

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA DE CIMENTO PMMA
NO ENSAIO DE FADIGA DE PRÓTESES DE QUADRIL ORIENTADO PELA
NORMA ISO 7206-4

Ralf Wellis de Souza

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2007

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA DE CIMENTO NO
ENSAIO DE FADIGA DE PRÓTESES DE QUADRIL ORIENTADO PELA NORMA
ISO 7206-4

RALF WELLIS DE SOUZA
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2007

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Cervieri, INMETRO

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira, COPPE/UFRJ

Prof. Dr. Sandro Griza, UNISINOS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico esta dissertação aos meus pais, minha irmã e toda a grande família.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Afonso Reguly pela orientação.

Ao Professor Telmo Roberto Strohaecker por ter proporcionado todas as condições para a realização desse trabalho.

Ao inestimável apoio e amizade do Sandro.

Ao Cervieri por todo auxílio na instrumentação e aquisição de dados.

Ao colega Genaro Zanon pela contribuição na realização dos ensaios mecânicos.

Aos colegas Gabriel Tarnowski, Fabiano Bertoni e demais integrantes do ProEng que colaboraram na realização das simulações numéricas.

Ao Dr. Luiz Sérgio Marcelino Gomes pelo auxílio na concepção do plano de trabalho.

A empresa MDT-Indústria e Comércio de Implantes Ortopédicos pelo fornecimento das hastes.

A todos os colegas do LAMEF pelo incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cimento Ortopédico.....	4
2.1.1 Função na Artroplastia	4
2.1.2 Comportamento Mecânico.....	5
2.1.3 Processo de Polimerização.....	6
2.1.4 Tensões Residuais.....	8
2.1.5 Espessura da Camada de Cimento.....	8
2.1.6 Interface Cimento/Haste.....	10
2.2 Hastes femorais.....	11
2.2.1 Dados Históricos de Hastes Femorais.....	11
2.2.2 Materiais de uso em Artroplastias de Quadril.....	12
2.3 Fadiga nos Biomateriais de uso em Artroplastias de Quadril.....	14
2.4 Testes de Fadiga em Hastes de Quadril.....	15
2.5 Metodologia e Resultados de Trabalhos Anteriores.....	17
2.5.1 Análises Realizadas via Instrumentação com Extensômetros de Resistência Elétrica.....	17
2.5.2 Análises Realizadas via Simulação por Elementos Finitos.....	21
2.5.3 Análises sob Diversas Configurações de Ensaios.....	28
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1 Amostras	33
3.1.1 Medidas das Hastes	33
3.1.2 Posições de Interesse.....	34
3.1.3 Instrumentação.....	35

3.2	Dispositivos de Ensaio.....	36
3.2.1	Dispositivo Especificado pela Norma ISO 7206-4.....	36
3.2.2	Dispositivo Alternativo a Norma ISO 7206-4.....	38
3.3	Cimentação das Hastes.....	40
3.3.1	Cimentação no Dispositivo Especificado pela Norma.....	40
3.3.2	Cimentação no Dispositivo Alternativo.....	40
3.4	Acompanhamento da Polimerização.....	41
3.5	Ensaio Estático.....	42
3.6	Ensaio Cíclico.....	43
3.7	Ensaio com Controle de Deslocamento.....	43
3.8	Simulação das Deformações.....	43
3.8.1	Simulação das Condições de Ensaio de acordo com a Norma	43
3.8.2	Simulação das Condições de Ensaio em Configuração Alternativa.....	45
3.8.3	Simulação da Haste Engastada em Corpo Rígido.....	48
4.0	RESULTADOS	49
4.1	Deformações Residuais ao Final da Polimerização	49
4.2	Deformações sob Carregamento Estático.....	52
4.3	Deformações sob Carregamento Cíclico.....	57
4.4	Ensaio com Controle de Deslocamento.....	61
4.5	Simulações por Elementos Finitos.....	63
5.0	DISCUSSÃO.....	66
5.1	Deformações Residuais.....	66
5.2	Ensaio Estático.....	70
5.3	Ensaio Cíclico.....	70
5.4	Ensaio com Controle de Deslocamento.....	71
5.5	Simulação por Elementos Finitos.....	72
6.0	CONCLUSÃO	76
7.0	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	77
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Influência da temperatura no perfil de viscosidade dinâmica, em função do tempo, durante a polimerização de um tipo de cimento ortopédico (FARRAR 2001).....	7
Figura 2.2	Sistema osso-haste-cimento formado no momento da artroplastia.....	10
Figura 2.3	Ilustração do aumento das tensões radiais e circunferenciais pela aplicação de carga e migração da haste.....	11
Figura 2.4	Diferentes níveis de resistência á fadiga para vários materiais (TEOH 2000).....	14
Figura 2.5	Rompimento da camada passivada por planos de escorregamento (TEOH 2000).....	15
Figura 2.6	Fotografia e desenho esquemático de Haste de Quadril instrumentada com extensômetros do tipo roseta fixados em uma fina camada de PMMA (STOLK 2002).....	18
Figura 2.7	Imagem ilustrando o modelo proposto (ROQUES 2004).....	19
Figura 2.8	Resultados de deformações residuais de 3 testes assinalando principalmente o momento em que a haste é inserida no cimento e os picos exotérmicos da polimerização (ROQUES 2004).....	19
Figura 2.9	Imagem ilustrando o posicionamento dos extensômetros no trabalho de Fisher (1997) e o resultado das deformações.....	20
Figura 2.10	Localização dos 30 extensômetros e distribuição das deformações ao longo da haste (PETERS 2001).....	21
Figura 2.11	Imagem do modelo criado para análise de tensões e ao lado o esquema de carregamento previsto (PYBURN 2004).....	22
Figura 2.12	Imagem mostrando a malha de elementos finitos (NUÑO 2002).....	23
Figura 2.13	Gráfico ilustrando os resultados da análise por elementos finitos (NUÑO 2002).....	23
Figura 2.14	Dispositivo experimental a base de PMMA e a malha que o representa na simulação (STOLK 2004).....	24
Figura 2.15	Modelo tridimensional de uma prótese cimentada na região proximal de um fêmur (HUNG 2004).....	25

Figura 2.16	Configuração do ensaio como indicado pela ISO 7206-4 (a), de um modelo simplificado (b) e a malha de uma prótese específica com a representação de seu campo de tensões (c) (BALEANI 2000).....	26
Figura 2.17	Distribuição de tensões paralelas ao eixo axial da haste nas diversas configurações de engaste (RAIMONDI 1999).....	27
Figura 2.18	Tensões máximas principais para as diferentes situações de engaste das hastes (RAIMONDI 1999).....	27
Figura 2.19	Esquema do modelo experimental (MC CORMACK 1999).....	28
Figura 2.20	Ilustração do esquema de carregamento, uma foto do dispositivo e a malha utilizada para a análise por elementos finitos (LENNON 2003).....	29
Figura 2.21	Modelo de configuração das amostras e o desenho esquemático do dispositivo de ensaio (HERTZLER 2002).....	30
Figura 2.22	Distribuição de tensões (MPa) na região lateral da haste (PLOEG 1999)..	31
Figura 3.1	Desenho com as medidas da haste fornecido pela MDT.....	33
Figura 3.2	Desenho esquemático constante na Norma ISO 7206-4.....	34
Figura 3.3	Posições na haste e no manto de cimento onde foram afixados os extensômetros.....	35
Figura 3.4	Detalhes das diferenças na instrumentação. Extensômetros fixados diretos na haste e aqueles fixados sob uma pequena camada de PMMA.....	36
Figura 3.5	Desenho esquemático apresentado na norma sugerindo a configuração do dispositivo.....	37
Figura 3.6	(a) Dispositivo construído de acordo com as recomendações contidas na Norma ISO 7206-4. A prótese está instrumentada para aquisição de dados. (b) e (c) Dimensões (mm) totais do manto de cimento e aquela em relação à haste na região proximal.....	37
Figura 3.7	(a) Desenho esquemático da montagem do dispositivo criado para cimentação com uma camada menos espessa. (b) e (c) Dimensões (mm) totais do manto de cimento e aquelas em relação à haste na região proximal.....	38
Figura 3.8	Imagem do dispositivo alternativo preparado para o ensaio.....	39
Figura 3.9	Detalhe da prótese cimentada e instrumentada no dispositivo alternativo. Os parafusos de fixação impedem o giro do copo metálico dentro do suporte.....	39
Figura 3.10	Prótese afixada e instrumentada no momento da cimentação no copo metálico.....	41
Figura 3.11	Detalhe da prótese alinhada no copo metálico durante a cimentação.....	41

Figura 3.12	Imagem em detalhe dos dados adquiridos através dos extensômetros no momento de um ensaio estático.....	42
Figura 3.13	Malha do copo de cimentação à esquerda e do dispositivo de contato a direita.....	44
Figura 3.14	Malhas do manto de cimento, da prótese e da cabeça.....	44
Figura 3.15	Ilustração do modelo completo e suas condições de contorno.....	45
Figura 3.16	Malhas criadas para a base rígida e o dispositivo de contato.....	46
Figura 3.17	Malhas do copo metálico, do manto, da prótese e da cabeça.....	46
Figura 3.18	Ilustração da malha do modelo criado e das condições de contorno.....	47
Figura 3.19	Ilustração do modelo criado considerando a prótese engastada em um corpo rígido.....	48
Figura 4.1	Resultados de deformação residual no manto de cimento depois de 24 horas de acompanhamento nas quatro posições de aquisições de dados.....	50
Figura 4.2	Dados de deformação durante a polimerização da amostra N3.....	51
Figura 4.3	Dados de deformação na cimentação da amostra A3 durante os 20 minutos iniciais. O ponto A se refere ao início do vazamento do cimento no copo metálico. O ponto B ilustra o momento do pico exotérmico.....	51
Figura 4.4	Deslocamento da amostra A1 durante os estágios do carregamento estático.....	54
Figura 4.5	Deslocamento da amostra A3 durante os estágios do carregamento estático.....	54
Figura 4.6	Deslocamento da amostra N3 durante os estágios do carregamento estático.....	55
Figura 4.7	Deslocamento da amostra N2 durante os estágios do carregamento estático.....	55
Figura 4.8	Deformações medidas nas posições do cimento durante os ciclos do carregamento estático. As médias de cada conjunto estão colocadas no gráfico de barras.....	56
Figura 4.9	Deformações medidas nas posições das hastes durante os ciclos do carregamento estático. As médias de cada conjunto estão colocadas no gráfico de barras.....	56
Figura 4.10	Deslocamento das linhas de carga durante o ensaio de fadiga da amostra A1.....	57
Figura 4.11	Gráfico mostrando o início da aquisição de dados nos diversos extensômetros da amostra N3.....	58

Figura 4.12	Deformações medidas nas posições das hastes ao final dos cinco milhões de ciclos de carregamento. As médias de cada conjunto de amostras (A e N) estão colocadas no gráfico de barras.....	60
Figura 4.13	Deformações medidas nas posições do cimento ao final dos cinco milhões de ciclos de carregamento. As médias de cada conjunto de amostras (A e N) estão colocadas no gráfico de barras.....	61
Figura 4.14	Comportamento do sistema cimento/haste sob deformação constante de 5 mm/min.....	62
Figura 4.15	Resultados das deformações encontradas para a configuração com manto de cimento menos espesso.....	64
Figura 4.16	Resultados das deformações encontradas para a configuração com manto de cimento mais espesso.....	65
Figura 5.1	Gráfico ilustrando a deformação residual de duas amostras durante a cimentação.....	67
Figura 5.2	Gráfico ilustrando as deformações obtidas na simulação numérica.....	74
Figura 5.3	Gráfico comparativo dos valores médios obtidos experimentalmente nos ensaios estáticos e dos resultados das simulações, para todas as posições no manto de cimento.....	74
Figura 5.4	Gráfico comparativo dos valores médios obtidos experimentalmente nos ensaios estáticos e dos resultados das simulações, para todas as posições na haste.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Resultados da amplitude de deslocamento das linhas de carga durante os ensaios de fadiga.....	58
Tabela 4.2	Resultados de deslocamento das linhas de carga em ensaio sob deslocamento constante de 5 mm/min.....	62
Tabela 4.3	Valores de deformação obtidos na simulação para as posições no manto de cimento tal qual nas amostras experimentais Os valores mostrados são referentes a média dos resultados em cada posição.....	64
Tabela 4.4	Valores de deformação obtidos na simulação para as posições na haste tal qual nas amostras experimentais Os valores mostrados são referentes a média dos resultados em cada posição.....	64
Tabela 5.1	Valores de deformação no manto de cimento sob carregamento estático. Os valores mostrados nos ensaios são referentes à média dos resultados em cada posição.....	73
Tabela 5.2	Valores de deformação na haste sob carregamento estático. Os valores mostrados nos ensaios são referentes à média dos resultados em cada posição.....	73

RESUMO

A Norma ISO 7206-4 descreve o método, as condições de ensaio e a preparação de corpos-de-prova para a determinação das propriedades de resistência à fadiga de hastes femorais. Como para a preparação dos corpos-de-prova a Norma não define uma espessura do meio de fixação, este estudo teve como objetivo investigar quais os efeitos, nos resultados de resistência à fadiga, de camada de cimento menos espessa e, se possível, estabelecer uma condição de ensaio mais severa e facilmente reproduzível, contrapondo a atualmente sugerida pelas ilustrações da Norma. Para tanto, foram avaliadas através de extensômetros de resistência elétrica as deformações residuais provenientes da cura do cimento e as deformações produzidas durante os ensaios nos mantos de cimento e nas hastes.

Para o desenvolvimento do trabalho foi construído um dispositivo de fixação de amostras alternativo. Neste aparato já estão atendidos os ângulos de abdução e flexão previstos pela Norma. O suporte de amostra (cilíndrico) foi produzido com diâmetro interno que possibilitou a preparação de camadas de cimento de menor espessura. Foram respeitadas as condições de preparo, temperatura e composição para posterior comparação de resultados. Foram previstas a preparação de 3 corpos-de-prova em cada espessura de manta para os ensaios de fadiga. Todas fixadas com PMMA. Os mantos de cimento foram instrumentados nas regiões proximal e distal e as hastes femorais nas regiões lateral, frontal e medial. Os ensaios foram conduzidos nas condições que determinam a Norma e os dados de deformação foram adquiridos por um condicionador de sinais e processados por software específico. Adicionalmente foram realizadas as simulações por elementos finitos das duas condições de espessuras do manto de cimento para complementação das análises.

Ao final se pode constatar que as diferenças nos níveis de deformação de ambos os casos não foram significantes. Considerando apenas os resultados dos ensaios de fadiga, os corpos de prova preparados com manto mais espesso apresentaram deformações pouco maiores nas hastes. Desta forma, se constatou que o dispositivo criado não produziu uma condição mais severa. Além disso, se pôde inferir que o acúmulo de danos na camada de cimento tem grande influencia sobre as deformações que são impostas às hastes ao longo dos 5 milhões de ciclos de fadiga.

ABSTRACT

The ISO 7206-4 standard describes the method and conditions of testing to assess the endurance properties of femoral stems. However, in the standard is not specified the thickness of the embedding medium. In this study it has been investigated the influence of thin cement layer during fatigue tests. Therefore, the strains induced by the curing and the external loads applied during the fatigue testes were measured using strain gages inside the cement mantle and at particular stem positions.

A test fixation apparatus was fabricated to develop this work. The apparatus follow the angles of adduction and flexion required by the ISO standard. A cylindrical support was produced to facilitate the stem fixation in the thinner cement layer. The conditions of preparation, temperature and composition of cement mantles were kept to allow comparison with the commonly used method. The fatigue tests were conducted with three specimens for each mantle thickness utilizing PMMA for the stem fixation. The measurements of strain gages were realized in the proximal and distal regions of the cement mantles and the lateral, frontal and medial regions of the stems. The tests were performed according ISO standard specifications and the data measurements acquiring and processing were realized by specific software. Additionally, the computer simulations of the two cement mantle condition were performed.

The results suggest in both cases that there are no significant differences in the strain levels. The fatigue tests in the thicker cement layer specimens showed small strain increases in the stems. In this way the both apparatus have shown similar results. Besides that, it was possible to conclude that the damage accumulation at the cement played an important rule in strain imposed at the stem during five millions cycles fatigue testing.

1.0 INTRODUÇÃO

No Brasil, existem poucos laboratórios com capacidade, ou seja, equipamentos e massa crítica, para executarem análises de implantes ortopédicos segundo o que ditam as normas nacionais e internacionais. O governo Brasileiro ciente disto, através de uma ação conjunta do Ministério da Saúde e do Ministério de Ciência e Tecnologia, em 2005, deu início a um processo de capacitação de laboratórios. O objetivo estava em selecionar instituições no país que, habilitadas inicialmente em trabalhos ligados a esta área ou por possuírem sistemas de gestão implementados, se propusessem a integrar uma rede nacional de avaliação de implantes. Ao cabo deste programa, ele se encerra ao final de 2007, os laboratórios deverão estar aptos a realizar uma gama de ensaios de avaliação de implantes e de desenvolver novos procedimentos e, além disso, deverão ter condições de capacitar mais recursos humanos na área e, fundamentalmente, formar a Rede Multicêntrica de Avaliação de Implantes Ortopédicos – REMATO.

Em 2001, o Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul passou a ter contato com dados e informações a respeito das dificuldades e necessidades do setor de implantes ortopédicos. Naquele momento viu na sua estrutura condições para começar a trabalhar com ensaios de próteses metálicas. A partir de então começaram uma série de atividades e trabalhos que originaram a criação de um grupo vinculado à área de engenharia biomédica. Hoje, em fase final do seu projeto de atualização de infra-estrutura, que permitirá integrar definitivamente a REMATO, já executa rotineiramente uma série de ensaios e análises de diversos tipos de implantes ortopédicos.

Ao longo do tempo, já completou 50 anos, o LAMEF se destacou principalmente pela atuação nas áreas da mecânica da fratura e da fadiga. No campo dos implantes ortopédicos já foram realizados muitos ensaios de fadiga em diversos tipos de componentes. Destaca-se aí a realização de ensaios de fadiga em hastes para substituições totais de quadril que, no Brasil, são regulados pela Norma NBR ISO 7206 (partes 1 a 10). A Norma especifica, entre outros itens, a forma de carregamento, a posição em que a haste deverá ser fixada e o meio de fixação que deverá ser cimento ortopédico. “A ISO 7206-4 (versão internacional) foi concebida com base em muitos relatos de falhas em substituições

totais de quadril observados *in vivo* nos anos 70 e 80” (BALEANI 2000). Ou seja, os procedimentos previstos pretendiam replicar as condições de uma haste cimentada sem suporte na região proximal. Assim, com a perda de estabilidade nesta região, uma parte considerável do implante estaria sendo carregada em balanço. Esta situação fica bem caracterizada quando a Norma estabelece que o meio de embutimento, em relação a cabeça, deverá estar a uma distância equivalente a 40% do comprimento do centro da cabeça ao final distal da haste. Porém, desde o início, avaliando cautelosamente todos os detalhes da norma, se percebeu que em relação a forma de fixação não há uma definição quanto ao diâmetro do meio de encaixe. Nas dezenas de testes realizados até o momento nenhuma haste falhou ao longo dos ensaios. Os ensaios de fadiga orientados por esta Norma devem durar 5 milhões de ciclos ou até que a prótese falhe. Esta situação demonstra a qualidade dos implantes sob análise, por outro lado, suscita algumas dúvidas quanto a metodologia de ensaio empregada.

Nas cirurgias do quadril, os ortopedistas avaliam criteriosamente questões como tamanho, idade, peso e atividade dos pacientes de forma a escolher o design apropriado do implante. Isto implicará nas características do canal femoral que deverá ser preparado para receber o implante e, conseqüentemente, estarão também definidas as dimensões do manto de cimento ortopédico que fixará a prótese. Vários estudos têm mostrado que uma ótima camada de cimento é um fator de suma importância para a longevidade de próteses cimentadas. De acordo com estudos radiológicos e observações clínicas uma ótima camada de cimento deve ser assimétrica, evitar o contato do osso com a prótese e ter entre 1 e 3 mm de espessura nas Zonas de Gruen 2 a 6. Nas Zonas 1 e 7 deve ter de 4 a 7 mm de espessura sendo que a haste metálica deve preencher mais de 50% do canal (MORSCHER 2002).

Evidentemente as exigências e restrições a que estará submetida uma haste implantada em um fêmur humano, são bem diferentes de dispositivos elaborados para sustentação em bancadas de teste, embora também existam fêmures compósitos que representam uma aproximação da condição real. Sabe-se que a Norma ISO está permanentemente sob aperfeiçoamentos e muitos são os estudos neste sentido. De qualquer forma, pareceu relevante avaliar melhor esta questão relativa a influência da espessura da camada de cimento nos ensaios em laboratório. Como se sabe os cimentos ortopédicos tem módulo de elasticidade em torno de 3GPa e um comportamento visco-elástico característico. Por outro lado as condições de polimerização deste material polimérico têm profunda influência sobre o comportamento mecânico. Já as hastes de quadril, que podem

ser produzidas em ligas de titânio, aço inoxidável ou cromo-cobalto, têm módulo de elasticidade e resistência a fadiga muito superiores, se comparadas com o polimetacrilato de metila (PMMA) que é a base dos cimentos usados atualmente.

Considerando que os dois materiais atuam em conjunto, e que sob carregamento externo a haste transfere carga para o cimento, passa a ser interessante investigar com a mudança de rigidez do sistema, quais as conseqüências seriam impostas a haste. Em outras palavras, se haveria uma forma de configurar um ensaio, ainda sob as diretrizes principais da ISO 7206 (condições de carregamento), que representasse uma condição mais severa ao implante. Como este sistema se forma quando a haste é colocada em contato com o cimento ainda sob polimerização torna-se pertinente avaliar uma série de aspectos desde este momento inicial. Verificar qual a grandeza e a influência das tensões residuais, geradas no momento da polimerização, nas deformações do cimento, já no seu estado sólido, sob carregamento. Analisar, também, se o nível de deformações do cimento sob carga pode variar de acordo com sua espessura em relação a haste. Finalmente, concluir se estas questões relativas a cimentação trariam conseqüências na forma de diferentes níveis de deformação das hastes.

Portanto, o objetivo deste trabalho é comparar ensaios conduzidos de acordo com as especificações da Norma ISO 7206-4 (e o que sugerem suas ilustrações) com ensaios em uma configuração alternativa (menor camada de cimento) registrando dados de deformações tanto do cimento como das hastes e, se possível estabelecer uma forma mais severa para análise em fadiga de hastes de quadril. De qualquer modo, estamos cientes de que se forem constituídas condições muito severas pode-se levar ao superdimensionamento das hastes e a problemas como “stress shielding”, ou seja, uma barreira às tensões que normalmente agem sobre o osso e, ao afrouxamento asséptico que é a perda da estabilidade ao longo do tempo devido a questões mecânicas ou biológicas. Para tanto, se revisou uma série de aspectos relativos aos cimentos poliméricos, como seu comportamento mecânico, influência do processo de polimerização e das tensões residuais. Considerou-se também a metodologia empregada e os resultados obtidos em pesquisas realizadas por diversos autores em temas semelhantes. Além disso, nas hastes foram realizados ensaios estáticos, dinâmicos e com controle de deslocamento e comparados com os resultados encontrados no modelamento matemático destes mesmos ensaios.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Ortopédico

Os cimentos são formados genericamente por uma parte líquida e uma parte em pó. O componente líquido é composto pelo monômero metacrilato de metila (MMA) e um ativador que promove o processo de cura a frio. Há, também, traços de um inibidor para minimizar a polimerização do monômero durante a estocagem. O componente em pó contém partículas de PMMA, como componente principal e, sulfato de bário e peróxido de benzoil. O peróxido de benzoil inicia a polimerização quando o pó e o componente líquido se misturam.

Após a mistura das fases líquido e sólido a polimerização ocorre através de uma reação de radicais livres e a cinética é regulada pela concentração do ativador (Peróxido de Benzoil) e pelo acelerador (N,N-Dimetil P-Toluidina) os quais estão presentes na fase sólida e líquida respectivamente. Elementos radiopacos (ex. sulfato de bário) são adicionados à fase sólida de maneira a criar um contraste com o osso em exames radiológicos (DE SANTIS 2003).

Na fixação da haste femoral com cimento as técnicas de mistura dos componentes e sua aplicação durante a artroplastia evoluíram desde a primeira geração, com preparação e preenchimento manual e sem preparação do canal medular femoral, até a segunda geração que inclui utilização de injetor do cimento e fechamento do canal femoral. Nos dias atuais, as técnicas de terceira geração trouxeram medidas de redução de porosidade (preparação a vácuo ou com centrifugação e pressurização do cimento), utilização de centralizadores e a utilização de um sistema de aplicação semelhante ao das técnicas de segunda geração.

2.1.1 Função na Artroplastia

Cimentos ortopédicos de base acrílica foram originalmente destinados para uso em cirurgias dentárias, mas agora, cerca de 40 anos depois da primeira vez que foram utilizados em cirurgia total de quadril, formam uma interface de comportamento seguro entre as próteses metálicas ou plásticas e o osso vivo (DUNNE 2003).

A utilização do PMMA por Jonh Charnley em 1959 para a fixação de componentes no osso, em substituições totais de quadril, revolucionou a artroplastia do quadril (MORSCHER 2002).

Adicionalmente a procedimentos de artroplastias de quadril, passou a ser empregado em artroplastias de joelho e outras juntas, com o objetivo de fixar implantes metálicos e poliméricos ao osso vivo (DEMIAN 1998).

A utilização do cimento acrílico envolve a mistura do monômero (líquido) ao polímero (pó) para produzir uma massa viscosa. Essa fase intermediária permite o manuseio, a moldagem e o vazamento na cavidade do osso. A prótese é então fixada e mantida no local até que o processo de polimerização promova a solidificação da massa de cimento (ORR 2003)

A camada de cimento tem o objetivo principal de resistir e transferir carga entre os materiais naturais e sintéticos unidos, enquanto funciona como um anteparo mecânico, reduzindo concentração de tensões e absorvendo choques mecânicos (MCCORMACK 1999).

Indicado para a fixação de prótese ao osso no processo de artroplastia, estabelece um processo de adesão mecânica com a parte do osso de estrutura esponjosa (trabecular) e com a prótese metálica.

2.1.2 Comportamento Mecânico

O PMMA é um polímero termoplástico, vítreo e amorfo, o qual é conhecido por ser um material frágil. Suas características de material frágil contribuem para o pobre comportamento em fadiga. Estudos *in vitro* têm demonstrado que a resistência à fadiga do PMMA é algo em torno de 8 a 20 MPa. A natureza dos mecanismos de falha por fadiga também têm sido objeto de análise. Não está clara, por enquanto, qual parte do processo de fadiga é dominante, se a nucleação de trincas de fadiga ou a propagação de trincas de fadiga (GILBERT 1995).

O comportamento viscoelástico do PMMA, tal qual se dá em muitos outros materiais, se refere ao fenômeno que ocorre a altas temperaturas, onde as deformações não são apenas função da tensão aplicada, mas também do tempo e da temperatura. O resultado prático disso é que sob carregamento constante a deformação aumentará gradualmente ao longo do tempo (fluência) e, contrariamente, à deformação constante, a tensão diminuirá com o passar do tempo (relaxamento de tensão). O PMMA tal quais outros polímeros, começa a apresentar o comportamento viscoelástico quando sua temperatura se aproxima

de um nível conhecido como temperatura de transição vítrea(Tg). Muito acima desta temperatura os polímeros passam a apresentar um estado elástico ou fluído, por outro lado, muito abaixo desta temperatura eles são duros, frágeis e não sofrem fluência. A temperatura de transição vítrea do PMMA (370° K) é próxima o bastante da temperatura corporal (310° K) de modo que o comportamento viscoelástico se torna significativo (WHEELER 1999).

Há muitas propriedades mecânicas que são necessárias determinar para se caracterizar esse tipo de material. Alguns métodos de testes mecânicos estáticos podem não ser sensíveis as condições de carregamento *in vivo* e, além disso, podem não ser apropriados na determinação da estabilidade dos componentes do cimento ao longo do tempo. Adicionalmente, há muitas variáveis (relação de mistura dos componentes de cimentos ortopédicos, preparação de corpos-de-prova e condição de pré-molhamento) que podem afetar as propriedades mecânicas determinadas *in vitro* (DEMIAN 1998).

As características mecânicas dos polímeros são muito mais sensíveis a mudanças de temperatura na vizinhança da temperatura ambiente. Considerando o comportamento tensão-deformação para o PMMA, a várias temperaturas entre 4 e 60 °C, podemos constatar que um aumento de temperatura produz uma diminuição do módulo de elasticidade, uma redução do limite de resistência à tração e uma melhoria da ductilidade (CALLISTER 2002)

Diferentes fatores podem afetar as propriedades mecânicas do PMMA. Por exemplo, o PMMA tem relativamente baixa tenacidade à fratura, a qual está relacionada com a baixa resistência à fadiga e ao impacto. Um fator que pode afetar a tenacidade à fratura é a porosidade. Uma vez que os poros são identificados *in vitro* como concentradores de tensão e fontes de trincas, alto grau de porosidade pode contribuir para microtrincas (RIES 2006).

2.1.3 Processo de Polimerização

O iniciador (Peróxido de Benzoi) e o acelerador (N,N-Dimetil P-Toluidina) formam um complexo com a produção de radicais, que por sua vez dão o início à polimerização do monômero. O grau de polimerização é afetado pela quantidade de iniciador e acelerador, no pó e no monômero líquido, pelo tipo de preparação (manual, vácuo ou centrifugação), pelo pré-resfriamento do monômero e pela presença de oxigênio. O pré-resfriamento dos componentes também aumenta o tempo de polimerização e a viscosidade do cimento quando comparada a preparação em que os componentes estão a

temperatura ambiente. Como se trata de um processo exotérmico, em que se pode chegar a relativamente altas temperaturas em pequenos intervalos de tempo, há um número de fatores que afetam a máxima temperatura do processo, como uma grande massa de cimento e uma grande quantidade de monômero misturada ao pó (DEMIAN 1998).

A contração do cimento durante o processo de polimerização é um fator que pode contribuir com o afrouxamento de próteses. O volume de cimento misturado a vácuo pode ser reduzido cerca de 7 a 8% na cura, comparado com 1 a 2% no caso de cimento misturado manualmente. Isto é uma consequência do grande número de bolhas de ar, no caso do cimento misturado manualmente, expandindo durante a polimerização e agindo contrariamente à contração. A direção da contração, a partir da haste ou a partir do osso também é significativa (ORR 2003).

A reação de polimerização é afetada por vários fatores: primeiro, durante o progresso da polimerização, a mistura se torna viscosa assim como as cadeias poliméricas crescem longamente; em segundo lugar, o monômero permanece relativamente móvel levando a uma auto-aceleração da taxa de polimerização; por último, a reação é fortemente exotérmica e a liberação de calor promove a aceleração da velocidade de polimerização. A velocidade de reação fortemente não linear durante o processo torna difícil saber exatamente quando o material se torna capaz de suportar cargas (LENNON 2002). A figura 2.1 mostra a influência da temperatura, em função do tempo, na evolução da viscosidade durante a polimerização de um cimento ortopédico comercial.

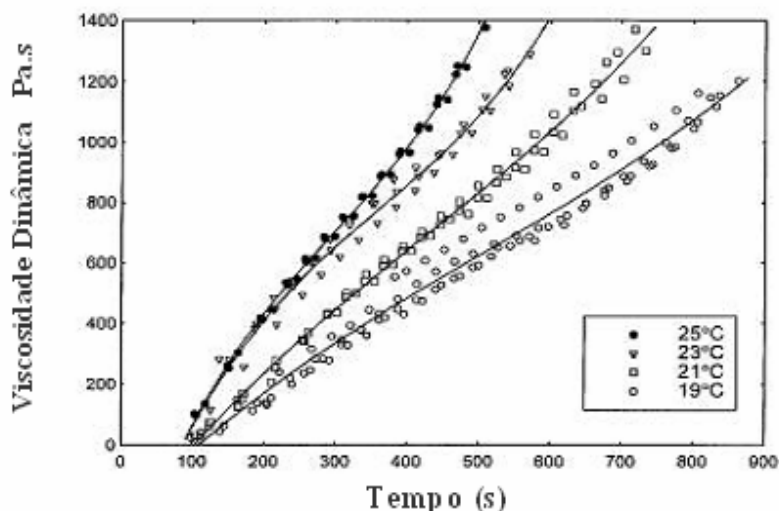


Figura 2.1 Influência da temperatura no perfil de viscosidade dinâmica, em função do tempo, durante a polimerização de um tipo de cimento ortopédico (FARRAR 2001).

2.1.4 Tensões Residuais

O processo de cura do cimento é um fenômeno complexo de solidificação onde tensões transitórias são geradas e as tensões residuais variam com as diferentes condições de contorno durante a cura (NUÑO 2002).

O processo de polimerização transforma o líquido inicial em um material viscoso e, finalmente, em um cimento endurecido rapidamente, com o aumento associado da temperatura devido ao processo de polimerização exotérmica. Este processo pode chegar a altas temperaturas em períodos de tempo relativamente curtos dependendo do volume de cimento envolvido, da quantidade de monômero misturada no pó e das quantidades do ativador e do acelerador. Isto sem considerar aspectos intrinsecamente relacionados ao momento de uma artroplastia, tais como a condição da cavidade femoral, resfriamento do implante e sua taxa de transferência de calor.

Durante a polimerização dois mecanismos podem induzir as alterações dimensionais no cimento, criando tensões residuais: a contração devido à mudança de densidade (o polímero final é mais denso que o monômero inicial) e a contração térmica devido a contração do sólido no resfriamento.

A tensão residual é um fator a ser considerado no aparecimento de trincas, no cimento, antes do carregamento, assim como a porosidade, concentração de tensões ou a excessiva geração de calor. O pico de temperatura alcançada para uma dada região de cimento parece ter um significativo efeito no nível de tensões residuais que ocorrem, indicando que o controle da relação polímero/monômero, assim como as condições ambientais durante a polimerização são críticas no controle do fenômeno de trincas devidas à contração do cimento (LENNON 2002).

Em resumo, as tensões residuais podem ser resultantes da contração do cimento, pressurização durante a cimentação e de gradientes térmicos oriundos das variações nas taxas de cura.

2.1.5 Espessura da Camada de Cimento

Vários autores sugerem, através de estudos radiográficos, clínicos e análise por elementos finitos, que finas camadas de cimento estão sujeitas ao aumento de deformações, podendo fragmentar e contribuir para o afrouxamento do componente femoral (KAWATE 1998).

A figura 2.2 ilustra o sistema osso-cimento-haste formado no momento da artroplastia. Neste sistema são observadas, *in vivo*, camadas de cimento em torno de 1 a 7 mm conforme a região, a geometria do implante e a cavidade intramedular.

A forma e integridade do manto de cimento e a adequação das interfaces cimento/implante e cimento/osso são fatores importantes que afetam a longevidade de implantes femorais cimentados. No entanto, a importância da espessura, vazios, porosidades, homogeneidade e extensão da camada de cimento são controversas. Muitos estudos têm correlacionado uma fina ou incompleta camada de cimento com distribuição irregular de tensões, fratura do manto, descolamento da haste, afrouxamento e osteólise. Muitas variáveis influenciam a forma da camada de cimento. Estas incluem a geometria do implante, preparação e anatomia do fêmur e técnica de cimentação. Por outro lado, dispositivos centralizadores (distal e proximal) parecem aumentar completamente a espessura e a reprodutibilidade do manto de cimento (VALDIVIA 2001).

Sob o ponto de vista mecânico, as trincas passantes, ou seja, que se estendem da interface do cimento com a haste até a interface do cimento com o osso, podem contribuir para a perda de estabilidade do componente implantado, porque o manto de cimento não resistiria por muito tempo a tensões radiais. Do ponto de vista biológico, estas trincas passantes agem como condutores de partículas (debris), entre a haste e o osso. Se uma interface haste/cimento tem o potencial para gerar partículas, então a transferência destas pequenas partículas através do cimento para o osso seria prejudicial (MANN 2004).

A etiologia da fratura do manto de cimento é multifatorial. Variáveis importantes são provavelmente a resistência a fadiga do cimento, defeitos no manto de cimento, espessura do manto, projeto do implante e o histórico de carregamento do quadril (KAWATE 1998).

Jasty et al. estudaram as características mecânicas e biológicas em relação a implantes para substituição total de quadril e concluíram que as falhas de longo prazo do manto de cimento foram devidas a fatores mecânicos, começando como trincas na interface haste-cimento e gradualmente se desenvolvendo como fraturas de fadiga ao longo da camada de cimento. Eles apresentaram evidências de que as trincas tiveram início como um resultado da fadiga associado com defeitos no manto (ORR 2003).

A falha catastrófica do cimento não ocorre frequentemente. O mecanismo mais comum de falha é a ruptura por fadiga produzida por carregamentos cíclicos abaixo da resistência máxima do material. O carregamento cíclico resulta em acúmulo de dano nas regiões de pico de tensão dentro do cimento. Vazios dentro do cimento agem como

concentradores de tensões e, conseqüentemente, como um foco para o início da fratura por fadiga. Por outro lado vazios de determinado tamanho e configuração podem dissipar a energia de fratura, produzir o cegamento da ponta da trinca e a conseqüentemente dificultar a propagação estável da fratura (MULLER 2002).

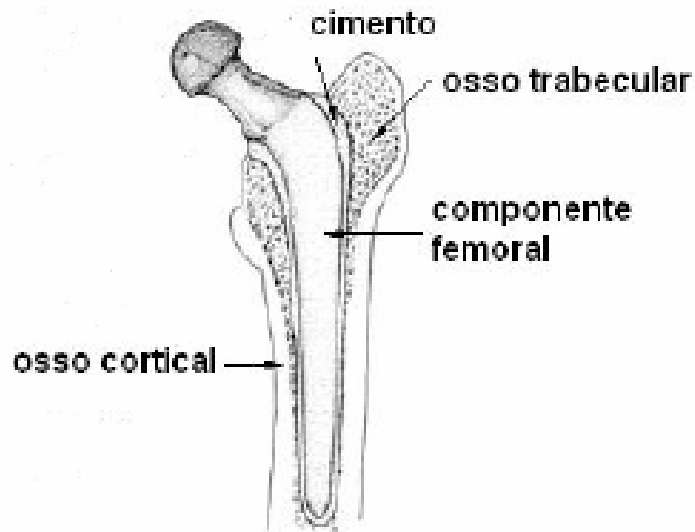


Figura 2.2 Sistema osso-haste-cimento formado no momento da artroplastia.

2.1.6 Interface Cimento/Haste

A diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos e o fato do módulo de elasticidade do cimento ser muito menor do que o módulo de elasticidade do osso e particularmente da haste, causam uma diferença de comportamento mecânico dos materiais durante o carregamento. Conseqüentemente resulta na distribuição de tensões não uniformes e de valores elevados nas interfaces (ZOR 2002).

Estudos biomecânicos identificaram esta interface, particularmente a região medial-proximal e a ponta da haste como as áreas de maiores tensões sob carregamento. A resistência da interface é determinada pelo coeficiente de fricção da área de interface. Superfícies de acabamento rugoso com alto coeficiente de fricção aumentam a resistência ao cisalhamento da interface, resistindo à migração da haste. Contudo, se ocorrer a falha da interface, o micro-movimento da superfície rugosa causará uma abrasão do cimento gerando uma grande quantidade de debris. Por outro lado, implantes polidos com um baixo coeficiente de fricção diminuem a resistência ao cisalhamento da interface. Estes implantes tendem a migrar dentro do manto de cimento e se estabilizar pelo aumento de tensões radiais compressivas e tensões circunferenciais. A figura 2.3 ilustra esta situação. Adicionalmente, as superfícies polidas minimizam a abrasão e a geração de debris.

Entretanto, picos de tensão no manto e na interface com a haste predispõem o sistema ao descolamento e ao início de fratura por fadiga (MULLER 2002).

O manto de cimento e suas interfaces têm sido considerados, a longo tempo, como o ponto fraco na fixação duradoura de componentes femorais em artroplastias totais do quadril. As evidências são bastante fortes; adicionalmente às trincas partindo dos poros, o mecanismo dominante de início de falha da fixação de componentes femorais é a perda de adesão na interface cimento/metal. Essa perda de adesão não é um processo generalizado, mas, se inicia em dois pontos especificamente, na região proximal e distal das próteses (ESTOK 1997).

Os resultados do estudo de Hung et al (2004) revelam que os pontos principais para o início de falhas são as regiões proximal-medial e da ponta da haste, o que claramente demonstra o mesmo cenário observado em estudos clínicos. Tais falhas por fadiga não são resultados apenas das degenerações das interfaces haste-cimento, mas também são fortemente afetadas pela distribuição de tensões na camada de cimento e acúmulo de danos nos ciclos de carregamento.

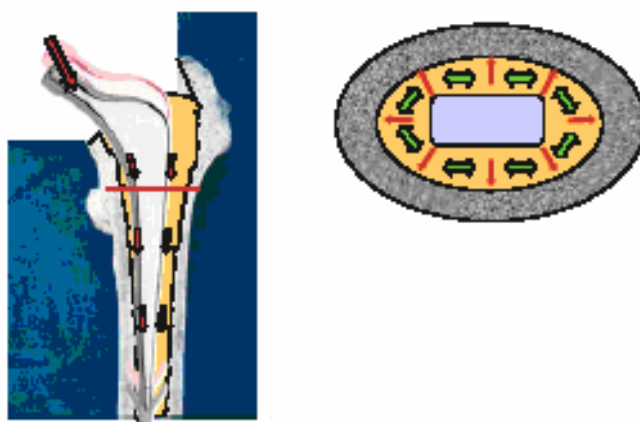


Figura 2.3 Ilustração do aumento das tensões radiais e circunferenciais pela aplicação de carga e migração da haste.

2.2 Hastes Femorais

2.2.1 Dados Históricos das Hastes Femorais

O conhecimento adquirido durante a Primeira Guerra ajudou no tratamento das vítimas da Segunda Guerra Mundial. Nesta, houve menos amputações executadas, menos gangrena e melhores meios de fixação das fraturas. Os alemães precisavam de medidas

rápidas para recolocar os seus soldados em condições de lutar e desenvolveram vários procedimentos de fixação de fraturas durante esse período. Ao lado disto, também os americanos realizaram grandes contribuições. Em 1942, um americano, Austin T. Moore (1895-1963) executou e noticiou a primeira substituição de quadril por uma prótese metálica. Pela primeira vez, ele tinha substituído a porção superior inteira do fêmur com uma prótese feita a partir de uma liga de cromo-cobalto. Tinha uma cabeça redonda, laçadas para inserção de músculos, e uma extremidade inferior que deslizava para o interior da diáfise fixando-se a ela. Com o passar dos anos, melhorou o desenho da prótese e a técnica cirúrgica. Em consequência, há um tipo de prótese chamada de Austin-Moore que ainda hoje é usada. Nos anos que se seguiram à guerra, os cirurgiões ortopédicos buscaram aperfeiçoar o tratamento das fraturas, em particular com o uso de pinos metálicos e arames para fixação. Com a introdução de ligas que poderiam ser efetivamente usadas, houve também uma nova onda de próteses que foram desenvolvidas para o tratamento tanto de artrite como de fraturas problemáticas. O uso de antibióticos e de novos meios de diagnósticos também facilitou a prática ortopédica. Em 1950, Sir John Charnley escreveu um livro clássico na abordagem não-cirúrgica das fraturas, "The Closed Treatment of Common Fractures". Charnley, entretanto, é efetivamente reconhecido como o inovador da artroplastia total de quadril. Entre outras contribuições, é dele o desenvolvimento de um cimento acrílico auto fixante para ancorar a prótese femoral e a cúpula acetabular. Charnley também estava interessado no atrito articular e substituiu o Teflon com o uso de polietileno de alta densidade. Muitas das artroplastias totais de quadril que ele executou nos anos 60 estão ainda sólidas e servindo efetivamente aos seus pacientes.

2.2.2 Materiais de Uso em Artroplastias de Quadril

Um grande desafio da cirurgia ortopédica é a busca de implantes para fixar fraturas ou substituir partes do esqueleto, feitos de materiais que conciliem bom desempenho mecânico e conveniente compatibilidade com o organismo. Nos dias atuais, para a maior parte dos implantes, os materiais utilizados têm-se mostrado adequados, desempenhando eficientemente seu papel. Entretanto, há diferenças entre implantes utilizados na fixação de fraturas, considerados como implantes estáticos, daqueles destinados a substituir uma articulação. Enquanto nos primeiros se espera resistência mecânica suficiente para que possa substituir temporariamente o papel desempenhado pelo osso, aliada à composição que não provoque qualquer reação no organismo, a substituição de uma articulação coloca um desafio adicional: suportar contínuos movimentos e a transmissão de cargas. A

princípio, entre os materiais que pareciam mais capazes de desempenhar esse papel situaram-se os metais, buscando-se neles não somente a capacidade de suportar as cargas, mas também de resistir à corrosão provocada pelo meio salino do organismo. Os metais mais comumente utilizados na confecção de articulações do quadril são os aços inoxidáveis, as ligas de cromo-cobalto e o titânio e suas ligas.

O aço inoxidável mais usado atualmente é conhecido pela designação da Norma ASTM F 138 (correspondente ao aço inox 316L modificado para aplicações médicas) e tem como principais elementos de liga o cromo, níquel e molibdênio. Essa liga é bastante suscetível à corrosão por pites quando em contato com o ambiente do organismo, podendo levar a falhas estruturais no implante e conseqüente fratura por fadiga. A liga de cromo-cobalto apresenta, por outro lado, grande resistência à corrosão e melhor desempenho mecânico. A reação dos tecidos que ficam em contato com o metal mostra melhor compatibilidade do que com os aços. O titânio, associado ao alumínio e vanádio, é o metal que provoca menor reação no organismo, desde que não sofra desgaste. Caso ele ocorra, as partículas do metal ficam impregnadas nos tecidos adjacentes. O titânio tem pouca resistência à abrasão e por isso não é recomendável para ser utilizado em áreas que sofram atrito. Atualmente as hastes para substituições totais de quadril estão sendo apresentadas em diversas configurações. Elas podem diferir no seu modo de fixação, cimentadas ou não, e isso está diretamente relacionado ao tipo de acabamento superficial, que pode ser polido ou rugoso. Elas podem ser modulares ou não. Dessa forma podem ter a cabeça fixa ou móvel (de material cerâmico ou metálico) e muitas variações de geometria. Nesse aspecto podem-se verificar modelos com ou sem colar na região do corpo proximal, além de próteses totalmente modulares divididas em parte do colo femoral, do corpo proximal e da haste distal. Todas essas variações são oriundas de pesquisa e desenvolvimento, buscando a estabilidade do implante, produzindo o mínimo de desgaste das partes e de modo a evitar o afrouxamento da prótese, prolongando a sua vida útil.

Em resumo, todos os materiais utilizados em substituição total de quadril devem ter em comum a biocompatibilidade, isto é, não provocar rejeição local ou sistêmica do corpo humano, devem ser resistentes a corrosão, degradação e ao desgaste, ter propriedades mecânicas capazes de suprir as necessidades da estrutura que foi substituída e atender às exigências de normas de fabricação e controle de qualidade a custos relativamente baixos.

2.3 Fadiga nos Biomateriais de Uso em Artroplastias de Quadril

Materiais utilizados em dispositivos implantáveis poderão estar sujeitos a altas tensões e altos ciclos de carregamento. Essa condição severa de carregamento em um meio agressivo (corpo humano) leva, em geral, à falha por fadiga de implantes metálicos, poliméricos e cerâmicos. Um processo de fadiga e que envolva mecanismos de desgaste poderá causar a geração de debris, os quais produzem uma reação aguda dos tecidos que, por sua vez, levam ao agravamento de problemas de fadiga dos biomateriais pela produção de enzimas e produtos químicos que são altamente corrosivos. Os métodos para avaliação em fadiga de biomateriais devem incluir a caracterização morfológica dos debris, tanto quanto o entendimento das reações dos tecidos aos debris e simular o mais próximo possível as condições impostas *in vivo*, tanto de tensões e deformações, como do meio corporal. O desenvolvimento da resistência à fadiga e ao desgaste de biomateriais ainda está em estágio inicial (TEOH 2000).

A fadiga dos metais já foi extensivamente estudada. A resistência à fadiga das ligas metálicas mais comuns para implantes, utilizadas em substituições de quadril, tais como, aço inoxidável, ligas cromo-cobalto e de titânio e seus relacionamentos com as características microestruturais, da superfície e dos processos de corrosão tem sido abordados na literatura. A figura 2.4 mostra a resistência à fadiga de algumas ligas para implantes mais comuns usando uma aproximação de valores de curvas S/N. É interessante notar a importância do forjamento, o qual introduz tensões compressivas na superfície. Pode-se perceber que as peças forjadas de aço inoxidável AISI 316L e ligas cromo-cobalto têm resistência à fadiga significativamente maior do que os mesmos materiais no estado fundido (TEOH 2000).

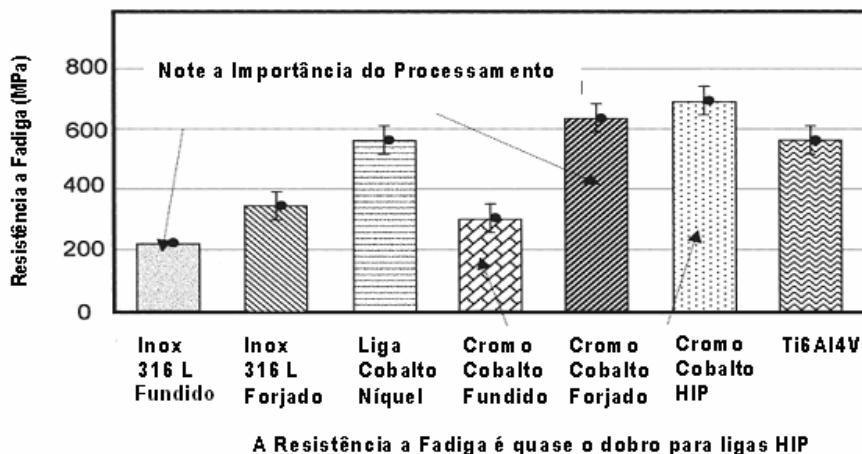


Figura 2.4 Diferentes níveis de resistência à fadiga para vários materiais (TEOH 2000).

Os processos químicos e mecânicos combinados desempenham um papel fundamental no início de trincas. O rompimento de camadas superficiais e o conseqüente ataque eletroquímico se devem à incapacidade de rápida repassivação. A figura 2.5 mostra, esquematicamente, como a formação de planos de escorregamento rompe a camada protetora de óxido durante a fadiga. Isto expõe imediatamente regiões sem proteção à corrosão. Vários estudos demonstram que metais que tem sua camada de passivação rompida em meios agressivos têm a resistência a fadiga sensivelmente afetada.

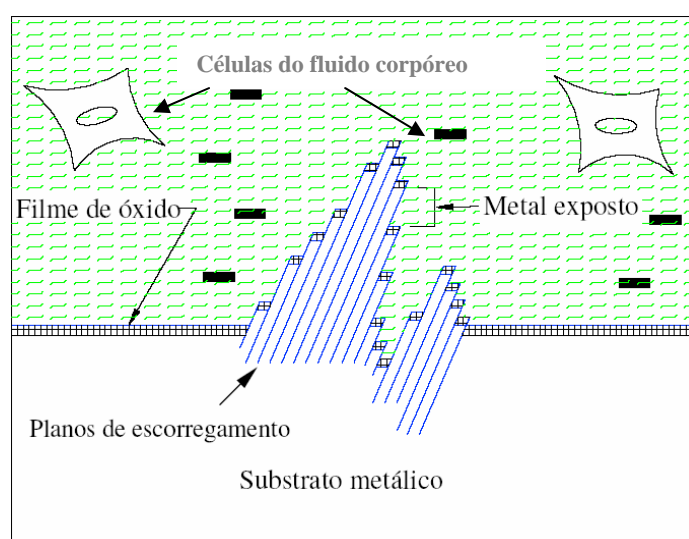


Figura 2.5 Rompimento da camada passivada por planos de escorregamento. Adaptado de TEOH 2000.

2.4 Teste de Fadiga em Hastes de Quadril

A Norma ISO 7206-4 detalha todo o procedimento deste ensaio. Os procedimentos foram definidos para reproduzirem experimentalmente o modo de falha de próteses cimentadas observadas “*in vivo*” a partir dos estudos realizados nos anos 70 e 80 (PLOEG 1999).

O teste de fadiga é um dos testes de laboratório mais efetivos para se avaliar a confiança de próteses. A Norma ISO 7206-4 descreve os procedimentos e dispositivos para a determinação da resistência à fadiga de hastes femorais. Os procedimentos requerem a fixação da haste em um dispositivo com a utilização de cimento ortopédico. O cimento restringe a parte distal da haste, começando a uma distância estabelecida ($0,4 \times CT$) do centro da cabeça femoral. A haste é orientada a $10^\circ \pm 30'$ em abdução e também é

orientada a $9^\circ \pm 1^\circ$ em flexão. A carga cíclica aplicada varia de 300 a 2300N a uma frequência de 1 a 10 Hz. As hastes devem suportar este carregamento durante 5 milhões de ciclos.

Os testes pré-clínicos de resistência de componentes femorais de próteses de substituição total de quadril são realizados segundo a Norma ISO 7206 (partes 4 e 8). Essa norma está frequentemente sob revisão. A magnitude das cargas de fadiga deve ser cuidadosamente avaliada de modo a representar as reais condições de carregamento. Se as condições de carregamento não forem conservadoras, os testes podem falhar na detecção de problemas e fraturas *in vivo* podem ocorrer. Por outro lado, se as cargas simuladas forem excessivas, resultará em uma condição muito severa no teste de fadiga. Isso conduzirá ao aumento de tamanho das hastes, causando uma barreira às tensões que agem sobre os ossos, que levam a reabsorção óssea proximal, aumentando o risco de falha do implante (BALEANI 1999).

A atual Norma de ensaio de fadiga (ISO 7206) é normalmente restrita de 1 a 5 milhões de ciclos os quais representam aproximadamente de 1 a 5 anos de serviço. O espectro de carregamento consiste de uma amplitude constante a qual não representa diferentes atividades, tais como caminhar, subir e descer escadas e os movimentos de sentar e levantar. Os testes normalmente são realizados com uma larga porção de cimento acrílico onde as hastes são inseridas e que não recriam a mesma distribuição e nível de carregamento a que estão expostas no fêmur humano (STYLES 1998).

Testes pré-clínicos podem ajudar a reduzir a frequência de afrouxamento de implantes. Desde que a Norma ISO 7206 foi criada diminuíram as cirurgias de revisão causadas pela fratura de próteses. Entretanto, outros processos de falha mecânica têm se tornado mais aparente. Particularmente a perda de adesão das interfaces e a falha por fadiga do cimento são as causas mais prováveis da perda de estabilidade dos implantes (STOLK 2002).

Nos anos 70 o modo principal de falha em próteses de quadril era propagação de trincas de fadiga a partir da região lateral da haste. Isso ocorria porque a fixação na parte superior (proximal) do osso era perdida. Assim, o implante passava a ser carregado em balanço, fixado apenas na parte distal (PRENDERGAST 2001).

A resistência à fadiga de próteses para substituição total de quadril está se tornando muito importante uma vez que esse tipo de cirurgia vem ocorrendo com maior frequência em pacientes jovens e ativos (MCCORMACK 1999).

2.5 Metodologia e Resultados de Trabalhos Anteriores

Muitos trabalhos envolvendo a construção de modelos experimentais, instrumentações com extensômetros de resistência elétrica e modelamento matemático têm sido desenvolvidos no sentido de pesquisar aspectos fundamentais ligados a artroplastia total de quadril. Alguns desses estudos envolvem questões como a porosidade em cimentos ortopédicos (DUNNE 2003; JANSSEN 2005), as tensões residuais impostas pela polimerização deste material (ROQUES 2004; FISHER 1997) e seu comportamento mecânico (SANTIS 2003; LEWIS 1998). Outros tantos têm abordado conceitos relativos ao comportamento da interface cimento/haste (PEREZ 2005; NUNO 2002; VERDONSCHOT 1996) bem como a estabilidade da haste no manto de cimento (VERDONSCHOT 1998; HOWARD 2004). Há ainda aqueles relativos aos testes pré-clínicos (PRENDERGAST 2001) e os aspectos mecânicos (MULLER 2002) envolvidos no sistema (osso/cimento/implante) das substituições totais de quadril. Poderíamos citar muitos outros trabalhos e tópicos envolvidos, mas vamos mostrar a seguir, de maneira resumida, alguns estudos vinculados ao tema proposto nesta pesquisa e que de certa forma a embasaram tanto no aspecto metodológico como conceitual.

2.5.1 Análises Realizadas via Instrumentação com Extensômetros de Resistência Elétrica

No trabalho de Stolk et al (2002) foram preparadas próteses para cimentação em fêmures compósitos. Essa preparação consistiu na marcação de três seções da região medial das próteses e estas foram recobertas por um fino filme de PMMA que serviu de base para a fixação dos extensômetros. Foi utilizada uma resina epóxi para promover uma boa adesão à superfície do cimento acrílico. Os fios condutores foram posicionados em pequenas fendas usinadas nas superfícies posterior e anterior das hastes. Cristofolini e Viceconti (2000) fizeram a validação desse tipo de instrumentação e aquisição de sinais para medição de deformações e tensões na interface da haste com o cimento. O objetivo do trabalho foi de registrar os resultados de deformação, sob carregamento, no cimento e no osso compósito a fim de estabelecer uma análise comparativa com os resultados obtidos em um modelo similar construído por elementos finitos. As imagens da figura 2.6 ilustram o procedimento experimental.

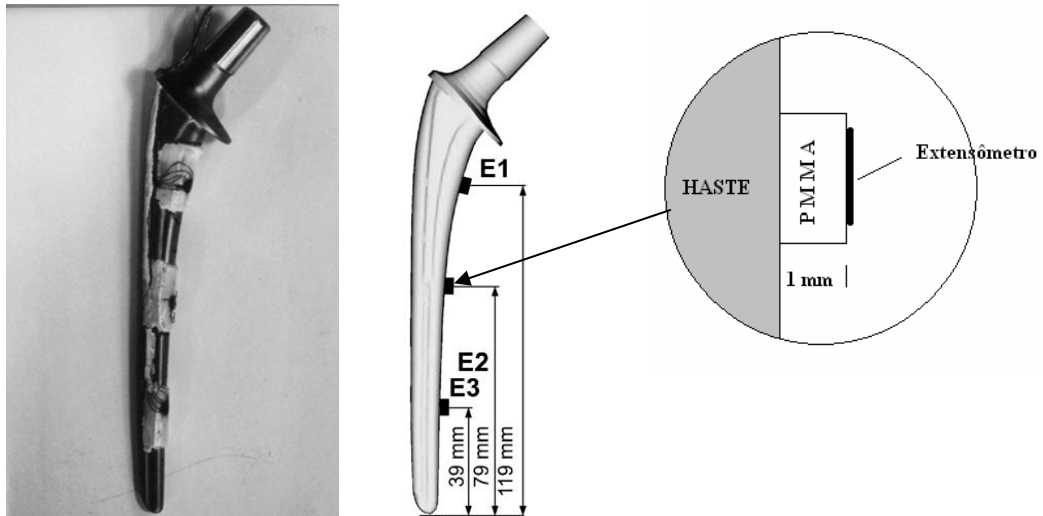


Figura 2.6 Fotografia e desenho esquemático de haste de quadril instrumentada com extensômetros do tipo roseta fixados em uma fina camada de PMMA (STOLK 2002).

O estudo de Roques (2004) se propôs a desenvolver um modelo experimental para a avaliação das tensões residuais no cimento ortopédico durante e após a polimerização. Foram utilizadas várias formulações de cimentos e de métodos de mistura. Simultaneamente um sensor de emissões acústicas foi empregado para avaliar os possíveis mecanismos de relaxação de tensões. Com esses dados também se propôs estabelecer as condições iniciais para a construção de modelos por elementos finitos. O modelo foi construído a partir de um tubo polido de aço inox, e os extensômetros, um do tipo roseta na primeira etapa e, dois axiais orientados longitudinalmente e dois na direção circunferencial na segunda etapa. A figura 2.7 ilustra a configuração do modelo e a figura 2.8 mostra os resultados de deformação residual obtidos pelos extensômetros do tipo roseta durante a primeira hora de teste e, também destaca que o primeiro pico de deformação é devido à inserção da haste no cimento.

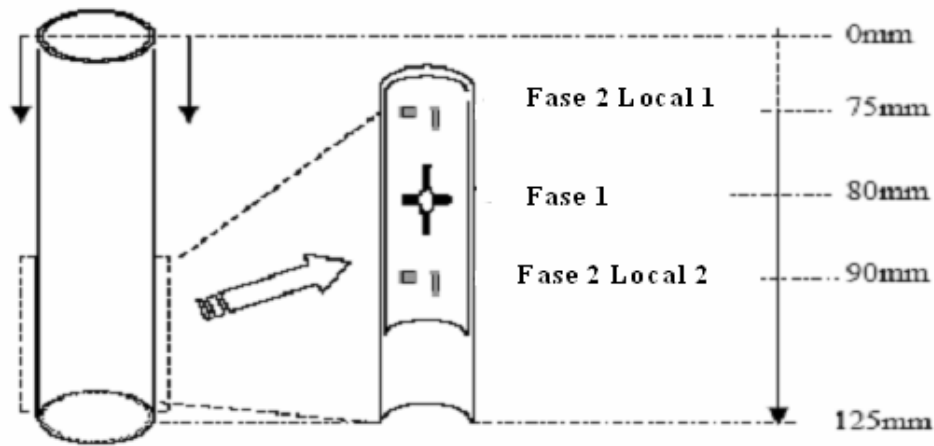


Figura 2.7 Imagem ilustrando o modelo proposto (ROQUES 2004).

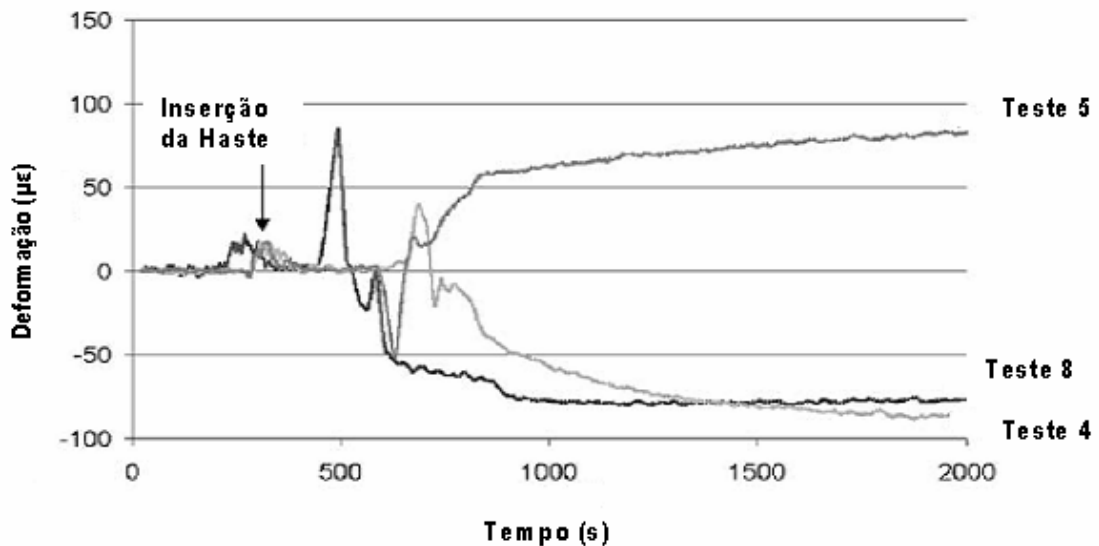


Figura 2.8 Resultados de deformações residuais de 3 testes assinalando principalmente o momento em que a haste é inserida no cimento e os picos exotérmicos da polimerização (ROQUES 2004).

Fisher et al (1997) realizaram ensaios utilizando uma prótese de quadril onde foram colocados seis extensômetros no interior do cimento, sendo dois uniaxiais, três biaxiais e um do tipo roseta. O objetivo foi de avaliar a influência da espessura da camada de cimento no nível e distribuição das deformações sob carregamento. Na Figura 2.9 pode-se verificar o posicionamento dos sensores no manto de cimento em relação à prótese e os resultados das deformações medidas em função da posição dos sensores, utilizando uma carga de 1400 N. A conclusão do trabalho é de que uma da camada de cimento de 3.7 mm

espessura causou uma diminuição nos picos de deformação do cimento na região medial-distal, que pode chegar a 49%, em relação a uma camada de 2.4 mm. Dessa forma o aumento da espessura do manto de cimento pode aumentar a vida em fadiga porque reduz os picos de deformação dentro do cimento.

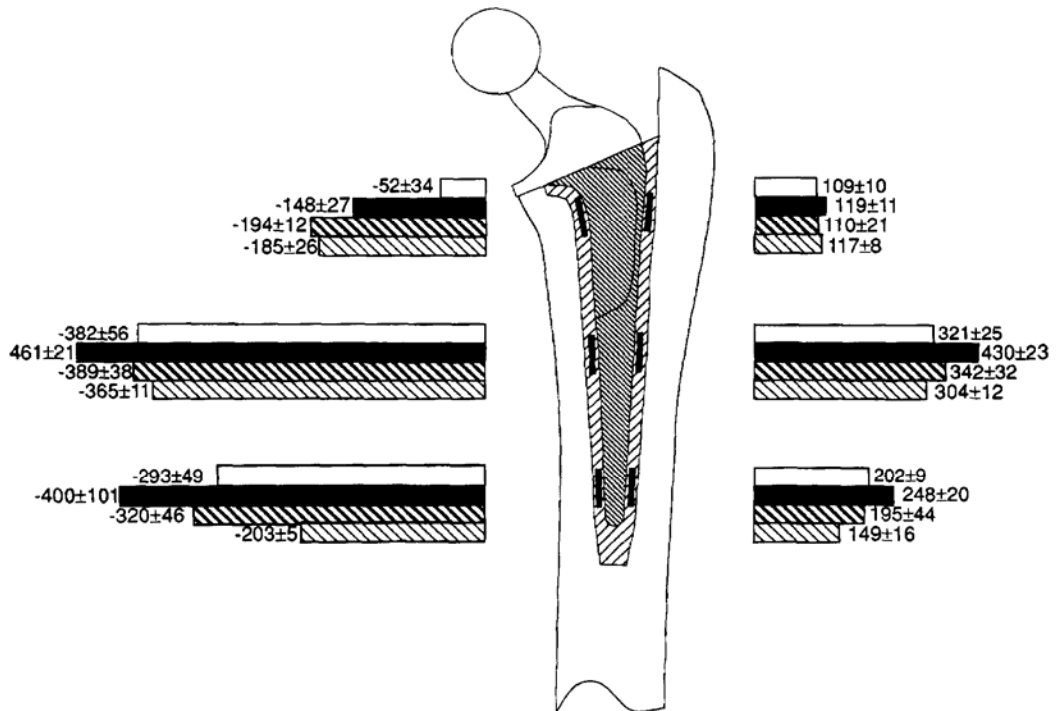


Figura 2.9 Imagem ilustrando o posicionamento dos extensômetros no trabalho de Fisher (1997) e o resultado das deformações.

Peters (2001) se baseou em estudos anteriores realizados através da simulação por elementos finitos, que mostram que as maiores tensões no cimento localizadas nas regiões proximal e distal das hastes e que estas estão associadas ao descolamento da interface cimento/haste. Nesse estudo as deformações no cimento foram medidas em 2 hastes femorais de diferentes geometrias. Foram afixados 15 extensômetros na região lateral e mais 15 na região medial, totalizando 30 extensômetros axiais em cada haste femoral. A carga aplicada foi de 2250 N. Através de radiografias foi verificada a homogeneidade da espessura do cimento por todo o fêmur (manto de cimento com 1 mm). A localização dos sensores e alguns resultados de deformação podem ser verificados na Figura 2.10. Os resultados mostraram que as deformações máximas e o perfil de deformações ao longo das hastes diferiram entre as 2 hastes. Em um caso, o pico de deformações foi localizado na região proximal e, no outro as maiores deformações estavam em torno da região medial. O

autor conclui que a redução das deformações, principalmente nas regiões proximal e distal das hastes, pode ser obtida através da adequação da geometria.

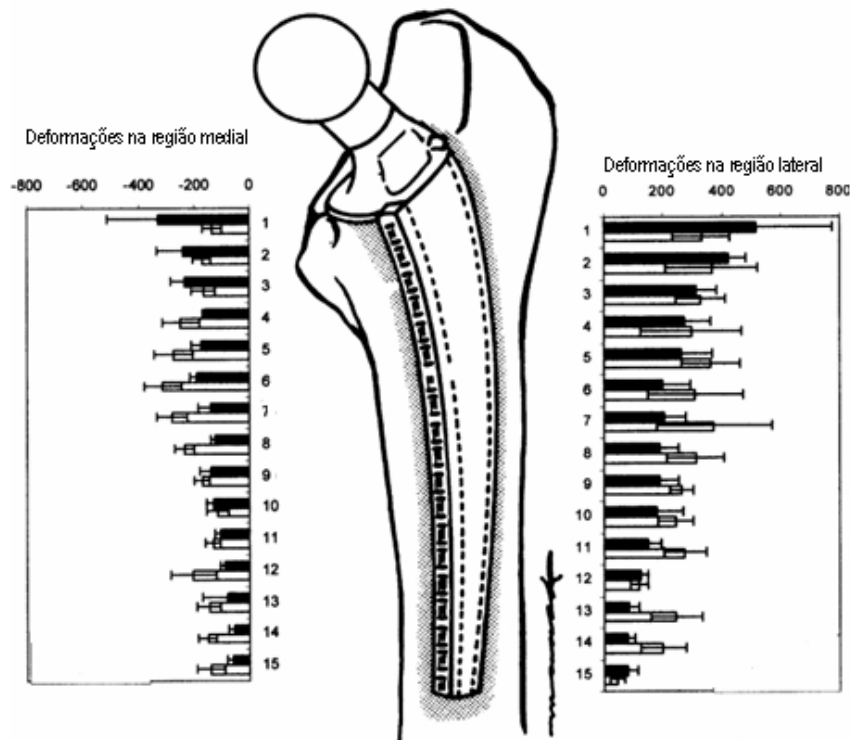


Figura 2.10 Localização dos 30 extensômetros e distribuição das deformações ao longo da haste (PETERS 2001).

2.5.2 Análises Realizadas via Simulação por Elementos Finitos

No trabalho realizado por Pyburn (2004) foi construído um modelo a partir dos softwares Solid Works e Cosmos para se avaliar as tensões em uma haste de quadril na presença de cimento ortopédico. Foram estabelecidas várias seções transversais para o implante com o intuito de comparar os diferentes níveis de tensões geradas sob carregamento. A carga imposta, 2000 N com um ângulo de 21° em relação a vertical, corresponderia ao máximo carregamento que sofre um implante durante uma caminhada. A figura 2.11 ilustra a configuração estabelecida através de software, o esquema de carregamento, as seções transversais utilizadas bem como as posições medidas. Entre as conclusões cita a necessidade de softwares mais sofisticados que permitam a elaboração de modelos com maior aprimoramento tendo em vista as propriedades do osso e uma grande variedade de geometria e seções transversais.

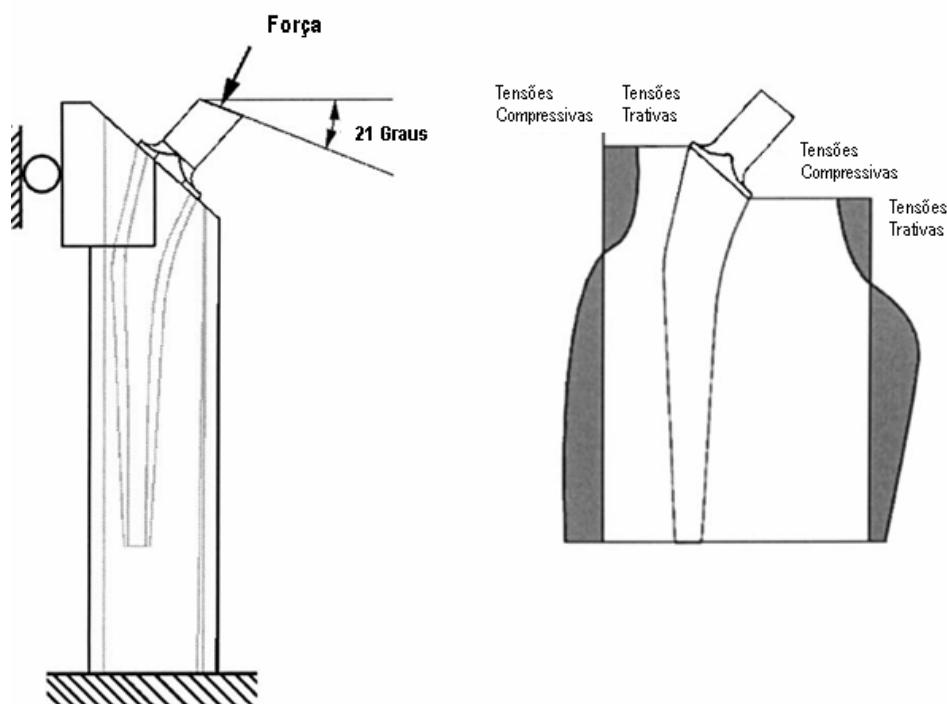


Figura 2.11 Imagem do modelo criado para análise de tensões e ao lado o esquema de carregamento previsto (PYBURN 2004).

Nuño (2002) fez um estudo numérico para determinar se a inclusão de componentes de tensões associadas as tensões residuais na interface do cimento com o implante de quadril cimentado afetava a distribuição de tensões no cimento devido a cargas aplicadas externamente. Segundo o autor, durante a artroplastia total de quadril, quando o cimento polimeriza entre o implante e o osso, tensões residuais são geradas no cimento. Para verificar essa hipótese foi feita uma análise de elementos finitos onde elementos de contato não-lineares tridimensionais foram usados para representar a interface da haste-cimento. A figura 2.12 mostra o modelo construído e a figura 2.13 um gráfico com os resultados da análise por elementos finitos. Esse trabalho mostrou que a inclusão de tensões residuais afetou as distribuições de tensões no cimento e na interface da haste-cimento. O perfil da distribuição das tensões no cimento é semelhante (com e sem as tensões residuais), porém diferem em magnitude. Os resultados mostraram que os picos de tensão no cimento são subestimados quando a análise não inclui as tensões residuais devido à cura do cimento.

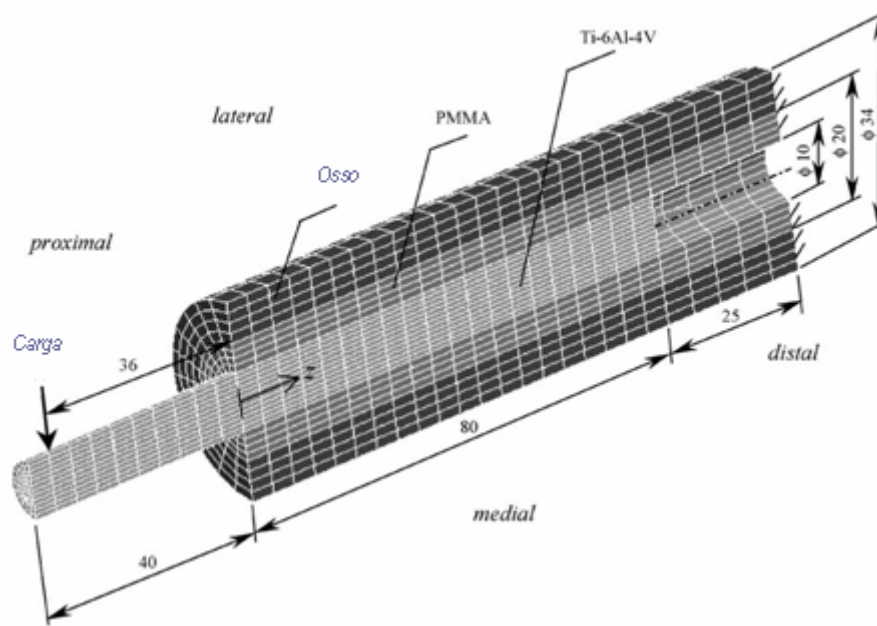


Figura 2.12 Imagem mostrando a malha de elementos finitos (NUÑO 2002).

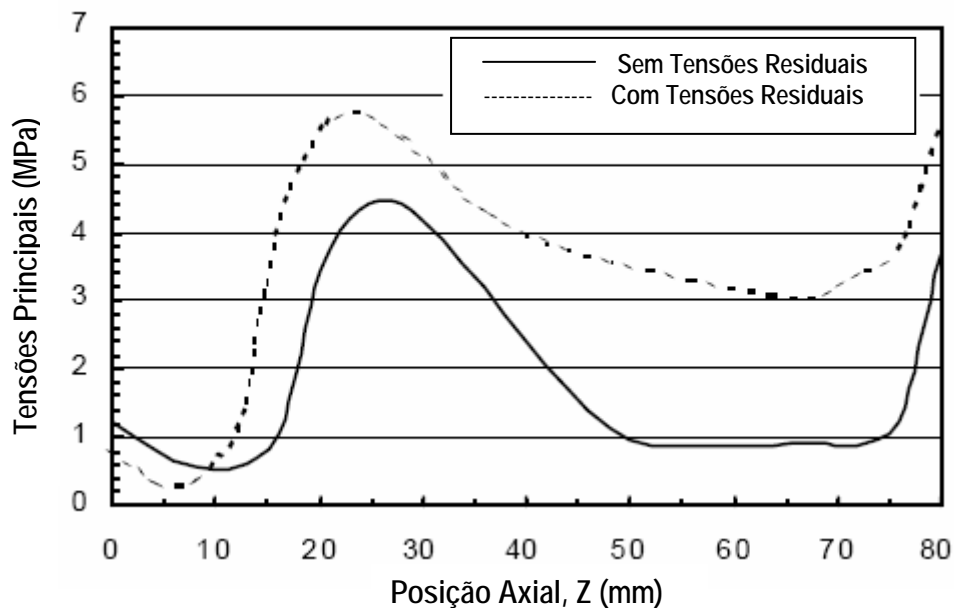


Figura 2.13 Gráfico ilustrando os resultados da análise por elementos finitos (NUÑO 2002).

O trabalho de Stolk (2004) teve o objetivo de desenvolver um algoritmo para simular o fenômeno de fluência e o acúmulo de danos dentro do cimento ortopédico. Essa simulação, serviria para os testes de novos implantes de quadril e a probabilidade de desenvolver um quadro de acúmulo de danos. Além disso, testes de fadiga foram

simulados e comparados com resultados experimentais. A figura 2.14 mostra o modelo experimental criado em PMMA ao lado da malha criada para representá-lo. O autor considera que a combinação dos conceitos de fluência e acúmulo de danos no mesmo modelo representa um importante aprimoramento, pois ambos os processos se inter-relacionam. A fluência do cimento causa um alívio de tensões reduzindo a taxa de acúmulo de danos.

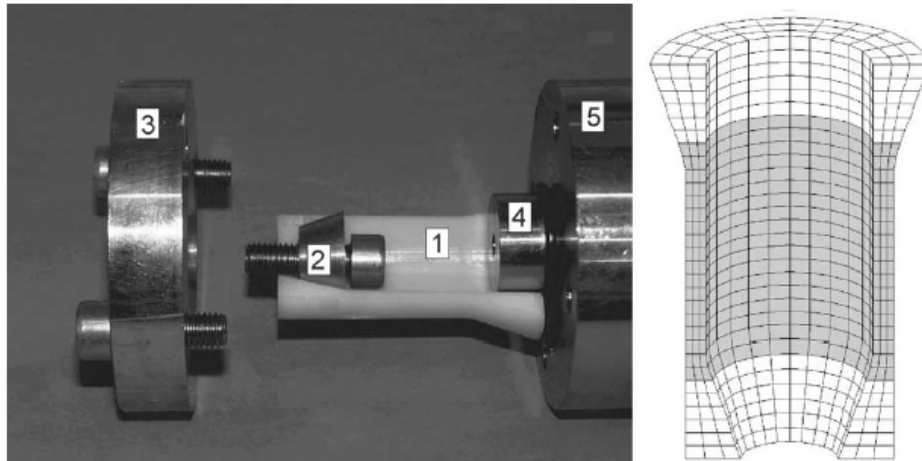


Figura 2.14 Dispositivo experimental a base de PMMA e a malha que o representa na simulação (STOLK 2004).

O trabalho de Hung (2004) se propôs a desenvolver um algoritmo computacional para simular o comportamento em fadiga de hastes de quadril cimentadas e sob condições fisiológicas. Para isso se baseou na análise por elementos finitos e na mecânica de dano contínuo para quantificar a taxa de dano da camada de cimento. Em particular, foi considerado o efeito do descolamento das interfaces na distribuição das tensões e nas taxas de danos para a simulação em fadiga. A figura 2.15 mostra o modelo tridimensional criado para simular a região proximal de um fêmur com uma prótese metálica cimentada. Os resultados mostraram que os pontos principais para o início de falha são as regiões medial e lateral na porção proximal e também na região do final da haste (distal). Tais falhas por fadiga resultam na degradação da interface haste/cimento e afetam fortemente a distribuição de tensões no cimento e a taxa de dano nos ciclos subseqüentes.

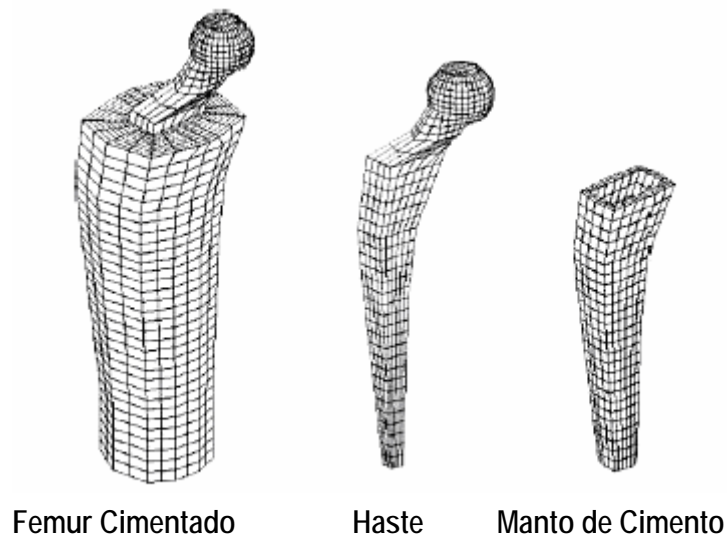


Figura 2.15 Modelo tridimensional de uma prótese cimentada na região proximal de um fêmur (HUNG 2004).

Baleani (2000) verificou a resistência à fadiga de próteses de quadril feitas sob medida. Essas próteses formam uma classe particular de implantes de quadril, pois seus desenhos reproduzem o canal medular de fêmures específicos. O estudo foi conduzido a partir de próteses já produzidas e implantadas. A empresa responsável forneceu os modelos em CAD. Como a Norma ISO 7206-4 não prevê a realização de testes para este tipo de próteses, foi realizado o estudo a partir de um protocolo teórico de modo a se prever o nível de tensões alcançado pelas próteses seguindo a metodologia de testes da ISO. As tensões foram determinadas com a utilização dos conceitos teóricos associados ao modelo da viga engastada e através da simulação por elementos finitos. A figura 2.16 mostra a forma de fixação de acordo com a ISO 7206-4, um modelo simplificado e a malha construída para um específico modelo com o respectivo resultado do campo de tensões. A partir do modelo que apresentou os resultados mais críticos foi produzido outro fisicamente e, instrumentado com extensômetros no local em que o modelo numérico apresentava um pico de tensão. O resultado da tensão medida ficou 30% abaixo do resultado obtido pela simulação. De forma geral o estudo estabelece que através da teoria da viga engastada é possível calcular as tensões estáticas induzidas pela configuração da ISO 7206-4 com diferenças abaixo de 20% em relação aquelas calculadas através da simulação por elementos finitos.

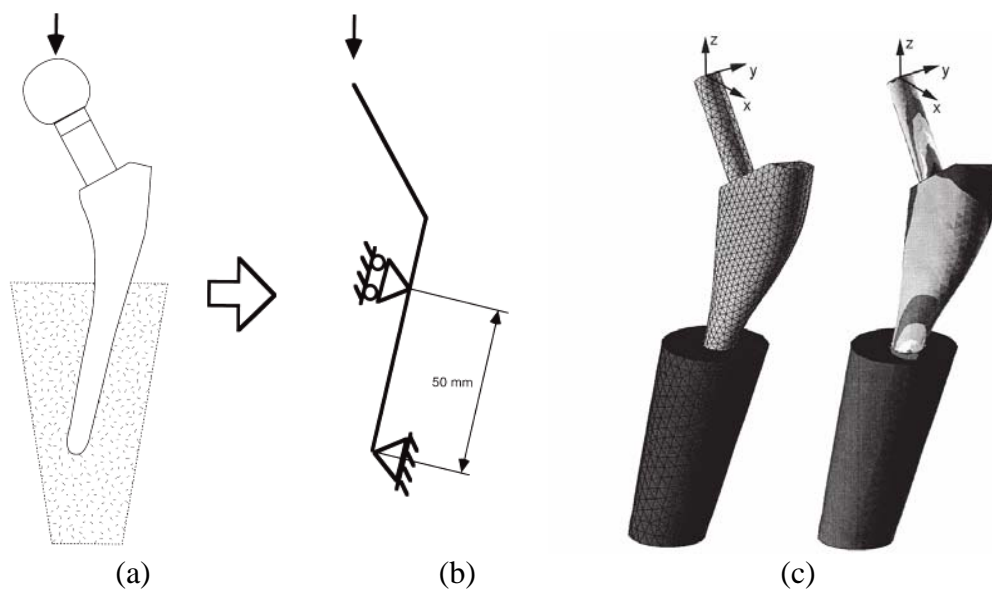


Figura 2.16 Configuração do ensaio como indicado pela ISO 7206-4 (a), de um modelo simplificado (b) e a malha de uma prótese específica com a representação de seu campo de tensões (c) (BALEANI 2000).

O trabalho de Raimondi (1999) tendo como material de referência o titânio, avaliou as tensões máximas de uma haste em diferentes condições de ensaio, mas tendo como parâmetro a Norma ISO 7206-4 e usando a simulação por elementos finitos através de um modelo tridimensional. No desenvolvimento do trabalho foram criadas as malhas para diversas espessuras de camadas de cimento variando de 18 mm até 70 mm. Além disso, foram estabelecidas seis condições de engaste da haste em relação à superfície superior do manto de cimento e da direção distal da haste. Na criação dos elementos e nós para as diversas configurações se percebe que há duas condições extremas. Em uma situação todos os elementos representativos da fixação da haste estão situados na periferia da seção da superfície superior do cimento. Na outra todos os elementos estão situados em toda a seção da haste correspondente a superfície superior do cimento. As figuras 2.17 e 2.18 ilustram as diversas configurações de engaste bem como os resultados das tensões principais resultantes em cada caso e de como elas se distribuem ao longo da haste. Entre as conclusões do trabalho é sugerido que reduções na espessura da camada de cimento provocam apenas pequenos acréscimos às tensões máximas nas hastes. Indicam, também, que os testes de fadiga realizados de acordo com o protocolo estabelecido pela ISO 7206-4 podem garantir uma confiança relativa aos resultados de avaliação de componentes sensíveis a variações de tensões.

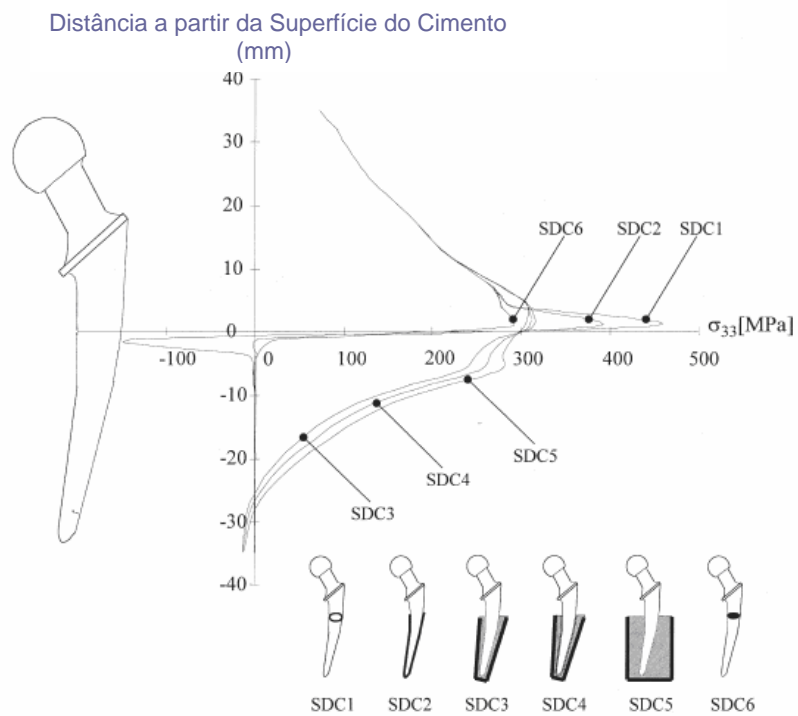


Figura 2.17 Distribuição de tensões paralelas ao eixo axial da haste nas diversas configurações de engaste (RAIMONDI 1999).

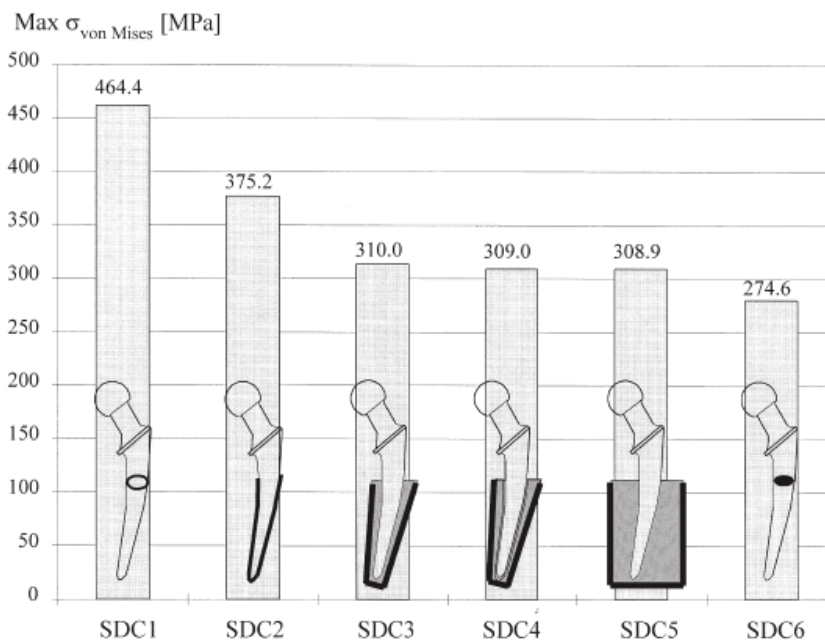


Figura 2.18 Tensões máximas principais para as diferentes situações de engaste das hastas (RAIMONDI 1999).

2.5.3 Análises sob Diversas Configurações de Ensaio

O trabalho de McCormack (1999) pretendeu determinar como o acúmulo de danos ocorre na camada de cimento de uma substituição total de quadril. Para tanto foi criado um modelo físico experimental onde foi gerado o estado de tensões encontrado no manto de cimento e, ao mesmo tempo, permitiu a visualização do início e o crescimento de microtrincas. Dessa maneira foi possível fazer um acompanhamento gradual do processo. Seis amostras foram testadas até 5 milhões de ciclos. A figura 2.19 mostra o modelo físico com todas as características dimensionais, esquema de carregamento e as janelas laterais onde se pode observar as trincas. O trabalho conclui que, sob carregamento em flexão permitido pelo modelo, a maioria das trincas se inicia a partir de poros na massa de cimento e não nas interfaces. Além disso, indicou que as regiões laterais e mediais têm comportamento de acúmulo de danos estatisticamente diferentes e que as trincas geradas pelas tensões residuais aceleram significativamente o processo de acúmulo de danos. Destaca ainda a importância da reprodução das restrições e dos modos de carregamento para o modelamento adequado do processo de acúmulo de danos.

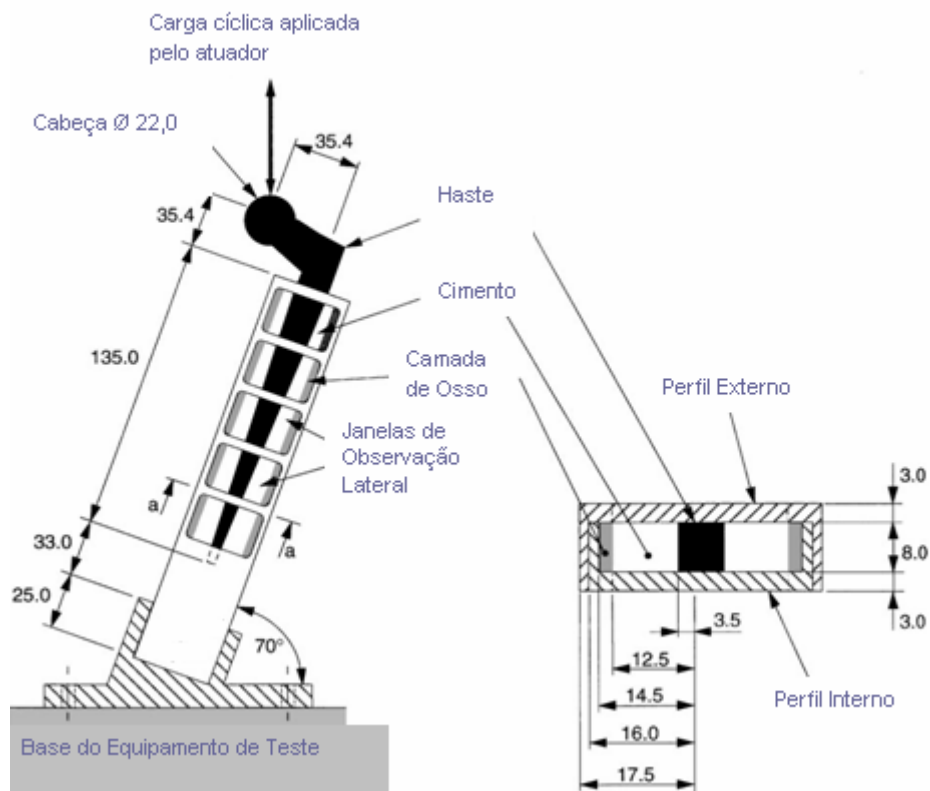


Figura 2.19 Esquema do modelo experimental (MCCORMACK 1999).

O trabalho de Lennon (2003), considerando o acabamento superficial como uma característica de projeto que pode afetar diretamente a taxa de afrouxamento, se propôs a investigar qual o efeito do acabamento superficial no acúmulo de danos de fadiga em uma camada de cimento. Para tanto desenvolveu um modelo experimental de um fêmur implantado que permite a visualização do crescimento de danos no manto de cimento. Foram testadas 5 próteses polidas e 5 próteses rugosas. Os danos associados à contração durante a polimerização e aqueles associados a 2 milhões de ciclos de carregamento foram medidos. A figura 2.20 mostra o esquema de carregamento do modelo, uma foto do dispositivo e a malha usada para a análise por elementos finitos. Os níveis de danos devido à contração do cimento foram os mesmos para os dois casos, superfície polida e rugosa, além disso, não houve diferença significativa nos danos provocados após a aplicação da carga cíclica. Os danos iniciados na região lateral do cimento foram significativamente maiores do que aqueles na região medial para os dois tipos de acabamento superficial. A análise por elementos finitos mostrou que as tensões são maiores para as próteses polidas. Finalmente conclui que apesar das tensões maiores envolvidas, as próteses polidas não provocam um cenário de falha por acúmulo de danos.

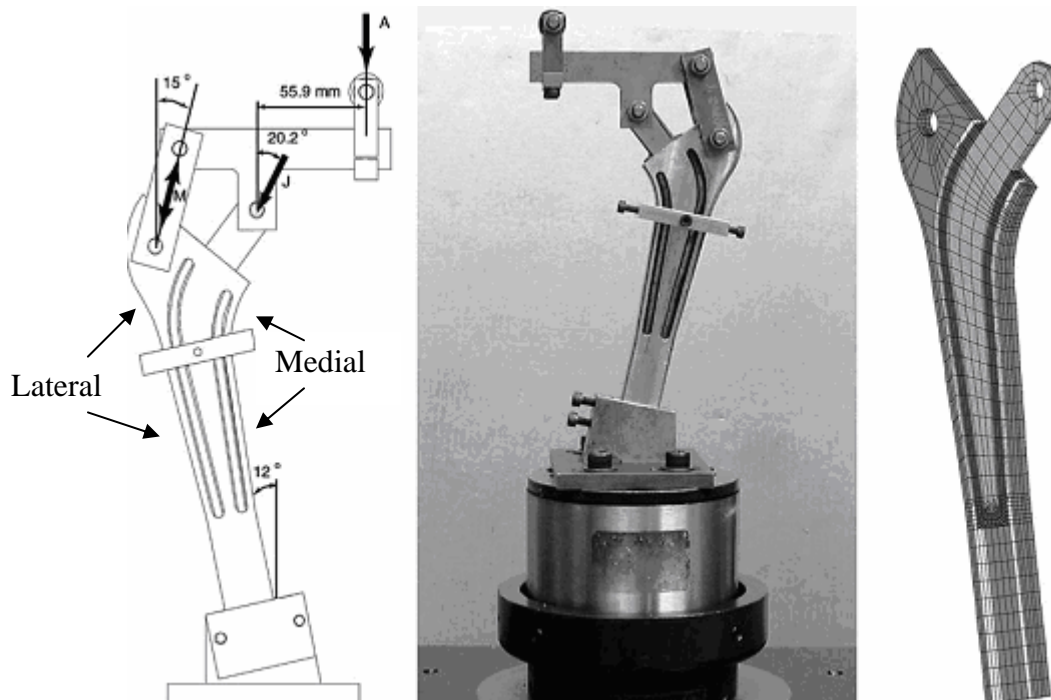


Figura 2.20 Ilustração do esquema de carregamento, uma foto do dispositivo e a malha utilizada para a análise por elementos finitos (LENNON 2003).

Partindo de estudos anteriores que indicavam que o afrouxamento de hastes cimentadas em substituições totais de quadril se iniciava na interface cimento/haste, Hertzler (2002) realizou estudo combinando métodos experimentais e computacionais. Considerando que a origem do processo de propagação de trincas na interface cimento/haste não é totalmente compreendida e que as trincas estão comumente associadas com as camadas finas de cimento, pesquisou o processo de propagação de trincas a partir da interface cimento/haste através de um dispositivo de carregamento torsional. As amostras, preparadas em moldes metálicos contendo seções transversais de hastes de Charnley, apresentavam diferentes camadas de cimento (1, 3 e 7 mm). Seis amostras de cada espessura de cimento, totalizando 18, foram construídas e submetidas a carregamentos torsionais cíclicos. A figura 2.21 mostra a configuração padrão das amostras e um desenho do dispositivo de ensaio. Os resultados mostram que a taxa de crescimento de trincas não depende da espessura da camada de cimento, mas que as trincas tendem a alcançar o seu comprimento máximo (passantes) em um número menor de ciclos para camadas menos espessas.

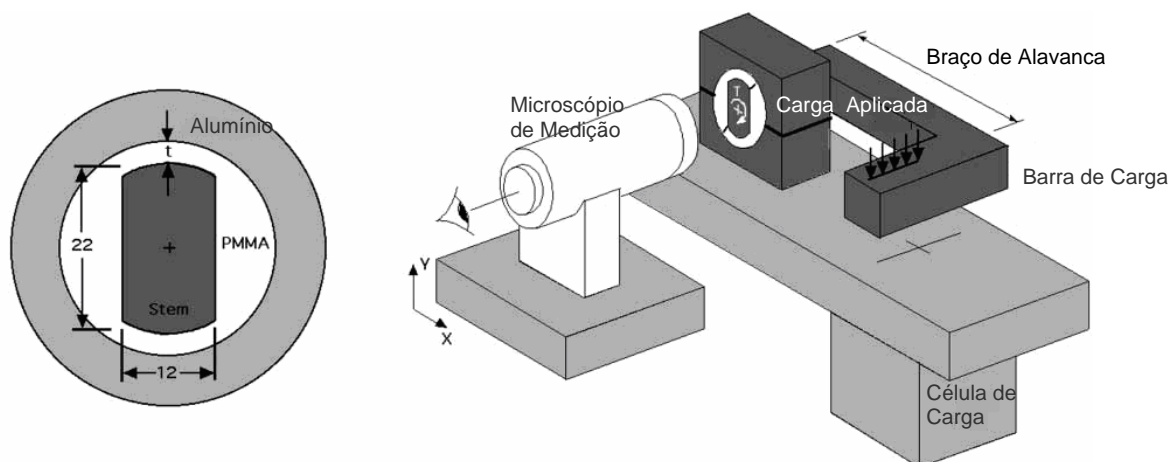


Figura 2.21 Modelo de configuração das amostras e o desenho do dispositivo de ensaio (HERTZLER 2002).

Ploeg (1999) realizou um estudo para o tratamento estatístico dos resultados de ensaios de fadiga de hastes de quadril. O teste de fadiga de componentes é um passo final no desenvolvimento de substituições totais de juntas e são realizados para validar a segurança destes componentes antes do uso clínico. Nesse estudo os testes foram realizados com dois objetivos: primeiro, para determinar a relação das componentes locais de tensão e força usando extensômetros e, segundo, para realizar uma descrição estatística

dos resultados dos testes de fadiga. Foram testadas 49 próteses, em uma série de testes estáticos e de fadiga, em três diferentes tamanhos. A figura 2.22 mostra os resultados de tensão obtidos em dois testes estáticos, de 3 e 7kN, a partir de 10 sensores colocados na região mais suscetível a fratura, isto é, cinco extensômetros logo acima da superfície do cimento e cinco logo abaixo, na porção lateral da haste. Entre as conclusões do trabalho se destaca a referência ao valor da utilização de extensômetros no planejamento e avaliação de testes de fadiga.

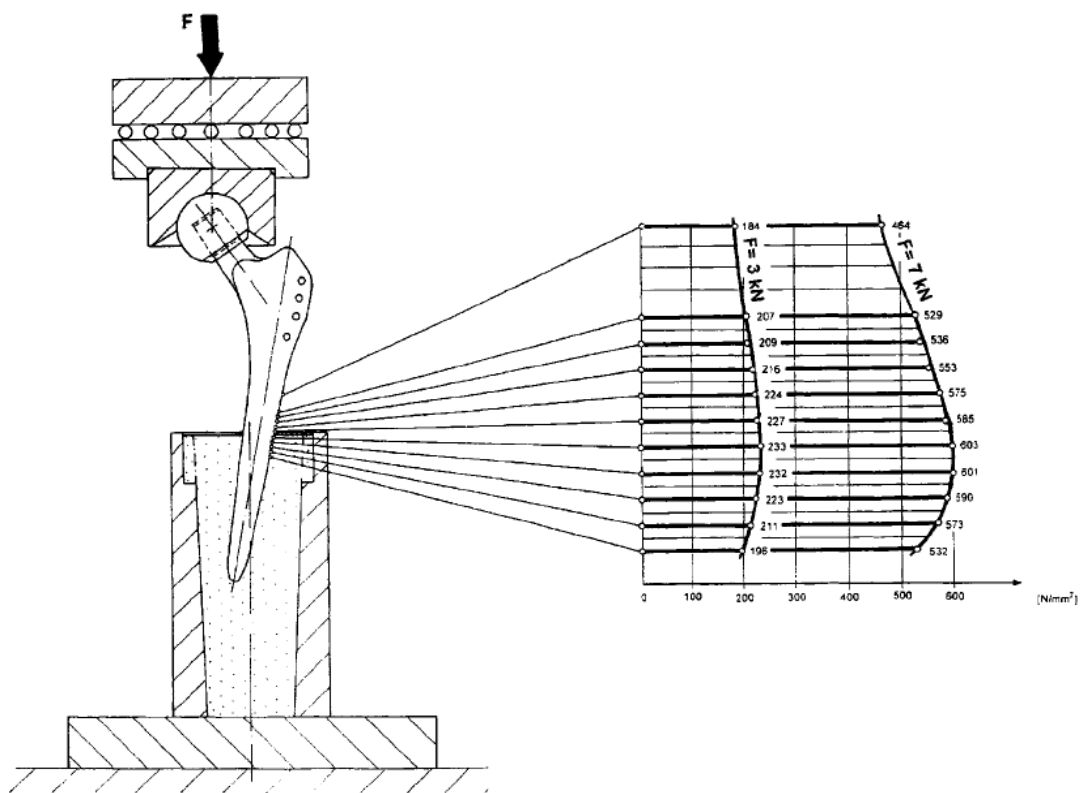


Figura 2.22 Distribuição de tensões em MPa na região lateral da haste (PLOEG 1999).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo proposto neste trabalho foram realizados ensaios de carregamento mecânico (estáticos, de fadiga e com controle de deslocamento) nas hastes de quadril fixadas em cimento acrílico e simulação dos ensaios estáticos através de modelamento matemático. Amostras do cimento preparado como meio de fixação foram retiradas para avaliação do seu módulo elástico, segundo a norma NBR ISO 5833. Durante a fixação das próteses nos dispositivos de ensaio, em meio contendo o cimento acrílico, foram adquiridos os dados referentes às deformações residuais do cimento. Ao longo dos ensaios estáticos e de fadiga também foram adquiridos nas regiões instrumentadas os dados relativos às deformações da camada de cimento e da haste femoral.

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios de fadiga foram próteses femorais fornecidas pela empresa MDT-Indústria e Comércio de Implantes Ortopédicos Ltda. O cimento de resina acrílica auto-polimerizável (copolímero de metacrilato de metila) e o líquido acrílico (monômero de metacrilato de metila) da VIPI Ltda. foram ambos adquiridos no mercado de distribuição normal.

As avaliações da resistência à fadiga das hastes femorais foram executadas em dispositivos construídos de acordo com os requisitos da Norma ISO 7206-4. Também foram utilizados dispositivos que permitiram a fixação das hastes em camadas de cimento menos espessas. Com o objetivo de estudar o estado de deformações que a haste e a camada de cimento experimentavam durante cada ensaio, foram colados extensômetros em determinados pontos da haste (medial, lateral e frontal) e do manto de cimento (proximal-lateral, proximal-medial, distal-lateral e distal-proximal) como ilustrado na figura 3.3. Uma máquina universal de ensaios MTS 810 (100kN) foi a utilizada para a realização dos ensaios mecânicos.

Em resumo, a seqüência do trabalhos, foi: a) identificados os requisitos da Norma ISO 7206-4 e as alternativas a esta norma, as hastes foram medidas e foram fixados os extensômetros. b) as hastes foram cimentadas nos respectivos dispositivos com aquisição simultânea dos dados de deformação residual gerados pela polimerização do cimento. c) ensaios estáticos, de fadiga e sob deformação constante com a simultânea aquisição de dados de deformação das hastes e das camadas de cimento. d) foram realizadas as

simulações por elementos finitos para uma análise comparativa com os dados experimentais.

3.1 Amostras

As hastes utilizadas para a realização dos ensaios de fadiga foram as próteses femorais SPOAC II Cone 12/14 Primária nº 1 para substituição total de quadril, em aço inoxidável (ASTM F-138), fornecidas pela empresa MDT-Indústria e Comércio de Implantes Ortopédicos Ltda. A figura 3.1 mostra o desenho da prótese e suas dimensões.

Foram criados dois grupos de amostras: próteses analisadas a partir de ensaios na configuração orientada pela Norma ISO 7206-4 e o outro grupo em que as próteses foram analisadas em um dispositivo alternativo. O primeiro conjunto de amostras foi denominado de N (norma) e suas amostras de N1, N2 e N3. O segundo foi denominado de A (alternativo) e suas amostras de A1, A2 e A3.

3.1.1 Medidas das Hastes

Como parte dos requisitos de posicionamento da haste femoral no meio de embutimento, é necessário o conhecimento da distância CT (figura 3.2), referenciada na norma e ilustrada na figura 3.2. As medições foram executadas nas hastes com o componente cefálico em um traçador de altura com coluna dupla com resolução de 0,01 mm e com auxílio de um dispositivo de medição (paquímetro digital) e dos dados de projeto fornecidos pela empresa. A distância CT medida foi de 143,20 mm. A partir daí foi calculada a distância do centro da cabeça até o meio de embutimento ($CT \times 0,4$) de 57,28 mm.

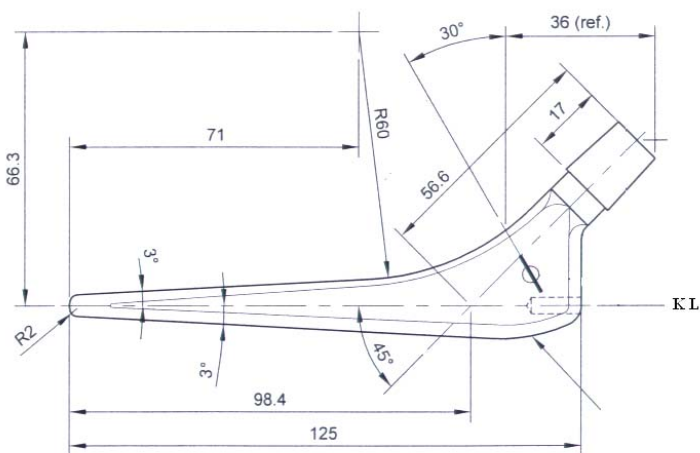


Figura 3.1 Desenho com as medidas da haste fornecida pela MDT

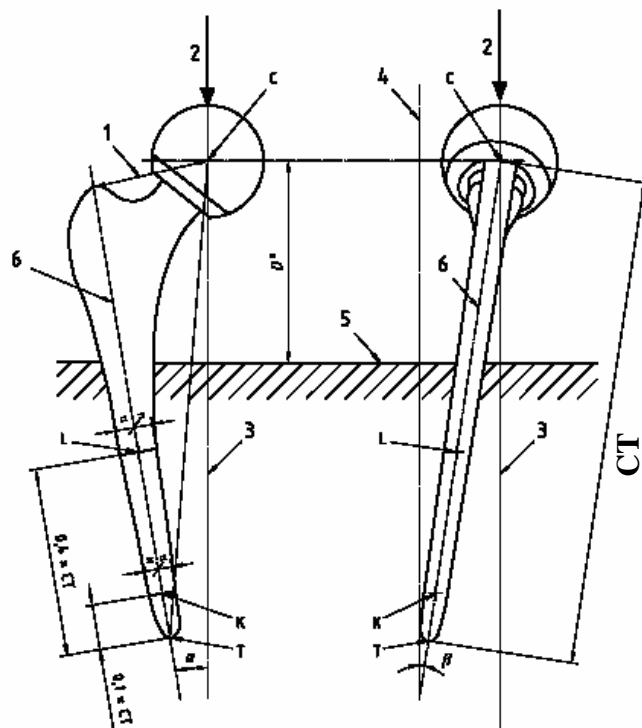


Figura 3.2 Desenho esquemático constante na Norma ISO 7206-4

3.1.2 Posições de Interesse

O trabalho de Prendergast (2001) cita a propagação de trincas de fadiga a partir da região lateral da haste como o modo principal de falha em próteses de quadril porque a fixação na parte superior (proximal) do osso era perdida, então o implante passava a ser carregado em balanço, fixado apenas na parte distal.

Os trabalhos de Hung et al (2004) e Muller (2002) revelam que estudos clínicos e biomecânicos demonstram que as áreas de maiores tensões sob carregamento e como os pontos principais para o início de falhas são a região medial-proximal e a região da ponta da haste (regiões medial e lateral distal).

A partir dos dados da bibliografia, se verifica que as regiões que apresentam maior probabilidade de ocorrerem problemas nas hastes são as regiões medial e lateral. Nesta última estão envolvidas as tensões trativas mais preocupantes no que se refere à fadiga. Por outro lado, como a proposta é de se comparar a distribuição de cargas no manto de cimento espesso (norma) e do mais fino (alternativo) e avaliar frente às deformações impostas as hastes em cada caso, é importante determinar aquelas posições mais significativas dentro do manto de cimento. Baseado nesses estudos foi estipulado às posições dos sensores de

deformação: a) posições medial, frontal e lateral fixados diretamente nas hastes. b) posições medial-proximal, lateral-proximal, medial-distal e lateral distal fixado no manto de cimento. A figura 3.3 mostra todas as posições selecionadas para a fixação dos extensômetros.

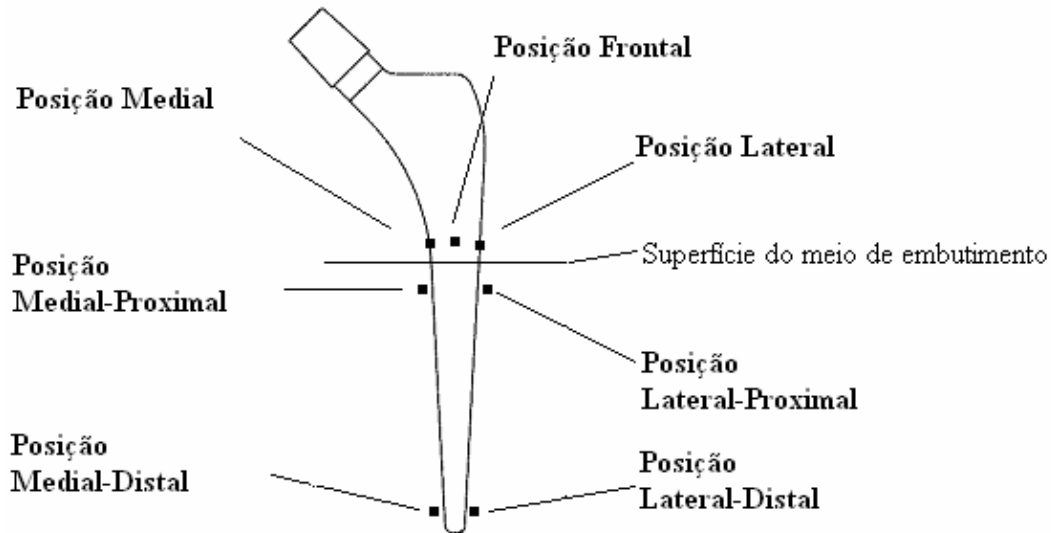


Figura 3.3 Posições na haste e no manto de cimento onde foram afixados os extensômetros.

3.1.3 Instrumentação

As superfícies das próteses foram preparadas conforme procedimentos padrões de lixamento, desengraxe, e de colagem de extensômetros de resistência elétrica. Foi colado um extensômetro uniaxial para medição de deformação em cada uma das três posições da haste. Estes extensômetros foram posicionados a 5 mm da superfície superior do cimento. Os extensômetros de resistência elétricos situados dentro do manto de cimento foram colados a 1 mm da superfície da haste sob uma porção de PMMA anteriormente fixada nas regiões proximal e distal das hastes. A figura 3.4 mostra, esquematicamente, essa disposição, assim como os extensômetros fixados nas posições proximais situados 5 mm abaixo da superfície do cimento. Os extensômetros fixados nas posições distais ficaram situados a 5 mm da ponta da haste. Todos os extensômetros foram calibrados de acordo com procedimentos padronizados.

A utilização de extensômetros uniaxiais foi baseada no trabalho de Fisher (1997), que demonstra que as deformações axiais no cimento são, em geral, consideravelmente maiores do que aquelas medidas nas direções circunferenciais e radiais. Seu trabalho

sugere ainda que as medidas das deformações axiais sejam suficientes para se dar uma visão geral dos efeitos de fatores como a geometria dos implantes e a espessura do manto de cimento sobre as deformações geradas no cimento.

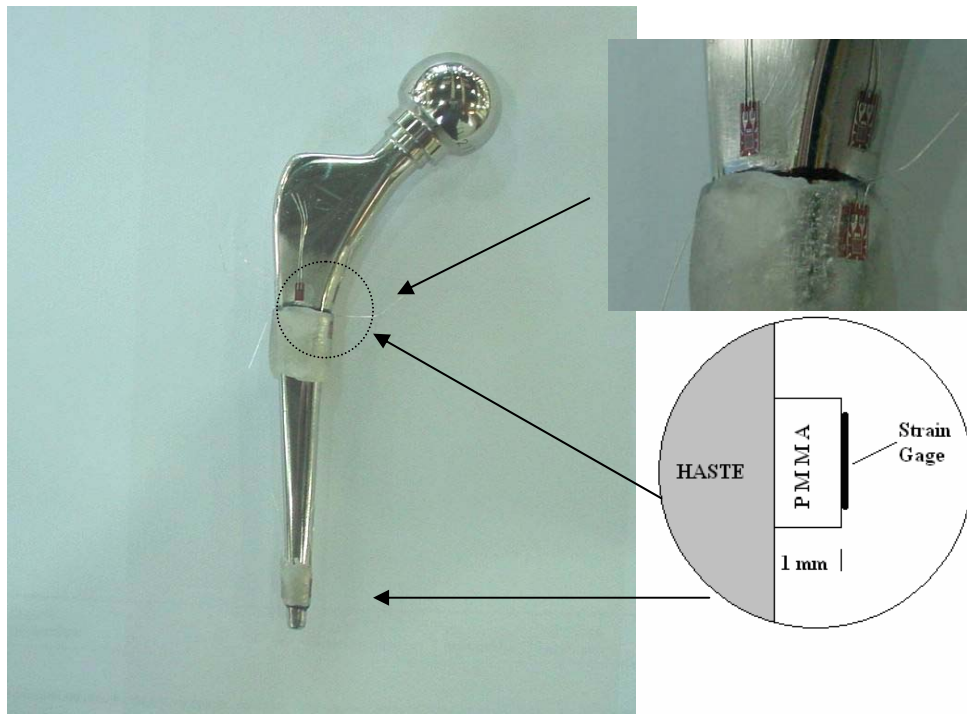


Figura 3.4 Detalhes das diferenças na instrumentação. Extensômetros fixados diretos na haste e aqueles fixados sob uma pequena camada de PMMA.

3.2 Dispositivos de Ensaio

3.2.1 Dispositivo Especificado pela Norma ISO 7206-4

A parte 4 da Norma ISO 7206 especifica o método de ensaio para a determinação da vida em fadiga, sob condições laboratoriais, de hastes femorais usadas em articulações totais de quadril. O princípio de ensaio consiste em imergir a parte inferior da haste em cimento polimérico e, após a cura deste, posicionar a amostra em uma máquina de ensaio onde uma carga cíclica será aplicada sobre a cabeça femoral (figura 3.5). Um copo metálico foi construído em aço inoxidável de maneira que a prótese pudesse ser cimentada respeitando os ângulos de adução e flexão e que ainda fosse assegurado o carregamento (linha de carga) sob o centro da cabeça quando montado sob a máquina de testes (figura 3.6).

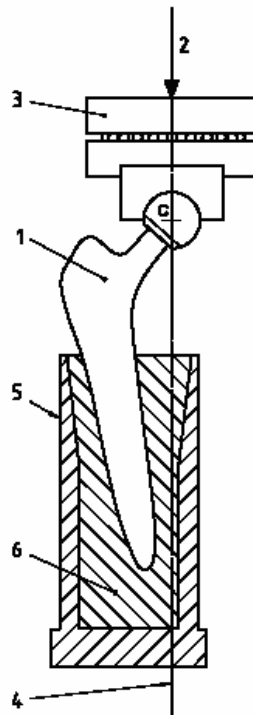


Figura 3.5 Desenho esquemático apresentado na norma sugerindo a configuração do dispositivo.

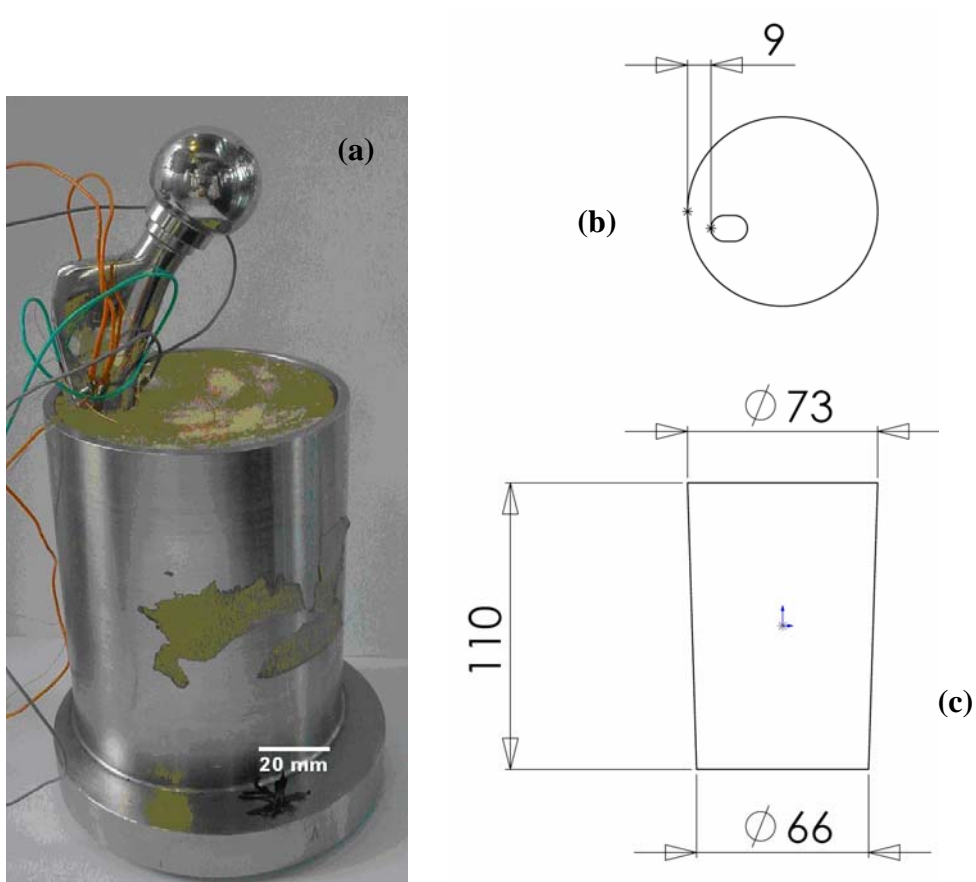


Figura 3.6 (a) Dispositivo construído de acordo com as recomendações contidas na Norma ISO 7206-4. A prótese está instrumentada para aquisição de dados. (b) e (c) Dimensões (mm) totais do manto de cimento e aquela em relação a haste na região proximal.

3.2.2 Dispositivo Alternativo a Norma ISO 7206-4

Como a Norma ISO 7206 não especifica o diâmetro do manto de cimento que deverá ser empregado no ensaio, foi desenvolvido um dispositivo em que a prótese pode ser afixada em um copo metálico de menor diâmetro, conseqüentemente com menor quantidade de cimento. Esse dispositivo consiste de um suporte (base) feito em aço para a fixação no equipamento de ensaio, construído de tal forma que os ângulos de adução e flexão já estão contemplados. O copo metálico serve para a cimentação da prótese e para a colocação dentro do suporte, sendo mantido em posição por seis parafusos. A figura 3.7 apresenta um desenho com a configuração do dispositivo e a figura 3.8 mostra a foto do dispositivo pronto para o ensaio. Na figura 3.9 é apresentado o dispositivo em detalhe ressaltando a fixação do copo metálico com a prótese cimentada.

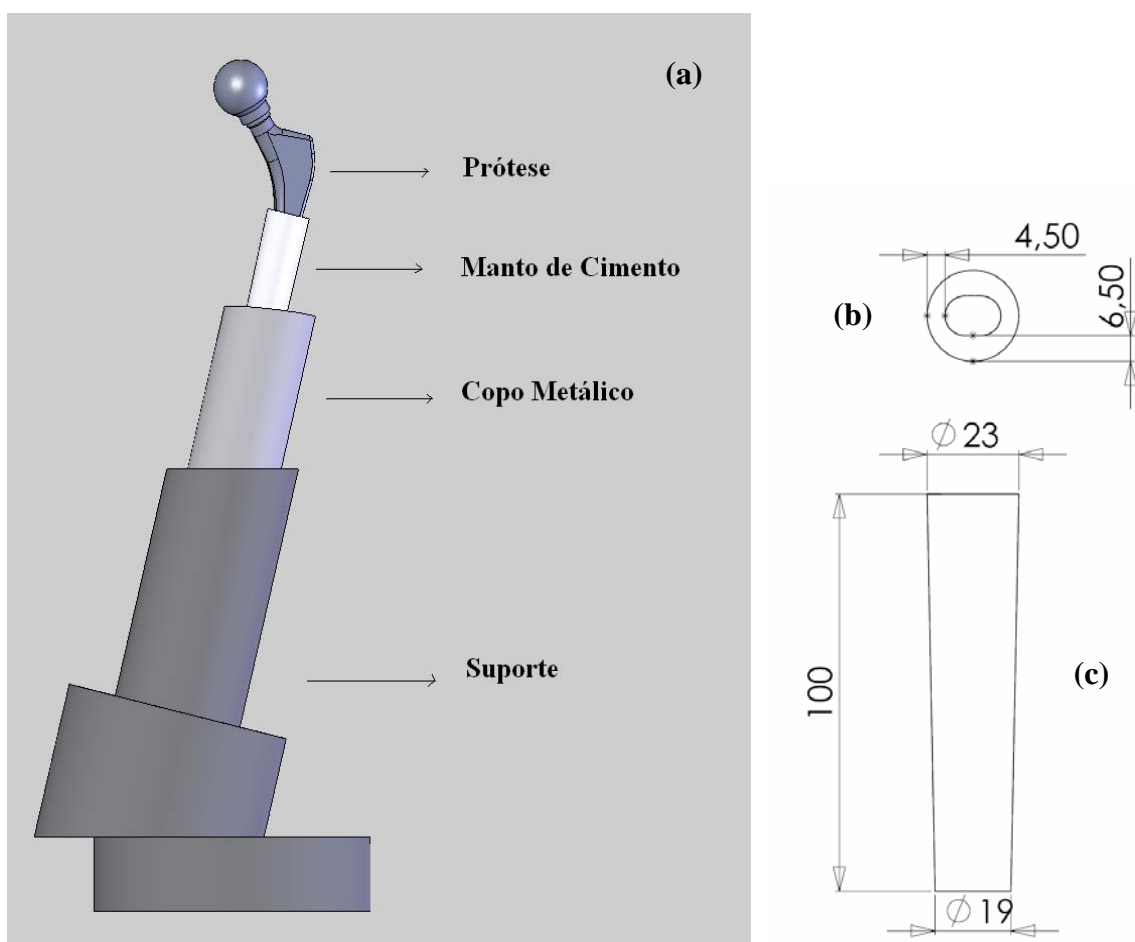


Figura 3.7 (a) Desenho esquemático da montagem do dispositivo criado para cimentação com uma camada menos espessa. (b) e (c) Dimensões (mm) totais do manto de cimento e aquelas em relação a haste na região proximal.



Figura 3.8 Imagem do dispositivo alternativo preparado para o ensaio.

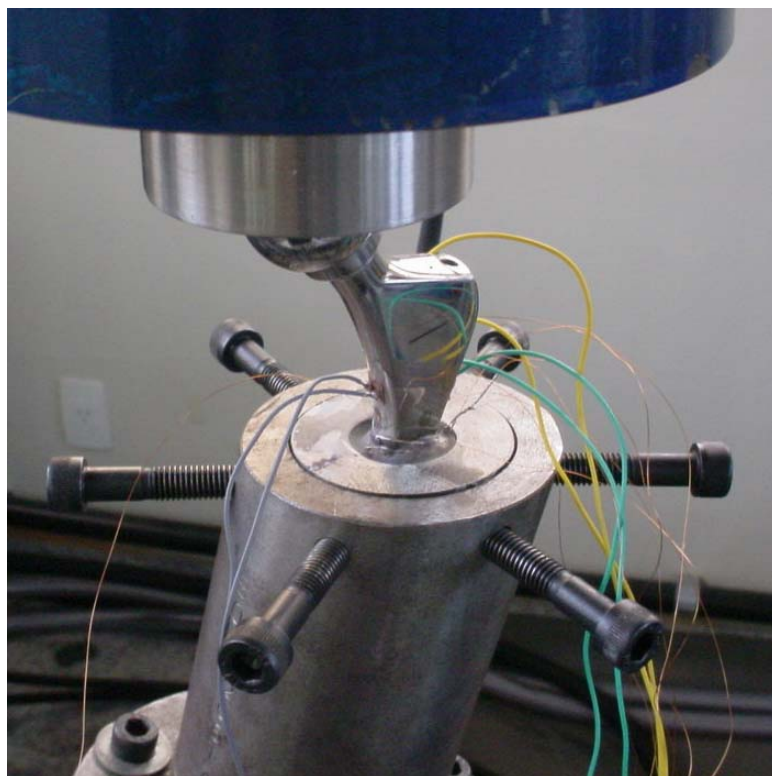


Figura 3.9 Detalhe da prótese cimentada e instrumentada no dispositivo alternativo. Os parafusos de fixação impedem o giro do copo metálico dentro do suporte

3.3 Cimentação das Hastes

A resina acrílica incolor marca Ortocril, e o catalisador Clássico, tipo Jet, autopolimerizante foram utilizados para a cimentação. O cimento foi deixado curar por 40 minutos e então o conjunto foi retirado do dispositivo de alinhamento, permanecendo 7 dias a 25°C e 42% de umidade relativa do ar.

3.3.1 Cimentação no Dispositivo Especificado pela Norma

As cabeças das próteses foram fixadas e posicionadas com o alinhamento em 10° no eixo antero-posterior e 9° no eixo médio-lateral da haste. Posicionou-se o copo e se ajustou a distância do centro da cabeça até a marca de nível (superfície do meio de engaste) em 57,28 mm valor equivalente a $CT \times 0,4$. A massa de cimento foi preparada de acordo com as medidas apropriadas de pó e do monômero e misturada durante 2 minutos, quando então ocorre o vazamento no copo metálico.

3.3.2 Cimentação no Dispositivo Alternativo

As próteses foram alinhadas pelo eixo KL da haste referenciado na Norma e afixada. Foram mantidas presas pela cabeça e também alinhadas ao centro do recipiente de cimentação. Também foi medida a distância do centro das cabeças até o meio de embutimento que deveria corresponder a $CT \times 0,4$, com uma tolerância de $\pm 2,0$ mm. Efetuou-se o vazamento do cimento acrílico, garantindo que a posição das hastes fosse mantida até a completa cura do cimento. A figura 3.10 mostra uma prótese afixada no momento da cimentação e a figura 3.11 mostra, através de uma vista superior, detalhe da haste alinhada e cimentada.

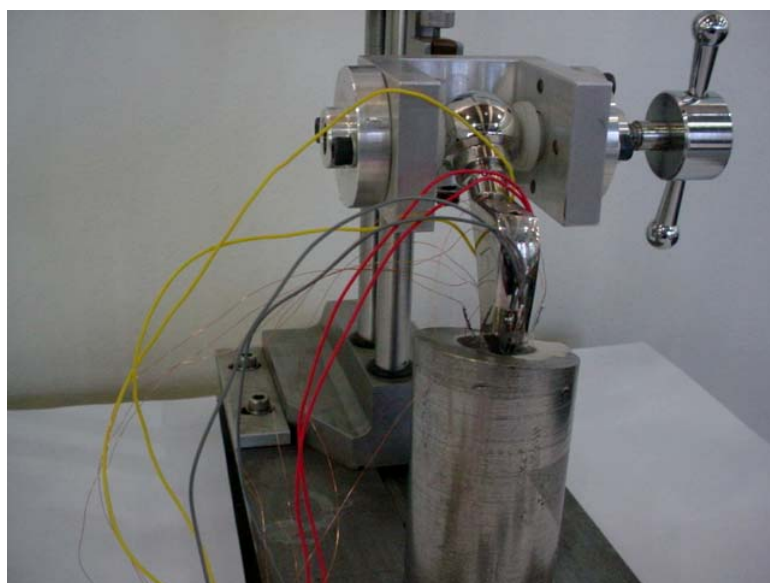


Figura 3.10 Prótese afixada e instrumentada no momento da cimentação no copo metálico.

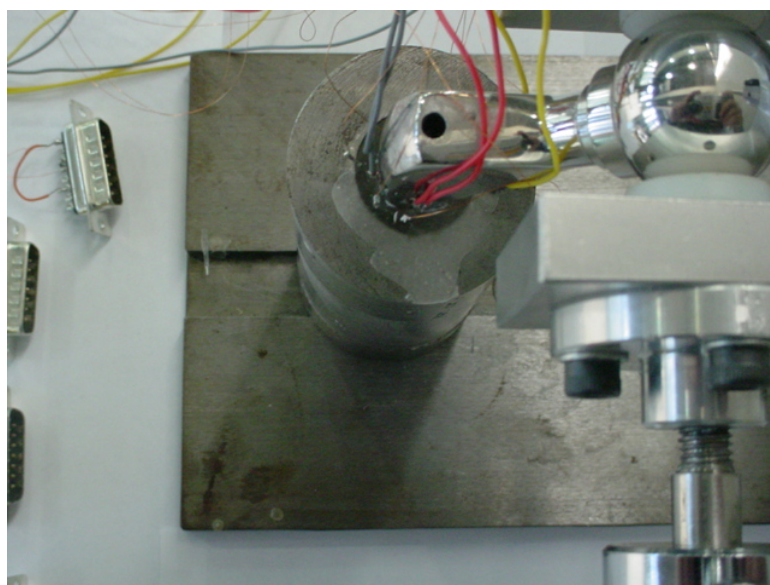


Figura 3.11 Detalhe da prótese alinhada no copo metálico durante a cimentação

3.4 Acompanhamento da Polimerização

Em ambos os casos, na cimentação nos dispositivos da norma e no alternativo, os dados de deformações residuais foram adquiridos durante 24 horas a partir do momento do vazamento do cimento nos copos metálicos e com as próteses já posicionadas. A aquisição

dos dados de deformação foi realizada através dos extensômetros de deformação que foram conectados ao equipamento Spider HBM de 8 canais ligado a um microcomputador utilizando o software Catman 4.0. Os extensômetros foram colados sobre uma porção de PMMA, de aproximadamente 1 mm de espessura, fixada nas hastes nas quatro posições de interesse já referidas no item 3.1.2.

3.5 Ensaio Estáticos

Após o período total da cura do cimento foram procedidos os ensaios estáticos em todas as amostras. Esses ensaios consistiram de 5 ciclos de carregamento. Em todos os casos a carga máxima atingida foi de 2300 N. A figura 3.12 mostra a aquisição de dados no monitor durante o ensaio estático de uma haste no dispositivo alternativo. O esquema de carregamento para cada ciclo foi assim estabelecido:

- a) rampa de 1 (um) minuto para alcançar a carga máxima;
- b) permanência de 1 (um) minuto na carga máxima;
- c) rampa de 1 (um) minuto para o total descarregamento
- d) permanência de 1 (um) minuto sem carga;
- e) início de nova rampa de carregamento

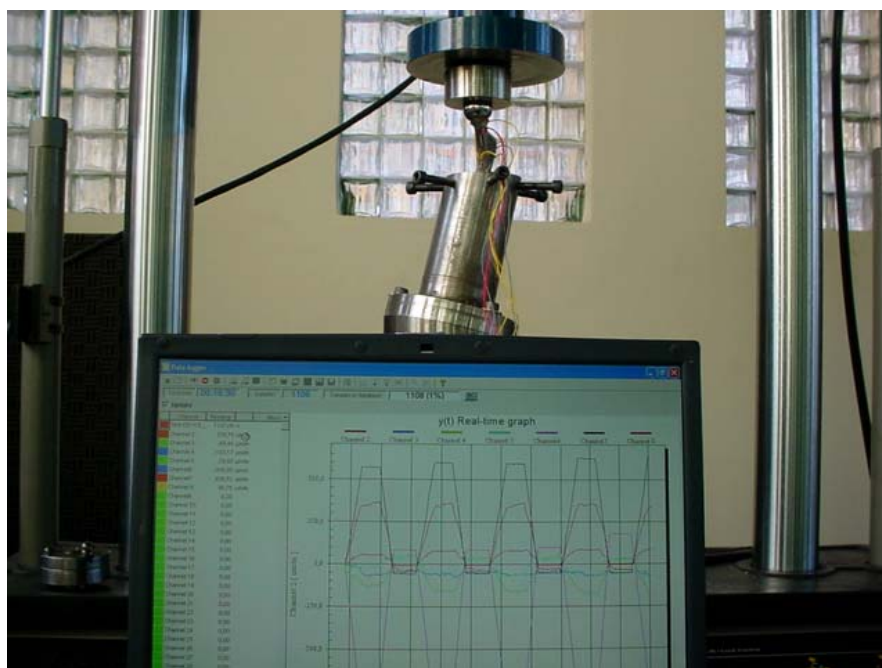


Figura 3.12 Imagem em detalhe dos dados adquiridos através dos extensômetros no momento de um ensaio estático.

3.6 Ensaio Cíclicos

Os ensaios cíclicos foram realizados em todas as amostras seguindo o estabelecido pela Norma ISO 7206-4, carga máxima de 2300 N e carga mínima de 300 N. A frequência de carregamento utilizada foi 10 Hz. A aquisição de dados de deformação nos pontos instrumentados, tanto na haste como no manto de cimento, também foi realizada. Os ensaios foram encerrados ao se atingir 5 milhões de ciclos.

3.7 Ensaio com Controle de Deslocamento

Os ensaios com controle de deslocamento foram realizados ao final dos ensaios de fadiga e com controle de deslocamento no conjunto haste/cimento, através do sistema da MTS. O objetivo desses ensaios foi de avaliar a diferença de rigidez dos dois conjuntos. Sob uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min os ensaios foram conduzidos até se atingir um máximo de 12 mm de deslocamento. Foram registradas as cargas relativas aos respectivos deslocamentos para todas as amostras. Devido aos níveis de carga alcançados não foram adquiridos os dados dos extensômetros.

3.8 Simulação das Deformações

3.8.1 Simulação das Condições de Ensaio de Acordo com a Norma

O modelo criado para simular as deformações no manto de cimento e na haste reproduzindo as características do ensaio de acordo com a Norma ISO 7206-4 é composto de duas peças modeladas como cascas rígidas e mais outras três peças modeladas como sólidos homogêneos e que representam o manto de cimento, a prótese e a cabeça. As figuras 3.13 e 3.14 ilustram as malhas de cada um dos sólidos utilizados na análise. É considerada a existência de atrito de 0,3 entre o dispositivo de contato e a cabeça da prótese. O dispositivo de contato é composto por 462 elementos quadráticos do tipo shell, rígidos e de interpolação linear, num total de 493 nós. A base do dispositivo (copo de cimentação) é composta por 1774 elementos quadráticos do tipo shell, rígidos e de interpolação linear, num total de 1802 nós. Os outros sólidos são assim representados, o manto de cimento é constituído de 37120 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, em um total de 40813 nós, a prótese é constituída de 2336 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, num total de 3330 nós e finalmente a cabeça foi representada com 2886 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, em um total de 3532 nós.

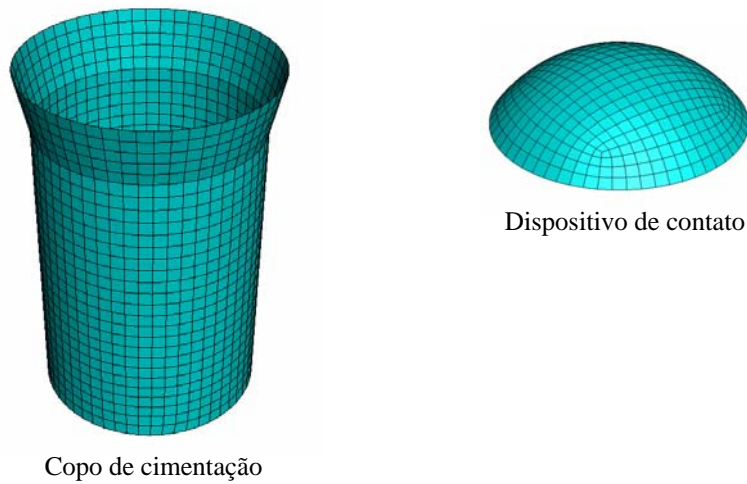


Figura 3.13 Malha do copo de cimentação a esquerda e do dispositivo de contato a direita.

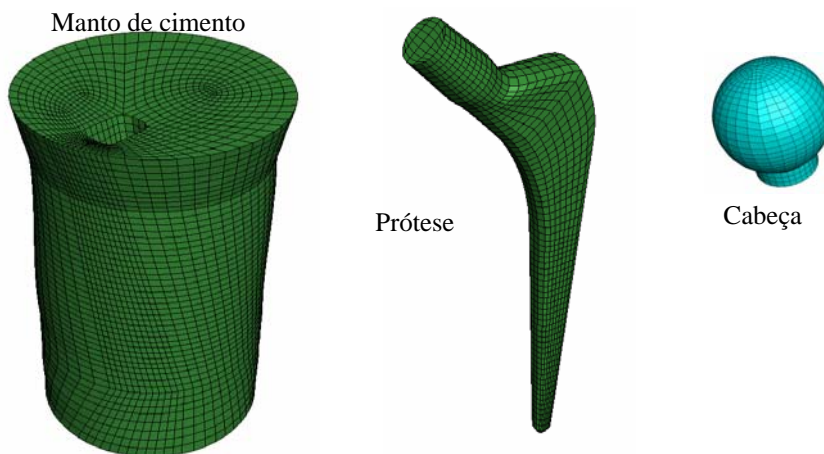


Figura 3.14 Malhas do manto de cimento, da prótese e da cabeça.

O material da prótese e da cabeça nos ensaios foi de aço inox. Portanto, nesta análise foram considerados para este material um módulo de elasticidade de 205 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,3. Por outro lado, o manto de cimento é constituído de PMMA, então foram adotados o módulo elástico de 2,8 GPa e coeficiente de Poisson 0,3. Como os demais componentes da montagem foram considerados rígidos não houve necessidade de especificar as características do material. As condições de contorno impostas ao modelo foram a de engaste na base do dispositivo e a carga de 2300N aplicada axialmente na casca. O modelo apresenta um conjunto de interações localizadas nas regiões onde existe

contato entre as peças. A montagem das peças envolvidas no modelo é mostrada na figura 3.15. Como na prática existe uma adesão mecânica entre o manto de cimento e as superfícies do dispositivo e da prótese, as regiões de contato foram consideradas como coladas. Outra região de adesão é a interação entre a cabeça e prótese, essa região é considerada perfeitamente colada. Desta maneira a carga aplicada se distribui pela superfície da cabeça (não apenas em um ponto) simulando a condição de contato com o equipamento de teste.

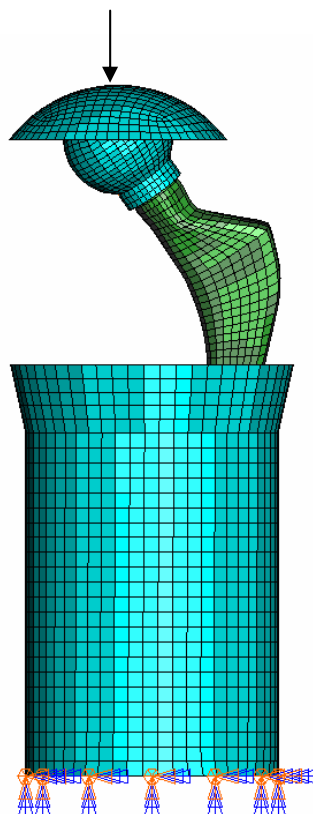


Figura 3.15 Ilustração do modelo completo e suas condições de contorno.

3.8.2 Simulação das Condições de Ensaio em Configuração Alternativa

O modelo criado para simular as deformações no manto de cimento e na haste reproduzindo o ensaio realizado de maneira alternativa à configuração sugerida pela Norma ISO 7206-4 é composto de três peças modeladas como cascas rígidas e mais outras três peças modeladas como sólidos homogêneos e que representam o manto de cimento, a prótese e a cabeça. É considerada a existência de um coeficiente de atrito de 0,3 entre o dispositivo de contato e a cabeça da prótese. O dispositivo de contato é composto por 462 elementos quadráticos do tipo shell, rígidos e de interpolação linear, num total de 493 nós. A base do dispositivo é composta por 3768 elementos hexaédricos sólidos e de

interpolação linear, num total de 4797 nós. O copo de cimentação é composto por 1016 elementos hexaédricos sólidos e de interpolação linear, num total de 1407 nós. Os outros sólidos são assim representados, o manto de cimento é constituído de 9060 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, em um total de 11210 nós, a prótese é constituída de 2336 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, num total de 3330 nós e finalmente a cabeça foi representada com 2886 elementos hexaédricos sólidos de interpolação linear, em um total de 3532 nós. As figuras 3.16 e 3.17 ilustram a malha de cada um dos sólidos utilizados na análise.

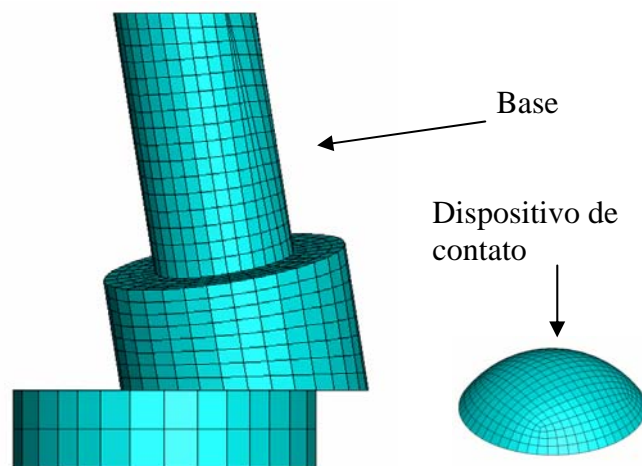


Figura 3.16 Malhas criadas para a base rígida e o dispositivo de contato

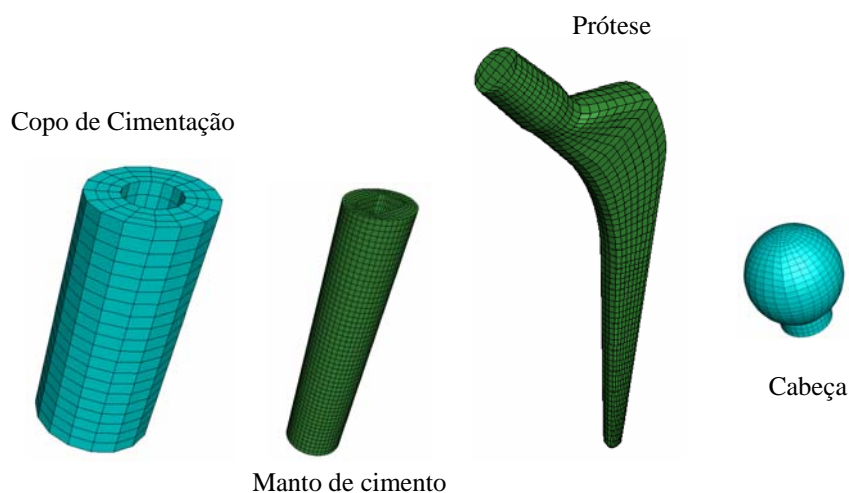


Figura 3.17 Malhas do copo metálico, do manto de cimento, da prótese e da cabeça.

Como na situação anterior, o material da prótese e da cabeça nos ensaios também é de aço inox, portanto, nesta análise também foram considerados o módulo de elasticidade de 205 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,3. Como o manto de cimento é constituído de PMMA, então o módulo de elasticidade de 2,8 GPa e coeficiente de Poisson 0,3 foram utilizados. Como os demais componentes da montagem foram considerados rígidos não houve necessidade de especificar as características do material. As condições de contorno impostas ao modelo foram a de engaste na base do dispositivo e a carga de 2300N aplicada pela casca. O modelo apresenta um conjunto de interações localizadas nas regiões onde existe contato entre as peças. A montagem das peças envolvidas no modelo é mostrada na figura 3.18. Como na prática existe uma adesão mecânica entre o manto de cimento e as superfícies do dispositivo e da prótese, as regiões de contato foram consideradas como coladas. Outra região de adesão é a interação entre a cabeça e prótese, essa região é considerada perfeitamente colada. Com isso, como no outro modelo, a carga aplicada se distribui pela superfície da cabeça (não apenas em um ponto) simulando a condição de contato com o equipamento de teste.

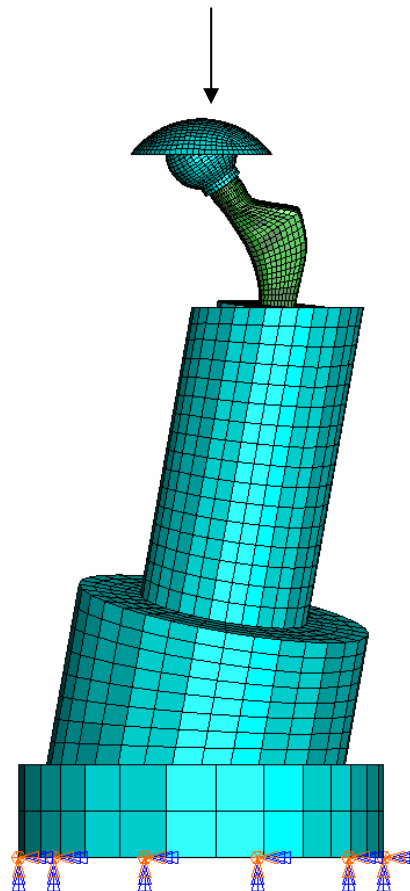


Figura 3.18 Ilustração da malha do modelo criado e das condições de contorno

3.8.3 Simulação da Haste Engastada em Corpo Rígido

Nesta simulação, que apresenta as mesmas características do modelo criado para simular as deformações no manto de cimento e na haste reproduzindo as características do ensaio de acordo com a Norma ISO 7206-4, se buscou apenas as deformações na haste considerando o manto de cimento como um corpo rígido. Em outras palavras, há um engaste em todas as direções na superfície da prótese que está em contato com o manto de cimento. A figura 3.19 mostra a imagem do modelo criado.

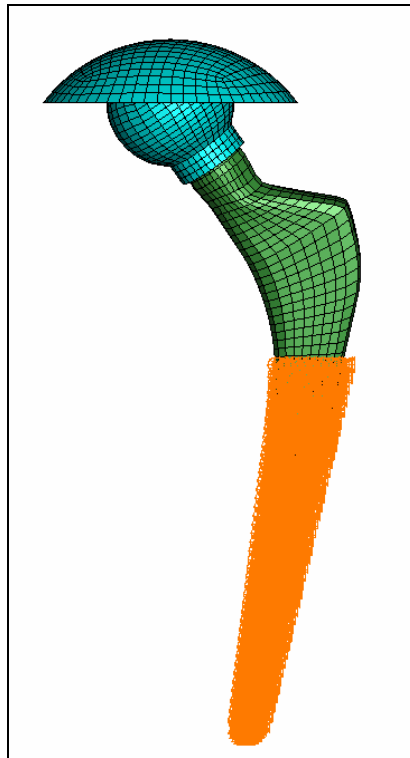


Figura 3.19 Ilustração do modelo criado considerando a prótese engastada em um corpo rígido

4.0 RESULTADOS

4.1 Deformações Residuais ao Final da Polimerização

Durante a aquisição de dados de deformações residuais, no momento da polimerização, foi possível observar que a temperatura externa dos dispositivos de fixação com maior massa de cimento (amostras N1 a N3), foi mais alta. Esta observação foi apenas de caráter empírico, somente pela sensibilidade ao manuseio, pois não foram utilizados quaisquer sensores que pudessem efetivamente determinar os níveis de temperatura alcançados. Da mesma forma, como descrito na literatura (ROQUE 2004; ORR 2003), no estágio final com a estabilização da polimerização e com o resfriamento dos corpos de prova foi observada uma pequena contração da massa de cimento.

A figura 4.1 mostra todos os valores de deformação residual medidos nas quatro posições instrumentadas no cimento para os corpos de prova dos dois conjuntos de amostras. Nesta figura também é mostrado um gráfico de barras e as médias obtidas para cada conjunto de amostras (A e N). Os resultados mostrados na figura são aqueles registrados ao final das 24 horas de acompanhamento das deformações e não correspondem aos picos de deformação verificados durante a polimerização, mais especificamente quando o pico exotérmico foi alcançado.

Na posição medial-proximal, em todos os corpos de prova, foram observadas deformações residuais negativas. Os valores identificados nessa posição foram, em média, superiores as medições obtidas nas posições lateral-proximal e lateral-distal. Em uma análise comparativa, nesta mesma posição, os valores verificados para as amostras do conjunto N (N1 a N3) foram superiores as amostras do conjunto A (A1 a A3).

Na posição lateral-proximal foi observado apenas um valor de deformação positiva (960 $\mu\text{m}/\text{m}$) para a amostra A1. Todas as demais medidas mostraram valores negativos de deformação. Os maiores resultados medidos nesta posição, nos dois conjuntos de amostras, apresentam valores muito próximos aqueles determinados na posição medial-proximal.

Na posição medial-distal foram observadas duas medidas positivas (A1 e N1). Considerando todas as deformações em módulo, se verifica que não houve deformação menor do que 1152 $\mu\text{m}/\text{m}$. Desta forma se percebe que as magnitudes das deformações nesta posição foram maiores do que as medidas nas outras duas posições.

Na posição lateral-distal a magnitude das deformações foram as menores de toda as posições medidas, em especial para as amostras do conjunto alternativo. Houve deformações positivas e negativas nos dois conjuntos de amostras. Os valores encontrados apresentaram dispersão semelhante a da posição medial-proximal.

Como citado no trabalho de Roques (2004) no gráfico da polimerização de todos CP's foram observados 3 estágios. No primeiro foi verificado o pico exotérmico de temperatura acompanhado de variações bruscas de deformações. No segundo estágio as variações foram menores e mais constantes até chegarem a um valor máximo quando se deu o início do terceiro estágio onde as deformações se estabilizaram. A figura 4.2 mostra as curvas de deformação da amostra N3 nas quatro posições medidas e onde se pode verificar o comportamento descrito acima. Da mesma forma, a figura 4.3 ilustra os momentos iniciais da polimerização da amostra A3. Durante o estágio 2 as deformações aumentam ou diminuem a partir do valor máximo obtido no estágio 1. No estágio 2 há uma tendência das deformações retornarem a zero.

Em resumo, na maioria das posições onde foram medidas as deformações residuais estas foram compressivas, mas não equivalentes em magnitude. Em média, as deformações nas posições proximais foram mais elevadas do que aquelas verificadas nas posições distais. Este comportamento está de acordo com o que foi verificado pelos trabalhos de Huiskes(1997) e Estok (1980).

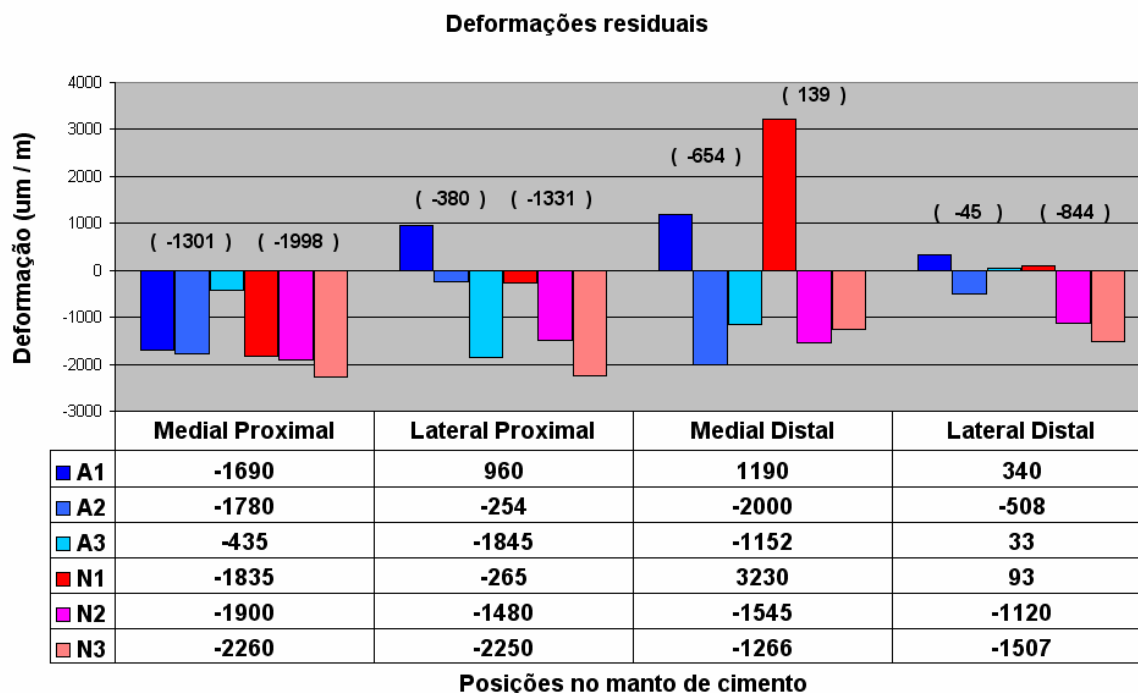


Figura 4.1 Resultados de deformação residual no manto de cimento depois de 24 horas de acompanhamento nas quatro posições de aquisições de dados. As médias de cada conjunto estão colocadas no gráfico de barras.

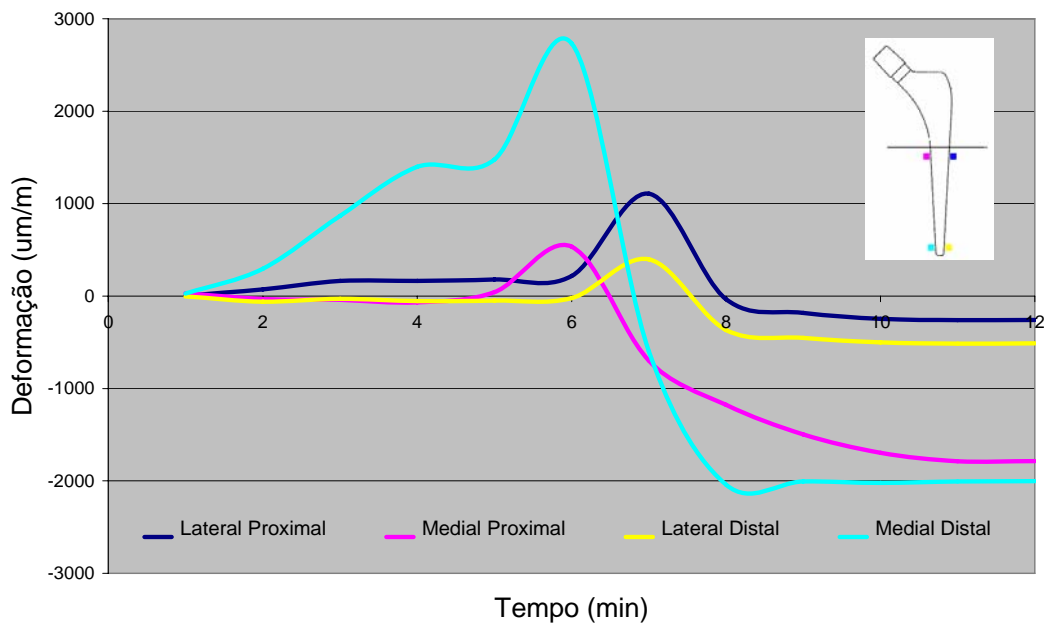


Figura 4.2 Dados de deformação durante a polimerização da amostra N3. As curvas foram geradas a partir de uma seleção (filtro) de pontos representativos.

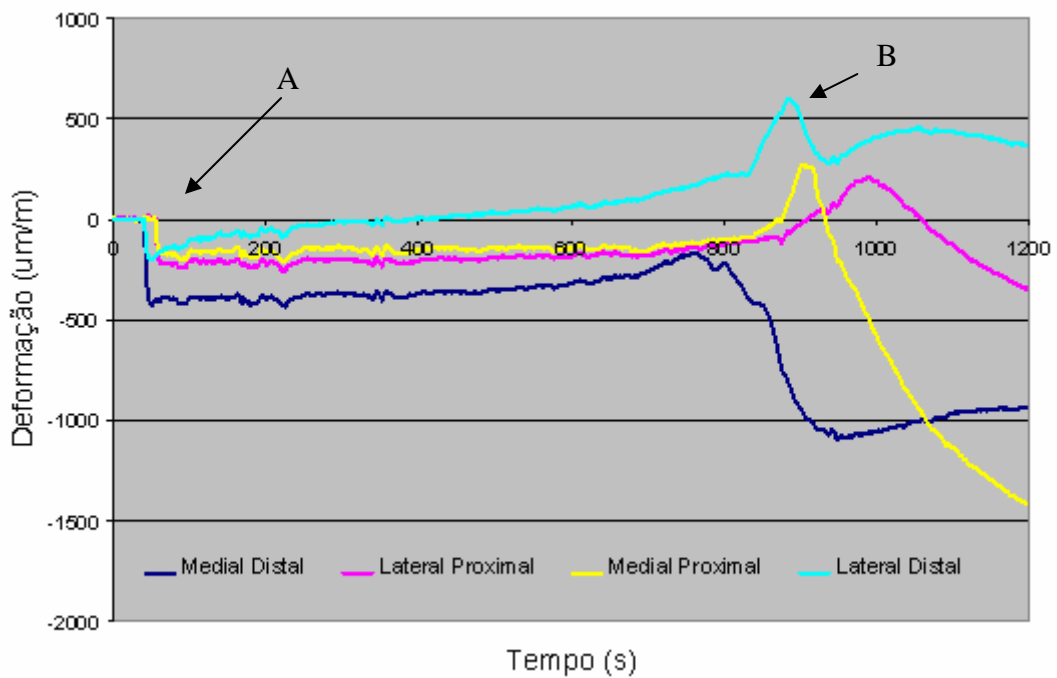


Figura 4.3 Dados de deformação na cimentação da amostra A3 durante os 20 minutos iniciais. O ponto A se refere ao início do vazamento do cimento no copo metálico. O ponto B ilustra o momento do pico exotérmico.

4.2 Deformações sob Carregamento Estático

Os resultados de deformação sob carregamento estático para todas as quatro posições medidas no cimento e para as três posições medidas nas hastes são correspondentes ao maior valor obtido após cinco ciclos completos de carregamento. A partir do LVDT instalado no equipamento de ensaio (MTS 810) foi possível identificar o deslocamento das linhas de carga, ou seja, a fração relativa à deformação do conjunto haste/cimento mais aquela relativa à migração da haste no manto de cimento (embora não tenham sido avaliados os micromovimentos das hastes no cimento). Neste aspecto é possível afirmar que a rigidez do equipamento e dos dispositivos utilizados asseguram a confiabilidade nos deslocamentos medidos.

Considerando-se o conjunto de amostras do grupo A, a amostra A1 mostrou a menor variação no deslocamento da linha de carga, do primeiro ao último ciclo de carga. A figura 4.4 ilustra uma variação total de apenas 0,02 mm (0,63mm – 0,65mm) o que provavelmente corresponda a uma migração distal (acomodação) da prótese no manto de cimento. Como este fator não foi medido, é possível considerar como uma deformação permanente do sistema. A amostra A3 (figura 4.5) foi a que apresentou a maior deformação permanente (0,04 mm) embora os valores de deslocamento obtidos do primeiro ao último ciclo de carga tenham sido menores (0,33mm – 0,37 mm). No caso do conjunto de amostras N, a amostra N3 (figura 4.6) foi a amostra que apresentou a maior deformação permanente (0,02 mm) e também os maiores valores de deslocamento da linha de carga (0,46 mm – 0,48 mm). Ao se analisar todas as amostras dos conjuntos A e N, a amostra que apresentou a maior deformação permanente foi a A3 enquanto que a amostra A1 foi aquela em que se determinaram os maiores valores de deslocamento das linhas de carga (0,63 mm – 0,65 mm). A amostra N2 (figura 4.7) apresentou o menor deslocamento permanente entre todas as amostras.

A figura 4.8 mostra todos os valores de deformação medidos nas quatro posições instrumentadas no cimento enquanto que a figura 4.9 apresenta os resultados de deformação nas posições medidas nas hastes. Os resultados são referentes aos corpos de prova dos dois conjuntos de amostras. Nestas figuras também são mostrados os gráficos de barras com as médias obtidas para cada conjunto de amostras (A e N). Os resultados mostrados nas figuras são os maiores valores de deformação obtidos durante os cinco ciclos de carregamento.

Verificando-se os resultados obtidos nas medições com os extensômetros no cimento verifica-se para a posição medial-proximal que o maior valor de deformação

medido foi de $-440 \mu\text{m/m}$ na amostra N2. As médias dos valores de deformação medidos dos dois conjuntos analisados ficaram muito próximas. Para as amostras do conjunto A foi de $-306 \mu\text{m/m}$ e para as amostras do conjunto N foi de $-343 \mu\text{m/m}$. Todas as deformações medidas para esta posição foram compressivas.

Ao se observar os resultados obtidos na medição das amostras na posição lateral-proximal do manto de cimento verifica-se que o maior resultado foi aquele medido na amostra N2 ($580 \mu\text{m/m}$). Em contrapartida, o menor valor medido foi de $187 \mu\text{m/m}$ na amostra A2. Na média, os valores das amostras com manto menos espesso (A) foram menores ($309 \mu\text{m/m}$) do que os valores verificados nas amostras do grupo com manto mais espesso (N) [$396 \mu\text{m/m}$]. Todas as deformações medidas para esta posição foram trativas.

Na posição medial-distal foi observada a menor dispersão de resultados, considerando-se as duas condições de espessura de cimento. Na condição A, a média foi de $-132 \mu\text{m/m}$ e, na condição N, a média foi $-204 \mu\text{m/m}$. Os valores medidos nesta posição foram menores do que os medidos nas outras duas posições proximais

Na posição lateral-distal a média obtida para a condição N foi de $-192 \mu\text{m/m}$ e, na condição A foi de $-106 \mu\text{m/m}$. Na amostra A2 foi perdido o sinal referente a esta posição, devido à ruptura dos terminais do extensômetro e não foi possível a aquisição de dados. Nesta posição foram obtidos os menores valores de deformação de todas as posições medidas em ambos os conjuntos de amostras.

Na medição das deformações das hastes na posição medial a média obtida para as amostras ensaiadas na condição A foi de $-816 \mu\text{m/m}$ enquanto que para as amostras da condição N foi de $-736 \mu\text{m/m}$. O maior valor de deformação nessa posição foi de $-920 \mu\text{m/m}$ medido na amostra N3 e, corresponde também ao maior valor de deformação, seja compressiva ou trativa, medido nas três posições avaliadas nas próteses.

Na região lateral das hastes a média das observações na condição A foi de $620 \mu\text{m/m}$, enquanto que a deformação média na condição N foi de $617 \mu\text{m/m}$. O maior valor de deformação, medido na amostra N3, foi de $760 \mu\text{m/m}$ e a menor deformação obtida, na amostra N1, foi de $504 \mu\text{m/m}$.

Observando-se os resultados obtidos na posição frontal da haste percebe-se que estes correspondem às menores deformações medidas das três regiões analisadas da haste. No caso do grupo de amostras da condição N a média dos valores é de $156 \mu\text{m/m}$ enquanto que a média das amostras da condição A é de $164 \mu\text{m/m}$. Deve ser mencionado também que nos valores encontrados para ambos os grupos de amostras há a menor

dispersão de resultados de todas as posições medidas, tanto na haste como no manto de cimento.

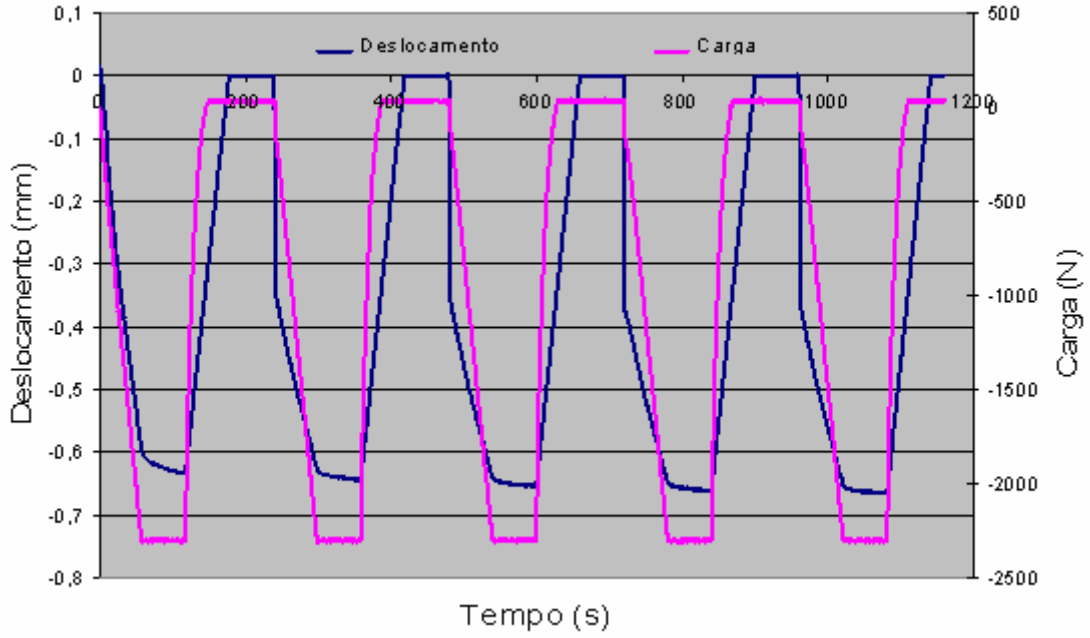


Figura 4.4 Deslocamento da amostra A1 durante os estágios do carregamento estático.

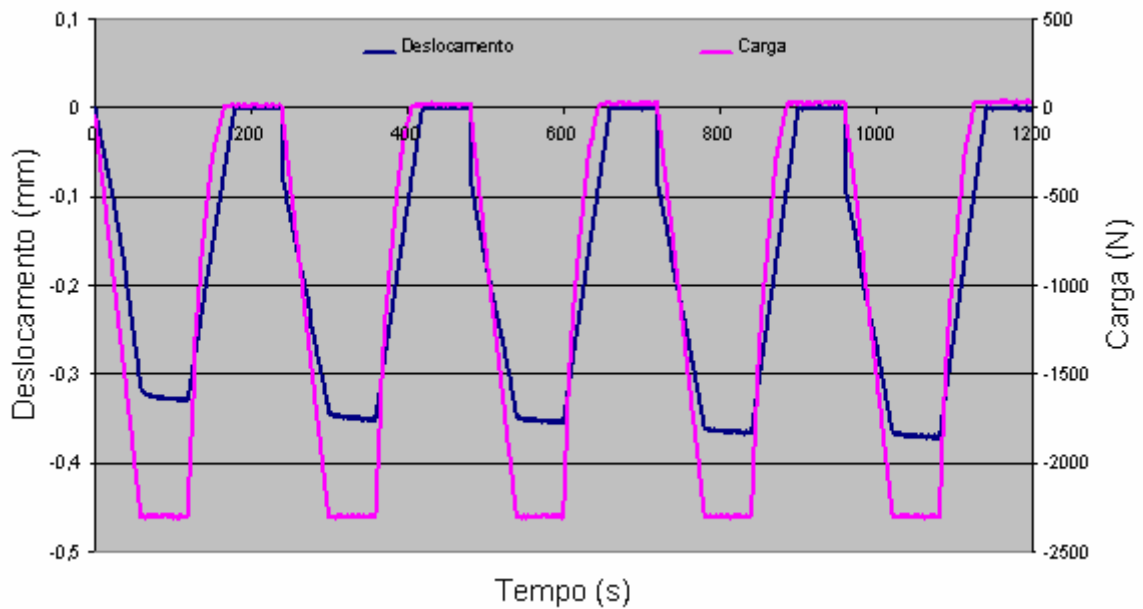


Figura 4.5 Deslocamento da amostra A3 durante os estágios do carregamento estático

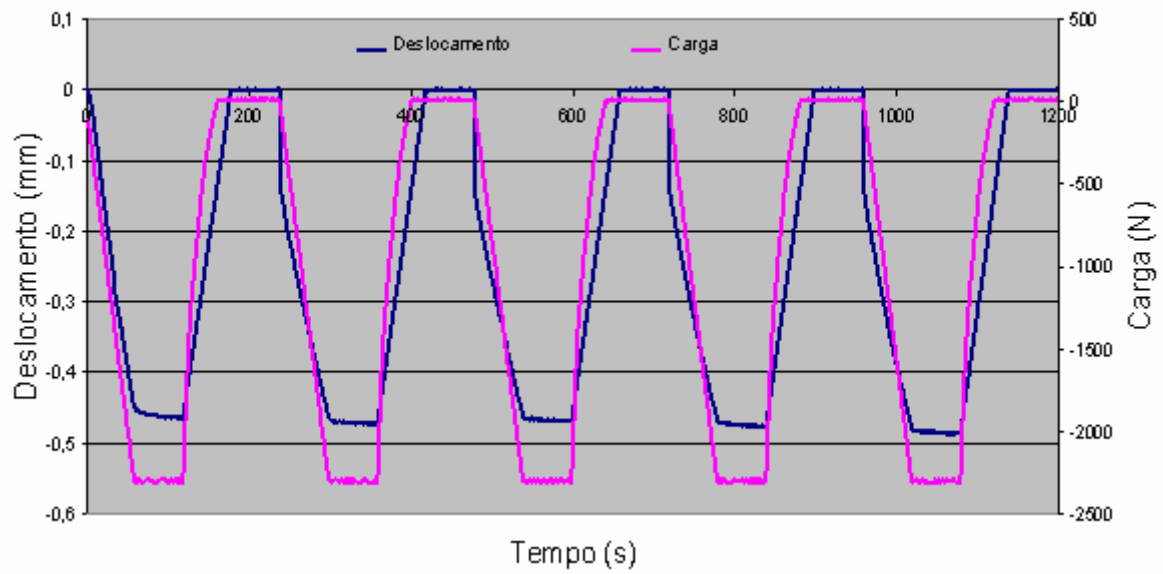


Figura 4.6 Deslocamento da amostra N3 durante os estágios do carregamento estático.

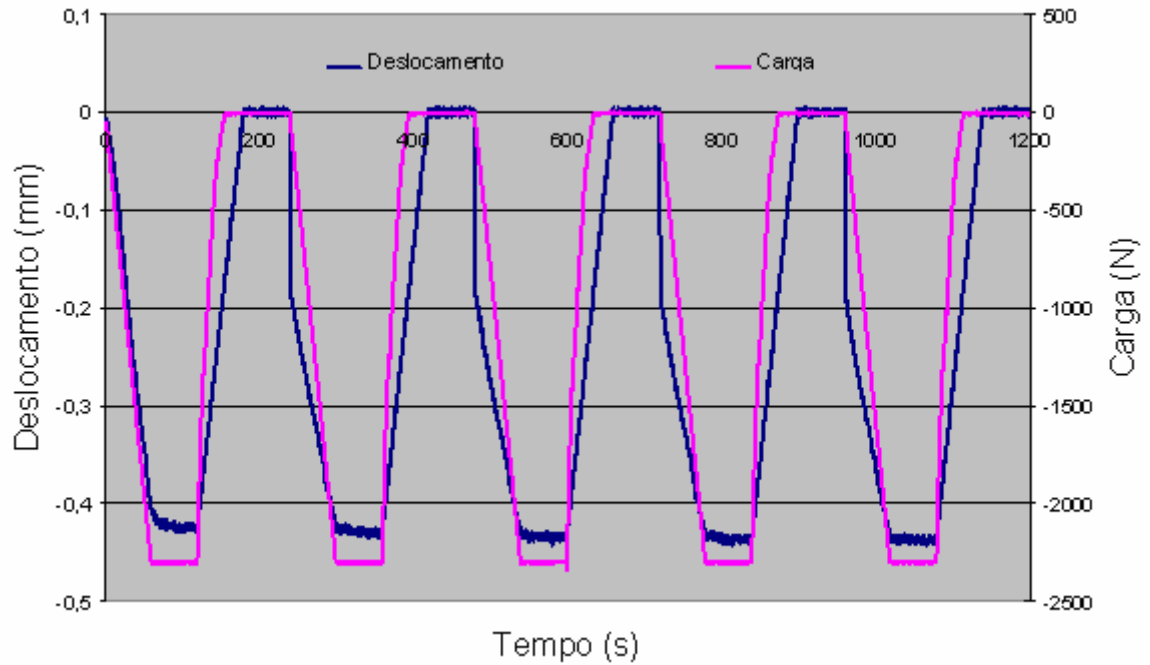


Figura 4.7 Deslocamento da amostra N2 durante os estágios do carregamento estático.

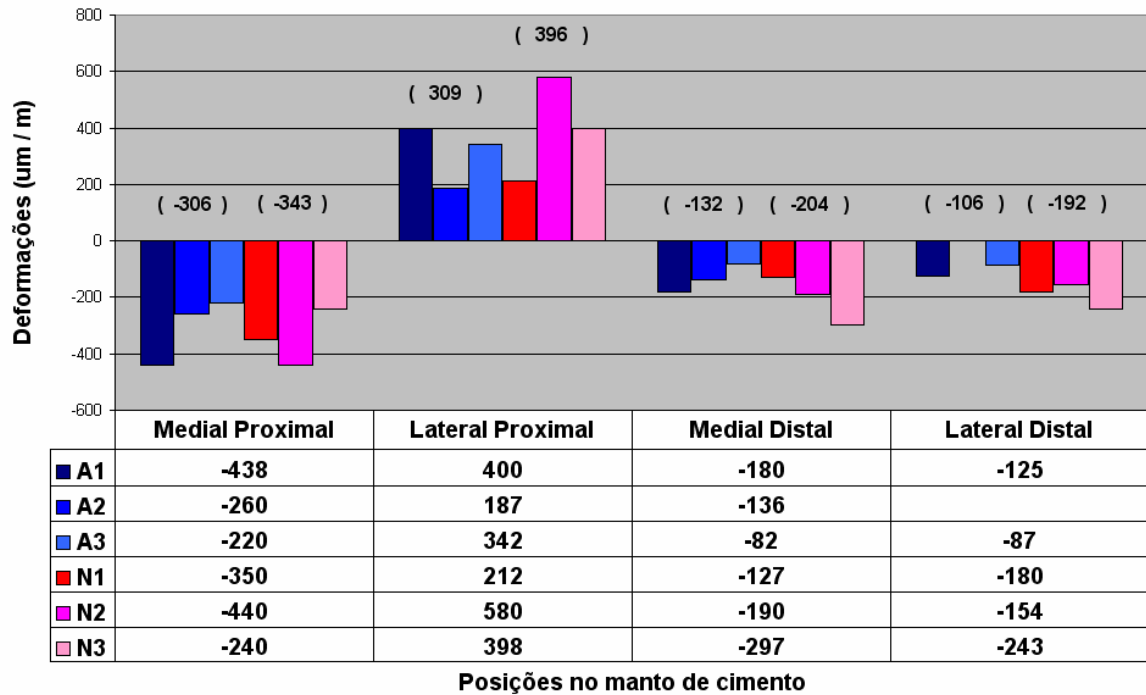


Figura 4.8 Deformações medidas nas posições do cimento durante os ciclos do carregamento estático. As médias de cada conjunto estão colocadas no gráfico de barras.

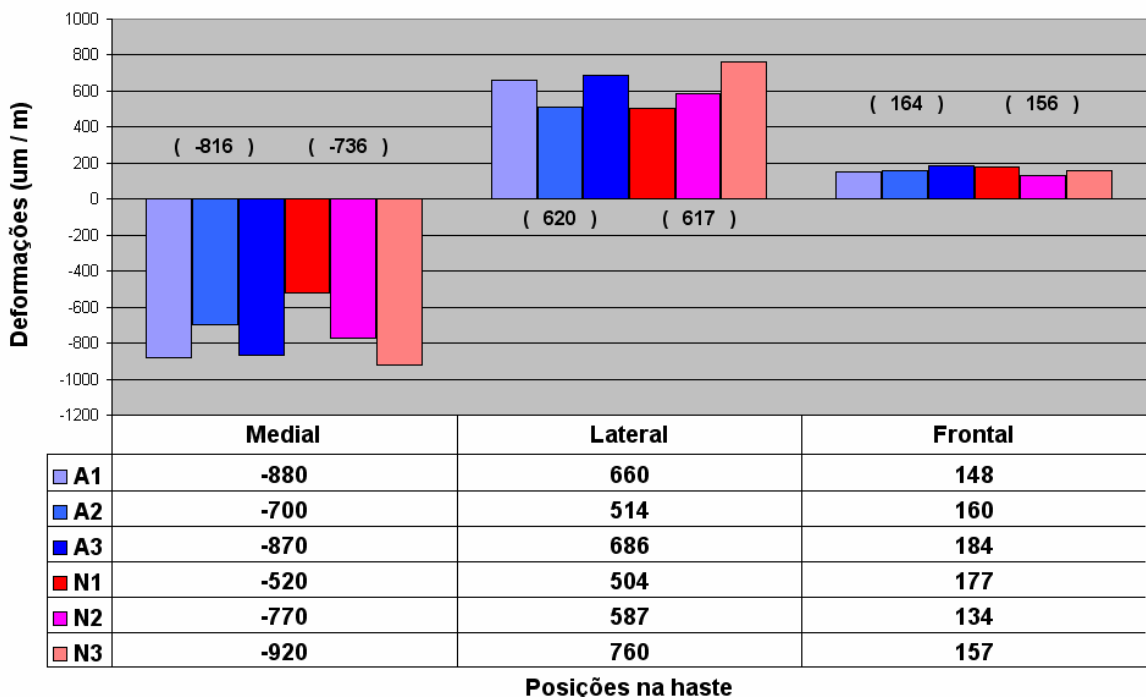


Figura 4.9 Deformações medidas nas posições das hastes durante os ciclos do carregamento estático. As médias de cada conjunto estão colocadas no gráfico de barras.

4.3 Deformações sob Carregamento Cíclico

Nos ensaios de fadiga foram adquiridos os dados relativos ao deslocamento do conjunto haste/cimento em função das cargas aplicadas, no intervalo de 300 N a 2300 N, durante os 5 milhões de ciclos. A figura 4.10 ilustra uma curva típica, mostrando o deslocamento das linhas de carga, obtida no ensaio da amostra A1.

Verifica-se nos dados da tabela 4.1 que a amplitude média de deslocamento, no início dos ensaios, correspondente à aplicação das cargas máximas e mínimas, foi de 0,17 mm. Ao se observar os mesmos dados obtidos durante os ensaios, passados cerca de 2,5 milhões de ciclos, foi verificada uma amplitude média de deslocamento de 0,15 mm. Ao final dos 5 milhões de ciclos este dado de amplitude das linhas de carga chega a 0,13 mm. Diante disto, se percebe que houve uma tendência à diminuição da amplitude de deslocamento das linhas de carga ao longo dos ensaios. Ainda, ao se observar os dados dos deslocamentos das linhas de carga para todas as amostras ensaiadas, percebe-se que em média houve uma deformação permanente do sistema de 0,07 mm. O maior valor foi observado na amostra A1 com uma deformação de 0,12 mm e o menor caso foi da amostra A2 onde se observou uma deformação de 0,04 mm ao final.

A seguir são também apresentados os dados obtidos, sob carregamento cíclico, através dos extensômetros situados em três posições nas hastes e em quatro posições no manto de cimento. O gráfico mostrado na figura 4.11 ilustra a aquisição dos dados de deformação nos vários extensômetros nos momentos iniciais do ensaio da amostra N3. Todas as amostras ensaiadas resistiram aos 5 milhões de ciclos exigidos pela Norma ISO 7206.

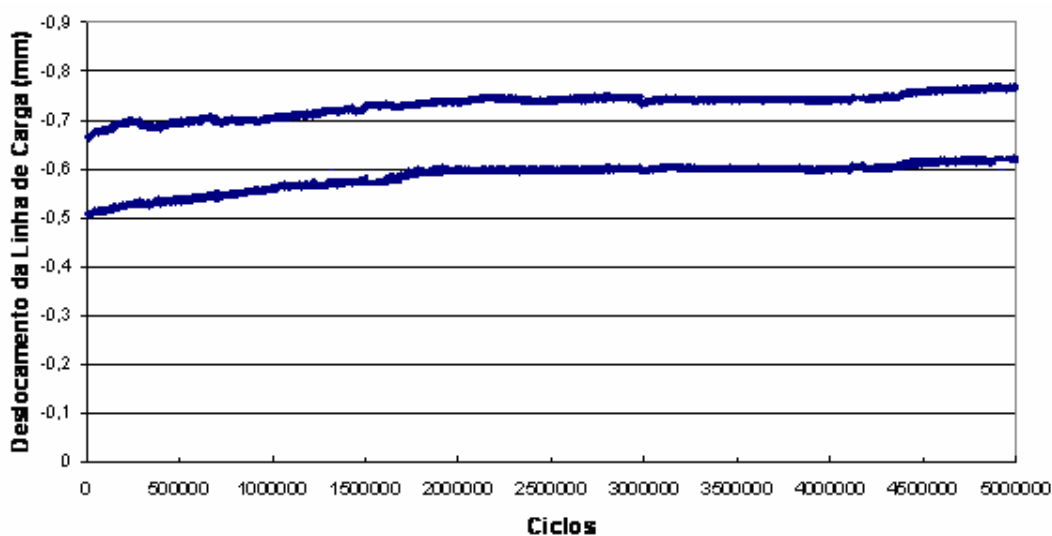


Figura 4.10 Deslocamento das linhas de carga durante o ensaio de fadiga da amostra A1

Tabela 4.1 Resultados da amplitude de deslocamento das linhas de carga durante os ensaios de fadiga

Amostras	Deslocamento (mm)					
	Início		Meio		Fim	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
N1	Os dados não foram adquiridos para esta amostra					
N2	0,15	0,30	0,22	0,36	0,23	0,32
	0,15		0,14		0,09	
N3	0,10	0,35	0,12	0,36	0,15	0,35
	0,25		0,24		0,20	
A1	0,50	0,66	0,59	0,74	0,62	0,76
	0,16		0,15		0,14	
A2	0,12	0,26	0,15	0,26	0,16	0,26
	0,14		0,11		0,10	
A3	0,22	0,39	0,29	0,43	0,31	0,44
	0,17		0,14		0,13	
Amplitude Média	0,17		0,15		0,13	

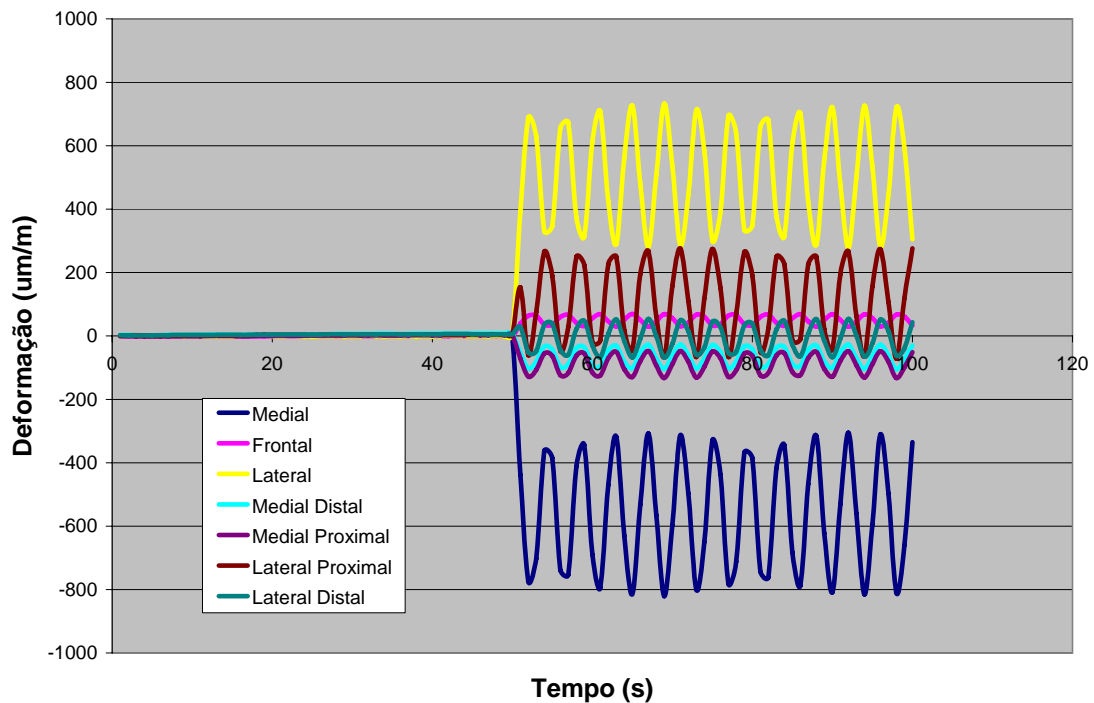


Figura 4.11 Gráfico mostrando o início da aquisição de dados nos diversos extensômetros da amostra N3

A figura 4.12 mostra todos os valores de deformação medidos nas tres posições instrumentadas nas hastes enquanto que a figura 4.13 apresenta os resultados de deformação nas quatro posições medidas no cimento. Os resultados são referentes aos corpos de prova dos dois conjuntos de amostras. Nestas figuras também são mostrados os gráficos de barras com as médias obtidas para cada conjunto de amostras (A e N). Os resultados mostrados nas figuras são os maiores valores de deformação obtidos ao final dos cinco milhões de ciclos de carregamento.

Ao se analisar apenas as deformações medidas nas hastes, verificou-se que todos os dados resultantes de carregamento cíclico são menores do que aqueles obtidos sob carregamento monotônico. Nos resultados das medições das deformações na posição Medial, as médias obtidas, tanto no conjunto com manto mais espesso quanto no grupo com manto mais fino, ficaram com valores muito próximos. O maior valor medido foi na amostra N3 de $-720 \mu\text{m/m}$ e o menor valor foi de $-430 \mu\text{m/m}$ na amostra A2 .

Na posição lateral onde estão sendo medidas as deformações trativas, mais críticas em termos de fadiga, a média das deformações das amostras do grupo N foi superior a média das deformações das amostras do grupo A. Resultado inesperado, mas, de certa forma de acordo com os resultados obtidos sob carregamento monotônico.

Na posição frontal também a média dos valores obtidos para as amostras do grupo N foi maior do que a média dos valores do grupo A. Foi a posição que apresentou menor dispersão de resultados, tal qual ocorreu sob carregamento monotônico. Nesta posição foram medidas as menores deformações das regiões medidas nas hastes, e nesse caso estão envolvidas deformações trativas relacionadas a torção (ângulos de abdução e torção).

Ao se analisar os dados adquiridos a partir dos extensômetros colocados no manto de cimento foram observados na posição medial-proximal que a média das deformações medidas nas amostras do grupo A foram maiores do que aquelas do grupo N, o que não foi observado sob carregamento monotônico.

Na posição lateral-proximal os valores de deformação medidos foram muito semelhantes o que se expressou na média dos dois grupos de amostras (N= $223 \mu\text{m/m}$; A = $230 \mu\text{m/m}$), tal qual ocorreu sob carregamento monotônico. O maior valor de deformação, $365 \mu\text{m/m}$ foi medido na amostra A1.

Na posição medial-distal o maior valor de deformação medido foi na amostra A2 ($-257 \mu\text{m/m}$). No grupo A foi verificado o maior desvio padrão dos resultados medidos sob carregamento dinâmico. O menor valor medido nesta posição também foi no grupo A (A3 = $-25 \mu\text{m/m}$).

Na posição lateral-distal houve resultados com pouca dispersão no grupo N e para a amostra A2 não foi possível fazer a aquisição de dados nesta posição devido ao rompimento do terminal de ligação com o extensômetro. O maior valor de deformação foi medido na amostra N3 (-170 $\mu\text{m/m}$). A média do grupo A foi de -91 $\mu\text{m/m}$ e a do grupo N foi de -134 $\mu\text{m/m}$.

Os resultados de deformação, de forma global, estiveram consistentes com aqueles obtidos sob carregamento monotônico, principalmente sob o ponto de vista qualitativo, com as maiores deformações nas posições medial e lateral e muito menor na posição frontal. Da mesma forma, nas posições no manto de cimento houve uma equivalência dos níveis de deformação encontrados. No controle do deslocamento máximo após 5 milhões de ciclos, o maior valor foi obtido no corpo de prova A1 com 0,76 mm, que se refere ao deslocamento total do sistema haste/cimento. O menor valor de deslocamento (0,22 mm) foi encontrado ao final do teste do corpo de prova N3.

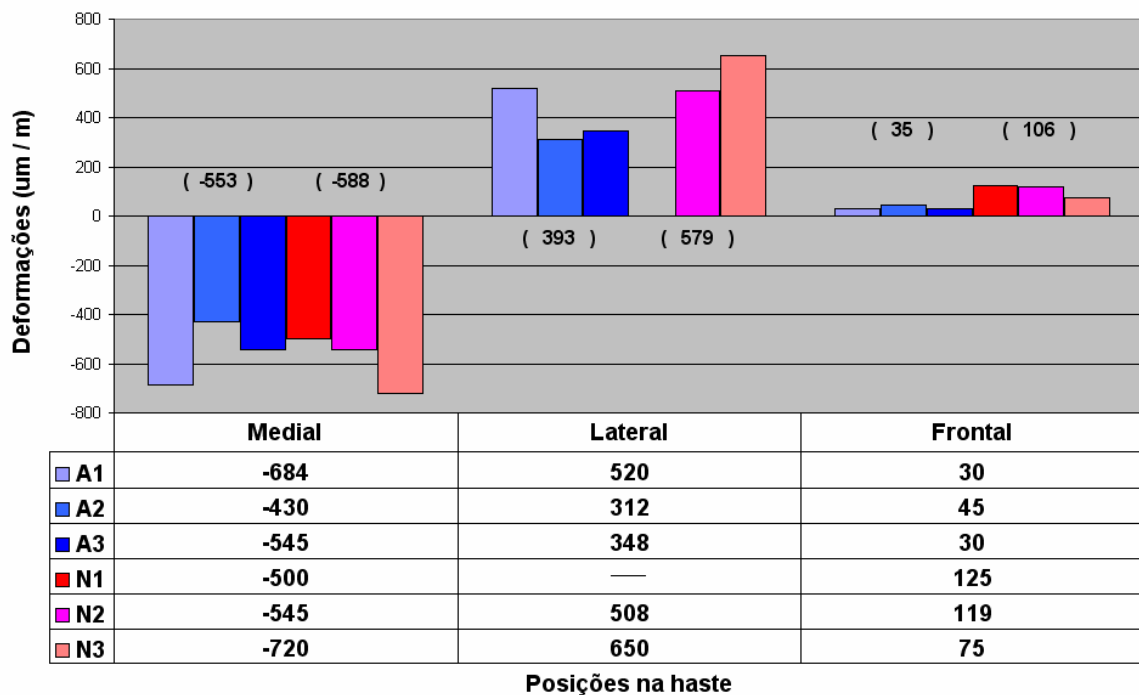


Figura 4.12 Deformações medidas nas posições das hastes ao final dos cinco milhões de ciclos de carregamento. As médias de cada conjunto de amostras (A e N) estão colocadas no gráfico de barras.

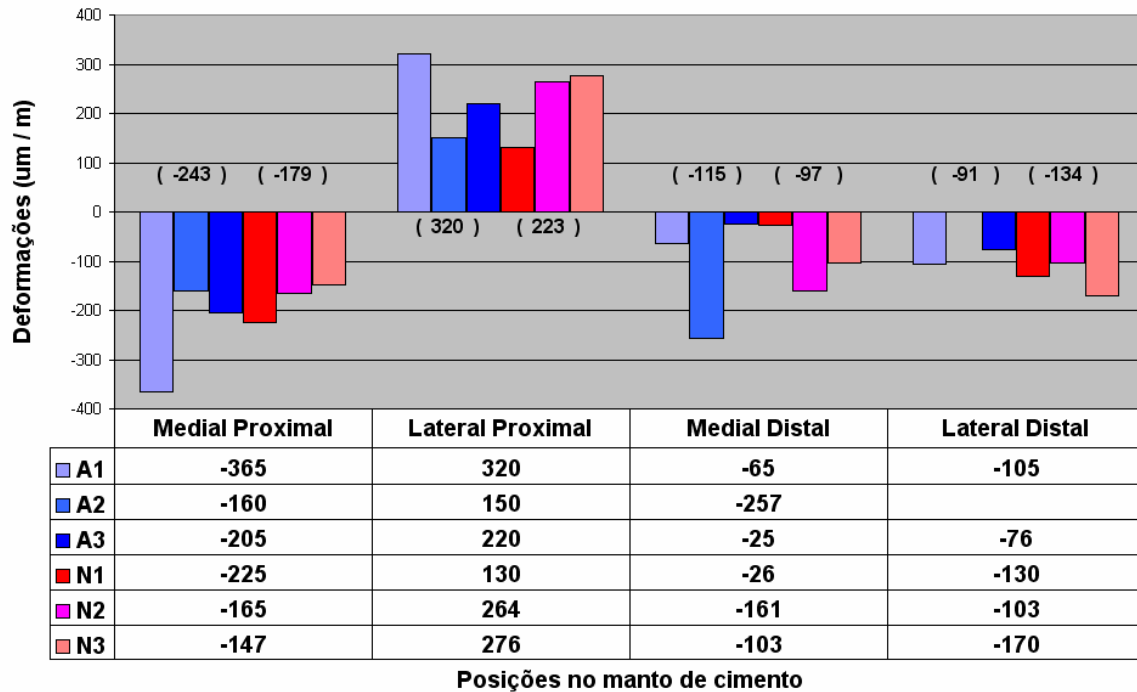


Figura 4.13 Deformações medidas nas posições do cimento ao final dos cinco milhões de ciclos de carregamento. As médias de cada conjunto de amostras (A e N) estão colocadas no gráfico de barras.

4.4 Ensaaios com Controle de Deslocamento

Os resultados dos ensaios sob controle de deslocamento estão relacionados na tabela 4.2. A taxa de deslocamento foi controlada através do sistema da máquina servo-hidráulica e ficou determinada em 0,5 mm/min. Todos os corpos de prova foram ensaiados até se atingir 12 mm de deslocamento. A figura 4.14 mostra o gráfico resultante do ensaio da amostra A2, que ilustra, de maneira aproximada, o comportamento das linhas de carga nos demais ensaios. Percebe-se que existe um estágio inicial onde o deslocamento é devido à deformação que ocorre predominantemente na haste e posteriormente há o início de outro estágio onde o deslocamento do sistema é determinado de forma predominante pelas alterações no manto de cimento. Este comportamento do PMMA exposto a uma taxa de deformação constante é o alívio de tensões, característico de materiais viscoelásticos. As máximas cargas são atingidas ao final do primeiro estágio. No caso da amostra N1, a máxima carga, a mais baixa registrada em todos os ensaios, foi obtida já dentro do segundo estágio. A carga mais alta (18,9 kN) foi atingida no ensaio da amostra A2 com um deslocamento de 3,3 mm. Na amostra N2 com apenas 2,1 mm de deslocamento foi atingida a máxima carga de 11,9 kN.

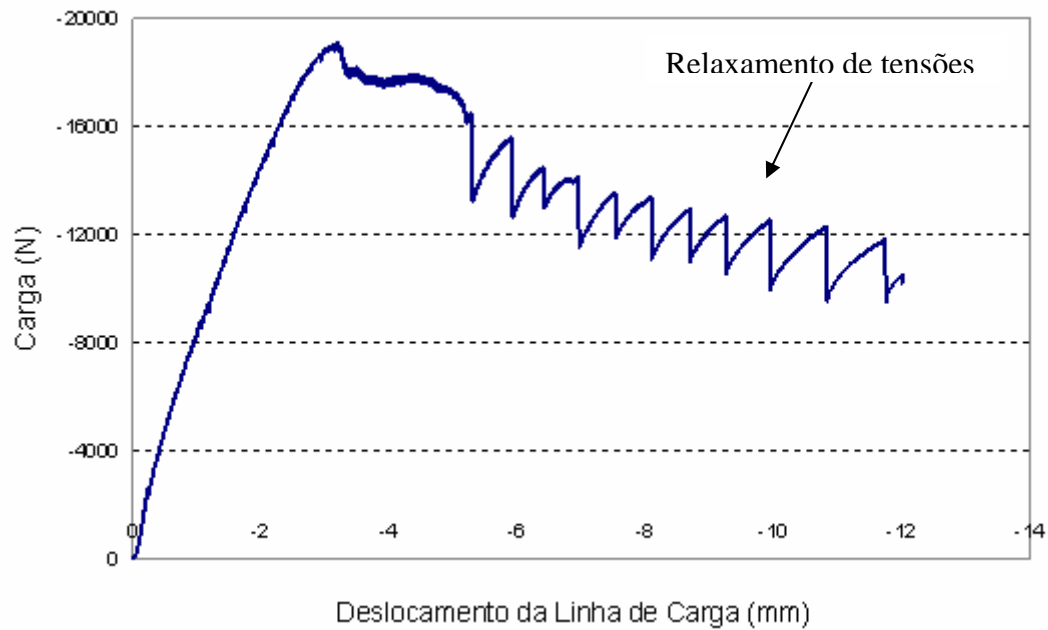


Figura 4.14 Comportamento do sistema cimento/haste sob deformação constante de 5 mm/min.

Tabela 4.2 Resultados de deslocamento das linhas de carga em ensaio sob deslocamento constante de 5 mm/min.

Amostra	Carga Máxima (kN)	Deslocamento (mm)
A1	15	4,5
A2	18,9	3,3
A3	11	3,3
N1	3,1	4,3
N2	11,9	2,1
N3	11	2,3

4.5 Simulações por Elementos Finitos

Os resultados da simulação por elementos finitos para os dois sistemas de ensaio são mostrados nas tabelas 4.3 e 4.4. Da mesma forma, as figuras 4.15 e 4.16 ilustram a construção dos modelos utilizados e apresentam as regiões mais solicitadas nas hastes.

Os resultados para a posição medial-proximal, na representação do manto menos espesso, foi encontrado o valor de deformação de $-805 \mu\text{m/m}$ enquanto que para a representação do manto mais espesso o valor obtido foi de $-560 \mu\text{m/m}$. Na posição lateral-proximal os resultados obtidos nos modelamentos do manto mais espesso e do manto mais fino foram, respectivamente, $194 \mu\text{m/m}$ e $488 \mu\text{m/m}$. Estes resultados são quantitativamente diferentes daqueles obtidos para os modelos experimentais nas mesmas posições. Na posição medial-distal o modelo com a configuração da norma apresentou uma deformação de $-81 \mu\text{m/m}$ e o modelo com a configuração alternativa apresentou um valor de $-32 \mu\text{m/m}$. Na posição lateral-distal para o modelo de acordo com a norma o resultado foi de $-65 \mu\text{m/m}$ e para o modelo da configuração alternativa uma deformação de $-28 \mu\text{m/m}$. Estes resultados estão qualitativamente de acordo com os resultados dos modelos experimentais embora com magnitudes diferentes. Analisando os resultados para todas as posições no manto de cimento e comparando os resultados experimentais com os resultados do modelamento percebe-se que existe uma relação qualitativa entre os resultados das posições proximais e daqueles obtidos nas posições distais.

Na simulação das deformações da haste na posição medial se obteve o valor de $-887 \mu\text{m/m}$ no modelo com a configuração da norma e de $-971 \mu\text{m/m}$ no modelo com configuração alternativa. Estes resultados estão qualitativa e quantitativamente de acordo com os resultados obtidos experimentalmente. Da mesma forma, no modelamento das deformações na posição lateral da haste tanto o modelo configurado de acordo com a norma como o modelo com configuração alternativa apresentaram resultados, $650 \mu\text{m/m}$ e $725 \mu\text{m/m}$ respectivamente, de acordo com aqueles obtidos experimentalmente, nos grupos A e N, nesta mesma posição. Na posição frontal os resultados que apresentaram uma concordância qualitativa com os resultados obtidos nos modelos experimentais, mas com magnitudes um pouco diferentes, foram para o modelo da norma e modelo alternativo, $222 \mu\text{m/m}$ e $245 \mu\text{m/m}$ respectivamente. De qualquer maneira, estes resultados representam a simulação da aplicação de carga estática em um material considerado isotrópico e homogêneo onde aspectos como tensões residuais, porosidades e trincas não são incluídos na análise.

Tabela 4.3 Valores de deformação obtidos na simulação para as posições no manto de cimento tal qual nas amostras experimentais. Os valores mostrados são referentes a média dos resultados em cada posição.

	A (Simulação)	N (Simulação)
Medial-Proximal	-805 $\mu\text{m/m}$	-560 $\mu\text{m/m}$
Lateral-Proximal	488 $\mu\text{m/m}$	194 $\mu\text{m/m}$
Medial-Distal	-32 $\mu\text{m/m}$	-81 $\mu\text{m/m}$
Lateral-Distal	-28 $\mu\text{m/m}$	-65 $\mu\text{m/m}$

Tabela 4.4 Valores de deformação obtidos na simulação para as posições na haste tal qual nas amostras experimentais. Os valores mostrados são referentes a média dos resultados em cada posição.

	A (Simulação)	N (Simulação)
Medial	-971 $\mu\text{m/m}$	-887 $\mu\text{m/m}$
Lateral	725 $\mu\text{m/m}$	650 $\mu\text{m/m}$
Frontal	245 $\mu\text{m/m}$	222 $\mu\text{m/m}$

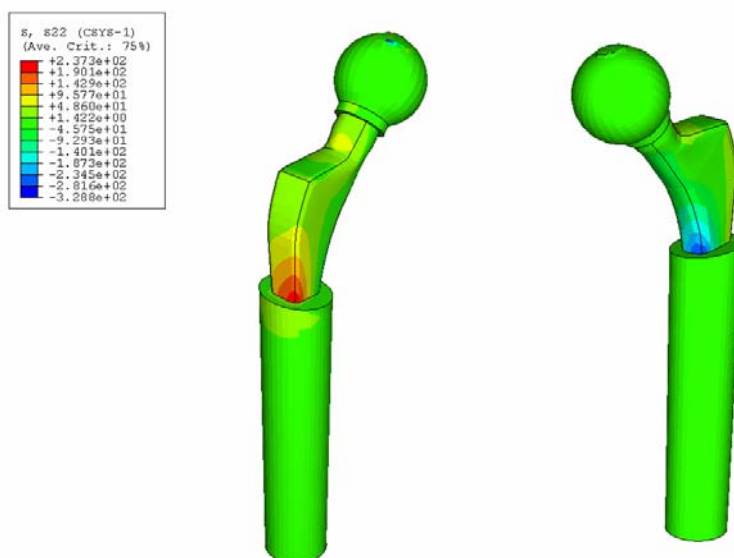


Figura 4.15 Resultados das deformações encontradas para a configuração com manto de cimento menos espesso.

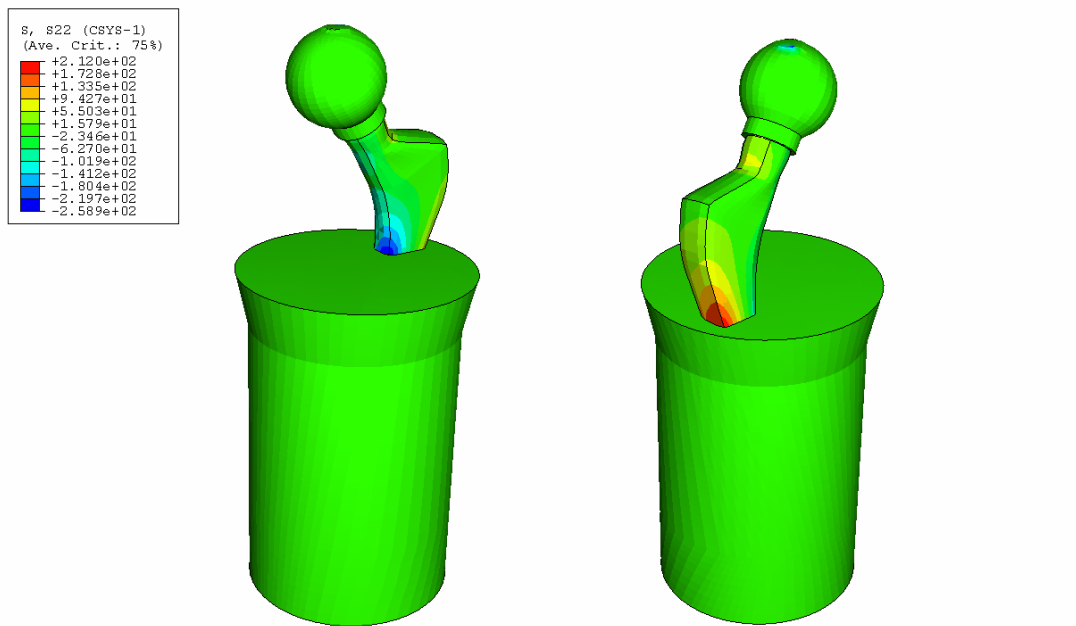


Figura 4.16 Resultados das deformações encontradas para a configuração com manto de cimento mais espesso.

5.0 DISCUSSÃO

5.1 Deformações Residuais

Como nos procedimentos adotados para a cimentação das amostras não foi pressurizado o cimento e os dados utilizados para análise são apenas aqueles registrados ao final de 24 horas. Assim, os resultados das deformações residuais são oriundos apenas das contrações volumétricas envolvidas no resfriamento. Por outro lado, o aparecimento de deformações positivas pode ter sido originado pela ocorrência de trincas, poros (e sua distribuição) ou fases de diferentes graus de mistura próximo aos extensômetros.

A presença de poros e trincas próximo aos extensômetros também podem explicar a variação dos valores de deformação entre as amostras de um mesmo conjunto e que determinaram uma grande diferença em alguns casos. Outro fator que deve ser observado é que as posições distais devido ao modo de vazamento do cimento nos dispositivos de fixação, são as que primeiro entram em contato com mistura de cimento e onde provavelmente se iniciam as primeiras frentes de cura.

Observando-se globalmente os resultados de deformações residuais, temos um intervalo de $-2260 \mu\text{m/m}$ medido na posição medial-proximal da amostra N3 até $3230 \mu\text{m/m}$ medido na posição medial-distal da amostra N1. Com base nesses resultados e naqueles constantes na figura 4.1 obtidos pelo acompanhamento das deformações residuais é possível afirmar que o comportamento descrito na literatura foi verificado, ou seja: nos corpos de prova com maior manto de cimento (grupo N) observam-se maiores deformações residuais em todas as posições onde foram realizadas essas medidas. Conforme Roques (2004) as diferenças dimensionais são geradas pela contração devido às mudanças de densidade (volumétrica) e ao resfriamento (térmica), e ainda por questões microestruturais como os níveis de porosidade e sua distribuição e a quantidade de monômero que eventualmente não se misturou. No trabalho de Lennon e Prendergast (2002) fica claro que quanto maior for a taxa de transferência de calor, o que ocorre nas zonas de interface, menores serão os picos de temperatura e maior será o tempo para alcançá-los. Como nos dispositivos usados neste trabalho as interfaces para a transferência de calor do cimento são formadas junto a haste e o molde metálico (que serve de recipiente de cimentação), o que se percebe é que no molde menor, (alternativo ao sugerido pela norma) onde foi vazado um menor volume de cimento e as áreas de interface estavam mais próximas,

ocorreram os menores picos de deformação. Por outro lado, no trabalho de Orr, (2003) as evidências sugerem que as contrações térmicas implicam em deformações residuais e podem ser o fator determinante na incidência de trincas. Em termos de contração volumétrica, é perceptível que a expansão de poros pode acomodar alguma redução de volume do material. Neste caso a quantidade e distribuição de poros passam a ser um fator chave.

A figura 5.1 ilustra o comportamento de duas amostras a partir das deformações residuais na posição medial-distal. Na amostra N3 se verifica claramente o pico exotérmico enquanto na amostra A3 (camada de cimento menor) este momento não é tão marcante. No final do processo a amostra N3 chega a um maior valor de deformação residual.

Assim, a média dos resultados de deformação residual obtidos para as amostras com manto mais espesso foram maiores do que aquelas verificadas com mantos de cimento menos espessos, o que está de acordo com estudos anteriores de alguns autores (HEDIA 2000; LENNON 2002).

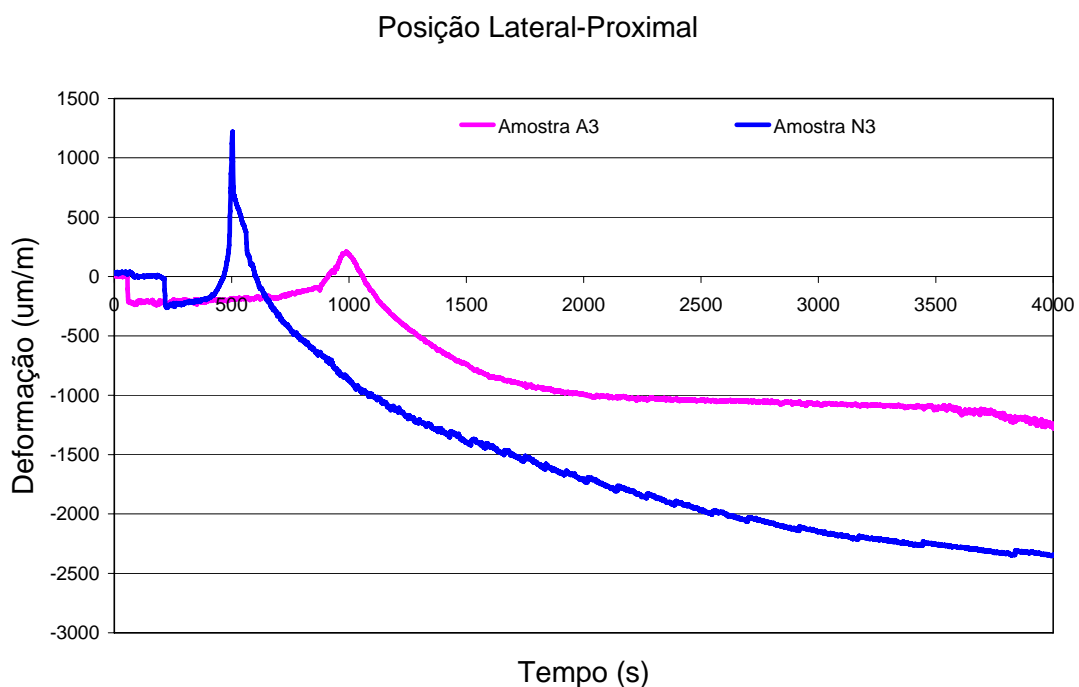


Figura 5.1 Gráfico ilustrando a deformação residual de duas amostras durante a cimentação.

5.2 Ensaio Estático

Ao se observar os deslocamentos das linhas de carga medidos pelo LVDT do equipamento de teste, das diversas amostras sob carregamento, se percebeu que as variações encontradas do primeiro ao último ciclo de carga estão relacionadas com a deformação permanente do manto de cimento, ou ainda, a migração distal das hastes. No caso da deformação do manto de cimento, tal situação está ligada a fluência do PMMA. Este comportamento característico de materiais poliméricos pode ter ocorrido preferencialmente em regiões mais solicitadas, como a região proximal ou distal. No caso de migração distal das hastes, tal condição está intimamente relacionada a fenômenos de superfície. No estudo de Verdonschot (1996) foi verificado que as forças de fricção na interface (coeficiente de fricção) são determinantes para a quantidade de migração. Por outro lado, o processo de fricção é alterado devido às condições superficiais (na interface), como o nível de porosidades, que também podem reduzir sensivelmente a área para transferência de carga. Como não foram medidos os micromovimentos das hastes, não se pode afirmar com certeza quanto a ocorrência de migração. Considera-se então, que estas variações estão relacionadas com a deformação permanente do sistema haste/cimento. De qualquer modo, estas deformações permanentes dos dois conjuntos analisados apresentaram valores muito próximos e o aspecto surpreendente foi o fato de que a maior deformação permanente ter sido encontrada no corpo de prova que apresentou o menor deslocamento das linhas de carga ao longo de cinco ciclos (0,33 a 0,37mm).

Analisando os resultados obtidos sob carregamento estático, em todas as posições onde foram realizadas medidas no manto de cimento, percebe-se que as amostras do conjunto N apresentaram as médias dos valores de deformação superiores às determinadas nas amostras do conjunto A, nas mesmas posições. O fato das amostras com maior volume de cimento apresentar maiores deformações medidas axialmente (porém com menor deformação permanente ou menor migração distal da haste dentro do manto de cimento) parece estar associado ao nível de deformações radiais e circunferenciais, além das questões relativas a interface (porosidade e rugosidade) e à própria rigidez do sistema. Por outro lado, ao se observar os resultados medidos nas três posições das hastes há uma inversão, ou seja: as médias dos valores de deformação do conjunto A são maiores do que aquelas encontradas no conjunto N, para as mesmas posições. Disso se conclui que houve transferência de carga para o cimento em uma magnitude um pouco maior, no caso da camada mais espessa. Ou seja, as maiores deformações no manto de cimento (mais espesso) impuseram menores solicitações a aquelas regiões das hastes, em especial a região lateral, onde as deformações relativas são as

mais importantes sob a ótica da fadiga. Essas deformações maiores estão intrinsicamente ligadas ao maior volume de cimento, de poros, trincas e vazios e à distribuição dos mesmos. De qualquer forma, as diferenças de deformações entre os dois conjuntos de amostras são pouco significativas, tendo em vista o objetivo original: estabelecer condições mais rigorosas de ensaio.

Adicionalmente, ao se analisar a influência das deformações residuais nas deformações sob carregamento externo, o trabalho de Nuño e Avanzolini (2002) demonstrou que a inclusão de tensões residuais afeta a distribuição de tensões no cimento e na interface haste-cimento devido a cargas externamente aplicadas. Verificou que há uma tendência da distribuição de tensões no cimento, com ou sem tensões residuais no cimento, ocorrerem de forma semelhante, mas com magnitudes diferentes. No presente estudo também foi possível estabelecer esta relação entre os resultados encontrados, ou seja, maiores níveis de deformações residuais corresponderam a níveis de deformações maiores sob carregamento externo. Para exemplificar, as médias das deformações residuais nas amostras do conjunto N foram superiores aquelas encontradas nas amostras do conjunto A. De mesmo modo, as deformações no cimento, sob carregamento externo, nas amostra do conjunto N, em média, também foram superiores aquelas do conjunto A. Porém, nem sempre foi possível estabelecer esta relação comparando-se as amostras, uma a uma. Por exemplo: as medições das deformações residuais na posição medial-proximal das amostras A1 e A2 determinaram -1690 $\mu\text{m/m}$ e -1780 $\mu\text{m/m}$ respectivamente. Sob carregamento monotônico (2300N) as medições nestas mesmas amostras apresentaram deformações de -438 $\mu\text{m/m}$ e -260 $\mu\text{m/m}$ respectivamente. Da mesma maneira, as medidas de deformações residuais realizadas para as amostras N2 e N3, na posição medial-distal, foram de -1545 $\mu\text{m/m}$ e -1266 $\mu\text{m/m}$ respectivamente. Sob carregamento as medições destas amostras mostraram valores de deformações de -190 $\mu\text{m/m}$ e -297 $\mu\text{m/m}$, ou seja, as deformações sob carregamento externo medidas não estão diretamente relacionadas com as deformações residuais impostas. Mas de forma global, verifica-se que os maiores níveis de deformações residuais implicaram em deformações maiores sob carregamento externo.

Em resumo, as deformações permanentes do sistema haste/cimento para os dois conjuntos de amostras foram semelhantes. Da mesma forma, as deformações medidas nas hastes e no cimento, através dos extensômetros, também apresentaram, em magnitudes, valores muito próximos para os dois conjuntos de amostras. Porém, as amostras do conjunto N apresentaram, em média, deformações no cimento um pouco maiores, enquanto que as

amostras do conjunto A apresentaram deformações um pouco maiores nas hastes. Estes resultados eram aqueles previstos pelos estudos anteriores.

5.3 Ensaio Cíclico

No carregamento em fadiga de todas as amostras, após os 5 milhões de ciclos, o que se observou foi uma natural diminuição nos valores das deformações resultantes em relação àqueles sob carregamento estático, face às características do carregamento cíclico. Isto pode ser observado comparando-se os valores expressos nas figuras 4.8 e 4.9 (resultados de deformação sob cargas estáticas) e aqueles apresentados nas figuras 4.12 e 4.13 (resultados sob cargas de fadiga).

Em todas as posições as medidas realizadas no manto de cimento, com exceção da posição lateral-distal, as deformações médias obtidas nas amostras do conjunto A foram maiores do que aquelas medidas nas amostras do conjunto N. Considerando-se as medidas obtidas a partir dos extensômetros nas posições nas hastes, contrariamente ao que ocorreu sob carregamento estático, as médias das deformações relativas às hastes do conjunto N foram maiores do que aquelas observadas no conjunto A.

Esta mudança de comportamento pode ser explicada por alguns fatores. Como foi visto em Verdonchot (1996), os implantes sob carregamento cíclico tendem a migrar distalmente até se estabilizarem, aumentando as tensões de compressão radial e as tensões circunferenciais. O autor associa essa migração à fluência do cimento acrílico quando carregado ciclicamente. Por outro lado, Mann (2004) associa esse comportamento às trincas existentes no manto de cimento (a partir da haste ou de vazios) que crescem em número e tamanho com o carregamento cíclico. Verifica também, que em mantos de cimento mais finos há maior probabilidade de se encontrar trincas passantes. No presente estudo as trincas passantes são aquelas desde a interface haste/cimento até a interface cimento/copo metálico. Ainda segundo Mann (2004), estas trincas passantes contribuem para a perda da estabilidade porque o manto de cimento não suportará por muito tempo as tensões circunferenciais. Da mesma forma, Hertzler (2002) mostra em seu trabalho que a taxa de crescimento de trincas não depende da espessura do manto de cimento, mas as trincas tendem a alcançar o seu comprimento total (tornar-se passante) em um número menor de ciclos em camadas menos espessas. Adicionalmente, alguns autores têm sugerido que camadas de cimento mais finas estão sujeitas ao aumento de deformações, podem se fragmentar e contribuir para o afrouxamento do implante. Através do trabalho de McCormack (1999) foi evidenciado o cenário de acúmulo de danos, no manto de cimento,

associado ao processo de formação e crescimento de trincas. Sendo este processo dependente do histórico de carregamento, da quantidade de poros e sua distribuição e de trincas formadas no momento da polimerização.

De forma global, os resultados em fadiga estão coerentes com os resultados obtidos sob carregamento estático, ou seja: onde se verificou maiores deformações no manto de cimento foram constatadas menores deformações nas hastes. No carregamento estático o manto mais fino impôs maiores deformações às hastes; já no carregamento cíclico as amostras com manto mais espesso impuseram maiores deformações às hastes.

Em resumo, ao final dos 5 milhões de ciclos os processos de acúmulo de danos e de fluência, inerentes ao carregamento cíclico, estão associados as maiores deformações medidas no manto de cimento das amostras do conjunto A. Este comportamento pode estar associado ao surgimento de um maior número de trincas passantes (ligando as duas interfaces). Conseqüentemente, as deformações medidas sob carregamento cíclico nas hastes do conjunto A foram menores. Contrariamente, nas amostras com manto mais espesso (conjunto N), o processo de acúmulo deve ter resultado em um menor número de trincas passantes, de maneira que as deformações medidas no manto de cimento dessas amostras foram menores, impondo assim maiores deformações às hastes. O seccionamento das amostras para a análise de trincas não foi realizado. Porém, esta hipótese parece ser a mais adequada para explicar a mudança na magnitude das deformações medidas sob carregamento cíclico nos dois conjuntos de amostras.

5.4 Ensaio com Controle de Deslocamento

Os ensaios com controle de deslocamento foram realizados para se ter uma melhor noção sobre a diferença de rigidez dos dois sistemas (haste + manto de cimento) em avaliação, ou seja: amostras do conjunto N preparadas de acordo com a norma ISO 7206 (manto mais espesso) e amostras do conjunto A preparadas em uma configuração alternativa (manto menos espesso). Os resultados mostrados na tabela 4.2 permitem concluir que o sistema associado às amostras com manto de cimento mais fino apresentam maior rigidez. A consideração que se faz aqui é que, sob carregamento, o deslocamento do sistema é dado em parte pela deformação na haste e em outra parte pela deformação no manto de cimento. Como esperado, as amostras com manto menos espesso exigem maiores cargas para produzir um mesmo deslocamento, em comparação com as amostras com manto mais espesso. Isto está de acordo com o modelo de Voight, também conhecido

como modelo de mesma deformação, ou como regra das misturas. Este modelo assume que todos os constituintes da mistura de “n” materiais estão sujeitos a mesma deformação e que a tensão é distribuída proporcionalmente entre eles segundo sua importância. O trabalho de Hedia (2001) também utiliza este modelo para analisar uma série de configurações de módulos elásticos para a haste e para o manto de cimento numa tentativa de otimizar a rigidez e diminuir as tensões que atuam na prótese.

No presente estudo, embora os resultados nos testes com controle de deslocamento e sob carregamento estático tenham se mostrado em concordância com as análises de rigidez do sistema e a utilização da regra das misturas, no caso dos testes em fadiga parece que o processo de acúmulo de danos no manto de cimento tem maior influência sobre os resultados de deformação.

5.5 Simulação por Elementos Finitos

Existe uma série de trabalhos utilizando a simulação por elementos finitos para propor modelos de avaliação da vida em fadiga de próteses e também para consubstanciar resultados experimentais. Há também aqueles trabalhos que se propõem a estabelecer modelos para a avaliação das deformações e dos efeitos da presença de trincas nos mantos de cimento. O trabalho de Baleani (2000), por exemplo, se utiliza desta técnica para propor um protocolo de testes para a avaliação de próteses feitas sob medida. No presente estudo, as simulações têm por objetivo auxiliar na comparação de duas configurações de ensaio. Ou seja, os dados dessas análises por elementos finitos permitem avaliações qualitativas dos modelos. Deste modo, não foram utilizados maiores refinamentos nos modelos e a presença de poros ou trincas no manto de cimento não foi considerada.

A figura 5.2 mostra um gráfico com valores comparativos resultantes da simulação sob carregamento estático relativos aos sistemas de ensaio com a configuração da Norma ISO 7206, bem como a configuração alternativa e um modelo propondo um sistema rígido, onde a haste é considerada engastada em um material de mesmo módulo elástico. Este é considerado o pior caso para a haste, ou seja, a forma em que a haste será mais solicitada. Os dados obtidos para as deformações na haste estão coerentes entre si, já os dados de deformação no manto de cimento, como já mencionado, estão relativamente inconsistentes pela falta de refinamento dos modelos de simulação.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 esses dados são comparados com os dados obtidos nos ensaios estáticos. Na tabela 5.1 onde estão apresentados os valores de deformação no manto de

cimento, mais uma vez, os dados não guardam relação quantitativa. Por outro lado, na tabela 5.2 os resultados de deformação medidos nas hastes em ensaios estáticos e aqueles obtidos via simulação estão bem consistentes e guardam uma relação qualitativa e quantitativa apreciáveis. As figuras 5.3 e 5.4 também ilustram os resultados descritos acima.

No mesmo sentido, o trabalho de Raimondi (1999), através da simulação por elementos finitos, se propôs a avaliar as tensões principais (Von Misses) em seis (6) diferentes condições de teste, desde aquela definida pela norma de ensaios de fadiga até aquela que considera a haste engastada em toda a região distal a partir da superfície do cimento. Fez também a consideração de diferentes espessuras de manto de cimento. Os resultados sugerem que há apenas um pequeno acréscimo das tensões impostas às hastes com a diminuição da espessura da camada de cimento. O mesmo resultado foi encontrado no presente trabalho considerando-se os ensaios estáticos e a simulação numérica.

É possível afirmar que os resultados obtidos nas simulações foram úteis para se estabelecer uma análise comparativa com os dados obtidos experimentalmente nos ensaios estáticos, apesar da falta de refinamento no modelo em análise.

Tabela 5.1 Valores de deformação no manto de cimento sob carregamento estático. Os valores mostrados nos ensaios são referentes à média dos resultados em cada posição.

	A (Ensaio)	A (Simulação)	N (Ensaio)	N (Simulação)
Medial-Proximal	-306 $\mu\text{m/m}$	-805 $\mu\text{m/m}$	-343 $\mu\text{m/m}$	-560 $\mu\text{m/m}$
Lateral-Proximal	309 $\mu\text{m/m}$	488 $\mu\text{m/m}$	396 $\mu\text{m/m}$	194 $\mu\text{m/m}$
Medial-Distal	-132 $\mu\text{m/m}$	-32 $\mu\text{m/m}$	-204 $\mu\text{m/m}$	-81 $\mu\text{m/m}$
Lateral-Distal	-106 $\mu\text{m/m}$	-28 $\mu\text{m/m}$	-192 $\mu\text{m/m}$	-65 $\mu\text{m/m}$

Tabela 5.2 Valores de deformação na haste sob carregamento estático. Os valores mostrados nos ensaios são referentes à média dos resultados em cada posição.

	A (Ensaio)	A (Simulação)	N (Ensaio)	N (Simulação)
Medial	-816 $\mu\text{m/m}$	-971 $\mu\text{m/m}$	-736 $\mu\text{m/m}$	-887 $\mu\text{m/m}$
Lateral	620 $\mu\text{m/m}$	725 $\mu\text{m/m}$	617 $\mu\text{m/m}$	650 $\mu\text{m/m}$
Frontal	164 $\mu\text{m/m}$	245 $\mu\text{m/m}$	156 $\mu\text{m/m}$	222 $\mu\text{m/m}$

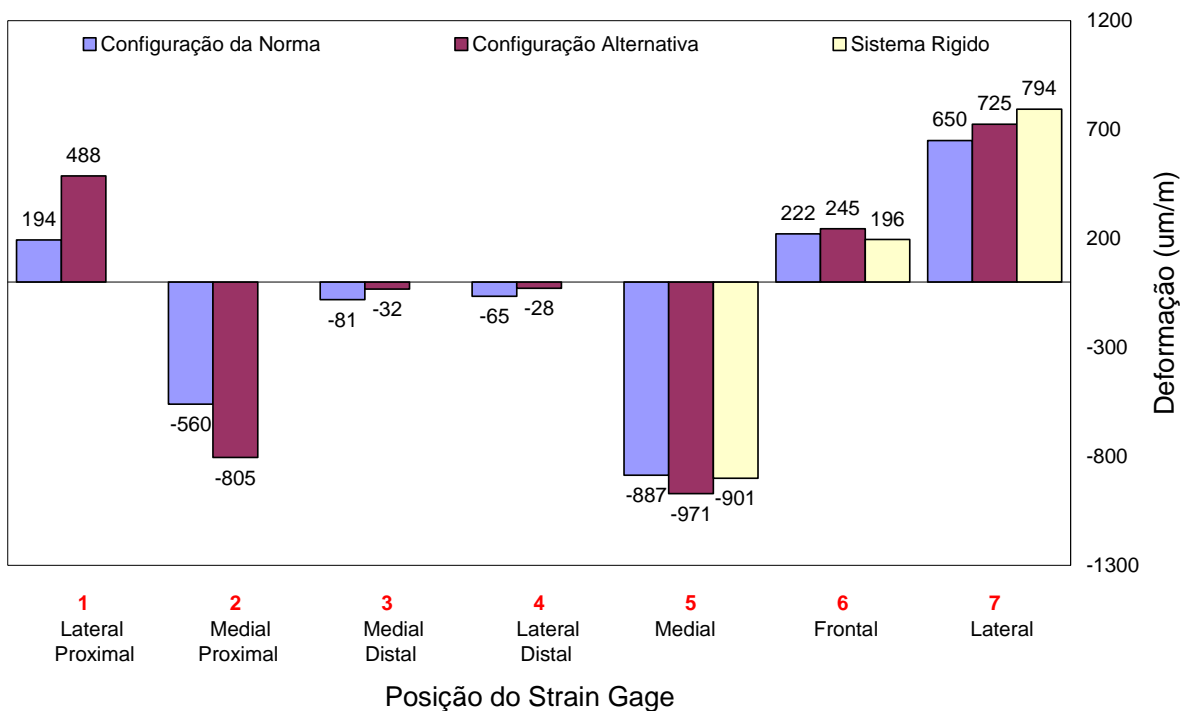


Figura 5.2 Gráfico ilustrando as deformações obtidas na simulação numérica.

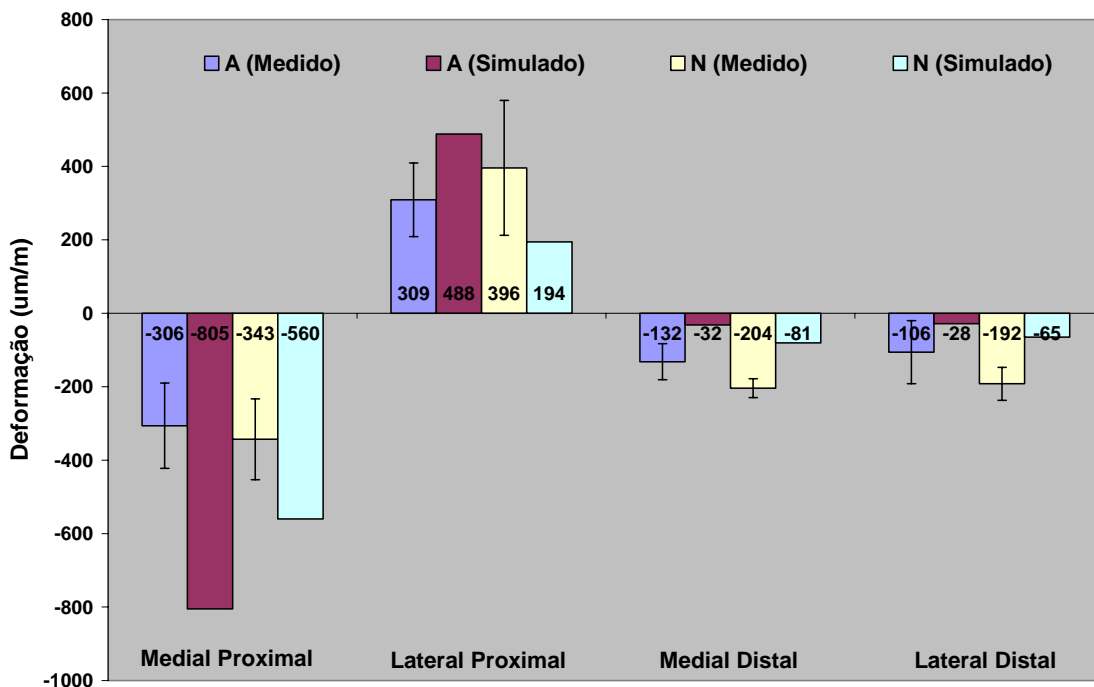


Figura 5.3 Gráfico comparativo dos valores médios obtidos experimentalmente nos ensaios estáticos e dos resultados das simulações, para todas as posições no manto de cimento.

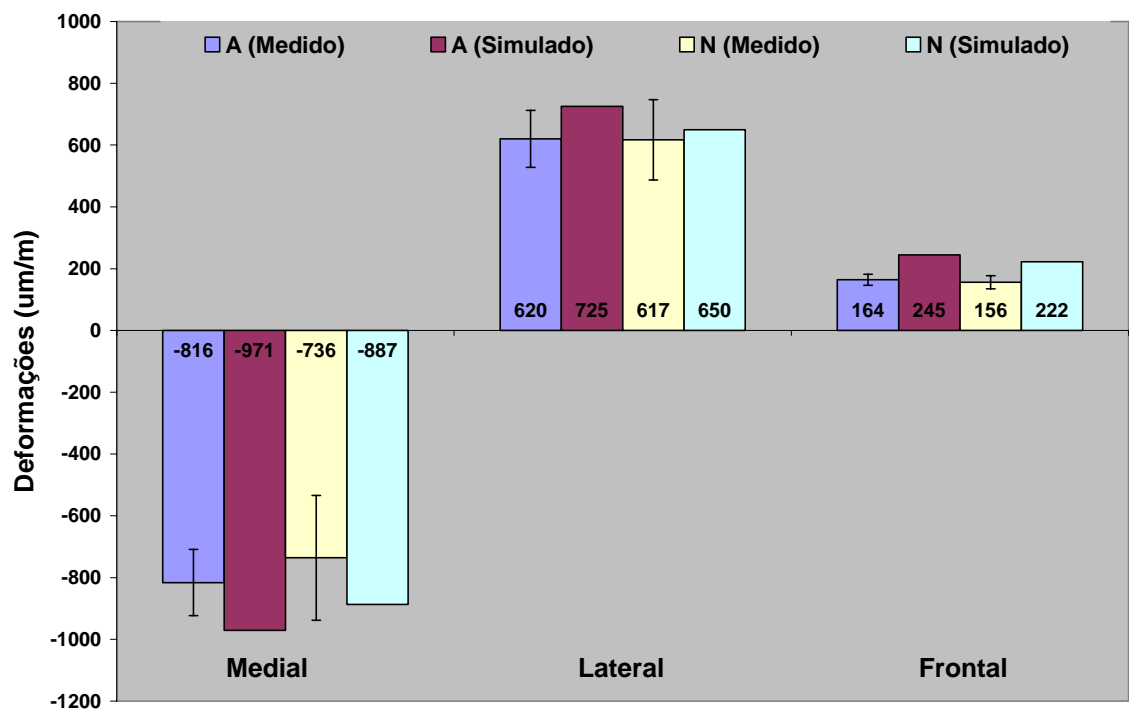


Figura 5.4 Gráfico comparativo dos valores médios obtidos experimentalmente nos ensaios estáticos e dos resultados das simulações, para todas as posições na haste.

6.0 CONCLUSÃO

O dispositivo alternativo criado para as avaliações deste trabalho se mostrou adequado para se conduzir ensaios de fadiga de próteses de quadril, atendendo a todos os requisitos da Norma ISO 7206-4.

Este dispositivo criado com o objetivo de produzir um meio de embutimento de menor espessura, não estabeleceu uma condição de ensaio mais severa às próteses do que aquela consagrada pela Norma ISO 7206-4.

O acúmulo de danos no manto de cimento se mostrou um fator importante na análise das deformações associadas aos ensaios de fadiga.

O fato de se conduzir os ensaios de fadiga até 5 milhões de ciclos foi fundamental para se perceber a importância da deterioração da camada de cimento com o tempo.

Os modelos criados através da análise numérica só poderão simular ensaios de fadiga com maior exatidão se neles forem incluídos o processo de acúmulo de danos e de fluência na camada de cimento.

7.0 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Construção de um modelo computacional para a análise das deformações na camada de cimento que considere a presença de poros, vazios e trincas e observando a questão de acúmulo de danos e da fluência ao longo do tempo e sob carregamento cíclico.

Aprimorar o dispositivo alternativo criado neste trabalho para a avaliação em fadiga de próteses de design não convencional ou totalmente modulares. Neste caso propor também um protocolo de ensaios para estes tipos de próteses.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 5833 (2004) – Cimentos para cirurgia – Cimentos de resina acrílica.

BALEANI, M.; Cristofolini, L.; Viceconti, M. **Endurance Testing of Hip Prostheses: a Comparison Between the Load fixed in ISSO 7206 Standard and the Physiological Loads.** Clinical Biomechanics 14, p. 339-45, 1999.

BALEANI et al. **Endurance Verification of Custom-Made Hip Prostheses.** International Journal of Fatigue 22, p. 865-71, 2000.

BURSTEIN, A. H., Wright, T. M. **Fundamentals of Ortophaedic Biomechanics.** Williams & Wilkins, Baltimore, 1994.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5. ed. LTC Editora, 2002.

DE SANTIS, R. et al. **Dynamic Mechanical Behavior of PMMA Based Bone Cements in Wet Environment.** Journal of Materials Science: Materials in Medicine 14, p. 583-94, 2003.

DEMIAN, Hany W.; Mc Dermott, Ken **Regulatory Perspective on Characterization and Testing of Orthopedic Bone Cements.** Biomaterials 19, p. 1607-18, 1998.

DUNNE, N. J. et al. **The Relationship Between Porosity and Fatigue Characteristics of Bone Cements.** Biomaterials 24, p. 239-45, 2003.

ESTOK, D. M, et al, **Factors Affecting Cement Strains Near the Tip of a Cemented Femoral Component.** The Journal of Arthroplasty Vol. 12, N° 1, 1997.

FARRAR, D. F. ; Rose, J. **Rheological properties of PMMA bone cements during curing.** Biomaterials 22, p. 3005-13, 2001

FISHER, D. A. et al. **Cement-Mantle Thickness Affects Cement Strains in Total Hip Replacement.** Journal of Biomechanics 30, p. 1173-77, 1997.

GILBERT, J. L.; Ney, D. S.; Lautenschlager, E. P. **Self-reinforced Composite Poly(methyl methacrylate): Static and Fatigue Properties.** Biomaterials 16, p. 1043-55, 1995.

HEDIA, H. S. **Stiffness Optimization of Cement and Stem Materials in Total Hip Replacement.** Bio-Medical Materials and Engineering 11, p. 1-10, 2001.

HERTZLER J.; Miller, A. M.; Mann, K. A. **Fatigue Crack Growth Rate does not Depend on Mantle Thicknes: An Idealized Cemented Stem Construct Under Torsional Loading.** Journal of Orthopaedic Research 20, p. 676 – 82, 2002.

HOLLISTER, S. J.; **Mechanical Factors Influencing the Outcome of Total Joint Replacement.** Current Orthopaedics 9, p. 2 – 8, 1995.

HOWARD J. L. et al. **A Quantitative Analisys of Bone Support Comparing Cementless Tapered and Distal Fixation Total Hip Replacements.** The Journal of Arthroplasty 19, p. 266 – 273, 2004.

HUNG, J. et al **Computer Simulation on Fatigue Behavior of Cemented Hip Prostheses: a Physiological Model.** Computer Methods and Programs in Biomedicine 76, p. 103-13, 2004.

ISO 7206-4: 2002, Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses – Part 4: **Determination of endurance properties of stemmed femoral components**

JANSSEN, D.; Stolk, J.; Verdonschot, N.; **Why Would Cemente Porosity Reduction be Clinically Irrelevant, While Experimental Data Show the Contrary.** Journal of Orthopaedic Research 23, p. 691 – 97, 2005.

KAWATE, K. et al. **Importance of a Thin Cement Mantle: Autopsy Studies of Eight Hips.** Clinical Orthopaedics and Related Research Vol. 1(355), p. 70-76, 1998.

LENNON, A. B.; Prendergast, P. J. **Residual Stress Due to Curing Can Initiate Damage in Porous Bone Cement: Experimental and Theoretical Evidence.** Journal of Biomechanics 35, p. 311-21, 2002.

LENNON, A.; McCormack, B. A. O.; B.; Prendergast, P. J. **The Relationship Between Cement Fatigue Damage and Implant Surface Finish in Proximal Femoral Prostheses.** Medical Engineering & Physics 25, p. 833 – 41, 2003.

LEWIS, G.; Nyman, J.; Trieu, H. H.; **The Apparent Fracture Toughness of Acrylic Bone Cement: Effect of Three Variables.** Biomaterials 19, p. 961 – 67, 1998.

MANN, K. A. et al. **Cement Microcracks in Thin –Mantle Regions After in Vitro Fatigue Loading.** The Journal of Arthroplasty N° 5 Vol. 19, p. 605-12, 2004.

MANN, K. A. et al. **Early Cementing Does Not Increase Debond Energy of Grit Blasted Interfaces.** Journal of Ortophaedic Research Vol. 22, p. 822-27, 2004.

MCCORMACK, B. A. O.; Prendergast, P. J. **Microdamage Accumulation in the Cement Layer of Hip Replacements Under Flexural Loading.** Journal of Biomaterials 32, p. 467-75, 1999.

MCCORMACK, B. A. O.; Prendergast, P. J.; O`Dwyer B.; **Fatigue of Cemented Hip Replacementes Under Torsional Loads.** Fatigue Fracture Engineering Materials Structure 22, p. 33 – 40 , 1999.

- MULLER, S.; McCaskie, A. W. **The Mechanics of Cemented Total Hip Replacement.** Current Orthopaedics 16, p. 403-06, 2002.
- NUÑO, N.; Amabili, M. **Modelling Debonded Stem-Cement Interface for Hip Implants: Effect of Residual Stresses.** Clinical Biomechanics 17, p. 41-48, 2002.
- NUÑO, N.; Avanzolini, G. **Residual Stresses at the Stem-Cement Interface of an Idealized Cemented Hip Stem.** Journal of Biomechanics 35, p. 849-52, 2002.
- ORR, J. F.; Dunne, N. J.; Quinn, J. C. **Shrinkage Stresses in Bone Cement.** Biomaterials 24, p. 2933-40, 2003.
- PÉREZ, M. A.; Garcia, J. M. ; Doblaré, M. **Analysis of the Debonding of the Stem-Cement Interface in Intramedullary Fixation Using a Non-Linear Fracture Mechanics Approach.** Engineering Fracture Mechanics 72, p. 1125 – 47, 2005.
- PLOEG, H. et al. **Fatigue Strength Testing of Hip Stems with Statistical Analysis.** Bio-Medical Materials and Engineering 9, p. 243-63, 1999.
- PRENDERGAST P. J.; Maher, S. A. **Issues in Pre-Clinical Testing of Implants.** Journal of Material Processing Technology 118, p. 337 – 42, 2001.
- PYBURN, E.; Goswami, T. **Finite Elements Analysis of Femoral Components Paper III – Hip Joints.** Material e Designs 25, p. 705 – 13, 2004.
- RACE, A. et al; **Early Cement Damage Around a Femoral Stem is Concentrated at the Cement/Bone Interface.** Journal of Biomechanics 36, p. 489 – 96, 2003.
- RAIMONDI, M. T.; Pietrabissa, R. **Modelling Evaluation of Testing Condition Influence on the Maximum Stress Induced in a Hip Prosthesis During ISO 7206 Fatigue Testing.** Medical Engineering & Fisics 21, p. 353-59, 1999.
- RAM, A. **Fundamentals of Polymer Engineering.** Technion-Israel Institute of Technology. Plenum Press, New York, 1997.
- RIES et al. **In Vivo Behavior of Acrylic Bone Cement in Total Hip Arthroplasty.** Biomaterials 27, p. 256 – 261, 2006.
- ROQUES, A. et al. **Quantative Measurement of Stresses Induced During Polymerization of Bone Cement.** Biomaterials 25, p. 4415-24, 2004.
- SKINNER, J. A. et al. **Should the Cement Mantle Around the Femoral Component be Thick or Thin?** The Journal of Bone & Joint Surgery(Br) 85-B, p. 45-51, 2003.
- STOLK, J. et al. **Finite Element and Experimental Models of Cemented Hip Joint Reconstructions Can Produce Similar Bone and Cement Strains in Pre-Clinical Tests.** Journal of Biomechanics 35, p. 499 – 510, 2002.
- STYLES, C. M.; Evans, S. L.; Gregson, P. J.; **Development of Fatigue Lifetime Predictive Test Methods for Hip Implants: Part I. Test Methodology.** Biomaterials 19, p. 1057-65, 1998.

TEOH, S. H. **Fatigue of Biomaterials: a Review.** International Journal of Fatigue 22, p. 825-37, 2000.

WAIDE, V. et al; **Experimental Investigation of Bone Remodelling Using Composite Femurs.** Clinical Biomechanics 18, p. 523 – 36, 2003.

WHEELER, J. P.G.; Miles, A. W.; Clift, S. E. **The Influence of Time-Dependent Properties of Bone Cement on Stress in The Femoral Cement Mantle of Total Arthroplasty.** Journal of Materials Science: Materials in Medicine 10, p. 497-501, 1999.

VALDIVIA, G. G. et al. **Three-Dimensional Analysis of Cement Mantle in Total Hip Arthroplasty.** Clinical Orthopaedics and Related Research Vol. 1(393), p. 38-51, (2001).

VERDONSCHOT, N.; Huiskes, R. **Subsidence of THA Stems due to Acrylic Cement Creep is Extremely Sensitive to Interface Friction.** Journal of Biomechanics 29, p. 1569-75, 1996.

VERDONSCHOT, N.; Huiskes, R. **Mechanical Effects on Stem Cement Interface Characteristics in Total Hip Replacement.** Clinical Orthopaedics and Related Research 1, p. 326 – 36, 1996.

VERDONSCHOT, N.; Huiskes, R. **Surface Roughness of Debonded Straight-Tapered Stems in Cemented THA Reduces Subsidence but not Cement Damage.** Biomaterials 19, p. 1773-79, 1998.

ZOR, M.; Kuçuk, M.; Aksoy, S. **Residual Stress Effects on Fracture Energies of Cement-Bone and Cement-Implant Interfaces.** Biomaterials 23, p. 1595-1601, 2002.

