico utilizam-se soluções simples sem grandes custos e que produzem os mesmos resultados do que aqueles com custos altos desde que usados de maneira adequada. (CAMON et al., 1985; NOOR, 1988).

O ideal seria o desenvolvimento de próteses personalizadas para cada paciente. Mas como desenvolvê-las a um custo financeiro e de tempo relativamente baixo garantindo que as tenham propriedades físicas e químicas compatíveis com o paciente? (BALEANI et al., 1997).

1.4 OBJETIVO

A proposta deste trabalho é apresentar um modelo tridimensional de um fixador externo construído com auxílio do computador e avaliar o comportamento mecânico deste, tais como a rigidez e o deslocamento, utilizando o Método dos Elementos Finitos e validar essa avaliação com ensaios mecânicos.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 MATERIAL

O aparelho de fixação externa foi constituído de uma barra de alumínio, quatro conectores de alumínio, quatro parafusos de fixação confeccionados de aço inoxidável, quatro porcas de aço inoxidável, quatro pinos de fixação também feitos de aço inoxidável (ANEXO II). Este aparelho foi transfixado em duas porções de madeira com espaçamento de 10 mm entre elas imitando o osso fraturado.

A Figura 1 mostra o desenho explodido do conjunto fixador externo e madeiras.

FIGURA 1 - Desenho explodido do fixador externo e madeiras.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Ensaios Mecânicos

O fixador externo foi submetido a três tipos de ensaios mecânicos (flexo-compressão; flexão ântero-posterior e flexão lateral).

2.2.1.1 Ensaio de Flexo-compressão

Foram utilizadas quatro configurações diferentes no ensaio mecânico de flexo-compressão variando-se a distância entre o centro geométrico da seção transversal da barra e o ponto de aplicação da carga.

No ensaio 1 a distância entre as interfaces pino-madeira e pino-conexão foi de 20 mm, no 2 essa distância foi de 30 mm, no 3 essa distância foi de 40 mm e no 4 essa distância foi de 50 mm.

A Figura 2 ilustra os quatro ensaios mecânicos.

FIGURA 2 - Configuração dos quatro ensaios de flexo-compressão mostrando a direção, sentido e intensidade do carregamento e o vínculo estrutural.

Nesses ensaios a carga foi aplicada na porção superior da madeira e a base da porção inferior da madeira ficou apoiada na parte fixa da máquina.

2.2.1.2 Ensaio de Flexão Ântero-Posterior

Neste tipo de ensaio, apenas uma configuração foi colocada em teste, onde a carga foi aplicada na face anterior posterior da porção superior da madeira e a base da porção inferior foi engastada (figura 3).

Obs. As cotas estão em mm.

FIGURA 3 - Configuração do ensaio de flexão ântero-posterior mostrando a direção sentido e intensidade do carregamento e o vínculo estrutural.

2.2.1.3 Ensaio de Flexão Lateral

Nesse ensaio, também foi testado apenas uma configuração (figura 4) e a carga foi aplicada na face lateral da porção superior da madeira e a base da porção inferior foi engastada.

Obs. As cotas estão em mm

FIGURA 4 - Configuração do ensaio de flexão lateral mostrando a direção e sentido do carregamento e o vínculo estrutural.

2.2.2 Máquina Universal de Ensaio (MUE)

Para todos estes ensaios foi usado apenas um único protótipo e para não invalidá-lo os ensaios ocorreram apenas na fase elástica do aparelho.

Os teste mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaio (MEU), do laboratório de Bioengenharia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

Para a medida da carga aplicada foi utilizada uma célula de carga Kratos® modelo KM com capacidade de 50 kgf ligada a uma ponte de extensometria Sodmex®, modelo CAE 201, que foi utilizada para a leitura dos valores da carga aplicada. Os deslocamentos foram medidos por um relógio comparador Mitutoyo®,

com precisão de 0,01 mm. A velocidade de aplicação da carga foi de 0,1 mm/min, com pré-carga de 300 gramas, e com tempo de acomodação de um minuto (Figura 5).

FIGURA 5 - Ensaio de Flexo-compressão realizado no fixador externo: 1) célula de carga, 2) relógio comparador, 3) conjunto a ser testado.

Os dados colhidos nos ensaios foram os valores da carga aplicada e os deslocamentos na direção da força (Anexo I).

2.2.3 Programa de análise por elementos finitos ANSYS®.

O ANSYS® consiste em um programa que faz análise do comportamento mecânico de estruturas utilizando o método dos elementos finitos bastante conceituado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de São Carlos.

Este programa possui ferramentas para criação de malhas, para atribuição de materiais, para aplicação de esforços e vínculos estruturais como também ferramentas para verificação do comportamento mecânico resultante destes esforços.

2.2.4 Modelamento 3D

No modelamento, utilizou-se o programa Microstation Modeler/J da Bentley Systems®, que com suas ferramentas de criação de sólidos básicos paramétricos e modelamento por características, permitiu a criação em três dimensões do conjunto fixador externo e as duas porções de madeira.

Após feita a modelagem do fixador externo, o modelo foi exportado através de um tradutor com extensão IGES® que possibilitou a leitura deste arquivo pelo programa ANSYS®.

As entidades geométricas do modelo passaram a se comportar como superfícies dentro do ANSYS®.

2.2.5 Organização da topografia

Através dos recursos de criação de volumes por superfícies oferecido pelo programa ANSYS® foi possível tornar o modelo como um conjunto de sólidos novamente compondo, assim, o modelo do fixador externo.

Após estabelecido o modelo foi necessário dividi-lo em geometrias com topologias regulares para a criação de uma malha regular evitando, assim, a geração excessiva de elementos (Figura 6).

FIGURA 6 - Modelo do fixador externo dividido em volumes regulares pronto para receber a malha constituída por elementos finitos.

2.2.6 Geração da Malha

A barra do fixador recebeu uma malha composta de elementos poliedro de 6 lados com 20 nós e os parâmetros dos materiais adotados foram módulo de elasticidade $E = 69 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, coeficiente de *Poisson* $\nu = 0,38$ propriedades estas que representam o alumínio (BEER e JOHNSTON, 1982) (Figura 7).

FIGURA 7 - Barra constituída de elementos finitos

Cada conexão foi dividida em dois tipos de volumes: um tipo de volume foi subdividido em volumes regulares e também receberam malha composta de elementos poliedro de 6 faces com 20 nós. Já, o outro tipo de volume foi malhado com elementos tetraedro com 10 nós. O material atribuído também foi o alumínio (Figura 8).

FIGURA 8 - Conexão constituída por dois tipos de elementos finitos

Os quatro pinos de fixação foram malhados com elemento poliedro de seis faces com 20 nós (Figura 9), onde receberam as propriedades do aço inoxidável $E=190 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0,40$ (POPOV, 1978).

FIGURA 9 - Haste de fixação composta por elementos finitos.

As duas partes de madeira foram divididas, cada uma, em dois tipos de volumes; um tipo foi malhado com elemento poliedro de seis lados com 20 *nós* com propriedade do material adotado $E=15 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ e $\nu=0,40$ (BEER e JOHNSTON, 1982). O outro tipo recebeu malha com elemento tetraedro com 10 nós, com as mesmas propriedades daquele.

A figura 10 apresenta a malha do conjunto do fixador externo e madeira.

FIGURA 10 – Modelo do fixador externo fixado em madeira

O modelo foi submetido a 6 (seis) ensaios, flexo-compressão (1, 2, 3 e 4), flexão ântero-posterior (5) e flexão lateral (6).

O modelo foi constituído de 7.924 elementos e 21.979 nós para o ensaio 1, de 9.041 elementos e 24.055 nós para o ensaio 2, de 8.062 elementos e 23.282 nós para o ensaio 3, de 8.315 elementos e 23.988 nós para o ensaio 4, de 7.924 elementos e 21.979 nós para o ensaio 5, de 7.924 elementos e 21.979 nós para o ensaio 6.

Em todos os ensaios, a base inferior da madeira recebeu um vínculo de fixação e as forças foram aplicadas com a mesma intensidade e posição do que naqueles testes realizados na máquina universal de ensaio conforme apresentado nas figuras 2, 3 e 4.

A comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e no MEF foi feita por meio de tabela comparativa da rigidez e dos deslocamentos, e também pela inclinação das curvas carga *versus* deslocamento.

3 RESULTADOS

3.1 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (1)

A figura 11 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 12 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 13 apresenta o gráfico carga (*TIME*) $\times$ deslocamento (*VALU*).

FIGURA 11 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio I junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 12 - Imagem do modelo deformado no ensaio 1 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 13 - Imagem do gráfico carga x deformação do ensaio 1

3.2 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (2)

A figura 14 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 15 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 16 apresenta o gráfico carga (*TIME*) $\times$ deslocamento (*VALU*).

FIGURA 14 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 2 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 15 - Imagem do modelo deformado do ensaio 2 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 16 - Imagem do gráfico carga x deslocamento do ensaio 2

3.3 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (3)

A figura 17 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 18 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 19 apresenta o gráfico carga (*TIME*) x deslocamento (*VALU*).

FIGURA 17 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 3 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 18 - Imagem do modelo deformado do ensaio 3 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 19 Imagem do gráfico carga $\times$ deslocamento do ensaio 3.

3.4 ENSAIO DE FLEXO-COMPRESSÃO (4)

A figura 20 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 21 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 22 apresenta o gráfico carga (*TIME*) $\times$ deslocamento (*VALU*).

FIGURA 20 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 4 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 21 - Imagem do modelo deformado do ensaio 4 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 22 - Imagem do gráfico carga $\times$ deslocamento do ensaio 4.

3.5 ENSAIO DE FLEXÃO ÂNTERO-POSTERIOR (5)

A figura 23 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 24 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 25 apresenta o gráfico carga (*TIME*) x deslocamento (*VALU*).

FIGURA 23 - - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 5 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 24 - Imagem do modelo deformado do ensaio 5 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 25 - Imagem do gráfico carga $\times$ deformação do ensaio 5.

3.6 ENSAIO DE FLEXÃO LATERAL (6)

A figura 26 apresenta a imagem do modelo deformado e não deformado junto com um quadro de cores do lado direito onde mostra a intensidade das tensões atuantes no modelo de acordo com essas cores. A figura 27 apresenta somente a imagem do modelo deformado junto com o quadro de cores mostrando as tensões atuantes conforme a cor. A figura 28 apresenta o gráfico carga (*TIME*) $\times$ deslocamento (*VALU*).

FIGURA 26 - Imagem do modelo deformado e não deformado do ensaio 6 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 27 - Imagem do modelo deformado do ensaio 6 junto com quadro de cores correspondente com as tensões atuantes no modelo.

FIGURA 28 - Imagem do gráfico carga $\times$ deformação do ensaio 6.

3.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA MUE E NO MEF

A comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 1 (flexo compressão) é mostrada na figura 29.

FIGURA 29 - Comparação entre as curva carga x deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 1.

A comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 2 (flexo-compressão) é mostrada na figura 30.

FIGURA 30 - Comparação entre as curva carga x deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 2.

Comparação dos resultados na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 3 (flexo-compressão) é mostrada na figura 31.

FIGURA 31 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 3.

Comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 4, (flexo-compressão) é mostrada na figura 32.

FIGURA 32 - Comparação entre as curva carga $\times$ deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 4.

Comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 5 (flexão ântero-posterior) é mostrada na figura 33.

FIGURA 33 - Comparação entre as curvas carga x deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 5.

Comparação dos resultados obtidos na máquina universal de ensaio e pelo MEF do ensaio 6 (flexão lateral) é mostrada na figura 34.

FIGURA 34 - Comparação entre as curva carga x deslocamento dos testes obtidos na MUE e no MEF do ensaio 6.

A TABELA 1 apresenta a rigidez obtida nos ensaios da MUE e nos dos MEF.

TABELA 1 - Rigidez apresentada pelos ensaios obtidos na MUE e no MEF.

Ensaio	MUE	MEF
	Rigidez N/mm	Rigidez N/mm
1	16,63	15,54
2	12,75	14,34
3	8,33	9,21
4	6,60	7,11
5	3,77	4,78
6	1,22	2,52

A TABELA 2 apresenta os deslocamentos nos dois modos de ensaio para os mesmos valores de carga.

TABELA 2 – Deslocamentos dos dois modos (MEU e MEF) de ensaio para valores de carregamento iguais.

Ensaio	Carga (N)	MUE	MEF	Diferença
		Desloc. (mm)	Desloc. (mm)	Percentual Relativa (%)
1	35,30	2,00	2,13	6,50
2	27,40	2,00	1,91	4,50
3	18,90	2,00	2,05	2,50
4	15,40	2,00	2,17	8,50
5	14,40	3,00	3,01	0,90
6	7,30	3,00	2,90	3,70

4 DISCUSSÃO

Um dos pontos mais importantes que contribuem comprovadamente para o sucesso e progresso no uso dos recursos de MEF está relacionado aos conceitos fundamentais obrigatórios na utilização da tecnologia MEF. Muitos profissionais que iniciam suas aplicações nessa área encontram dificuldades na utilização dessa tecnologia. Essas dificuldades advêm do fato de que o aprendizado de uso do programa de análise por elementos finitos é feito sem conhecimento satisfatório do Método dos Elementos Finitos, confundindo-se o aprendizado de manuseio de programas com o conhecimento do Método dos Elementos Finitos. Justifica-se, portanto, a filosofia de abordagem: se o analista não souber modelar o problema sem ter o computador, ele não deverá fazê-lo tendo o computador (ALVES FILHO, 1999).

Em visão oposta a anterior, muitas vezes, o aprendizado é de tal profundidade em técnicas matemáticas que, após um longo curso puramente acadêmico, surge a pergunta: “como utilizar esse conhecimento na prática?” Em função dessa abordagem, surgem o temor e o desestímulo quanto à aplicação desse conhecimento.

Deve-se introduzir o embasamento conceitual fundamental visando à utilização e ao entendimento do programa aplicativo, à luz dos conceitos.

Essa metodologia, tem-se revelado uma visão equilibrada entre o conhecimento teórico necessário e a aplicação prática.

A primeira dificuldade encontrada foi na leitura do arquivo, com extensão *IGES* exportado através do Modeler/J®, feita pelo ANSYS®, que na qual todas entidades geométricas que se comportavam como sólidos passaram a se comportar como superfícies. Quase todas essas superfícies tiveram que ser revisadas e muitas até reconstruídas para que o programa de elementos finitos conseguisse convertê-las em sólidos novamente, o que tornou esta fase trabalhosa.

No método dos elementos finitos temos que assumir algumas condições de contorno que, às vezes, tornam o modelo virtual não totalmente fiel ao modelo real. Mas, tal fato não chega a comprometer os resultados. Não fugindo à regra, nesse modelo virtual submetido à análise do MEF, algumas condições também foram assumidas. No caso das interfaces, barra-conectores, conectores-parafusos, parafusos-hastes e hastes-madeira, todas elas foram soldadas de modo a não permitir o movimento de deslizamento entre as interfaces adjacentes. As condições de carregamento impostas ao modelo foram cuidadosamente aplicadas para permanecer dentro da zona elástica e, também, só permitindo pequenos deslocamentos. Com estes cuidados foi possível comparar os resultados obtidos nos ensaios na máquina universal de ensaio com os dos MEF levando-se em conta que, com carregamento intenso levaria, nos ensaios realizados na MUE, aos escorregamentos das partes adjacentes do aparelho o que não ocorreria no modelo MEF pois as partes adjacentes foram todas soldadas não permitindo tais escorregamentos. Isto conduziria a grandes divergências na comparação dos resultados.

O tempo consumido pelo computador para resolver as equações utilizadas no MEF foi em torno de uma hora e quarenta minutos para cada ensaio. Isto foi devido ao elevado número de nós e também ao tipo de resultado requisitado para análise, pois a escolha do tamanho adequado da malha não parece óbvia em uma estrutura. Ela depende do conhecimento das propriedades do elemento escolhido para a representação do problema, que é a característica fundamental do método. Mas os programas de elementos finitos oferecem uma biblioteca com diversos tipos de elementos, cada um tentando representar um diferente comportamento físico conhecido da mecânica estrutural como placas, cascas, membranas, sólidos, vigas etc (ALVES FILHO, 1999).

Foram usados dois tipos de elementos para gerar a malha do modelo; o poliedro de seis lados que serviu para preencher as regiões com formas geométricas regulares possibilitando, assim, a geração de malhas regulares com redução do número de elementos, e o tetraedro que serviu para completar as partes onde a geometria não permitia o preenchimento com elementos regulares. Foi o que aconteceu com quase

todas as regiões de contato onde o número de elementos gerados foi grande por serem regiões com topologia complexa.

O programa ANSYS® possui um método particular em mostrar os resultados que tiveram, antes da comparação com os obtidos da MUE, que ser interpretados de modo a torná-los apropriados.

O maior valor do carregamento lido para cada ensaio realizado na MUE foi o utilizado para aplicação do carregamento no correspondente teste MEF e, para poder observar os crescentes deslocamentos em função destes carregamentos nos testes MEF, contou com o recurso iterativo entre a carga e o deslocamento do programa ANSYS® no qual promoveu uma interação incremental de carregamentos que consiste em extrair valores incrementais de deslocamentos até atingir o valor do deslocamento correspondente ao carregamento máximo. Com estes pares ordenados foi possível obter gráficos e tabelas com as variáveis carga e deslocamento.

Alguns gráficos carga $\times$ deslocamento extraídos do programa ANSYS® se mostraram decrescentes, isso devido ao sistema de coordenadas adotado na qual o programa faz referência porém, não comprometeu os resultados e sim apenas o aspecto visual.

Alguns autores têm reconhecido que a soldagem das interfaces interferem nos resultados interpretando este procedimento como incorreto (CHAO et al., 1979; VASSOUGHİ et al., 1989; MEROI e NATALI, 1989). Portanto; basearam-se em trabalhos onde os modelos foram constituídos em 2D (duas dimensões) além de submeterem esses modelos a carregamentos acima da região elástica.

SCHOLTEN et al. (1980), HAMPTON et al. (1980), CROWNINSHIELD et al. (1981) e TARR et al. (1982) apud HUISKES et al. (1983)¹ utilizaram o Método dos Elementos Finitos 3-D com vários graus de refinamento para avaliar o comportamento mecânico de estruturas complexas. Não foi observado, nesses estudos, a convergência de resultados devido à grande variedade da densidade na

¹ TARR, et al. (1982). *Predictions of cement-bone failure criteria: three dimensional finite element models versus clinical reality of total hip replacement. Finite Elements in Biomechanics*, New York, John Wiley.

malha, à diferença na geometria, às condições de carregamento como, também, às propriedades do material. Isso torna fundamental o procedimento com a atribuição de elementos, propriedades do material, condições de carregamento, condições de fixação e aspectos geométricos, para validação do modelo proposto.

O valor da rigidez observado no ensaio de flexão lateral obtido na MUE e no MEF mostrou-se uma grande diferença (106%), provavelmente no menor valor obtido na MUE foi devido a um deslizamento entre os componentes que compõe o fixador, provocando uma rotação indesejada.

O fixador externo utilizado para os ensaios mecânicos foi o do tipo Hoffmann por apresentar algumas particularidades tais como o de ser constituído de vários materiais e possuir juntas. Este modelo de fixador tem sido testado pelo MEF por alguns autores (BEAUPRE et al., 1983. VOSSOUGH et al. 1989 CHAO et al. 1989).

5 CONCLUSÃO

- 1) O modelo do fixador externo tridimensional proposto pelo MEF mostrou-se eficiente na avaliação do deslocamento e rigidez.
- 2) A rigidez aumenta com a redução da distância entre a porção de madeira e a barra de sustentação na montagem do fixador externo com a madeira.
- 3) Os resultados dos ensaios mecânicos se aproximaram dos resultados obtidos pelo MEF tornando-os estes válidos.

ANEXOS

- I. Valores de carga e deslocamento lidos durante os ensaios na MUE e no MEF (pg. 42)
- II. Desenho detalhado dos elementos que constituem o fixador externo e das porções de madeira (pg. 43-50).

Ensaio 1			Ensaio 2		
MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)	MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)
8,70	6,67	0,40	7,60	5,76	0,40
11,90	9,95	0,60	9,50	8,59	0,60
15,60	13,24	0,80	12,20	11,52	0,80
19,00	16,62	1,00	14,70	14,35	1,00
25,40	23,19	1,40	20,10	20,10	1,40
28,80	26,48	1,60	22,70	22,93	1,60
32,00	29,86	1,80	25,30	25,85	1,80
35,30	33,14	2,00	27,40	28,69	2,00
Ensaio 3			Ensaio 4		
MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)	MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)
4,00	1,90	0,20	4,80	2,90	0,40
5,60	3,70	0,40	5,90	4,20	0,60
7,20	5,60	0,60	7,40	5,70	0,80
8,90	7,40	0,80	8,60	7,10	1,00
10,60	9,30	1,00	11,30	10,00	1,40
12,00	11,00	1,20	12,60	11,30	1,60
14,00	12,90	1,40	13,80	12,80	1,80
15,50	14,70	1,60	15,40	14,20	2,00
17,40	16,70	1,80			
18,90	18,40	2,00			
Ensaio 5			Ensaio 6		
MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)	MUE (N)	MEF (N)	Desloc. (mm)
5,80	2,89	0,60	4,40	1,55	0,60
8,00	5,78	1,20	5,10	3,00	1,20
9,10	7,18	1,50	5,30	3,73	1,50
11,40	10,07	2,10	6,20	5,28	2,10
13,70	12,96	2,70	6,90	6,83	2,70
14,80	14,36	3,00	7,30	7,56	3,00

REVIS.			
REV	DATA	APROVADO

				aço inoxidável	
				Porca	
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.		
ESCALA	1:1	AUTOR			

REVIS.			
REV.		DATA	APROVADO

		aço inoxidável	
		Pino de fixação	
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.
ESCALA		AUTOR	

REVIS.			
REV	DATA	APROVADO

Corte A-A

		Aço inoxidável		
		Parafuso		
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.	
ESCALA e data		AUTOR		

REVIS.			
REV		DATA	APROVADO

DESENHO:		TAM. A4	DESENHO NO.
ESCALA		AUTOR	REV.

Madeira
Porção superior

REVIS.			DATA	APROVADO
REV				

R 13.50

140.00

		<i>Madeira</i> <i>Porção inferior</i>		
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.	
ESCALA em escala		AUTOR		

REVIS.			
REV		DATA	APROVADO

		Alumínio	
		Haste	
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.
ESCALA e unidade		AUTOR	

REVIS.			
REV		DATA	APROVADO

$\rightarrow \leftarrow 1.00$

aço inoxidável			
Arruela			
DESENHO:	TAM. A4	DESENHO NO.	REV.
ESCALA:	SEM ESCALA	AUTOR	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI NOOR, M. (1988). A simple and inexpensive external fixator. *Injury* V. 19, p. 377.

ALVES FILHO, A. (1999). Tecnologia CAE. *Cadesign Edição Especial Mecânica*. Ano 1 N. 01, p. 44-48.

ANSYS 5.5 Complete User's Manual (1998). *Inc. Product Documentation*. 10th ed.

ARGYRIS, J. H. (1957). The Matrix Theory of Statics. *Ingr. Arch.* V. 25, p. 174-192.

BISMARCK-NASR, M. N. (1993). *Finite Elements in Applied Mechanics*. Copyright. Chap. 4.

ARGYRIS, J. H. (1958). On Analysis of Complex Elastic Structures. *Appl. Mech. Ver.* V. 11, p. 331-8.

BEAUPRE, G. S., HAYES, W. C., JOFE, M. H. and WHITE III, A. A. (1983). Monitoring fracture site properties with external fixation. *J. Biomech. Engng* 105, p. 120-126.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr., E. R. (1992). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill. p. 634.

- BREKELMANS, W. A. M.; POORT, H. W. and SLOOFF, T. J. J. H. (1972). A new method to analyze the mechanical behavior of skeletal parts. *Acta Orthop.* V. 43, p. 301-317.
- CANNON, S. R. (1985). Simple external fixation of open and complicated fractures. *Injury* V. 16, p. 367.
- CHAO, E. Y. S.; BRIGGS, B. T. and McCOY, M. T. (1979). Theoretical and experimental analyses of Hoffmann-Vidal external fixation system. In *External Fixation: The Current State of the Art* (Editado por Brooker, A F. e Edwards, C. C.), p. 345-370.
- CHAO, E. Y. S.; KASMAN, R. A.; AN, K. N. (1982). Rigidity and stress analysis of external fracture fixation devices: A theoretical approach. *J. Biomech* V. 15, p. 971-86.
- CROWNINSHIELD, R. D.; BRAND, R. A.; JOHNSTON, R. C.; PEDERSEN, D. R. (1981). An analysis of collar function and the use of titanium in femoral prostheses. *Clin. Orthop. Rel. Res.*, V. 158, 270-7.
- EGAN, J. B.; SHEARER, J. R. (1987) Behaviour of an external fixation frame incorporating an angular separation of the fixator pins. *Clin. Orthop.* 233, 265-74.
- FINLAY, J. F.; MOROZ, T. K.; RORABECK, C. H.; DAVEY, J. R.; BOURNE, R. B. (1987). Stability of Ten Configurations of the Hoffman External Fixation Frame. *Bone and Joint Surg.* V.69 – A, p. 734-44.
- GILBERT, J. A.; DAHNERS, L. E.; ATKINSON, M. A. (1989). The effects of external fixation stiffness on early healing of transverse osteotomies. *J. Orthop. Res.* 7, 389.

- HAMPTON, S. J.; ANDRIACCHI, T. P.; GALANTE, J. O. (1980). Three dimensional stress analysis of the femoral stem a total hip prosthesis. *J. Biomechanics* V. 13, p. 443-8.
- HUISKES, R. and CHAO, E. Y. S. (1983). A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics. *J. Biomech.* V. 16, p. 385-409.
- KEMPSON, G. E.; CAMPBELL, D. (1981). The comparative stiffness of external fixation frames. *Injury*, V. 12 p. 297-304.
- KOTZAR, G. M; DAVY, D. T; BEHRENS, F. (1990) External fixator loads as a function of callus stiffness: an analytical study. In *Proc. 2nd Conf. Int.Soc. Fract. Resp.*, p. 121-2.
- MEROI, E. A; NATALI, A. N. (1989). A numerical approach to the biochemical analysis of bone fracture healing. *J. biomed. Engng Comput.* 26, p. 271-6.
- McCOY, M. T.; CHAO, E. Y. S.; KASMAN, R. A. (1983). Comparison of mechanical performance in four types of external fixator. *Clin. Orthop. Rel. Res.* V. 23, p. 180-195
- McKIBBIN, B. (1978). The biology of fracture healing in long bones. *J. Bone Joint Surg.* 60 B: 150-162.
- MORÓ, C. A. (1992). Fixação externa com grau de flexibilidade variável. Desenvolvimento do aparelho e da metodologia de utilização. Ribeirão Preto. Fac. Med. Rib. Preto-USP. (Mestrado).
- OONISHI, H.; TATSUMI, M; HASEGAWA, T. (1984) Biomechanical studies on framework and insertion of pins external fixation. *Orthopedics* 7, p. 658-668.

RAHN, B. A. (1982). Bone healing: Histologic and physiologic concepts. In: Sumnersmith, G.: Bone in Clinical ortopaedics: A Study in Comparative Osteology. Philadelphia. W. B. Saunders, 335-386.

RIBICK, E. F.; SIMONEN, F. A; MILLS, E. J.; HASSELER, C. R.; SCOLES, P.; MILNE, D.; WEIS, E. B. (1974). Mathematical and Experimental Studies on the Mechanics of Plated Transverse Fractures. *J. Biomech.* V. 7, p. 377-384.

RODAMAKER, M. (1983). The Use of Finite Elements in Dynamic Structural Evaluation. *Sound Vibrat.*, V. 17, n. 8, p. 12-9.

ROEHRLE, H.; SCHOLTEN, R.; SOLLBACH, W. (1980). Analysis of stress distribution in natural and artificial knee joints on the femur side using the finite element method. *International Conference Proceeding on Finite Elements in Biomechanics*. Editado por Simon, B. R. p. 781-794.

RYBICKI, E. F.; SIMONEN, F. A. (1977). Mechanics of oblique fracture fixation using a finite element model. *J. Biomech.* V. 10, p. 141-148.

SELIGSON, D.; POWERS, G.; O'CONNELL, P.; POPE, M. H. (1981). Measurement of the fracture gap motion in external fixation. *J. Trauma*, V. 21, p. 798-810.

VICECONTI, M.; BELLINGERI, L.; BALEANI, M.; TONI, A. (1997). Computerized mechanical validation of custom-made stems. *Chir. Organi Mov.* V. 82, p. 263-8.

VOSSOUGH, J.; YOUM, Y.; BOSSE, M.; BURGESS, A. R.; POKA, A. (1989). Structural stiffness of the Hoffmann simple anterior tibial external fixation frame. *Ann. Biomed. Engng* 17, 127-141.

ZAGOTTIS, D. (1975). Conceituação do Método dos Elementos Finitos. *Construção Pesada*, p. 44-50