

PROJETO ESTRUTURAL DE PRÓTESE IMPLANTO-SUPORTADA FIXA, UTILIZANDO MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS E EXPERIMENTAÇÃO COM STRAIN GAUGE

E. A. Capello Sousa^{*}, J. H. Rubo[†], e M. S. Moura^{*}

^{*} Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB)
Universidade Estadual Paulista, UNESP
Câmpus de Bauru, Bauru, 17.033-360, São Paulo, Brasil
e-mail: capello@feb.unesp.br, web page: <http://www.feb.unesp.br>

[†] Faculdade de Odontologia de Bauru (FOB)
Universidade de São Paulo, USP
Câmpus de Bauru, Bauru, 17.012-901, São Paulo, Brasil
e-mail: jrubo@fob.usp.br, web page: <http://www.fob.usp.br>

Key words: Finite Element Modeling, Strain Gauge Measurements, Implant-Supported Prosthesis.

Abstract. *In the present article the stresses are analyzed on framework of prostheses fixed by implants. This stress is determinant to clinical success of osseointegrated implants. Are necessary determinate distributions of stress at all implants. There are some approaches to calculate these structural forces, through the computational methods and experimental techniques. In this case, was used the two techniques, with Finite Element Model and strain gauge measurements. The typical mandibular fixed complete arch framework was positioned on a master cast. The strain gauge were fixed up and down of the cantilever beam, and near of the external abutment. A vertical load was applied on the cantilever, and strain is obtained through strain gauges. In addition, a Finite Element model was constructed to analyses stress, in same measurement region of the strain gauge, on the experimental prototype. The results obtained by experimental model, with strain gauge, and by computational model, using Finite Element, were in agreement. The results demonstrated the precision between the Element Finite model and experimental results, with strain gauge. Also, are showed the influence of change of the force about cantilever and stress level on framework of the prostheses.*

1 INTRODUÇÃO

Na área biomédica, muitas soluções clínicas são suficientes para resolver problemas médicos. Entretanto, existem áreas, como a bioengenharia, em que as pesquisas em muitos casos tem conseguido um grande progresso atualmente. Técnicas freqüentemente utilizadas em Engenharia, tanto experimentais como através de simulações computacionais, podem ser usadas em várias áreas biomédicas, como na medicina e odontologia, entre outras.

Das técnicas comumente utilizadas na solução de problemas de engenharia, predominaram por muitos anos as análises experimentais. Entretanto, com o advento da informática, outras formas de análise puderam ser utilizadas. Auxiliado por um grande avanço nas pesquisas matemáticas e a evolução dos sistemas computacionais, as soluções numéricas tornaram-se potencialmente fortes na resolução de problemas de engenharia. Desta forma, tanto as soluções experimentais quanto as soluções numéricas, são efetivamente utilizadas há algum tempo para resolver problemas de engenharia, e mais recentemente aplicadas em bioengenharia.

As metodologias mais popularmente utilizadas em engenharia são: a modelagem por Elementos Finitos, quando trata-se de soluções numéricas, e medidas com strain-gauges, quando as soluções são experimentais. Na verdade não existe uma superioridade na obtenção dos resultados através de modelagens numéricas ou análises experimentais. Deve-se observar que as duas técnicas não se substituem, mas, freqüentemente são utilizadas em conjunto. De fato, existe um consenso entre os pesquisadores e usuários, de que estas metodologias se complementam, tornando-se um forte ferramental para desenvolvimento de pesquisas e de avanços tecnológicos.

A aplicabilidade destas soluções em bioengenharia se acentua quando trata-se de problemas envolvendo próteses médicas. As próteses por si são consideradas como elementos externos ao organismo e que propõem-se à substituir uma função natural, que está debilitada no corpo humano. São várias as situações em que as próteses podem ser aplicadas. Dentre elas, existem as próteses com função estrutural, onde componentes mecânicos ou conjuntos de elementos mecânicos são colocados nos pacientes, para dar rigidez estrutural e receber solicitações de esforços mecânicos.

As próteses odontológicas também caracterizam-se como uma prótese estrutural, pois permitem restaurar a capacidade de mastigação dos pacientes. Entretanto, os esforços aplicados sobre estas próteses são suficientemente grandes para produzirem rupturas nos elementos mecânicos que fazem parte da prótese. Deve-se neste caso, avaliar as solicitações mecânicas sobre seus elementos, e produzir correções sobre o projeto estrutural da prótese, dando-lhe mais eficiência e durabilidade.

Um dos trabalhos pioneiros de biomecânica em implantes dentários, foi de Skalak [1], que avalia as tensões envolvendo os implantes osseointegrados e o tecido ósseo. Inicialmente, alguns autores utilizam técnicas clínicas ou diretas para obter os esforços nos implantes, como Rangert *et all* [2], Patterson *et all* [3], Jaarda *et all* [4], Weinberg [5] e Monteith [6]. Técnicas experimentais bastante simplificadas de obter os esforços, como a fotoelasticidade eram utilizadas em odontologia, Millington e Laung [7], e Waskewicks *et all* [8] e White *et all* [9].

Mais recentemente, utilizou-se extensômetros na avaliação estrutural de próteses odontológicas, como em Isa e Hobkirk [10], Carr *et all* [11], Isa e Hobkirk [12] e Hobkirk e Havthoulas [13].

Existem ainda os trabalhos de Chao *et all* [14], Clelland *et all* [15] e Assif *et all* [16], que associam as duas metodologias, fotoelasticidade e extensometria.

Outros trabalhos de avaliação de próteses implanto suportadas fixas, com implantes de Branemark, utilizando extensômetros, foi desenvolvida por Hollweg [17] e Hollweg *et all* [18]. Experimento semelhante utilizou Jacques [19] e Jacques *et all* [20], para avaliar desadaptação entre infra-estrutura e implantes.

Existem trabalhos em que autores utilizaram o Método dos Elementos Finitos para verificar as próteses odontológicas como nos trabalhos de Williams *et all* [21], Chen *et all* [22], Sertgöz e Güvener [23] e Sertgöz [24]. Todos avaliam os projetos da prótese e incluem em alguns casos a modelagem da mandíbula.

O objetivo deste trabalho é avaliar as tensões submetidas aos elementos mecânicos de próteses odontológicas. Neste estudo, uma prótese implanto suportada é utilizada, permitindo avaliar as tensões que ocorrem na infra-estrutura suportada pelos seus implantes. As avaliações são produzidas tanto em um modelo de Elementos Finitos, quanto através de experimentos com strain-gauges. É feita uma validação dos resultados obtidos pelas duas metodologias, e uma discussão final da potencialidade das ferramentas de solução apresentadas.

2 PRÓTESE IMPLANTO SUPORTADA FIXA

As próteses odontológicas fixas podem ser aplicadas utilizando-se várias formas e dimensões, dependendo do grau de correção a ser produzido. Para esta análise deve-se avaliar as próteses fixas totais, as quais caracterizam-se pela não existência de dentes na parte inferior da mandíbula. Uma típica prótese implanto suportada fixa é apresentada na figura 1.



Figura 1: Foto da Correção

A prótese implanto suportada fixa, utilizada neste trabalho é composta basicamente de uma infra-estrutura apoiada sobre implantes fixos. Esta infra-estrutura define o suporte da prótese dentária propriamente dita, a qual deve receber os dentes artificiais. A infra-estrutura é suportada pelos implantes, que por sua vez são afixados no osso mandibular. Devido às características biológicas, estes implantes são posicionados somente na região frontal da mandíbula. E o comprimento livre da infra-estrutura se estende para o interior da boca. A figura 2 mostra a disposição dos implantes na mandíbula.



Figura 2: Disposição dos Implantes

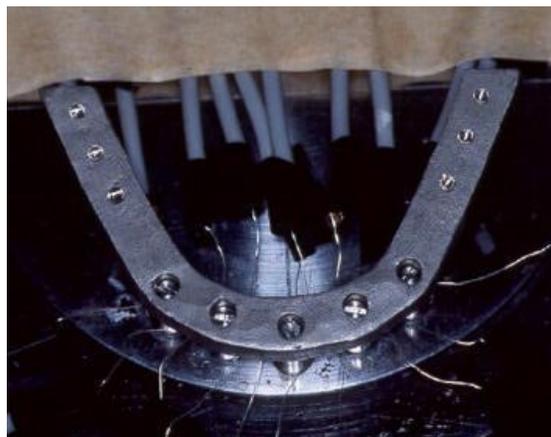


Figura 3: Implantes e Infra-estrutura.

A infra-estrutura afixada sobre os implantes possui a forma de um arco, tendo sua duas extremidades livres permanecendo como uma viga em balanço. O arco de curvatura da infra-estrutura é descrito pela posição dos implantes, dependendo do formato ou curvatura da parte frontal da mandíbula. Normalmente, utiliza-se cinco implantes de apoio, sobre os quais a infra-estrutura é fixada através de parafusos.

As geometrias dos elementos da prótese da prótese podem variar de acordo com a constituição física do paciente, entre outros fatores. Como condições mais usuais, definiu-se para análise 5 implantes de 3,5 mm de altura e 2 mm de diâmetro. Sendo que, a infra-estrutura, possui comprimento de extremidade livre 17 mm, com 6 mm de espessura e 4 mm de altura. A figura 3 apresenta mais detalhes sobre a curvatura da infra-estrutura, e a disposição dos implantes.

3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS - PROTÓTIPO COM STRAIN-GAUGES

A proposta do problema em questão é avaliar as tensões existentes em uma prótese implanto suportada fixa. Como já observado, é visível que as soluções numéricas obtidas através do Método dos Elementos Finitos são bem versáteis, e após a obtenção dos modelos, permitem obter a solução de uma infinidade de problemas físicos com bastante rapidez e eficiência. Entretanto, é de fundamental importância para o processo de constituição do modelo, que as soluções obtidas através do método sejam aferidas com outras metodologias e verificadas quanto a confiabilidade das soluções obtidas.

Neste caso, as soluções experimentais são bastante apropriadas e indispensáveis, pois permitem fazer a verificações das respostas obtidas através dos modelos numéricos. Desta forma, para que a eficiência do modelo numérico esteja garantida, deve-se fazer comparações entre as respostas obtidas com os modelos de Elementos Finitos e um protótipo experimental utilizando strain-gauges. Após esta aferição pode-se obter soluções para outros casos avaliados no modelo de Elementos Finitos. Neste trabalho, as duas metodologias devem seguir sempre paralelas, para conjuntamente desenvolver a análise da estrutura de prótese odontológica.

3.1 Modelo de Elementos Finitos da Prótese

O modelo de Elementos Finitos foi construído utilizando o programa Ansys v6.0. O modelo utiliza elementos cúbicos e tetraédricos com funções de interpolação ordem superior. O elemento escolhido no programa Ansys é o Solid95. A figura 4 apresenta o modelo de Elementos Finitos, utilizando-se da característica de simetria do modelo.

Observa-se no modelo apresentado, que existe uma região de malha mapeada e outra de malha livre. Neste caso, a extremidade livre da infra-estrutura está modelada com malha mapeada e a região onde a infra-estrutura faz intersecção com os implantes a malha é livre. O elemento Solid95, que caracteriza por ser um elemento solido estrutural tridimensional de 20 nós, pode ser utilizado como elemento cúbico para a malha mapeada, mas possui a propriedade de colapsar nós para representar elementos tetraédricos em locais onde a malha deve ser livre. Estes ajustes da malha são

importantes, pois resultam em maior eficiência do número de elementos na malha final, permitindo redução do custo computacional e rapidez no processo de cálculo.

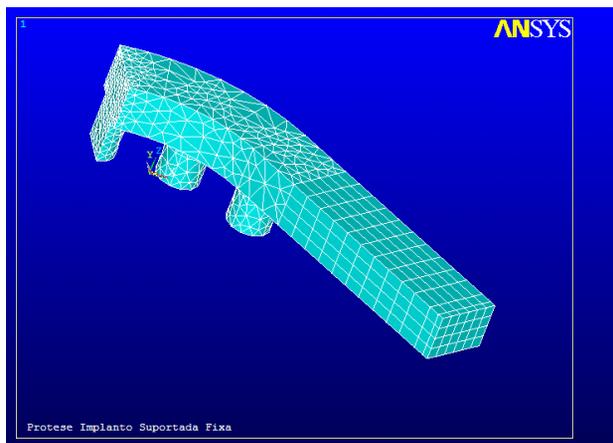


Figura 4: Modelo de Elementos Finitos

A obtenção dos resultados deve ser feita a partir do modelo de Elementos Finitos. A carga de 100N é aplicada na extremidade livre da infra-estrutura, enquanto as restrições são feitas na base dos implantes, estabelecendo condição de engastamento para a área abaixo do implante.

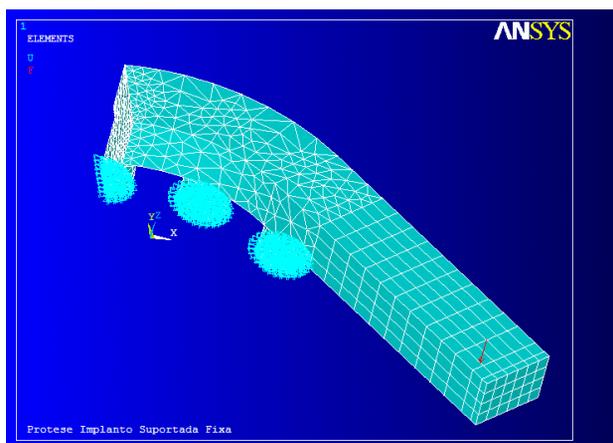


Figura 5: Condições de Carregamento e Restrições no Modelo de Elementos Finitos

A figura 5 mostra as condições de carregamento e restrições. Deve-se notar que a aplicação da três cargas não é feita simultaneamente, mas de forma alternada, isto é, aplica-se uma carga de 100N em cada ponto a uma distância de 10, 15 e 20 mm, separadamente. Nesta figura deve-se observa também o ponto onde deve ser obtido os resultados para análise, próximo a região do último implante, na parte superior e inferior. Deve-se observar que este ponto está sendo escolhido para desenvolver a análise, pois é a posição de maior esforço na infra-estrutura. Isto permite uma amplificação das deformações obtidas, dando uma maior sensibilidade sobre as respostas obtidas.

3.2 Experimento com Strain-gauges

O desenvolvimento experimental é feito construindo um protótipo, composto de um modelo mestre onde deve-se fazer a instalação de réplicas de implantes, as quais servirão de suporte dos intermediários, e posteriormente ser feita a fixação da infra-estrutura. São instalados dois strain-gauges, na região superior e inferior da infra-estrutura, no ponto imediatamente após o último implante. Desta forma, pode-se obter as medições das deformações na região da infra-estrutura com maior sollicitação por flexão. O conjunto é colocado em uma máquina de ensaio de tração e compressão, onde aplica-se a carga de 100N. Deve-se ainda variar a posição de carregamento, isto é, a partir do último implante deve-se posicionar a carga à 10, 15 e 20 mm, na direção da extremidade livre.

A aquisição dos dados é obtida em duas partes distintas. A força aplicada é obtida através da célula de carga instalada na máquina de ensaio de tração. Enquanto, a aquisição da deformação é proveniente dos strain-gauges, através de sistema de aquisição de dados apropriado. A figura 6 mostra o aparato experimental utilizado para aquisição de dados com os strain-gauges.

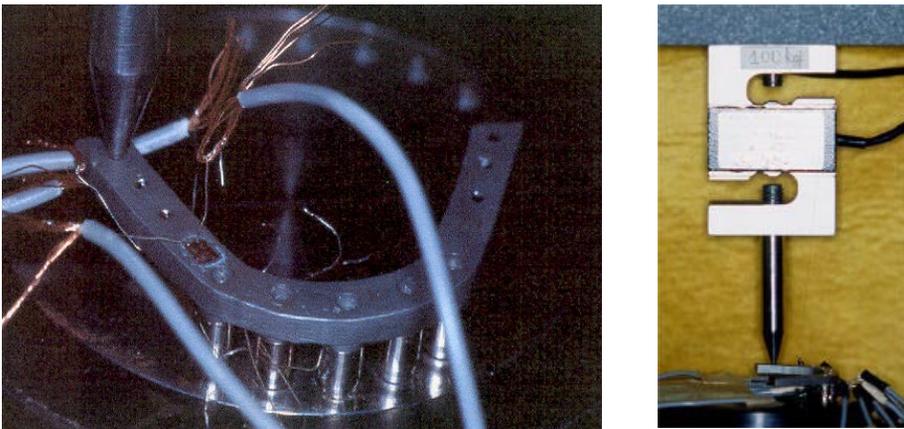


Figura 6: Aparato Experimental

O aparato experimental é composto de uma máquina de ensaio de tração Kratos Equipamentos Industriais Ltda, modelo K-2000 MP, que faz a aquisição de dados para a carga de ensaio. Os strain-gauges são conectados a uma placa condicionadora de sinais, modelo SC-2043-SG, que por sua vez está acoplada a uma placa de aquisição de dados, modelo PCI-MIO-16XE-10, acionada pelo programa LabView v5.1. Este conjunto de aquisição de dados e o programa LabView são da National Instruments Corp.

Deve-se observar que a aquisição produzida em aparatos distintos possuem alguns agravantes de dificuldades de aferição e qualidade dos dados obtidos. Foi desenvolvida uma ampla análise de verificação dos experimentos, as quais estão fora do escopo deste trabalho, mas que contribuíram muito para dar qualidade a pesquisa desenvolvida.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

As análises desenvolvem-se em três partes, quais sejam, a verificação experimental dos dados obtidos, quanto a precisão dos resultados obtidos; a resposta obtida através do modelo de Elementos Finitos; e finalmente uma comparação dos resultados obtidos através das duas metodologias, experimental e numérica.

4.1 Resultados Experimentais Utilizando Strain-gauges

Neste item deve-se apresentar os resultados experimentais, com as deformações obtidas através dos strain-gauges. As medições das deformações foram feitas em dois pontos da estrutura, ambos localizados na região mais próxima do primeiro implante, na direção da extremidade livre da prótese, sendo que, um ponto está localizado na parte superior e o outro na parte inferior da infra-estrutura.

O procedimento de aquisição dos dados da deformação pode ser verificado observando o gráfico da figura 7, que mostra os resultados obtidos dos strain-gauges, durante um processo completo de aquisição. Ou seja, antes de aplicar a carga, enquanto desenvolve-se a aplicação da carga e posteriormente ao atingir a carga máxima.

No gráfico pode observar que inicialmente tem-se um período de aferição do experimento, onde a carga é nula, e o sistema estabiliza mostrando deformação nula. Em seguida aplica-se a carga, fazendo com que o sistema perceba a presença de deformação através dos strain-gauges, mostrando uma de variação linear na curva, caracterizando que os resultados de deformação variam em função da aplicação da carga. Posteriormente, após a finalização da evolução da carga, quando esta atinge o valor máximo, espera-se a estabilização do experimento, para em seguida obter o valor final da deformação. Nesta condição a estrutura está submetida a carga máxima de 100 N.

Em ambas as curvas apresentadas no gráfico da figura 7, observa-se claramente a evolução da deformação com a variação da carga. A curva superior e inferior apresenta as aquisições do strain-gauge superior e inferior, respectivamente. A curva superior apresenta deformações de tração, corresponde ao strain-gauge da parte superior da infra-estrutura. Enquanto, a curva inferior apresenta a deformação de compressão da parte inferior da viga, obtida através do strain-gauge

instalado naquela região.

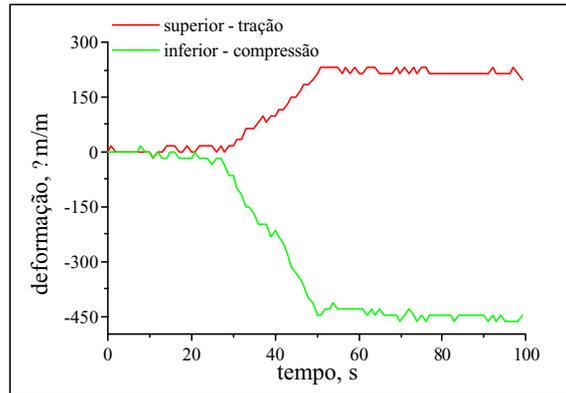


Figura 7: Histórico da Deformação na Aplicação da Carga

Como poderia-se esperar, as respostas caracterizam as deformações de tração e compressão das regiões, através dos sinais positivos e negativos das deformações mostradas no gráfico. Observa-se também que a extremidade livre da infra-estrutura atua como uma viga em balanço. O gráfico mostra este comportamento através das deformações obtidas, onde a tração e compressão, são quase equivalentes e bastante próximas.

As variações observadas, tanto na região do gráfico onde a deformação é zero, quanto na região onde ocorre a deformação máxima, após a aplicação da carga, definem a variação de precisão máxima dos strain-gauges. Estas variações são mostradas pelos pequenos picos de oscilações apresentados no gráfico da reposta.

Os gráficos seguintes, das figuras 8 e 9, mostram as deformações dos strain-gauges, variando-se a posição da carga de 100N, nas posições de 10, 15 e 20 mm ao longo da extremidade livre da infra-estrutura. No gráfico da figura 8 é apresentada a deformação do strain-gauge superior, onde ocorre tração. Enquanto, no gráfico da figura 9, é mostrada a deformação de compressão na região inferior da infra-estrutura.

Analisando os gráficos da figura acima, observa-se claramente o crescimento das deformações, apresentadas pelos strain-gauges, em função da variação da posição de aplicação da carga. Os valores apresentados mostram que o comportamento das deformações são proporcionais ao aumento do carregamento, devido ao crescimento da distância de aplicação da carga.

Em última análise observa-se que, em todos os casos, as deformações apresentadas tanto para a tração quanto para a deformação aumentam quase na mesma proporção, quando ocorre a ampliação da carga. E ainda, a deformação de compressão, da região inferior, é sempre superior à

deformação de tração, da região superior. Este comportamento pode ser explicado, observando que na região inferior, os fatores de concentração de tensão podem estar mais presentes, devido a flexão próxima do contato com o último implante.

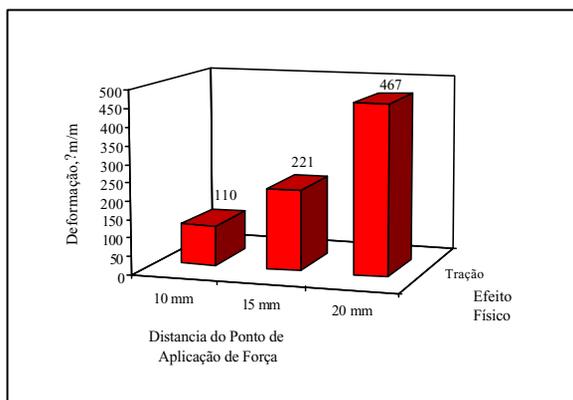


Figura 8: Deformação com Mudança de Posição da Carga - Superfície Superior - Tração

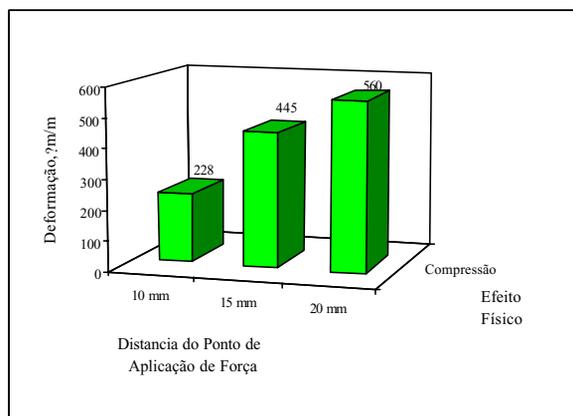


Figura 9: Deformação com Mudança de Posição da Carga - Superfície Inferior - Compressão

4.2 Resultados para o Modelo de Elementos Finitos

A construção do modelo de Elementos Finitos permite avaliar vários casos e condições de

carregamentos aplicados sobre a estrutura. Entretanto, como observado anteriormente, esta versatilidade deve estar garantida pela qualidade dos resultados obtidos. Para isto deve-se avaliar os mesmos casos analisados anteriormente no procedimento experimental. Deste forma, pode-se proceder uma análise comparativa dos resultados obtidos.

Em uma primeira análise pode-se avaliar o comportamento da infra-estrutura, nas mesmas condições apresentadas anteriormente no experimento, quando a carga de 100 N é aplicada na posição de 20 mm sobre a infra-estrutura. A figura 10 mostra o gráfico de deslocamentos nodais obtidos após a aplicação da carga. Observa-se que o deslocamento máximo ocorre na região mais distante do último implante. O deslocamento é praticamente nulo na região sobre os três implantes.

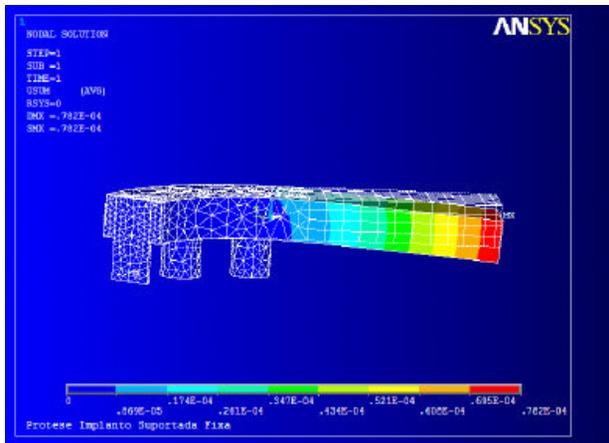


Figura 10: Deslocamento Estrutural - Modelo de Elementos Finitos

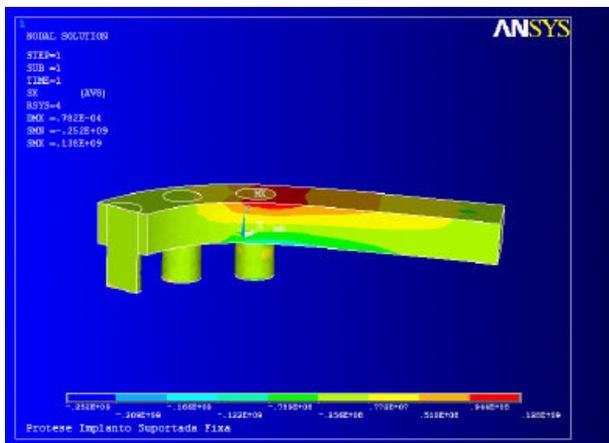


Figura 11: Tensões da Prótese - Modelo de Elementos Finitos

A figura 11 apresenta as tensões que ocorrem na infra-estrutura. Observa-se claramente que a região de maior tensão está próxima do último implante. As tensões iniciam-se mais altas na região do implante e reduzem ao longo do comprimento da infra-estrutura em balanço. Este comportamento é esperado, observando que as tensões diminuíam quando reduz-se o efeito do momento devido a aplicação da carga.

Pode-se verificar que a distribuição de tensões na direção transversal da infra-estrutura, mostra também um comportamento de uma viga em balanço. Ou seja, a tensão inicia na parte superior positiva, apresentando tração na região superior. Diminui percorrendo a altura da estrutura, até ocorrer tensões zero, na região central, onde pode-se representar uma possível linha neutra de tensões. E descendo ainda mais na altura da infra-estrutura, observa-se as tensões de compressão na região inferior. As figuras que seguem apresentam as deformações obtidas na infra-estrutura, variando-se a posição do carregamento.

Nas três figuras 12, 13 e 14, apresentadas acima, observa-se as deformações da infra-estrutura, para as cargas nas posições de 20, 15 e 10 mm. Na figura 12 observa-se claramente a região de maior deformação mais próxima do último implante. Também é possível verificar que as deformações presentes são decrescentes a partir do último implante, seguindo o sentido longitudinal da infra-estrutura. Devido à curvatura da estrutura, pode-se observar a presença de deformações em regiões onde existe a presença dos implantes. Isto poderia ocorrer pois a estrutura pode estar sendo solicitada por forças torcionais, apresentando deformações transversais ou devido ao efeito de Poisson do material.

Nas figuras 13 e 14, onde o carregamento aproxima-se dos implantes observa-se um comportamento semelhante ao anterior. Apenas que a região de concentração de tensão sobre o último implante torna-se maior.

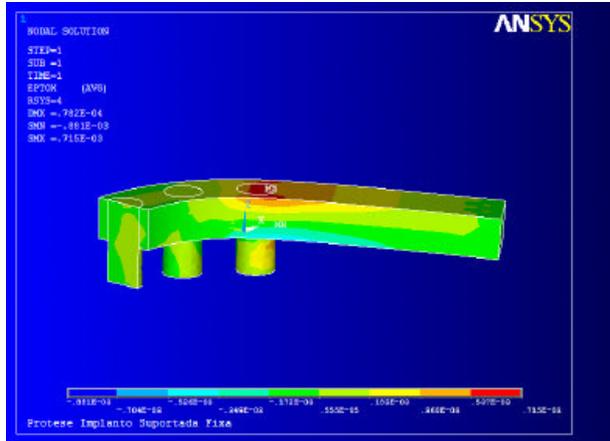


Figura 12: Deformações da Prótese - Modelo de Elementos Finitos - Posição da Carga 20 mm

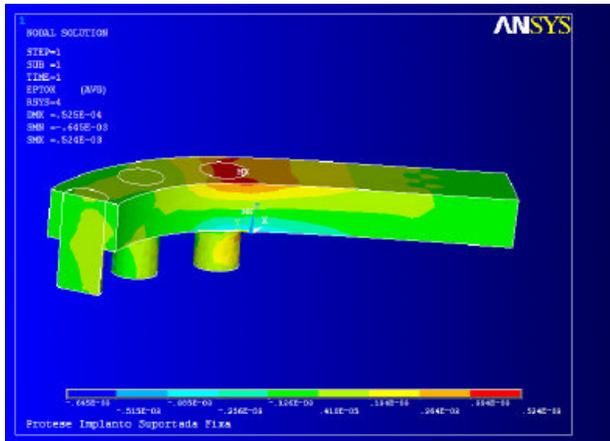


Figura 13: Deformações da Prótese - Modelo de Elementos Finitos - Posição da Carga 15 mm

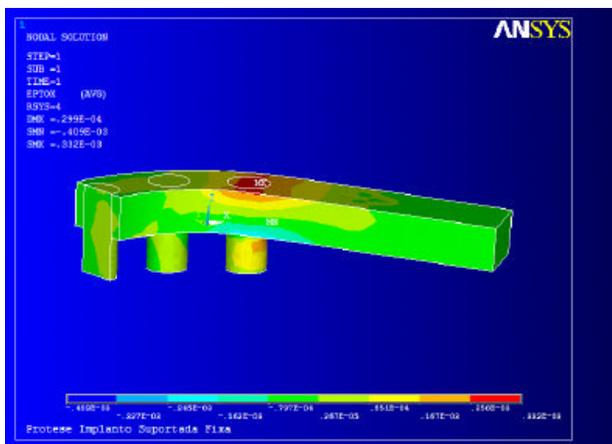


Figura 14: Deformações da Prótese - Modelo de Elementos Finitos - Posição da Carga 10 mm

4.3 Análise Final sobre os Resultados Experimentais e o Modelo de Elementos Finitos

Nas seções anteriores apresentou-se os resultados obtidos através do aquisição de dados com strain-gauges e os resultados obtidos através do modelo de Elementos Finitos. Parece bastante claro que os comportamentos apresentados pela estrutura, em ambos os casos, estão bastante convergentes. Entretanto, pode-se aprofundar ainda mais as verificações entre os dois procedimentos, analisando seus valores numéricos obtidos nos ensaios e no modelo numérico.

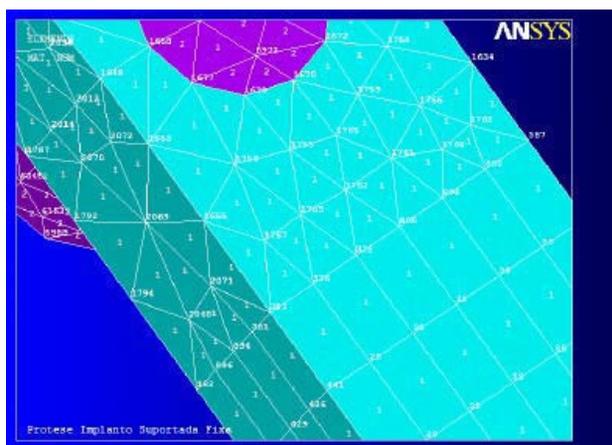


Figura 15: Vista Superior da Malha - Posição Nodal

A figura 13 apresenta as posições nodais onde pode-se obter os valores das deformações nesta região. Esta região é coincidente com o posicionamento do strain-gauges no protótipo. De forma semelhante pode-se identificar as posições nodais na região inferior, onde localiza-se o strain-gauge submetido a compressão.

Tabela 1: Resultados obtidos nos três métodos de análise

Distâncias do ponto de aplicação de força	Dados Analíticos	Dados Experimentais		Dados Numéricos	
	Tração e Compressão ?	Tração ?	Compressão ?	Tração ?	Compressão ?
20 mm	571	467	560	452,5	514
Erro em Relação a Solução Analítica %	-	18	2	21	10
Erro entre as Metodologias %	-	-	-	3,1	8,2

A tabela 1 mostra uma comparação entre os valores obtidos através das deformações nodais na malha apresentada acima, e os valores obtidos experimentalmente pelos strain-gauges. O caso comparativo apresentado utiliza a carga de 100N na posição de 20 mm. É feita uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos, e uma comparação com a solução analítica de uma viga em balanço engastada na região do último implante.

Os resultados apresentados na tabela demonstram uma boa convergência das soluções obtidas. Tanto para a solução das deformações de tração, quanto nas deformações de compressão, pode-se verificar que os resultados convergem bem.

A solução analítica apresentada possibilita apenas uma comparação da grandeza das respostas obtidas para as deformações, tendo em vista que esta não contempla todas características existentes no modelo real. Observa-se total coerência entre as respostas experimentais e a solução analítica, com erros relativamente reduzidos.

Quando analisa-se as respostas experimentais em relação as soluções numéricas, verifica-se também uma boa proximidade dos resultados apresentados. E a ordem de grandeza do erro encontrado é pequena. Deve-se observar que a pequena diferença entre o resultados obtidos nas duas metodologias são previsíveis. Nesta análise, é importante verificar que alguns fatores inerentes ao modelo real não estão presentes no modelo numérico. Os pontos de fixação realizados através

dos implantes e seus respectivos intermediários possuem uma rigidez que não está contemplada no modelo numérico. Outro fator que pode estar presente é a dificuldade de adaptação entre a infraestrutura e os intermediários.

Deve-se observar que existem algumas dificuldades em incluir nos modelos numéricos características que estão presentes na estrutura real. Entretanto, por se tratar de uma avaliação inicial, onde deseja-se verificar a potencialidade das modelagens numéricas e suas validações com resultados experimentais, pode-se notar que a concordância dos resultados são bastante satisfatórias.

Finalmente, pode-se acrescentar que em todos os resultados apresentados, verifica-se que a formulação de Elementos Finitos é bastante eficiente, e consegue reproduzir o comportamento obtido nas análises experimentais. Observa-se ainda que a solução de Elementos Finitos pode reproduzir muitos outros resultados, que na análise experimental fica restrita ao ponto de leitura do strain-gauge. E isto permite avaliações muito mais aprofundada sobre o comportamento da estrutura, após a obtenção do modelo de Elementos Finitos.

5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados mostram plenamente satisfatórios e validam a avaliação de modelos numéricos com protótipos experimentais. Os resultados obtidos no trabalho mostram que as soluções possuem um concordância muito boa. Observa-se claramente a potencialidade da solução numérica com modelos de Elementos Finitos, permitindo obter respostas mais detalhadas do que as soluções experimentais. E isto permite em avaliações posteriores incluir detalhes presentes na estrutura real com bastante facilidade. Quanto as próteses odontológicas, deve-se observar que a análise permite avaliar posteriormente outros casos como as características físicas dos parafusos de fixação, propriedades materias alternativos para os componentes, condições de fabricação e projeto da infra-estrutura.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Agradecimentos também são estendidos à UNESP (Universidade Estadual Paulista) e USP (Universidade de São Paulo) pelas condições de trabalho spendidas a esta pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

- [1] R. Skalak, Biomechanical Considerations in Osseointegrated Prosthesis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **49**, 6, 843-848 (1983).
- [2] B. Rangert, T. Jemt, L. Jörneus, Forces and Moments on Bränemark Implants. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **4**, 3, 241-247 (1989).

- [3] E.A. Patterson, R.B. Johns, Theoretic analysis of the Fatigue Life of Fixture Screws in Osseointegrated Dental Implants. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **7**, 1, 26-34 (1992).
- [4] M.J. Jaarda, M.E. Razzog, D.G. Gratton, Providing Optimum Torque to Implant Prostheses: a Pilot Study. *Implant Dent.*, **2**, 1, 50-52, (1993).
- [5] L.A. Weinberg, The Biomechanic of Force Distribution in Implant Supported Prostheses, *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **8**, 1, 19-31 (1993).
- [6] B.D. Monteith, Minimizing Biomechanical Overload in Implant Prostheses: A Computerized Aid to Design. *The Journal of Prosthodont Dentistry*, **5**, 495-502 (1993).
- [7] N.A. Milligton, T. Laung, Stress on an Implant Superstructure in Relation to its Accuracy of Fit. *Journal Dent. Res.*, **71**, 108, 529-537 (1992).
- [8] G.A. Waskewicks, J.S. Ostrowski, V.J. Parks, Photoelastic Analysis of Stress Distribution Transmitted from a Fixed Prostheses Attached to Osseointegrated Implants, *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **9**, 4, 405-411 (1994).
- [9] S.N. White, A.A. Caputo, T. Anderkvist, Effect of Cantilever Length on Stress Transfer by Implant Supported Prostheses, *Journal Prosth. Dent.*, **71**, 5, 493-499 (1994).
- [10] Z.M. Isa, J.A. Hobkirk, The Effects of Superstructure Fit and Loading on Individual Implant Units. Part 1: The effects of Tightening the Gold Screw and Placement of a Superstructure with Varying Degrees of Fit. *European Journal Prosthodontic Restoring Dentistry*, **3**, 6, 247-253 (1995).
- [11] A.B. Carr, J.B. Brunski, E. Hurley, Effects of Fabrication, Finishing, and Polishing Procedures on Preload in Prostheses Using Conventional "Gold" and Plastic Cylinders. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **11**, 5, 589-598 (1996).
- [12] Z.M. Isa, J.A. Hobkirk, The Effects of Superstructure Fit and Loading on Individual Implant Units. Part 2: The effects of Loading a Superstructure with Varying Degrees of Fit. *European Journal Prosthodontic Restoring Dentistry*, **4**, 1, 11-14 (1996).
- [13] J.A. Hobkirk, T. K. Havthoulas, The Influence of Mandibular Deformation, Implant Numbers, and Loading Position on Detected Forces in Abutments Supported Fixed Implant Superstructure. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **80**, 2, 169-174 (1998).
- [14] Y. Chao, et all., A Study into the Use Chromium-Cobalt Alloy for Constructing the Framework for Osseointegrated Prostheses. *Clinical Materials*, **3**, 309-315 (1988).
- [15] N.L. Clelland, A. Gilat, E.A. McGlumphy, W.A. Brandley, A Photoelastic and Strain Gauge Analysis of Angled Abutments for an Implant System. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **8**, 1, 541-548 (1993).
- [16] D. Assif, B. Marshak, A. Horowitz, Analysis of Load Transfer and Stress Distribution by an Implant Supported Fixed Partial Denture. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **75**, 3, 285-291 (1996).

- [17] H. Hollweg, *Análise da Passividade de Adaptação de Infra-Estruturas para Prótese Fixa Implanto-Suportada, Através do Uso de Extensômetros*. Bauru: Faculdade de Odontologia de Bauru, Universidade de São Paulo, Tese (Doutorado) (2000).
- [18] H. Hollweg, J.H. Rubo, L.B. Jacques, E.A. Capello Sousa, Passivity of Fit of Implant Supported Frameworks, Using Strain Gauge Measurements. *Journal of Dental Research*, AADR Abstracts, **80**, 101, (2001).
- [19] L.B. Jacques, *Análise do Estresse Gerado em Componentes de Prótese Fixa Implanto-Suportada, Através do Uso de Extensômetros*. Bauru: Faculdade de Odontologia de Bauru, Universidade de São Paulo, Tese (Mestrado) (2000).
- [20] L.B. Jacques, J.H. Rubo, H. Hollweg, E.A. Capello Sousa, Stress Distribution on Fixed Implant Supported Protheses, Using Strain Gauge Measurements. *Journal of Dental Research*, AADR Abstracts, **80**, 101 (2001).
- [21] K.R. Williams, C.J. Watson, W.M. Murphy, J. Scott, M. Gregory, D. Sinobad, Finite Element Analysis of Fixed Protheses Attached to Osseointegrated Implants. *Quintessence International*, **21**, 7, 563-570 (1990).
- [22] J. Chen, X. Lu, N. Payder, H.U. Akay, W.E. Roberts, Mechanical Simulation of the Human Mandible with and without an Endosseous Implant. *Medical Engineering Physical*, **16**, 53-61 (1994).
- [23] A. Sertgöz, S. Güvener, Finite Element Analysis of the Effect of Cantilever and Implant Length on Stress Distribution in an Implant-Supported Fixed Prosthesis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **12**, 165-169 (1996).
- [24] A. SERTGÖZ, Finite Element Analysis Study of the Effect Superstructure Material on Stress Distribution in an Implant-Supported Fixed Prothesis. *The International Journal of Prosthodontics*, **10**, 1, 19-27 (1997).