

ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF BIOCOMPATIBLE DENTAL CEMENTS

Vanderson Deon, Marco A. Argenta, Ana P. G. O. Franco and Mildred B. Hecke

*Grupo de Bioengenharia, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Avenida Cel. Francisco H. dos Santos, Jardim das Américas, Curitiba, Paraná, Brasil,
vanderson.bioengenharia@gmail.com, <http://www.grupo.bioengenharia.ufpr.br>*

Keywords: Bimodulus, FEM, Flexural Tests, Mechanical Properties.

Abstract. The classical elasticity theory assumes as basic hypothesis that materials have similar elastic properties in tension and compression. However, studies indicate that a wide range of materials such as cements, ceramics, graphite, composites and even some biological structures like bone, behave differently under tension and compression, i.e., in the elastic regime have different Young's modulus in tension and compression. These materials are known as bimodular materials. A correct approach to the simulation of mechanical behavior of these materials should consider these different properties. This work aims to simulate computationally the mechanical behavior of cementitious materials used in dental treatments, which require for their correct modeling, an accurate characterization of their properties. The mechanical properties of these materials were obtained from experiments performed by a dentist through uniaxial tension tests, uniaxial compression tests and three-point bending test. Resin cement selected for study was the Cement Post (Angelus® - Lot No. 6425). Using the finite element method a reverse analysis was carried out in order to generate computer models that reproduce the experimental mechanical tests. The results obtained in the numerical analysis were compared with the results obtained in laboratory tests for samples of this dental cement, in order to determine the correct Young's modulus in tension and compression and the rupture tension. In bending tests the relevant international standards applicable to dental materials do not consider, for calculating the flexural strength, the bimodular behavior of these material. It is concluded that in simulations of bimodular materials is required for greater accuracy more attention in the choice of their mechanical properties, mainly in finite element analysis. In the case of bending simulations, the correct knowledge of the different material Young's modulus on tension and compression is relevant for having a consistent approach in order to determine the flexural strength and tensile strength of bent samples.

1 INTRODUÇÃO

A Teoria Elástica para diferentes módulos de elasticidade foi formulada por Ambartsumyan C. A. em 1982 com base na Teoria Clássica da Elasticidade, e reflete o comportamento mecânico dos materiais com maior exatidão, pois assume que o módulo de elasticidade está relacionado com o estado de tensão podendo ser diferente à tração e à compressão. Uma grande gama de materiais, naturais e sintéticos, apresenta esse fenômeno conhecido como bimodularidade, no qual as propriedades elásticas à tração diferem das propriedades à compressão. Esse fenômeno já foi demonstrado através de experimentos em rochas, ossos, concreto, cerâmicas, grafites e compósitos (El – Tahan et. al., 1989; He et. al., 2009).

No campo da odontologia, onde inúmeros processos clínicos requerem a aplicação de materiais com tal característica, seja em restaurações dentárias, ancoragem de implantes ou até mesmo fixação de próteses, nota-se uma enorme necessidade de uma correta caracterização das propriedades dos materiais envolvidos, uma vez que, sendo sua evolução constante e muito rápida, muito pouco se conhece sobre seu comportamento, pois é ainda escassa a quantidade de informações disponíveis na literatura (Franco, 2008).

Os cimentos dentais, necessários para a fixação e restauração de estruturas dentárias, possuem propriedades mecânicas (como o módulo de elasticidade, a resistência flexural e as tensões limite de ruptura) cujos valores são superiores aos dos cimentos convencionais (Franco, 2008). Na macroescala, essas propriedades são obtidas tradicionalmente através de ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos. Esses ensaios são importantes, pois avaliam o material cimentante em condições semelhantes a que são exigidos na realidade clínica, onde estão sujeitos principalmente a esforços normais de compressão e esforços de flexão (regiões tracionadas e regiões comprimidas). Nos ensaios mecânicos se pode obter ainda a resistência à fratura dos materiais, que relacionadas às tensões e deformações produzidas em função das forças aplicadas. (Franco, 2008).

Para a validação das propriedades obtidas experimentalmente, busca-se por meio de análises inversas a reprodução dos ensaios através de simulações computacionais. Essa alternativa torna-se interessante à medida que permite de maneira confiável e em um processo não destrutivo, a avaliação dos resultados obtidos nos experimentos reais.

Em simulações numéricas de materiais que apresentam como característica a bimodularidade, como, por exemplo, por meio do uso do Método dos Elementos Finitos, pressupõe-se a elaboração de um modelo que contemple as reais diferenças que o material possui quando submetido a um determinado estado de tensão. Uma correta abordagem do comportamento mecânico de materiais bimodulares, levando em conta essa particularidade, deve considerar as diferentes propriedades mecânicas que o material possui quando submetido à tração e à compressão.

Estudos que se aprofundam na caracterização mais detalhada dos materiais devem

sempre ser realizados com a finalidade de observar comportamento biomecânico do material a ser modelado. Em especial, nos cimentos resinosos, similares ao material estudado no presente trabalho, de uso comum na odontologia, deve ser tomado um cuidado especial pois como pôde-se observar, o caráter bimodular desse material, propriedade que não tem sido considerada nos trabalhos recentes envolvendo análises de elementos finitos, podem levar a resultados e conclusões errôneas.

O objetivo deste estudo é alertar quanto à determinação e o uso das corretas propriedades mecânicas dos materiais em análises numéricas. Para isso, amostras de um cimento resinoso biocompatível utilizado na odontologia foram selecionadas e submetidas a ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos, com o intuito de se determinar suas propriedades físicas. Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos à luz das normas ASTM D638M-96, ASTM B695-02 e ISO 10477, e em especial com auxílio da análise fractográfica de corpos de prova, serão apresentados e comparados com resultados computacionais obtidos por meio de análise inversa via método dos elementos finitos para essas amostras de cimento.

No ensaio de flexão de três pontos, para a simulação da bimodularidade, foi utilizado um algoritmo desenvolvido em linguagem APDL que identifica em meio a um processo iterativo, com base na tensão dos elementos que compõe a malha de elementos finitos, as regiões tracionadas e comprimidas, e atribui para cada região o módulo de elasticidade adequado, seja de tração ou de compressão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram obtidas experimentalmente através dos ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos de corpos de prova confeccionados pela cirurgiã dentista Ana Paula Gebert de Oliveira Franco e são integrantes de sua pesquisa de doutorado junto ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da PUC/Pr.

O ensaio de tração uniaxial consiste na aplicação de uma carga de tração em um corpo de prova ao longo de um determinado eixo (Dowling, 1998; Goodman, 1989). Esse ensaio é raramente utilizado para obtenção de propriedades mecânicas em materiais frágeis, pois problemas na confecção do corpo de provas ou na própria execução do ensaio, como dificuldades no alinhamento e fixação da amostra, podem levar a resultados de resistência menores do que o material realmente apresenta (Hecke, 2009). Nesse ensaio a força deve ser aplicada de maneira uniforme em toda a seção, em seu plano horizontal, devendo existir um correto alinhamento na direção axial entre o eixo do corpo de provas e as garras do equipamento de ensaio. Para o ensaio de tração uniaxial foram confeccionados corpos de provas com formato de ampulheta por meio de moldes de silicone. O comprimento total da ampulheta é de 77 mm, com espessura de 6 mm, sendo que sua porção central mede 14,50 mm com espessura de 2,05 mm e largura de 2mm (ver Figura 1). Após serem removidas dos

moldes as amostras foram armazenadas em umidade relativa por 24 horas, com base nas orientações da norma ASTM D 638M-96. Os espécimes produzidos foram então submetidos ao ensaio de resistência da tração em uma Máquina de Ensaio Universal Instron com uma célula de carga de 100 N, a uma velocidade de 1,0 mm/min até a ruptura ocorrer, com as garras do equipamento a uma distância de 20 mm entre si.

A tensão de ruptura à tração (σ_r^+) foi determinada pela seguinte expressão (ASTM D638M-96):

$$\sigma_r^+ = \frac{P_r^+}{A} \quad (1)$$

onde σ_r^+ é a tensão de ruptura, P_r^+ é a força de ruptura do corpo de prova na tração e A é a menor área de seção transversal do corpo de prova.

O módulo de elasticidade do material à tração (E_t) foi determinado através da expressão:

$$E_t = \frac{P_e^+ L}{A \delta} \quad (2)$$

onde P_e^+ é a força de tração no limite de linearidade da reta, A é a menor área de seção transversal do corpo de provas, L o comprimento do corpo de prova entre as garras e δ o alongamento do corpo de provas no limite de linearidade da reta.

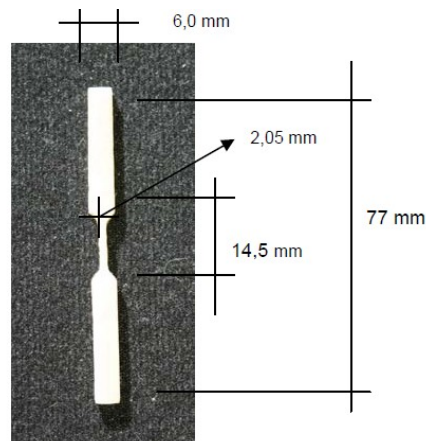


Figura 1: Geometria do corpo de provas do ensaio de tração uniaxial (Franco, 2008).

O ensaio de compressão uniaxial consiste na aplicação de uma carga de compressão em um corpo de prova ao longo de um determinado eixo (Goodman, 1989). A força deve ser aplicada, de maneira uniforme em toda a seção, no seu plano normal, devendo existir paralelismo entre a superfície da prensa e a seção transversal do corpo de provas. Para a compressão uniaxial foram confeccionadas amostras cilíndricas de 8 mm de altura por 4 mm de diâmetro para as amostras de cimento (ver Figura 2). A dimensão das amostras foi verificada com auxílio de um paquímetro digital, sendo descartados os espécimes que apresentaram algum tipo de defeito (falhas detectáveis a olho nu como porosidade ou presença de fraturas. Em seguida

foram submetidas ao ensaio de compressão a uma velocidade de 0,1 mm/min até sua ruptura. O ensaio de compressão foi realizado utilizando uma Máquina de Ensaio Universal (AG-I Shimadzu – Modelo Autograph), com base nas recomendações presentes na norma ASTM B695-02.

A tensão de ruptura à compressão (σ_r^-) foi determinada pela seguinte expressão ASTM B695-02.

$$\sigma_r^- = \frac{P_r^-}{\frac{1}{4}\pi d^2} \quad (3)$$

onde σ_r^- é a tensão de ruptura, P_r^- é a força de ruptura do corpo de prova na compressão e d é o diâmetro da seção transversal do corpo de provas.

O módulo de elasticidade do material à compressão (E_c) foi determinado através da expressão ASTM B695-02.

$$E_c = \frac{P_e^- L}{A\delta} \quad (4)$$

onde P_e^- é a força de compressão no minite de linearidade da reta, A é a área da seção transversal do corpo de provas, L o comprimento e δ o encurtamento do corpo de provas.

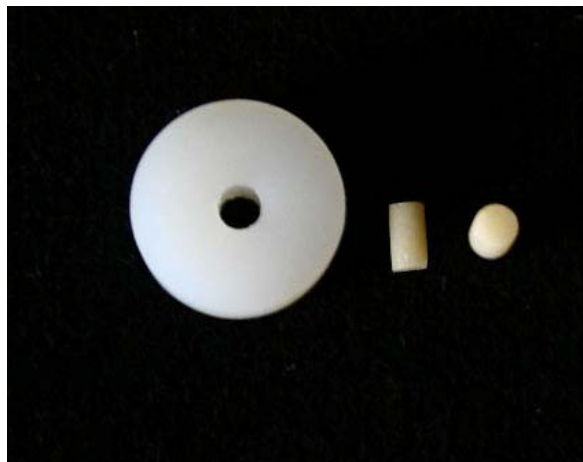


Figura 2: Obtenção de corpos de provas cilíndricos para o ensaio de compressão uniaxial com auxílio de matrizes de nylon (Franco, 2008).

O ensaio de flexão de três pontos é um teste que visa determinar a rigidez à flexão do material, por meio da determinação da tensão de ruptura do material à tração na flexão. Esse ensaio foi realizado em amostras retangulares de 25 mm x 2 mm x 2 mm, obtidas a partir de matrizes metálicas retangulares (ver Figura 3). Após serem mantidas em umidade relativa por 24 horas, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão de três pontos em uma Máquina de Ensaio Universal (AG-I Shimadzu – Modelo Autograph), na qual foi montado um aparato constituído de dois suportes paralelos e distantes 20 mm entre si, e um suporte central para a aplicação da carga,

com base nas recomendações presentes na norma ISO 10477.

A resistência a flexão (σ_f) foi determinada usando a expressão (ISO 10477)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (5)$$

onde P é a intensidade da carga no instante de fratura do material, L é a distância entre os suportes de apoio, b é a largura e h a altura da seção transversal do corpo de provas.

O módulo de elasticidade flexural (E_f) do material é obtido pela expressão (ISO 10477)

$$E_f = \frac{P_e L^3}{4fbh^3} \quad (6)$$

onde P_e é a força no limite de linearidade da reta, L é a distância entre os suportes de apoio, b é a largura e h a altura da seção transversal do corpo de prova e f o deslocamento (abaixamento) do ponto central do corpo de provas.

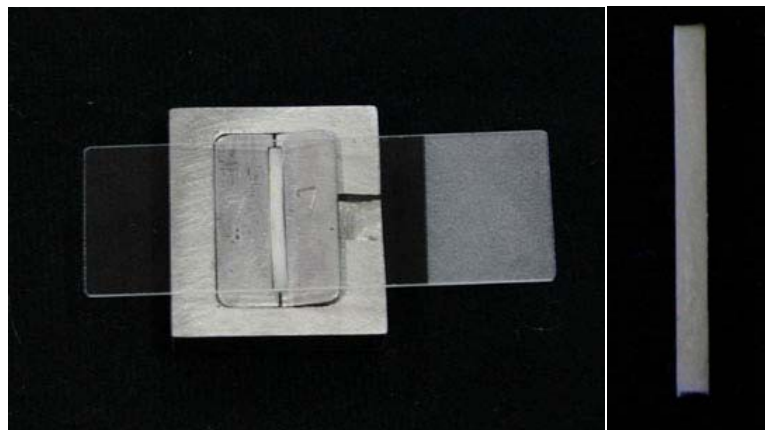


Figura 3: Obtenção de corpo de provas retangulares para o ensaio de flexão de três pontos com auxílio de matrizes metálicas e vista superior de um dos corpos de provas (Franco, 2008).

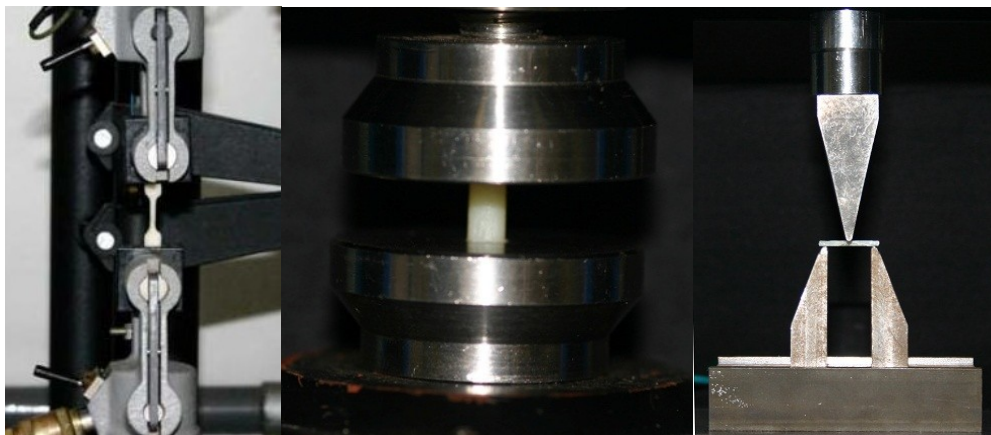


Figura 4: Ensaio de tração uniaxial, ensaio de compressão uniaxial e ensaio de flexão de três pontos (Franco, 2008).

2.2 Fractografia

Para a construção da réplica, o corpo de prova depois de fraturado foi moldado com silicone de adição Adhesil (Vigodent – Pasta Base (Lote nº 019/06)), pastas base e leve (Pasta Light body (Lote nº 009/06)) e o molde foi vazado em resina epóxi (Fiberglass Casa do Silicone - Resina Epóxi CMR – 028/I (Lote nº 18343)) para obtenção de uma réplica de resina epóxica. A réplica foi submetida à incorporação da liga áurica (Shimatzu – Modelo IC-50) para ser transformada em material eletricamente condutivo. Realizou-se uma cobertura de liga de ouro e paládio com o intuito de tornar a amostra mais condutiva, melhorando a emissão de elétrons secundários, que é o sinal mais utilizado no processo de formação da imagem da superfície desses materiais. Posteriormente, a amostra foi observada em Microscopia Eletrônica de Varredura (SSX-550-Shimadzu, Tokyo, Japan), onde se pode observar a seção transversal fraturada com um aumento de 35x.

2.3 Análise inversa via método dos elementos finitos – modelo de flexão pura para o material bimodular

Após a compilação dos resultados dos ensaios experimentais foi realizada uma análise inversa via método dos elementos finitos. Com o software ANSYS® foram reproduzidos os ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos, que buscaram adequar os módulos de elasticidade à tração, o módulo de elasticidade à compressão, assim como o módulo flexural para o cimento em estudo (ver [Tabela 1](#)).

De acordo com as hipótese da teoria de vigas de Euler-Bernoulli, a flexão pura de vigas esbeltas resulta em uma deformação uniforme e circular, onde as seções permanecem planas e ortogonais ao eixo longitudinal e ocorre um estado uniaxial de tensões ao longo desse eixo ([Beer et. al., 2006](#); [Timoshenko, 1966](#)). Na simulação computacional do ensaio de flexão de três pontos, tais hipóteses foram impostas, com o intuito de se aproximar esse problema ao caso da flexão pura.

O material foi considerado elástico bimodular, sendo os módulos de elasticidade à tração (+), E_t , e o módulo de elasticidade à compressão (-), E_c , obtidos a partir dos ensaios mecânicos. A posição da linha neutra (LN) na viga de Euler-Bernoulli composta por material bimodular submetido a flexão pura é obtida da expressão previamente derivada ([Jones, 1976](#) apud [Williams et. al., 2008](#)) que relaciona os módulos de elasticidade à tração e à compressão

$$d_{LN} = \frac{\sqrt{E_t}}{\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c}} h \quad (7)$$

onde d_{LN} é a distância da linha neutra a extremidade côncava da viga (fibras superiores, no caso submetidas a tensões de compressão) e h a altura da seção transversal da viga.

Na análise de elementos finitos foi gerado um modelo composto por uma malha

de 88641 nós e 80000 elementos (ver Figura 5). A carga aplicada foi a máxima força média transversal obtida para o ensaio de flexão de três pontos, chamada de carga P na Eq. (5). Para garantir a hipótese da viga de Euler-Bernoulli, os apoios foram colocados na altura da linha neutra das seções transversais das extremidades.

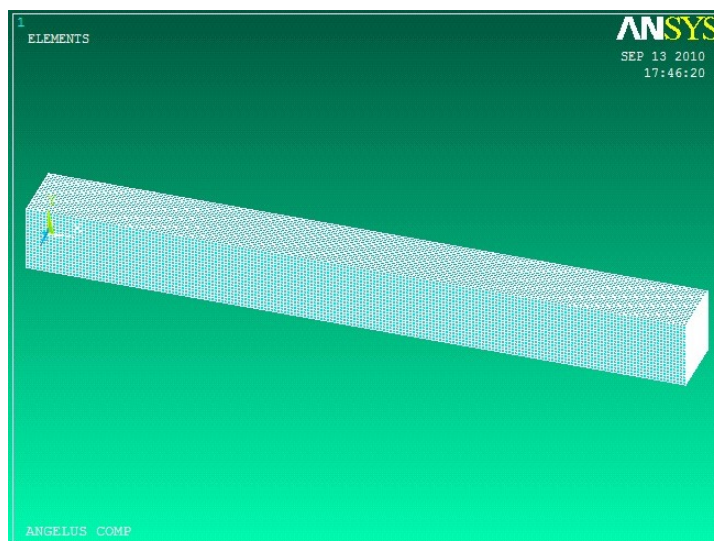


Figura 5: Modelo de elementos finitos para o ensaio de flexão de três pontos.

2.4 Consideração da bimodularidade no ensaio de flexão de três pontos

Para a simulação do ensaio de flexão de três pontos foi desenvolvido um algoritmo em linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language), que, através de um processo iterativo, identifica com base nas tensões dos elementos da malha de elementos finitos, quais regiões do corpo estão tracionadas e quais regiões estão comprimidas, e atribui o módulo de elasticidade correspondente a cada uma delas. Com o intuito de preservar a hipótese da viga de Euler-Bernoulli, os apoios foram deslocados para a altura da linha neutra das seções transversais das extremidades.

No primeiro passo da análise, o módulo de elasticidade a compressão é atribuído a todo o corpo. Nas iterações sucessoras, de acordo com a tensão σ_x verificada, o módulo de elasticidade é substituído pelo conveniente (tração ou compressão) até que ocorra a convergência. Portanto, o critério de convergência adotado considera a coincidência das tensões de tração calculadas para todos os elementos cujo módulo de elasticidade adotado no seu cálculo seja de tração (E_t). A Figura 6 apresenta um fluxograma que demonstra o processo.

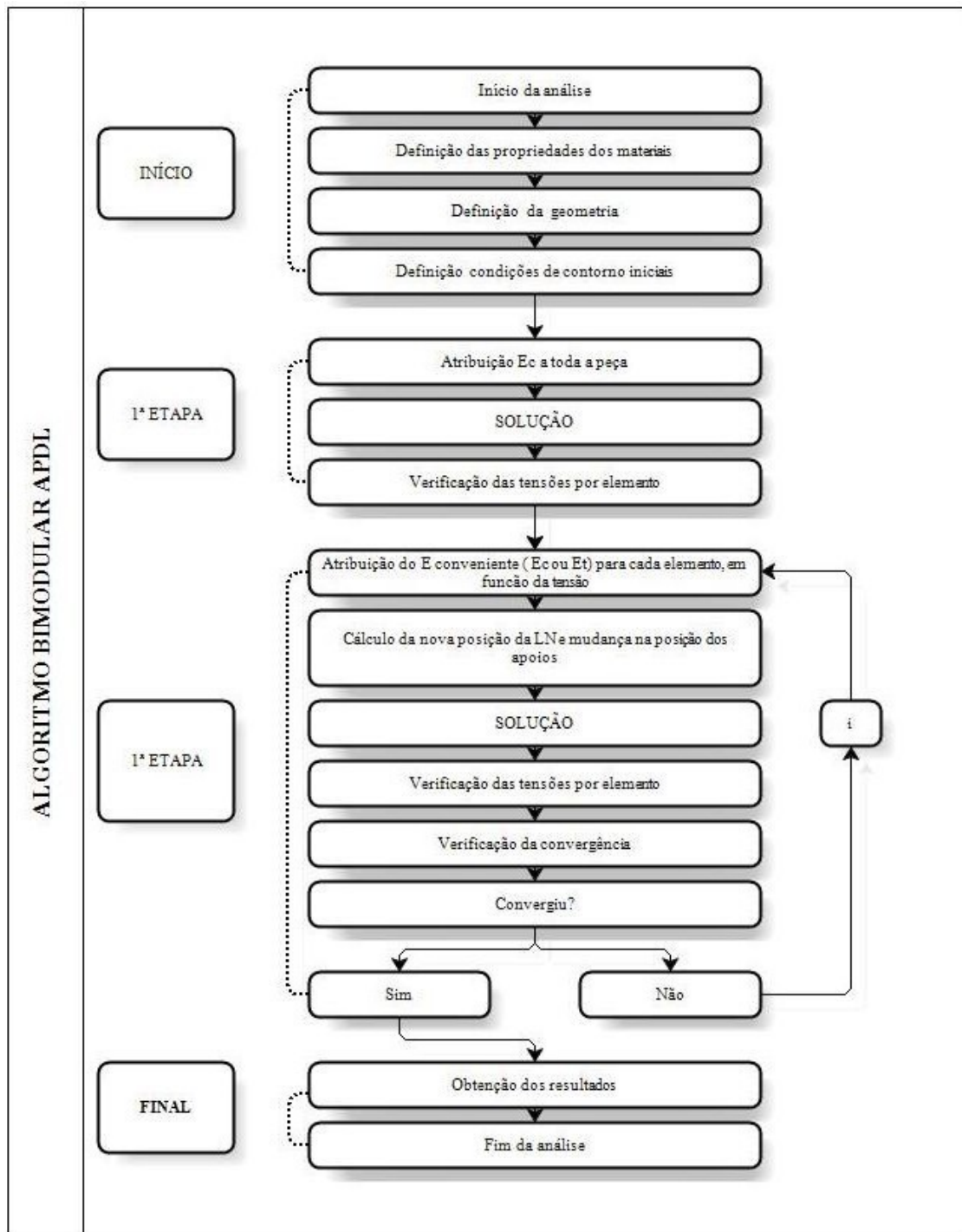


Figura 6: Metodologia ensaio de flexão de três pontos para material bimodular.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos ensaios de determinação das propriedades mecânicas

A [Figura 7](#) apresenta o gráfico contendo os resultados do ensaio experimental de tração uniaxial para 2 corpos de provas dentre os 5 testados para o cimento em estudo. Os resultados obtidos nesse ensaio para os outros três corpos de provas

foram desconsiderados devido a problemas observados no processo de execução do ensaio, que levaram a ruptura não perpendiculares ao eixo do carregamento. Como resultado desse experimento, considerando-se as amostras representativas, pode-se obter como valores médios para o módulo de elasticidade na tração $E_t = 1200 \text{ MPa}$ considerando a parte linear (inicial) da curva e para a tensão limite de linearidade, $\sigma_{\text{lim}}^+ = 7 \text{ MPa}$. A partir desse ponto se verifica o início de um processo de abertura de micro-fissuras, caracterizado pela perda de rigidez, resultando em um trecho não linear no gráfico tensão-deformação. Os ensaios apresentaram uma tensão limite de resistência à tração $\sigma_r^+ = 35,352 \pm 3,558 \text{ MPa}$ para uma deformação de $\varepsilon_r^+ = 4,125 \pm 0,704 \text{ (\%)}$.

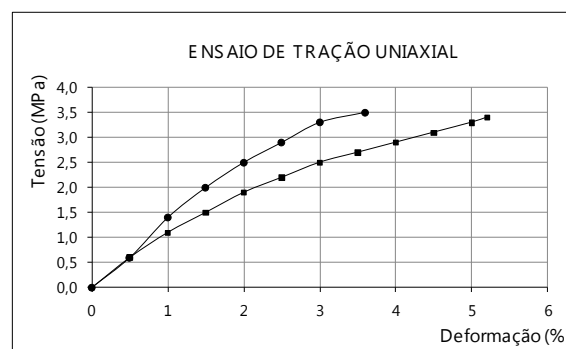


Figura 7: Resultados experimentais para os ensaios de tração uniaxial.

A Figura 8 apresenta o gráfico contendo os resultados de 10 amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. Esse experimento permitiu determinar os valores médios para o módulo de elasticidade na compressão $E_c = 2550 \text{ MPa}$ na parte linear (inicial) da curva, para a tensão limite de linearidade na compressão de $\sigma_{\text{lim}}^- = 48 \text{ MPa}$. A partir desse ponto ocorre um processo de colapso caracterizado por um trecho não linear no gráfico. O material apresentou uma carga média limite de ruptura à compressão de $P_r^- = 1483,73 \pm 365 \text{ N}$ para um deslocamento médio máximo na ruptura de $\delta_r^- = 0,8478 \pm 0,24662 \text{ mm}$, resultando em uma tensão máxima de resistência à compressão (ruptura) de $\sigma_r^- = 118 \pm 29 \text{ MPa}$.

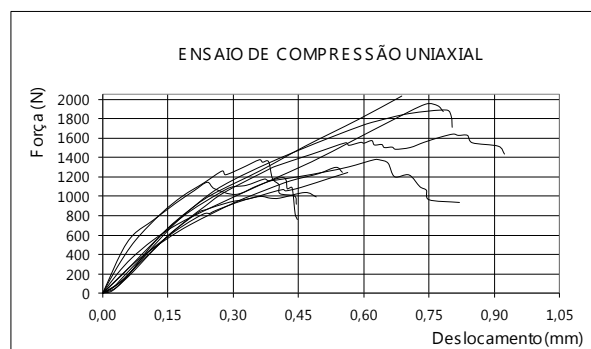


Figura 8: Resultados experimentais para os ensaios de compressão uniaxial.

A Figura 9 apresenta o gráfico carga-deslocamento transversal contendo os

resultados de 9 das 10 amostras submetidas ao ensaio de flexão de três pontos. Como resultado desse ensaio, obtém-se como carga máxima transversal $P = 21,3281 \pm 6,6328 \text{ N}$ para um máximo deslocamento transversal de $f = 0,97070 \pm 0,23701 \text{ mm}$, obtendo-se para tensão limite de resistência à flexão ou à tração na flexão (ruptura) $\sigma_f^{\dagger} = 79,98 \pm 24,873 \text{ MPa}$. (Mujika et. al., 2006; Lipetzky. et. al., 1996).

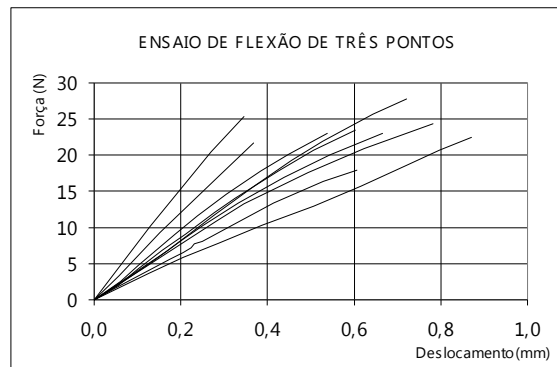


Figura 9: Resultados experimentais para os ensaios de flexão de três pontos.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores dos módulos de elasticidade na tração, compressão e flexão, obtidas nos ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos, para o cimento em estudo e calculados segundo as recomendações constantes das normas ASTM D638M-96, ASTM B695-02 e ISO 10477, respectivamente.

	Módulo de elasticidade à tração (E_t)	Módulo de elasticidade à compressão (E_c)	Módulo flexural (E_f)
Cimento Resinoso Biocompatível Cement Post (Angelus®)	1200 MPa	2550 MPa	2746 MPa

Tabela 1: Valores dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios e calculados segundo as normas específicas.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores das tensões de ruptura na tração e compressão, obtidos nos ensaios nos ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos, para o cimento em estudo e calculados segundo as recomendações constantes das normas ASTM D638M-96, ASTM B695-02 e ISO 10477, respectivamente.

	Tensão de ruptura à tração	Tensão de ruptura à compressão	Tensão de ruptura à tração obtido no

	obtido no ensaio de tração uniaxial (σ_r^+)	obtido no ensaio de compressão uniaxial (σ_r^-)	ensaio de flexão de três pontos – resistência à flexão (σ_f)
Cimento Resinoso Biocompatível Cement Post (Angelus®)	$35 \pm 3,6$ MPa	118 ± 29 MPa	80 ± 25 MPa

Tabela 2: Valores das tensões de ruptura à tração e compressão obtidos nos ensaios e calculados segundo as normas específicas.



Figura 10: Corpos de provas rompidos nos ensaios de tração, compressão (Franco, 2008).

As imagens apresentadas na Figura 10 referem-se aos corpos de provas rompidos nos ensaios de tração, compressão, enquanto as imagens apresentadas na Figura 11 referem-se a três corpos de provas rompidos nos ensaios de flexão.

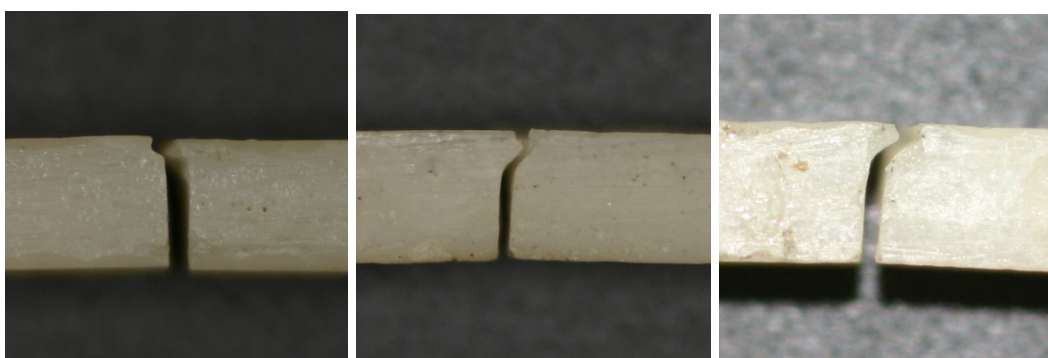


Figura 11: Corpos de provas rompidos nos ensaios de flexão (Franco, 2010).

Já a Figura 12 apresenta fotomicrografias eletrônicas de varredura de duas seções transversais de barras rompidas nos ensaios de flexão.

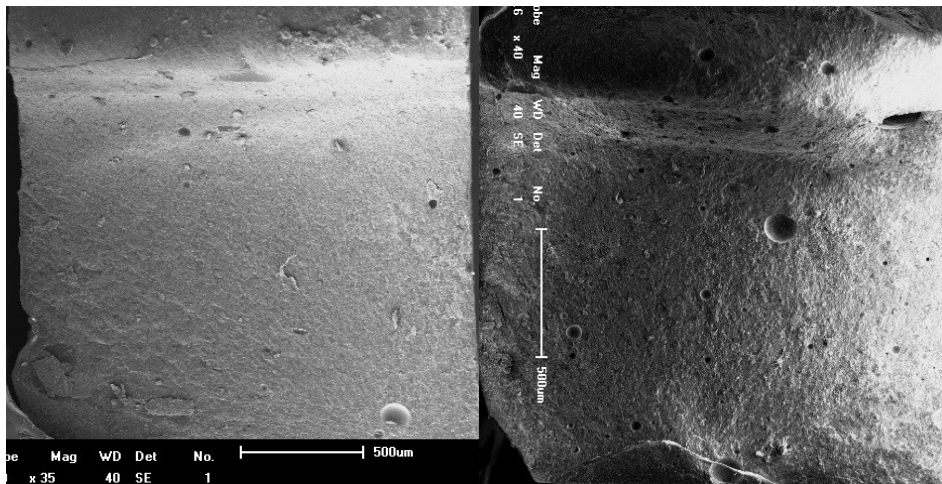


Figura 12: Fotomicrografias eletrônicas de varredura de duas seções transversais de espécimes rompidos nos ensaios de flexão com 35x e 40x de aumento (Franco, 2010).

3.2 Resultados dos ensaios de computacionais usando o MEF

Aqui se pretende apresentar os resultados obtidos para a simulação computacional (através do software ANSYS®) do ensaio de flexão de três pontos considerando-se quatro casos: 1º caso onde apenas se considera o módulo de elasticidade à tração do material; 2º caso onde apenas se considera o módulo de elasticidade à compressão do material; 3º caso onde apenas se considera o módulo de elasticidade flexural; e 4º caso onde se consideram ambos os módulos de elasticidade à tração e à compressão (modelo bimodular).

A Figura 13 apresenta em uma escala de cores a variação de tensões (σ_x) para uma seção transversal localizada a 1 mm do ponto de aplicação da carga (a fim de se evitar a concentração de tensões que ocorre na região onde o carregamento é aplicado).

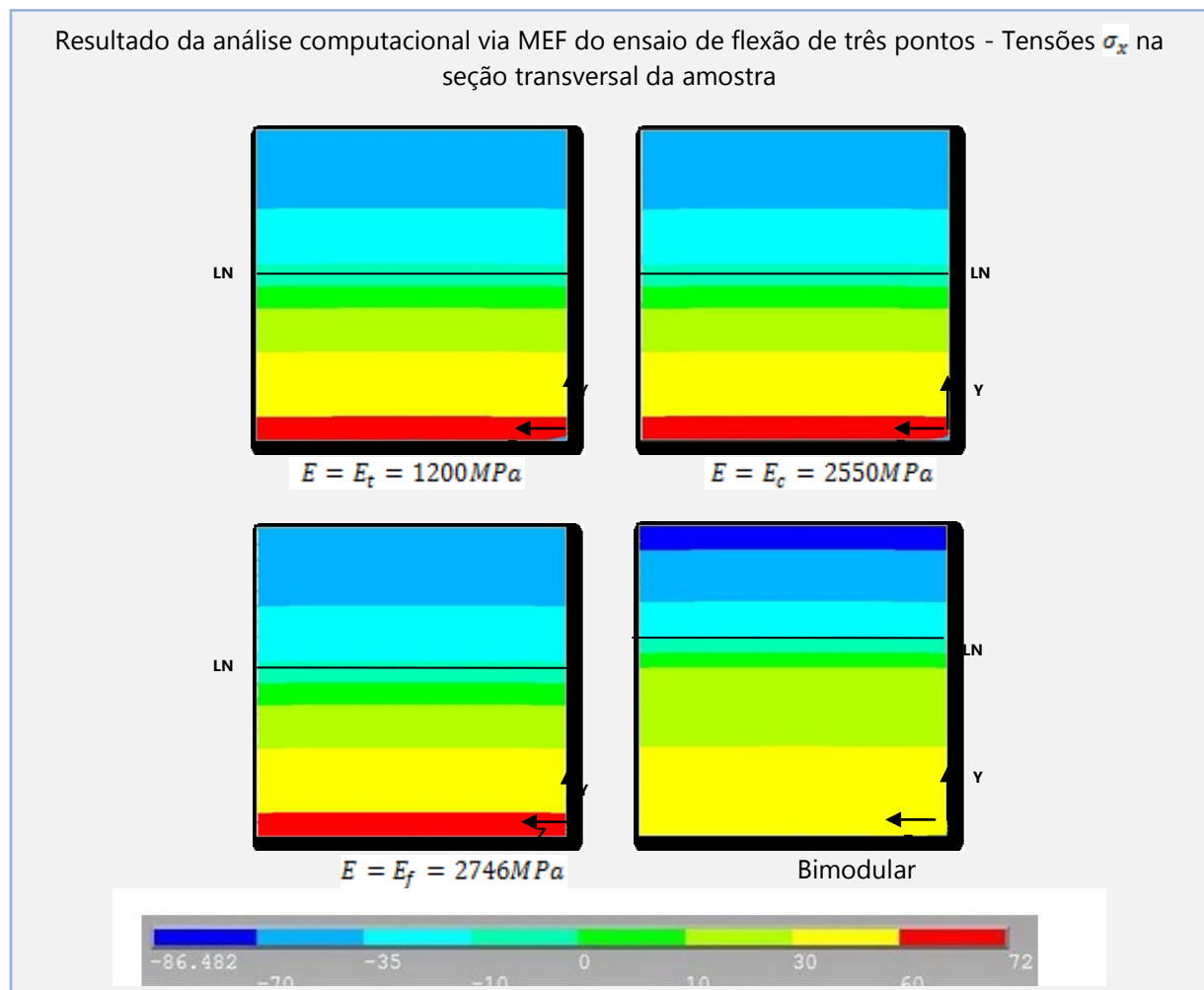


Figura 13: Resultados computacionais para o ensaio de flexão de três pontos. A primeira imagem corresponde ao caso em que foi considerado apenas o módulo de elasticidade à tração; a segunda imagem corresponde ao caso em que foi considerado apenas o módulo de elasticidade à compressão; a terceira imagem corresponde ao caso em que foi considerado apenas o módulo flexural; a quarta imagem corresponde ao caso em que foi considerada a bimodularidade.

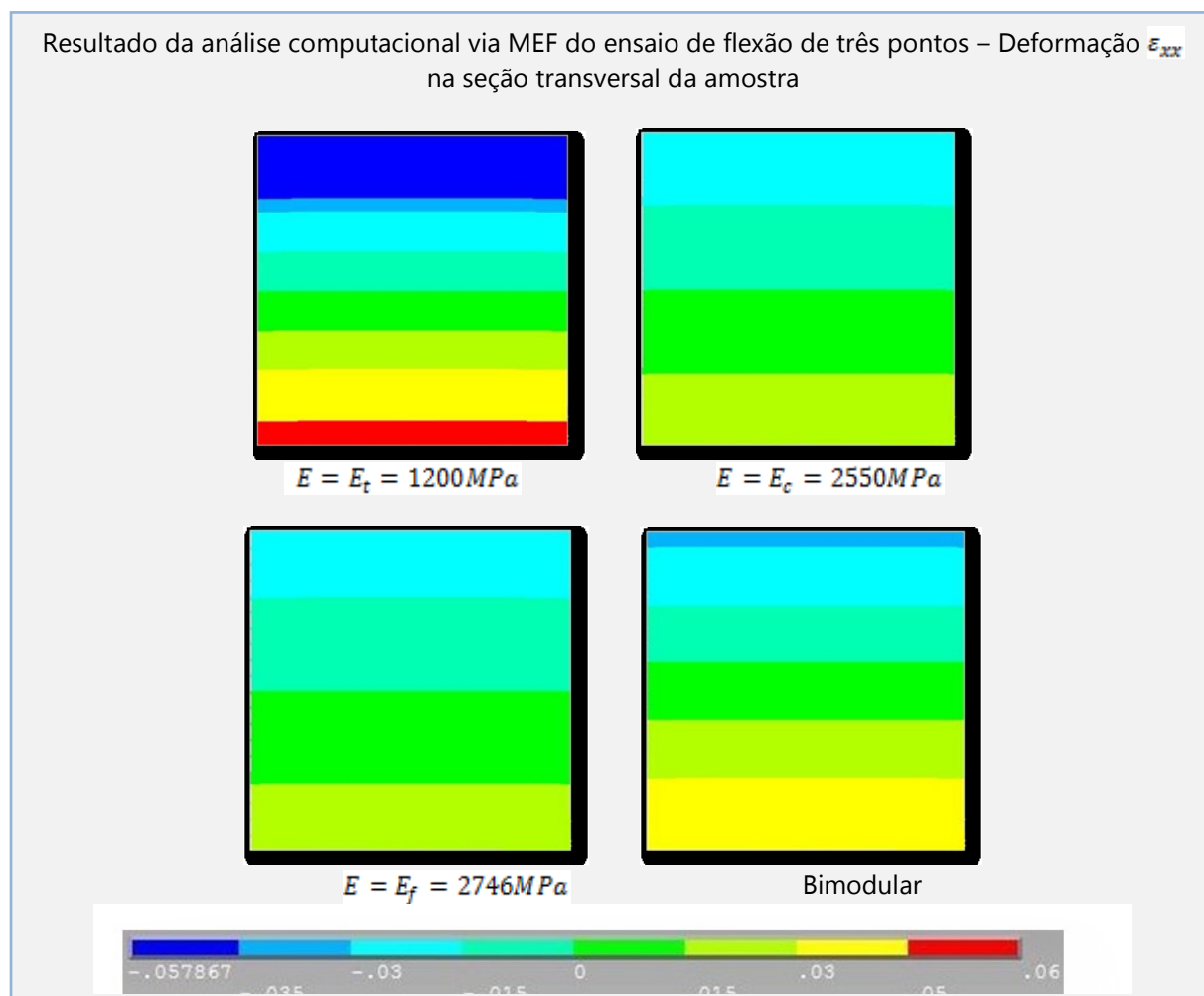


Figura 14: Resultados computacionais para o ensaio de flexão de três pontos. A primeira imagem corresponde ao caso em que foi considerado apenas o módulo de elasticidade à tração; a segunda imagem corresponde ao caso em que foi considerado apenas o módulo de elasticidade à compressão; a terceira imagem corresponde ao caso em que foi considerada a bimodularidade.

A Figura 14 mostra em uma escala de cores a variação das deformações (σ_{xx}) para uma seção transversal localizada a 1 mm do ponto de aplicação da carga.

A Tabela 3 apresenta um resumo das tensões σ_x e deformações ϵ_{xx} obtidas na simulação computacional para as quatro análises realizadas. As diferenças obtidas para as máximas tensões de tração e as máximas tensões de compressão verificadas nos dois primeiros casos decorre do erro numérico associado à análise computacional (cerca de 2,7%), pois o ponto escolhido para a obtenção do deslocamento transversal encontra-se exatamente abaixo do ponto de aplicação da carga, o que leva à referida inconsistência numérica.

	$\sigma_x^+_{max}$	$\sigma_x^-_{max}$	$\epsilon_{xx}^+_{max}$	$\epsilon_{xx}^-_{max}$
$E = E_t = 1200M$	71,248 MPa	69,353 MPa	0,057867	-0,05942
$E = E_c = 2550MPa$	71,248 MPa	69,353 MPa	0,027232	-0,027963
$E = E_f = 2746MPa$	71,248 MPa	69,353 MPa	0,025288	-0,025967

Bimodular	59,353 MPa	86,482 MPa	0,049386	-0,033965
-----------	------------	------------	----------	-----------

Tabela 3: Tensões σ_x e deformações (ε_{xx}) obtidas na simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos para os casos em que foram considerados apenas o módulo de elasticidade à tração (E_t), apenas o módulo de elasticidade à compressão (E_c), apenas o módulo de elasticidade flexural (E_f) e o bimodular.

4 DISCUSSÃO

Neste trabalho, foram utilizados ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e flexão de três pontos para a caracterização das propriedades físicas de um cimento resinoso biocompatível utilizado na odontologia. Inicialmente, apresenta-se uma interpretação qualitativa dos resultados dos ensaios realizados e dos mecanismos de fratura que são, em geral, controlados pelos micro-defeitos.

O estado de tração pura é conceitualmente uma das configurações mais simples de tensões, mas na prática pode ser difícil de alcançar pois pequenos desalinhamentos do corpo de prova durante o ensaio ou irregularidades amostra podem criar sobreposição de outras componentes de tensões (Quinn, 2007). A análise da Figura 7 permite identificar que após um pequeno trecho linear, a curva de resultados (gráficos "tensão-deformação") apresenta um trecho não linear. Esse trecho pode ser explicado como o trecho onde o corpo de prova apresenta fissuras para então, na seqüência, ser atingida a tensão de resistência ou tensão de ruptura ou tensão última à tração. Padrões de fratura de espécimes devidamente alinhados normalmente são bastante simples e o início da fratura é perpendicular ao eixo de carregamento. A Figura 10a apresenta a fotografia do corpo de prova rompido após o ensaio de tração uniaxial onde fica evidenciado o padrão de fratura perpendicular ao eixo da carga normalmente iniciando-se em um pequeno defeito ou inclusão.

A interpretação dos gráficos "força-deslocamento" dos resultados do ensaio de compressão uniaxial apresentados na Figura 8 permite identificar quatro regiões distintas: no início da aplicação da carga ocorre um pequeno trecho não linear elástico referente ao fechamento de poros e fissuras pré-existentes no corpo de prova. Na seqüência, as amostras apresentaram uma relação linear elástica seguindo para o início da destruição da amostra com o aparecimento das primeiras fissuras na amostra. Finalmente em algumas amostras aparece um quarto estágio referente ao crescimento instável das fissuras até finalmente a amostra romper. A Figura 10b apresenta a fotografia de dois corpos de prova rompidos após o ensaio de compressão uniaxial (Goodman, 1989).

O elemento básico de análise, que foi experimentalmente confirmado, é que o cimento resinoso testado neste trabalho mostrou diferentes comportamentos nos testes de tração e de compressão e, conseqüentemente, apesar da deformação axial ser, por hipótese, no teste de flexão assumida como linear com a espessura da

amostra (hipótese da teoria de vigas finas ou de Euler-Bernoulli), a tensão axial é bilinear. A diferença entre o módulo de elasticidade na tração (E_t) e compressão (E_c) faz com que a linha neutra (lugar onde os valores da tensão e da deformação são iguais a zero) se movimente e que, nesse caso, não estará no meio da amostra (Jones,1976; El – Tahan at. al.; 1989; He et. al., 2009; Lipetzky et. al., 1996).

A Figura 11 apresenta as fotografias de três corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão em três pontos. A carga de flexão cria uma distribuição de tensões internas no espécime de maneira que a tensão máxima de tração ocorre no lado oposto à aplicação da carga, ou seja, na parte inferior das fotografias mostradas na Figura 11. As tensões de tração diminuem no interior da barra até que se tornem zero na linha neutra (LN) e são equilibradas por tensões de compressão no lado oposto. No ensaio de flexão em três pontos, a tensão de tração será máxima no ponto médio do vão, justamente embaixo do ponto de aplicação da carga. Será nesse ponto que se iniciará a fratura do corpo de prova, normalmente em algum defeito, poro ou inclusão (Quinn at al, 2010). Percebe-se, nos três corpos de prova, que a fratura após iniciar-se no ponto inferior da seção, propaga-se para o interior do corpo de prova na direção do eixo neutro, formando um plano perpendicular ao eixo do espécime até encontrar o eixo neutro onde muda de direção, formando uma onda na forma de um "lábio" que é conhecido como linha de compressão ("compression curl" ou "cantilever curl"), um pouco antes da fratura total do espécime. A origem da fratura em uma superfície de fratura é oposta à linha de compressão (Quinn, 2007). A localização da linha de compressão nos três espécimes apresentados na Figura 11 permite concluir que a linha neutra não se encontra à meia altura, mas sim deslocada para a região de compressão, o que corrobora a afirmação anterior de que isso ocorre pela diferença entre os comportamentos do cimento resinoso na tração e compressão.

A análise da superfície de fratura é a principal forma para se determinar a causa da falha. A análise das superfícies fraturadas em MEV, mostradas na Figura 12, permitiram a observação de características fractográficas comumente encontrados em amostras de cerâmica (Quinn, 2007; Quinn at al, 2010). Identifica-se claramente a linha de compressão, a região tracionada e a região comprimida, conforme indicado na Figura 15a e 15b. No canto inferior direito, pode-se identificar uma bolha formando uma zona de fraqueza onde se iniciou a fratura. Ondas radiais indicam a direção de propagação da falha (representado na figura pelos traços brancos finos).

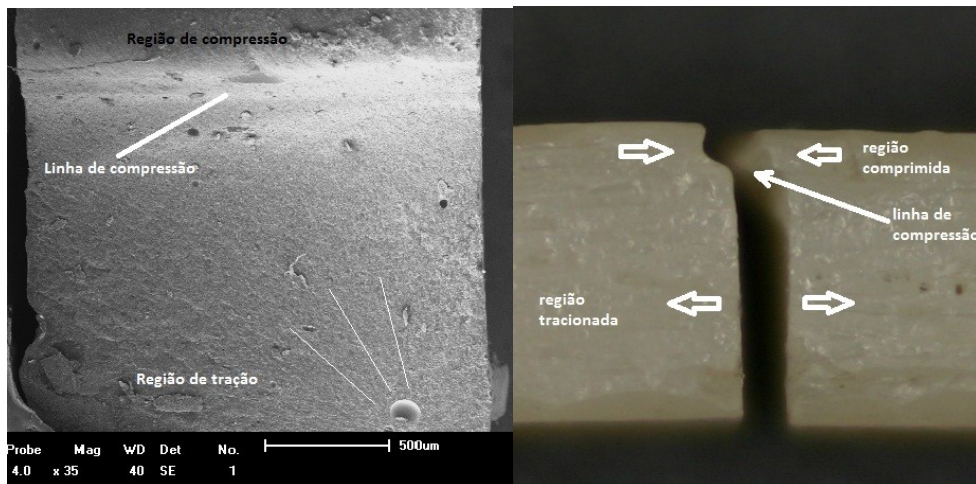


Figura 15: Corpo de prova rompido no ensaios de flexão. (Fonte: Franco,2010).

A modelagem computacional do ensaio de flexão apresentada neste trabalho procura evidenciar a importância da consideração do comportamento bimodular do material. Como salientado, a diferença entre o módulo de elasticidade na tração (E_t) e compressão (E_c) faz com que a linha neutra não esteja à meia altura, o que influenciará os valores dos módulos de elasticidade de flexão e resistência à flexão. O algoritmo proposto na Figura 6 mostrou-se capaz de detectar e modelar adequadamente um ensaio de flexão em três pontos de um material bimodular (He et al. 2009). As Figuras 13 e 14 apresentam as tensões (σ_x) e as deformações (ϵ_{xx}) para os quatro casos modelados: 1º caso - a viga em flexão foi modelada considerando que o material é elástico, isotrópico e linear, cujo módulo de elasticidade assume o valor obtido no ensaio de tração do material $E = E_t = 1200$ MPa; 2º caso - a viga em flexão foi modelada considerando que o material é elástico, isotrópico e linear, cujo módulo de elasticidade assume o valor obtido no ensaio de compressão do material $E = E_c = 2550$ MPa ; 3º caso - a viga em flexão foi modelada considerando que o material é elástico, isotrópico e linear, cujo módulo de elasticidade assume o valor obtido no ensaio de flexão do material $E = E_f = 2746$ MPa e 4º caso - a viga em flexão foi modelada considerando que o material é elástico, isotrópico e bilinear, cujo módulo de elasticidade nas regiões tracionadas assume o valor obtido no ensaio de tração do material e nas regiões comprimidas assume o valor obtido no ensaio de compressão do material. A Tabela 3 demonstra que a tensão máxima obtida na simulação numérica, na região de tração, quando se considera o material bimodular (4º caso) é de 59,353 MPa que é muito menor do que os valores obtidos tanto na simulação dos outros casos (1º, 2º e 3º casos) que é de 71,248 MPa, como do valor obtido na aplicação da Eq. (6) indicada pela norma ISO 10477 que é de 80 ± 25 MPa.

5 CONCLUSÕES

Dentro das limitações do presente trabalho é possível concluir:

1. Estudos que se aprofundem na caracterização mais detalhada dos materiais devem sempre ser realizados com a finalidade de observar o comportamento biomecânico do material a ser modelado, em especial nos modelos que utilizam o Método dos Elementos Finitos;
2. A utilização de ensaios de tração e compressão uniaxial, testes esses de fácil execução, permitiram a medida do módulo de elasticidade na tração E_t e na compressão E_c e da resistência mecânica dada pela tensão limite de linearidade na tração σ_{lin}^+ e na compressão σ_{lin}^- e tensão de ruptura na tração σ_r^+ e na compressão σ_r^- .
3. O teste de flexão apresentado na norma ISO 10477, usado para classificar materiais poliméricos de coroas dentais permite a determinação da resistência à flexão (σ_f) e do módulo de elasticidade flexural (E_f). As equações (5) e (6) propostas em tal norma e usadas para obter os resultados do teste são aplicáveis apenas a materiais que são isotrópicos, elásticos e lineares até a ruptura e com igual comportamento na tração e compressão. No entanto, tal teste é usado freqüentemente para cimentos e outros materiais compostos que têm diferentes curvas (e muitas vezes comportamento não-linear) de tensão-deformação sob carregamentos na tração e compressão. Nesse caso, tais equações não são aplicáveis devido à característica bimodular e ao comportamento da curva "tensão-deformação" não-linear.
4. A análise fractográfica mostrou-se útil na interpretação dos resultados experimentais e dos modelos computacionais, contribuindo para um melhor entendimento do comportamento bimodular do material.
5. Modelos computacionais, em especial, os modelos que utilizam o Método dos Elementos Finitos, que simulem materiais similares ao estudado no presente trabalho, em especial os cimentos resinosos, as cerâmicas e as resinas compostas, de uso comum na odontologia, além da dentina, do esmalte, da cartilagem (Willians, 2009), do osso trabecular e do osso cortical, devem considerar o comportamento bimodular do material. Ou seja, o comportamento do material nas regiões tracionadas deve levar em conta o comportamento obtido em ensaios de tração, por exemplo, o ensaio de tração uniaxial, assim como o comportamento do material nas regiões comprimidas deve levar em conta o comportamento obtido em ensaios de compressão, por exemplo, o ensaio de compressão uniaxial;
6. O algoritmo proposto na Figura 6 mostrou-se capaz de detectar e modelar adequadamente um ensaio de flexão em três pontos de um material bimodular;
7. Trabalhos envolvendo análises de elementos finitos que simulem materiais similares ao estudado no presente trabalho, em especial os cimentos resinosos, as cerâmicas e as resinas compostas, de uso comum na odontologia, e que utilizam diretamente os módulos de elasticidade obtidos em ensaios de compressão uniaxial ou ainda, flexão de três ou quatro pontos, tão comuns na literatura odontológica podem levar a resultados e conclusões errôneas por utilizar propriedades dos materiais incompatíveis com a realidade.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos que contribuíram na realização deste trabalho, em especial à UEPG, à PUC-Pr, ao Grupo de Bioengenharia da Universidade Federal do Paraná e ao Centro de Estudos de Engenharia Civil – CESEC pelo apoio e estrutura oferecidos, e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM Standards D 695 – 02a. *Standard Test Methods for Compressive Properties of Rigid Plastics*. 2002.
- ASTM Standards D 790 - 03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2003.
- Beer, F. P.; Johnston, E. R. *Resistência dos Materiais*. Pearson. 3ª Edição, 2006
- Dowling, N. E. *Mechanical Behaviour of Materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue*. Second Edition. Prentice Hall, 1998.
- El – Tahan, W. W.; Staab, G. H.; Advani, S. H.; Lee, J. K. *Structural Analysis of Bimodular Materials*. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989. v. 115. p. 963 – 981.
- Franco, A. G. O. *Análise não-linear do mecanismo de cimentação de pinos intraradiculares utilizando o método dos elementos finitos*. Dissertação de Mestrado, UEPG, 2008.
- Franco, A. G. O. *Avaliação quantitativa da interface adesiva intraradicular de três cimentos resinosos nos diferentes terços radiculares*. Tese de Doutorado em elaboração junto ao Programa de Pós Graduação em Odontologia, área de concentração Dentística Restauradora, PUC-Pr, 2010.
- Goodman, R. E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1989.
- He, X.; Chen, S.; Sun, J. *Applying the Equivalent Section Method to Solve Beam Subjected to Lateral Force and Bending-Compression Column with Different Moduli*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007. 49(1). p. 919 – 924.
- He, X.; Zheng, Z.; Sun, J.; Li, Y.; Chen, S. *Convergence analysis of a finite element method based on different moduli in tension and compression*. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. 46(1). p. 3734 – 3740.
- Hecke, M. B.; Franco, A. G. O.; Almeida, F. R.; Deon, V.; Carvalho, L. *Critério de Fratura de um Cimento Resinoso Dental Biocompatível*. Bragança, Portugal. 3º Congresso Nacional de Biomecânica. Anais do 3º Congresso Nacional de Biomecânica, 2009. v. 1. p. 169-174.
- ISO 10477. *Dentistry – Polymer-based crown and bridge materials*. International Standard, 1992. First Edition.
- ISO 4049. *Dentistry – Polymer-based filling, restorative and luting materials*. International Standard, 2000. Third Edition.
- Jones, R. *Apparent flexural modulus and strength of multimodulus materials*, *Journal of Composite Materials*, 1976, 10 pp. 342–354.
- Lipetzky, P.; Wanner, A. *On the problem of interpreting flexure experiments on semi-*

- brittle materials*. Materials Science & Engineering, 1996. A211. p. 87 – 94.
- Mujika, F.; Carbajal, N.; Arrese, A.; Mondragon, I. *Determination of Tensile and Compressive Moduli by Flexural Tests*. Polymer Testing, 2006. 25(1). p. 766 – 771.
- Quinn, J.; Quinn, G. D. *Material properties and fractography of an indirect dental resin composite*, Dental Materials, 2010, 26 pp. 589–599.
- Quinn, G. D. *Fractography of Ceramics and Glasses*. National Institute of Standards and Technology. 2007
- Timoshenko, S. *Strength of Materials*. First Edition. D. Van Nostrand Company, 1966.
- Willians, G. M.; Gratz, K. R.; Sah, R. L. *Asymmetrical strain distribution and neutral axis location of cartilage in flexure*. Journal of Biomechanics, 2009. 42(1). p. 325 – 330.