

# M

mecânica

# E

experimental

Revista da APAET – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões  
ISSN 1646-7078



Fadiga

Betão Estrutural

Materiais e Estruturas

Biomecânica

Ensaios

nº 20  
2012

**CORPO EDITORIAL:**

J. Sousa Cirne - **Editor chefe**  
Mário Santos  
J. Silva Gomes  
Paulo Piloto  
João Ferreira  
Jorge Gomes

mecânica

experimental

Depósito Legal Nº 165 644/01  
Impressão e Acabamento  
Quilate – artes gráficas

**Nº 20**

**2012**

**Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**  
-distribuição gratuita aos sócios  
- preço por unidade avulsa – 20€

**Endereço**  
APAET  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, 101  
1700-066 LISBOA CODEX  
e-mail: [apaet@lnec.pt](mailto:apaet@lnec.pt)

Capa:  
Optimização das metodologias de treino  
recorrendo a sistemas de aquisição do esforço  
dos atletas.  
(Cortesia do LOME-INEGI)



**ISSN 1646-7078**

A **Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET)** foi fundada em 1982 com os seguintes objectivos:

- 1 - Promover a cooperação científica e técnica no campo do conhecimento experimental da Mecânica Estrutural e, particularmente, da Análise Experimental de Tensões, visando o desenvolvimento e emprego dos aparelhos de medida e dos processos destinados à determinação das tensões em materiais e em todos os tipos de estruturas e mecanismos ou seus componentes.
- 2 - Assegurar a representação portuguesa na European Society for Experimental Mechanics (EURASEM) e na Society for Experimental Mechanics (SEM).

A **Revista "Mecânica Experimental"** foi criada pela Direcção desta Associação, com o objectivo de fomentar a publicação de artigos originais de qualidade que promovam a divulgação de informação e o intercâmbio científico e técnico entre os investigadores de língua portuguesa que nos seus trabalhos recorram a técnicas experimentais.

### **CORPOS GERENTES DA APAET (2011-2012)**

Mesa da Assembleia Geral - IDMEC; Secretário: PAVICENTRO; Vogal: Prof. Mário Vaz.

Direcção - Presidente: Eng<sup>o</sup> Mário Santos; 1<sup>o</sup> Vice-Presidente: CEMUC (Prof. J. Sousa Cirne); 2<sup>o</sup> Vice-Presidente: IPB (Prof. Paulo Piloto); Tesoureiro: LNEC (Eng<sup>o</sup> Jorge Gomes); Vogais: INEGI (Prof. J. Silva Gomes) e ICIST (Prof. João Ferreira); Secretário: LNEC (Hélder Vitória).

Conselho Fiscal - Presidente: ACADEMIA MILITAR ; Vogais: Investigador Coordenador Manuel J. Esteves Ferreira; Eng<sup>o</sup> Arlindo Gonçalves.

### **COMISSÃO CIENTÍFICA:**

Abel Trigo Cabral	Jorge Oliveira Seabra
Albano Cavaleiro	José António Simões
Alfredo Campos Costa	José Dias Rodrigues
Alfredo Ribeiro	José Martins Ferreira
Almeida Fernandes	José Reis Campos
Almeida Garrett	José Sousa Cirne
Altino Loureiro	Júlio Montalvão e Silva
Álvaro Cunha	Luís Guerra Rosa
Amílcar Ramalho	Madalena Teles
António Morão Dias	Manuel Freitas
António Pousada	Manuela Salta
António Sousa Miranda	Maria João Barros
António Tadeu	Mário Barbosa
António Torres Marques	Mário Santos
Arlindo Gonçalves	Mário Vaz
Eduardo Júlio	Oliveira Pedro
Elsa Caetano	Paulo Piloto
Elza Fonseca	Paulo Providência
Fernando Branco	Paulo Tavares de Castro
Francisco Queirós de Melo	Paulo Vila Real
Humberto Varum	Raimundo Delgado
J. Silva Gomes	Rui Carneiro Barros
João Ferreira	Shaker Meguid
Jorge Gomes	Valdemar Fernandes

## ÍNDICE DESTE NÚMERO

Modelos de Dimensionamento do FIB e do ACI para o Reforço à Flexão com CFRP <i>L. F. P. Juvandes, D. M. M. Azevedo, A. A. R. Henriques</i>	1
Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP <i>L. F. P. Juvandes, V. L. F. Reis</i>	13
Crack Propagation Behaviour of A Puddle Iron Under Constant and Variable Amplitude Loading <i>A.M. P. de Jesus, J.M.C. Maeiro, A.L.L. da Silva, A.S. Ribeiro</i>	25
Avaliação das Propriedades Mecânicas da Madeira <i>In Situ</i> por Ensaio de Mesoprovetes <i>R. D. Brites, J. S. Machado, P. B. Lourenço</i>	35
Aplicação do Eurocódigo 5 na Avaliação de Ligações Tradicionais de Madeira ao Fogo <i>P. B. Cachim, N. Lopes, H. Cruz, J. Branco, P. Vila Real, P. Palma</i>	41
On the Evaluation of Elastic Properties of P. Pinaster at the Growth Ring Scale <i>J. Pereira, J. Xavier, J. Morais, J. Lousada, F. Pierron</i>	51
On the Determination of the Modulus of Elasticity of Wood by Compression Tests Parallel to the Grain <i>J. Xavier, A. Jesus, J. Morais, J. Pinto</i>	59
Previsão do Módulo de Ruptura à Flexão em Toras de Eucalyptus SP pelo Ensaio de Vibração Transversal <i>M. R. Carreira, J. C. Molina, C. Calil Jr, A. A. Dias</i>	67
Análise Experimental do Processo de Microfuração Electroquímica <i>G. R. Ribeiro, I. M. F. Bragança, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins</i>	73
Caracterização de Materiais Compósitos à Base de Gesso FGD <i>A. Camões, C. Cardoso, S. Cunha, G. Vasconcelos, P. Medeiros, R. Eires, S. Jalali, P. Lourenço</i>	79
Laminados Multi-Direccionais de CFRP para Aplicações em Engenharia Civil <i>J. Sena Cruz, J. Barros, M. Coelho, P. Fernandes</i>	89
Colagem e Propriedades Mecânicas da Madeira de Pinheiro Tratada Termicamente <i>B. Esteves, H. Pereira</i>	101
Modelação da Furação de Laminados por Elementos Finitos <i>L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura, A. T. Marques</i>	109
Desenvolvimento de Equipamento para Microfuração por Electroerosão <i>I. M. F. Bragança, L. M. M. Alves, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins</i>	117
Influência dos Equipamentos para a Melhoria da Qualidade no Assentamento de Pisos Cerâmicos <i>M. T. Baú, G. A. Pelegrini, H. R. Roman, L. F. M. Heineck, C. Baú</i>	125
Sistemas CAD-CAM em Medicina Dentária: Integração com Métodos de Análise de Tensões <i>A. Correia, J.C. Sampaio-Fernandes, J.C. Reis Campos, M. A. Vaz, P. Piloto, N.V. Ramos</i>	131
Análise do Ensaio de Pino-no-Disco na Quantificação do Coeficiente de Atrito no Corte Ortogonal <i>V. A. M. Cristino, C. M. A. Silva, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins</i>	135
Desenvolvimento de Um Sistema de Determinação da Curva Tensão-Deformação Através do Ensaio "Bulge" <i>A. Santos, J. Mendes, F. Gomes Almeida, J. Reis, P. Teixeira, A. Barata Rocha</i>	145

## SISTEMAS CAD-CAM EM MEDICINA DENTÁRIA: INTEGRAÇÃO COM MÉTODOS DE ANÁLISE DE TENSÕES

A. Correia<sup>1</sup>, J.C. Sampaio-Fernandes<sup>1</sup>, J.C. Reis Campos<sup>1</sup>, M.A. Vaz<sup>2</sup>, P. Piloto<sup>2</sup>, N.V. Ramos<sup>3</sup>

1 - Grupo de Prótese Dentária e Oclusão. Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto. [acorreia@fmd.up.pt](mailto:acorreia@fmd.up.pt)

2 - Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental. [gmavaz@fe.up.pt](mailto:gmavaz@fe.up.pt)

3 - Instituto Politécnico de Bragança, Dept Tec. Mecânica. [ppiloto@ipb.pt](mailto:ppiloto@ipb.pt)



### RESUMO

*A evolução tecnológica das últimas décadas, dos sistemas de levantamento de forma, das preparações dentárias, do software de desenho virtual (CAD), dos materiais dentários e máquinas de fresagem (CAM), levou ao desenvolvimento de vários sistemas CAD-CAM com aplicabilidade em Medicina Dentária (ex. Everest®Kavo, disponível na FMDUP). Nesse sentido o Grupo da Prótese Dentária e Oclusão da FMDUP desenvolveu uma colaboração interdisciplinar com o Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) da FEUP no sentido de adoptar as tecnologias normalmente aplicadas em Engenharia para optimização de estruturas utilizadas em Próteses Dentárias.*

### 1. INTRODUÇÃO

A aplicação da tecnologia CAD-CAM em Medicina Dentária iniciou-se na transição da década de '70-'80 com os trabalhos desenvolvidos por Young e Altschuler nos EUA (mapeamento intra-oral por holografia laser), François Duret em França (Duret system) e Mormann e Brandestini, da Univ. de Zurique, Suíça, que revolucionaram a Medicina Dentária com o desenvolvimento do primeiro sistema CAD-CAM aplicado e comercializado de forma viável na reabilitação dentária - o sistema CEREC®. (Liu, 2008)

A evolução tecnológica das últimas décadas relativamente aos sistemas de levantamento de forma das preparações dentárias, do *software* de desenho virtual (CAD), dos materiais dentários e máquinas de fresagem (CAM), levou à construção de vários sistemas CAD-CAM com aplicabilidade em

Medicina Dentária.

**Tabela 1** - Exemplos de Sistemas CAD-CAM para Medicina Dentária.

NOME COMERCIAL	SITE
Everest®Kavo	<a href="http://www.kavo-everest.com">www.kavo-everest.com</a>
CEREC 3D® CEREC InLab®	<a href="http://www.sirona.com">www.sirona.com</a>
Etkon®	<a href="http://www.straumann.com">www.straumann.com</a>
Procera®	<a href="http://www.nobelbiocare.com">www.nobelbiocare.com</a>
Lava®	<a href="http://www.3m.com">www.3m.com</a>

Um exemplo é o sistema CAD-CAM Everest®Kavo, disponível na Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto (Fig 1), que contém 3 componentes principais: uma unidade de digitalização da preparação dentária extra-oral, uma unidade de desenho virtual da restauração (CAD) e uma unidade de fresagem dessa mesma

restauração (CAM), que vai fazer a conversão de uma estrutura virtual para uma estrutura real.



Fig 1 – Everest@Kavo, sistema CAD-CAM disponível na FMDUP. (esq.: scanner; centro: programa CAD; dir.: fresadora)

Contudo, grande parte dos insucessos em Prótese Dentária devem-se ao desconhecimento das propriedades dos materiais e das tecnologias associadas ao desrespeito dos princípios físicos elementares e à ignorância das tensões mecânicas dentro da cavidade oral, pelo que é justo considerar que a Engenharia ocupa um lugar fundamental na Medicina Dentária Moderna.

Nesse sentido o Grupo da Prótese Dentária e Oclusão da FMDUP desenvolveu uma colaboração interdisciplinar com o Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) da FEUP no sentido de adoptar as tecnologias normalmente aplicadas em Engenharia para optimização de estruturas, no estudo das próteses dentárias e da tecnologia CAD-CAM associada.

Apesar de actualmente existirem já sistemas CAD-CAM que permitem exportar os ficheiros CAD gerados num formato .STL (Ex. CEREC in Lab®), o sistema disponibilizado na Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto CAD-CAM, para a realização destes trabalhos, foi o Everest@Kavo (v.4.07.06), que é baseado num circuito fechado i.e. em que todo o fluxo de processamento da informação se restringe às suas próprias unidades, não permitindo trabalhar com componentes de outras marcas. Contudo, foi possível conceber uma metodologia de exportação dos ficheiros de desenho virtual deste sistema para integração com métodos de análise de tensões:

- Numéricos (ex. programas informáticos de análise

de elementos finitos, formato .stl).

- Experimentais (ex. fotoelasticidade e interferometria holográfica)

Desta forma, torna-se possível o estudo virtual de situações compatíveis com a realidade clínica de Medicina Dentária.

## 2. OBJECTIVOS

Neste trabalho é apresentada uma aplicação desta metodologia em diversos trabalhos experimentais de análise de tensões em próteses parciais fixas dentárias. (Correia, 2009)

## 3. METODOLOGIA

Utilizando o sistema Everest@Kavo (v.4.07.06) foi efectuada a digitalização dos troquéis de dois pilares aparafusados a dois implantes dentários, e executado o desenho de uma infra-estrutura de uma prótese parcial fixa de 4 elementos (sendo um deles um elemento em extensão – *cantilever*), compatível com a realidade da prática clínica Médico-Dentária (Fig 2 e Fig 3).

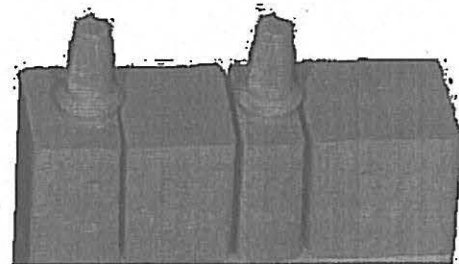


Fig 2 – Troquéis em gesso dos pilares aparafusados aos implantes dentários.

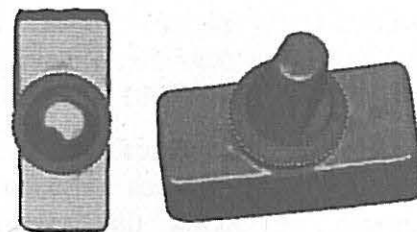


Fig 3 – Digitalização 3D dos pilares com o software Everest®.

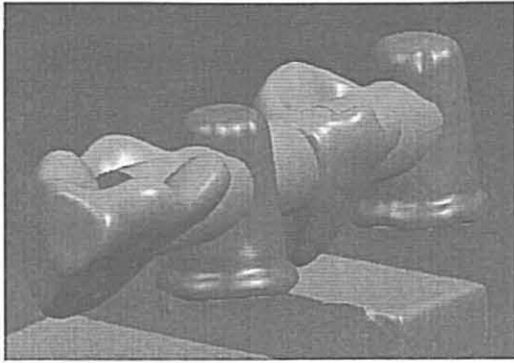


Fig 4 – CAD da infra-estrutura protética.

### 3.1. Processamento pelo método dos Elementos Finitos (Correia, 2009)

Uma vez que o programa não apresentava nenhuma função de exportação de ficheiros para análise por outros *softwares*, foi efectuada uma análise informática da pasta relativa ao programa CAD do sistema Everest®, tendo-se verificado a existência de ficheiros do tipo .igs (Initial Graphics Exchange Specification), um formato de vectores gráficos 2D/3D, utilizado por muitos programas CAD como um formato padrão ASCII para gravação e exportação de dados vectoriais.

Os ficheiros relativos à estrutura em análise foram então abertos no programa CAD Solidworks® (Fig 5) para verificação do desenho, e posteriormente no programa Abaqus® para construção de uma malha de elementos finitos (Fig 6), passível de ser submetida a uma análise de tensões e deformações numérica.

A aplicação de cargas na superfície oclusal do dente em cantilever permitiu-nos obter uma distribuição de tensões na malha de elementos finitos projectada sobre o desenho virtual desta infra-estrutura de prótese parcial fixa, que nos permitiu concluir,

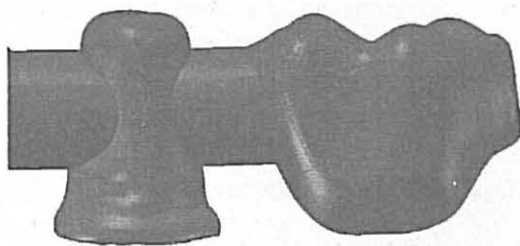


Fig 5 – CAD aberto no programa Solidworks.

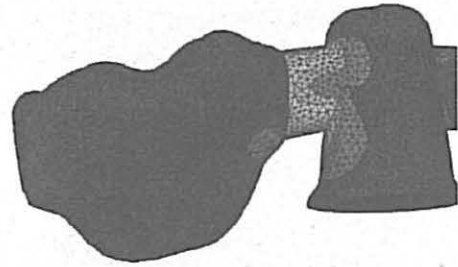


Fig 6 – Malha de elementos finitos relativa a uma infra-estrutura protética do tipo *cantilever*.

p.e., pela presença de valores elevados na zona inferior (gingival) do conector do elemento em *cantilever*.

### 3.2. Processamento pelo método da Fotoelasticidade (Correia, 2009)

De igual forma procurou-se efectuar uma análise experimental de tensões. Para tal, foi executada uma secção longitudinal do desenho CAD, à qual foi seleccionado apenas o contorno externo, de forma a permitir a construção de um modelo fotoelástico (Fig 7). Pretendeu-se assim efectuar uma análise qualitativa de tensões por fotoelasticidade.

Foi utilizada uma placa fotoelástica de 6,5mm na qual foi recortado o desenho exemplificado anteriormente. (Fig 8). A estrutura projectada na placa fotoelástica foi então submetida a cargas em diferentes pontos de aplicação, e analisada num polariscópio de transmissão existente no LOME – FEUP (Fig 9).

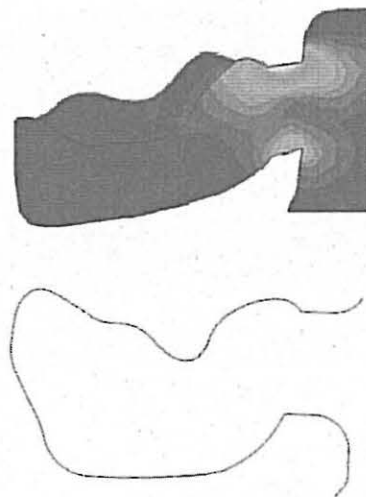


Fig 7 – Selecção e ampliação do contorno externo do modelo 3D a partir de uma secção longitudinal do modelo 3D.

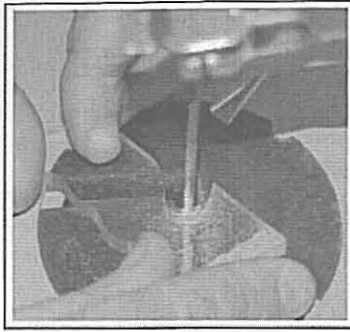


Fig 8 – Recorte do contorno externo da infraestrutura protética numa placa fotoelástica de 6,5mm.

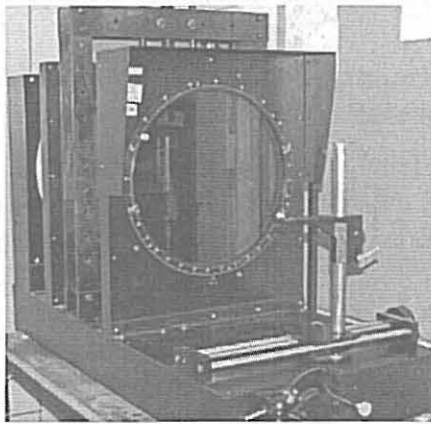


Fig 9 – Polariscópio de Transmissão (Vishay®) disponível no LOME-INEGI.

Desta análise experimental pelo método da fotoelasticidade foi possível concluir por uma concentração de franjas elevadas na zona do conector do elemento em *cantilever*, o que é coincidente com os dados obtidos pelo método dos elementos finitos.

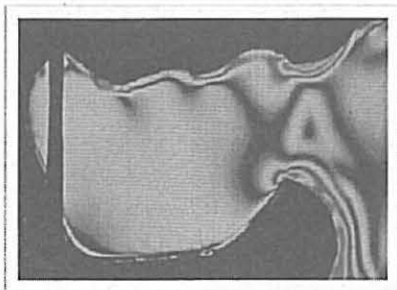


Fig 10 – Carga aplicada na zona mais distal do dente em *cantilever*. Concentrações de franjas na zona do conector.

#### 4. CONCLUSÕES

A interdisciplinariedade é fundamental para a evolução da ciência. A investigação aqui descrita representa uma metodologia

de integração de métodos de duas áreas da ciência distintas – Medicina Dentária e Engenharia.

É possível concluir que a aplicação de técnicas comumente utilizadas em Engenharia em análises de estruturas aplicadas em Medicina Dentária pode contribuir para a optimização das próteses dentárias ao identificar as zonas de distribuição de valores elevados de tensões e, em consequência, para uma melhor reabilitação clínica dos pacientes que necessitam, deste tipo de reabilitação.

Para uma integração verdadeira destas tecnologias, os programas informáticos dos sistemas CAD-CAM de Medicina Dentária deveriam, p.e., possuir um módulo avançado de simulação das cargas mastigatórias que permitisse uma análise de tensões - pelo método dos elementos finitos - das estruturas protéticas desenhadas 3D.

#### NOTA DOS AUTORES

A investigação aqui descrita está incluída na Tese de Doutoramento do autor principal (Correia A, 2009)

#### REFERÊNCIAS

1. Liu P-R, Essig M. A panorama of dental CAD/CAM restorative systems. Compendium 2008; 29(8): 2-10.
2. Correia A. 2009. Estudo das tensões exercidas sobre próteses fixas em zircónia e em titânio. Comportamento mecânico de estruturas executadas em CAD-CAM, 221 p. Tese de Doutoramento, Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto.

**MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DO FIB E DO ACI PARA O REFORÇO À FLEXÃO COM CFRP**

*L. F. P. Juvandes, D. M. M. Azevedo, A. A. R. Henriques*

**CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP**

*L. F. P. Juvandes, V. L. F. Reis*

**CRACK PROPAGATION BEHAVIOUR OF A PUDDLE IRON UNDER CONSTANT AND VARIABLE AMPLITUDE LOADING**

*A.M. P. de Jesus, J.M.C. Maeiro, A.L.L. da Silva, A.S. Ribeiro*

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA *IN SITU* POR ENSAIOS DE MESOPROVETES**

*R. D. Brites, J. S. Machado, P. B. Lourenço*

**APLICAÇÃO DO EUROCÓDIGO 5 NA AVALIAÇÃO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA AO FOGO**

*P. B. Cachim, N. Lopes, H. Cruz, J. Branco, P. Vila Real, P. Palma*

**ON THE EVALUATION OF ELASTIC PROPERTIES OF P. PINASTER AT THE GROWTH RING SCALE**

*J. Pereira, J. Xavier, J. Morais, J. Lousada, F. Pierron*

**ON THE DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF WOOD BY COMPRESSION TESTS PARALLEL TO THE GRAIN**

*J. Xavier, A. Jesus, J. Morais, J. Pinto*

**PREVISÃO DO MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO EM TORAS DE EUCALYPTUS SP PELO ENSAIO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL**

*M. R. Carreira, J. C. Molina, C. Calil Jr, A. A. Dias*

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE MICROFURAÇÃO ELECTROQUÍMICA**

*G. R. Ribeiro, I. M. F. Bragança, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins*

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE GESSO FGD**

*A. Camões, C. Cardoso, S. Cunha, G. Vasconcelos, P. Medeiros, R. Eires, S. Jalali, P. Lourenço*

**LAMINADOS MULTI-DIRECCIONAIS DE CFRP PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL**

*J. Sena Cruz, J. Barros, M. Coelho, P. Fernandes*

**COLAGEM E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE PINHEIRO TRATADA TERMICAMENTE**

*B. Esteves, H. Pereira*

**MODELAÇÃO DA FURAÇÃO DE LAMINADOS POR ELEMENTOS FINITOS**

*L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura, A. T. Marques*

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA MICROFURAÇÃO POR ELECTROEROSÃO**

*I. M. F. Bragança, L. M. M. Alves, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins*

**INFLUÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS PARA A MELHORIA DA QUALIDADE NO ASSENTAMENTO DE PISOS CERÂMICOS**

*M. T. Baú, G. A. Pelegrini, H. R. Roman, L. F. M. Heineck, C. Baú*

**SISTEMAS CAD-CAM EM MEDICINA DENTÁRIA: INTEGRAÇÃO COM MÉTODOS DE ANÁLISE DE TENSÕES**

*A. Correia, J.C. Sampaio-Fernandes, J.C. Reis Campos, M. A. Vaz, P. Piloto, N.V. Ramos*

**ANÁLISE DO ENSAIO DE PINO-NO-DISCO NA QUANTIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO CORTE ORTOGONAL**

*V. A. M. Cristino, C. M. A. Silva, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins*

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO ATRAVÉS DO ENSAIO "BULGE"**

*A. Santos, J. Mendes, F. Gomes Almeida, J. Reis, P. Teixeira, A. Barata Rocha*