

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLUSÃO DE *BRACKETS* NOS ENSAIOS DE FLEXÃO DE FIOS ORTODÔNTICOS: UM ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO

E. A. Ferreira¹, C. A. Cimini Jr.², E. B. Las Casas³, N. F. Rilo⁴

¹Prof. Visitante, Centro Universitário de Vila Velha, UVV, Brasil

²Prof. Adjunto, Departamento de Projeto Mecânico, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil

³Prof. Titular, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil

⁴Prof. Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, UC, Portugal



RESUMO

Neste artigo, são apresentados e comparados os resultados de forças produzidas por fios ortodônticos de aço inoxidável obtidos em simulações numéricas e testes experimentais. Foram adotados diferentes esquemas para a simulação numérica e para a análise experimental. Os procedimentos de testes dos fios foram realizados como indicado pela norma ISO 18541/2006 e acrescentando dois ou três brackets como suportes. Após a validação do modelo de elementos finitos, uma série de estudos paramétricos foi realizada com o objetivo de se conhecer o comportamento mecânico dos fios em diferentes situações. Os resultados trazem importantes informações acerca da rigidez dos fios e dos aparelhos ortodônticos.

1 - INTRODUÇÃO

A partir dos anos oitenta houve crescente interesse na comparação de propriedades de fios ortodônticos, já que nessa época foram introduzidas várias opções de fios para uso nos tratamentos das posições dentais. O aço inoxidável era o material tradicionalmente utilizado, desde os anos quarenta. Nos anos setenta surgiram os fios de ligas de níquel titânio e os fios de liga de titânio-molibdênio (Gurgel et al., 2001; Gravina et al., 2004).

Atualmente já estão comercialmente disponíveis fios de materiais compostos

reforçados com fibras de vidro, que prometem mimetizar as propriedades dos fios de aço inoxidável através da variação de sua fração volumétrica. Esse tipo de fio pode atingir um sucesso imediato devido a sua excelência estética, exigência cada vez mais presente nos tratamentos ortodônticos.

Devido à grande variabilidade de fios já disponíveis e também à grande expectativa de evoluções importantes nos próximos anos, estudos comparativos para os fios atualmente disponíveis são de muito interesse. Dessa forma, acredita-se que as propriedades dos fios de aço inoxidável

ainda continuarão por um período razoável como referência.

Com respeito às normas para testes dos fios utilizados em Ortodontia, a pioneira foi a norma da American Dental Association ADA 32 (1977). Depois dela, apesar da grande quantidade de trabalhos sugerindo mudanças para uma melhor adequação dos testes às condições do interior da cavidade oral, apenas em 2006 foi publicada a ISO 15841 (2006) que modificou os padrões de testes para fios ortodônticos.

Apesar dos trabalhos realizados utilizando a antiga norma ADA 32 (1977) como referência ainda serem atualmente muito úteis no processo de seleção de fios ortodônticos, torna-se eminente a necessidade de comparações dos fios à luz das normas atuais. Além disso, apesar da grande quantidade de trabalhos sobre fios publicada nos últimos anos, pouco se sabe sobre a força produzida por cada fio em cada situação. Mesmo quando essa informação está disponível, poucas condições de comparação são oferecidas, já que os estudos apresentam resultados em condições diferentes daquelas prescritas pela norma ISO 15841 (2006), sendo raros aqueles que fazem referência a resultados com o tipo de ensaio recomendado por essa norma.

Tendo em vista a necessidade de se conhecer melhor os fios ortodônticos disponíveis, foram realizados neste trabalho estudos experimentais e numéricos com a finalidade de investigar o comportamento desses fios quando testados segundo a norma ISO 15841 (2006). Pretende-se ainda verificar, através da versatilidade e praticidade do método dos elementos finitos, a influência de diversos fatores na rigidez à deflexão desses fios ortodônticos, tais como a inclusão de *brackets* com suas respectivas variações geométricas e de material.

2 - METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, foram cumpridas etapas

experimentais e de simulação numérica descritas a seguir.

2.1- Experimentos Laboratoriais: Parte I

Nesta etapa foram testados fios de aço inoxidável (Remanium[®]) da Dentauro. As dimensões das seções transversais dos fios utilizados foram de 0,41 mm x 0,41 mm, 0,41 mm x 0,56 mm, 0,46 mm x 0,64 mm e 0,48 mm x 0,64 mm.

O primeiro esquema de testes realizado seguiu as especificações da norma ISO 15841 (2006) para fios ortodônticos, cuja montagem é apresentada na Figura 1. Os ensaios foram realizados em uma Máquina Universal de ensaios mecânicos *Shimadzu Autograph AG-1*, com capacidade para 1 KN.

A resistência à flexão dos fios foi obtida a partir do diagrama de força de flexão vs. deflexão, pelo cálculo da inclinação da porção reta da curva, obtida em ensaios de flexão, denominada rigidez do fio.

Os fios foram testados, à temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e flexionados até apresentar um mínimo de deflexão permanente de 0,1 mm. A deflexão máxima de 1 milímetro foi estabelecida para todos os fios testados.

Outras características dos testes em flexão dos fios ortodônticos foram: (a) a máquina de ensaios foi ajustada para uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 1 mm/min; (b) as amostras de fios foram cortadas com comprimento de 35 mm; (c) o fio foi submetido a teste de flexão simétrica em três pontos; (d) o segmento de fio entre os suportes (vão entre os apoios) foi de 10 mm; (e) a flexão foi realizada com uma ponteira localizada na metade do segmento de fio e (f) o raio das extremidades dos apoios e da ponteira foi de 0,10 mm.

A fim de se obter a relação força por unidade de comprimento de cada fio ortodôntico. Para cada dimensão testada foram realizadas cinco réplicas para cada teste e obtidos a média e o desvio padrão para cada fio.

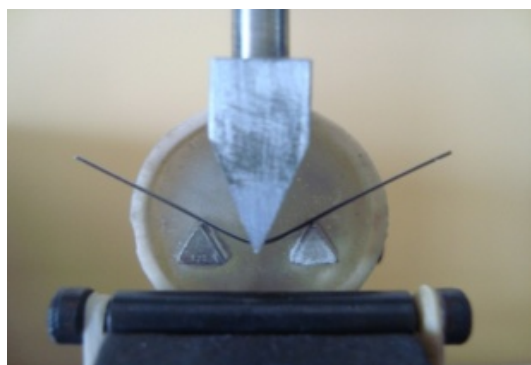


Fig. 1 - Montagem conforme da norma ISO 15841 (2006)

2.2- Simulações - Parte I

Os procedimentos para as simulações numéricas consistiram na realização de análises pelo método dos elementos finitos, utilizando-se modelos adequados, visando obter a relação força/deflexão para cada fio testado.

Nesta etapa, foi utilizado um modelo bidimensional representativo do ensaio da norma ISO 15841 (2006). Cada dimensão de fio testada em laboratório foi também utilizada nas simulações numéricas. As análises foram realizadas utilizando a plataforma comercial de elementos finitos ADINA® (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*) versão 8.5.

A Figura 2 mostra o modelo utilizado para simulações na norma ISO 15841 (2006). Foram utilizados 1500 elementos quadriláteros planos com 9 nós. A hipótese de estado plano de tensões foi considerada em todas as simulações para representar o problema tridimensional em duas dimensões. Foi utilizado, como material, o aço inoxidável, com módulo de elasticidade de 170 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Hipóteses de contato foram adotadas na região dos apoios de forma a melhor representar a interação fio-apoio.

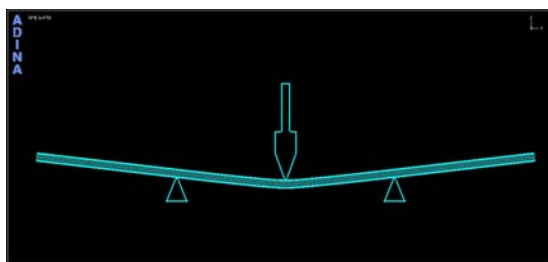


Fig. 2 - Modelo representando montagem da norma ISO 15841 (2006)

2.3- Simulações - Parte II

Para abranger os valores de resistência dos fios no intervalo de tolerância estabelecido pela norma ISO 15841 (2006) foram feitas simulações variando-se as dimensões das secções transversais dos fios em $\pm 0,01$ mm e do módulo de elasticidade dos materiais em $\pm 10\%$.

A Tabela 1 mostra os códigos para cada uma das dimensões utilizadas para os fios, considerando a dimensão nominal $\pm 0,01$ mm.

Tabela 1 - Códigos das dimensões utilizadas

Dimensões do fio (mm)	Código
(nominal-0,01) x (nominal-0,01)	D1
(nominal-0,01) x (nominal)	D2
(nominal-0,01) x (nominal+0,01)	D3
(nominal) x (nominal-0,01)	D4
nominal x nominal	D5
nominal x (nominal+0,01)	D6
(nominal+0,01) x (nominal-0,01)	D7
(nominal+0,01) x (nominal)	D8
(nominal+0,01) x (nominal+0,01)	D9

A Tabela 2 mostra os códigos das simulações realizadas para cada dimensão de fio, utilizando como exemplo o fio de dimensões 0,41 mm x 0,41 mm. O subscrito “a” nos códigos corresponde a “aço inoxidável”, único material considerado. Os subscritos D1 a D9 correspondem às variações de $\pm 0,01$ mm na dimensão nominal (Tabela 1) utilizadas para as seções transversais dos fios. A utilização dos subscritos “+” e “-” representa as variações de +10% e -10% no valor do módulo de elasticidade do aço inoxidável, respectivamente.

De acordo com a Tabela 2, então, a simulação S_{aD1} é aquela correspondente ao fio de aço inoxidável de dimensão 0,40 mm x 0,40 mm e com o módulo de elasticidade nominal, sem variação. As simulações S_{aD1+} e S_{aD1-} representam então

Tabela 2 - Códigos das simulações realizadas dentro da tolerância da norma ISO 15841 (2006) para o fio de aço 0,41 mm x 0,41 mm

Dimensões do fio (mm)	Módulo de Elasticidade do Aço Inoxidável		
	-10%	$E_{AÇO}$	+10%
0,40 x 0,40	S_{aD1-}	S_{aD1}	S_{aD1+}
0,40 x 0,41	S_{aD2-}	S_{aD2}	S_{aD2+}
0,40 x 0,42	S_{aD3-}	S_{aD3}	S_{aD3+}
0,41 x 0,40	S_{aD4-}	S_{aD4}	S_{aD4+}
0,41 x 0,41	S_{aD5-}	S_{aD5}	S_{aD5+}
0,41 x 0,42	S_{aD6-}	S_{aD6}	S_{aD6+}
0,42 x 0,40	S_{aD7-}	S_{aD7}	S_{aD7+}
0,42 x 0,41	S_{aD8-}	S_{aD8}	S_{aD8+}
0,42 x 0,42	S_{aD9-}	S_{aD9}	S_{aD9+}

às variações de +10% e -10%, respectivamente, no valor nominal do módulo de elasticidade do aço inoxidável para essa mesma dimensão. Observar que para todas as situações analisadas, S_{aD5} corresponde às dimensões e módulos nominais sem as variações consideradas.

2.4- Experimentos Laboratoriais: Parte II

O segundo esquema de testes realizado considerou a inclusão de dois e três *brackets* nos ensaios como apoios para fios ortodônticos. Foram ensaiados fios com as mesmas dimensões das seções transversais anteriormente utilizadas, ou seja, 0,41x0,41 mm, 0,41x0,56 mm, 0,46x0,64 mm e 0,48x0,64 mm.

Os *brackets* utilizados foram os auto ligáveis (Discovery[®] SL) da Dentaurum, para incisivos inferiores da prescrição Roth, com *slot* de 0,56 mm de altura e 0,71 mm de largura. (0,022" x 0,028").

As montagens para dois e três *brackets* podem ser visualizadas respectivamente nas figuras 3a e 3b. Os fios foram novamente testados à temperatura ambiente (23±2°C) e a uma velocidade de ensaio de 1 mm/min. A rigidez à flexão foi expressa em N/mm, tendo sido calculada pela divisão do valor da carga pela deflexão medida na porção linear dos diagramas obtidos pelo programa comer-

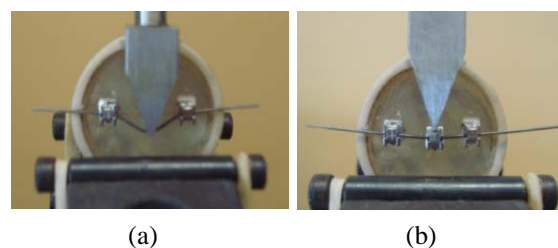


Fig. 3 - Montagens com: (a) dois *brackets* e (b) três *brackets*

cial TRAPEZIUM II, gerados diretamente dos ensaios.

A fim de se obter a relação força por unidade de comprimento para cada fio ortodôntico e cada dimensão testados, foram realizadas cinco réplicas para cada teste e obtidas as médias para cada fio.

2.5- Simulações - Parte III

Nesse grupo de simulações foram incluídos modelos com dois e três *brackets* no domínio, representando o segundo grupo de ensaios. Assim, para a inclusão de dois *brackets*, os apoios no modelo original (Figura 2) foram representados por superfícies de contato rígidas. Esse modelo é mostrado na Figura 4. A seguir foi incluído um terceiro *bracket* nesse último modelo, no ponto de aplicação de carga (Figura 5). Ambos os modelos, baseados no original, possuem 1500 elementos quadriláteros planos com 9 nós cada.

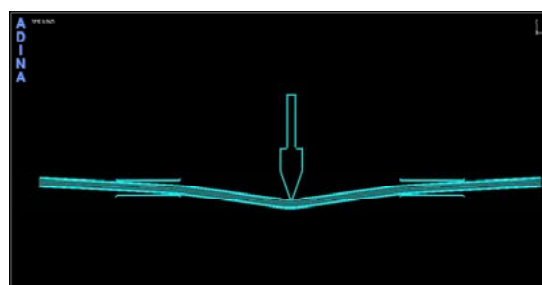


Fig. 4 - Modelo com 2 *brackets* como apoios laterais

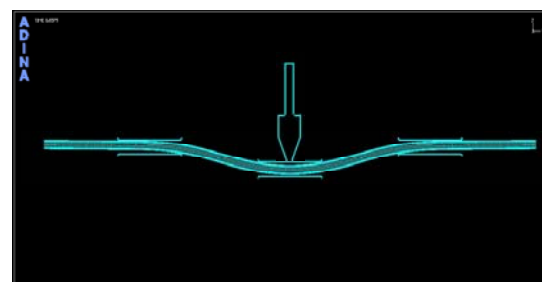


Fig. 5 - Modelo com 3 *brackets* (dois como apoios laterais e o terceiro no ponto de aplicação da carga)

2.6- Simulações - Parte IV

Nesta etapa efetuou-se uma série de estudos paramétricos com a finalidade de investigar a influência dos seguintes fatores na rigidez do fio sob flexão:

- variação da altura dos *slots* dos *brackets*;
- variação da largura dos *brackets*;
- variação do coeficiente de atrito entre os fios e os *brackets*;
- variação do modelo dos *brackets*.

As variações dos parâmetros de altura e largura dos *brackets* seguiram a disponibilidade dos *brackets* no mercado, fabricados pela Dentaurem. As alturas dos *brackets* utilizadas foram de 0,56 mm e 0,46 mm, e as larguras foram de 2,4 mm, 3,0 mm e 3,6 mm.

Nesse estudo paramétrico, além do aço inoxidável, foi acrescentado o material TMA (Titanium-Molybdenum Alloy) para os fios, correspondente à liga titânio-molibdênio também muito utilizada na prática clínica. Foram obtidos do trabalho de Baggio, Telles e Domiciano (2007) os coeficientes de atrito entre esses materiais de fio e os materiais aço e porcelana para os *brackets* (Tabela 3).

Tabela 3 - Coeficientes de atrito utilizados nas simulações das diferentes combinações *bracket*-fio (Bággio, Telles C.S. e Domiciano, 2007)

<i>Bracket</i>	Aço (A)	Porcelana (P)
Fio de Aço (A)	0,134	0,225
Fio de TMA (T)	0,248	0,270

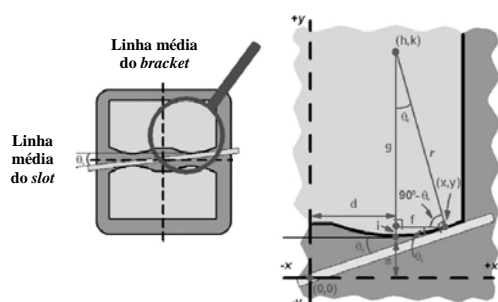


Fig. 6 - Esquema da geometria dos *brackets* com superfícies arredondadas (modificado de Thorstenson e Kusy, 2004)

Os modelos de *brackets* utilizados foram o *bracket* simples, o *bracket* geminado e o *bracket* com superfícies arredondadas. As geometrias dos *brackets* simples e geminado foram obtidas diretamente do catálogo do fabricante (Dentaurem) e a geometria dos *brackets* com superfícies arredondadas do trabalho de Thortensen e Kusy (2004) como mostra esquematicamente a Figura 6.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Resultados para experimento e simulação da montagem segundo a norma ISO 15481

Foram obtidos resultados experimentais conforme a norma ISO 15841 (2006) para cada fio testado em primeira e segunda ordem. A primeira ordem corresponde ao maior momento de inércia de flexão da seção retangular do fio, enquanto que a segunda ordem corresponde ao menor. Um exemplo dos diagramas obtidos como resultado dos ensaios de flexão é mostrado na Figura 7 para o fio 0,41 mm x 0,56 mm.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e as simulações para a montagem da norma ISO 15481 (2006) para flexão em três pontos de fios de aço inoxidável com dimensões de 0,41x0,41 mm, 0,41x0,56 mm, 0,46x0,64 mm e 0,48x0,64 mm em segunda ordem.

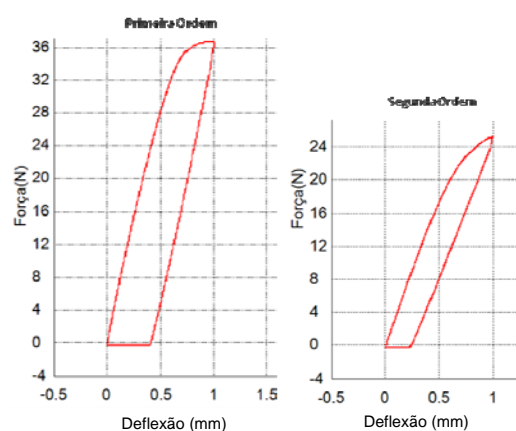


Fig. 7 - Força de flexão em função da deflexão do ponto médio para o fio de aço inoxidável 0,41 mm x 0,56 mm - Primeira ordem (maior inércia) e segunda ordem (menor inércia)

Tabela 4 - Rigidez obtida para ensaios de flexão em três pontos segundo montagem da norma ISO 15841 (2006) para fios de aço inoxidável ($E=170$ GPa) em segunda ordem

Dimensões do fio (mm)	Experimento (N/mm)	Simulação (N/mm)	δ (%)
0,41 x 0,41	18,89 ($\pm 0,05$)	19,80	4,8
0,41 x 0,56	23,73 ($\pm 0,08$)	26,85	10,6
0,46 x 0,64	35,96 ($\pm 0,12$)	42,97	19,5
0,48 x 0,64	43,48 ($\pm 0,10$)	48,74	12,1

Observa-se na Tabela 4 o baixo nível de dispersão nos valores medidos, indicando uma alta reprodutibilidade nos ensaios e uma consistente homogeneidade no comportamento mecânico dos fios.

Os dados da Tabela 4 são apresentados na Figura 8, juntamente com os resultados das simulações numéricas, onde se observa que as mesmas conseguiram captar as tendências apresentadas pelos resultados dos experimentos. No entanto, as estimativas das simulações resultaram em valores de rigidez superiores aos experimentalmente medidos, dessa forma não favoráveis à segurança. Assim a rigidez estimada excede à rigidez medida, o que poderia dar ao clínico uma falsa impressão de rigidez.

Além disso, as diferenças ficaram além do esperado, se situando na faixa entre 4,8% e 19,5%. Essas diferenças são consideráveis em se tratando de esforços aplicados sobre dentes e devem ser avaliadas cuidadosamente na prática clínica.

De acordo com os resultados obtidos, valores diferentes poderiam ser utilizados para representar a rigidez (N/mm) de cada fio. Resta saber qual desses valores se aproxima mais do valor esperado e representa melhor a liga e a dimensão do fio.

3.2- Resultados para simulação incluindo variações das dimensões e do módulo de elasticidade dentro da tolerância da norma ISO 15481

Utilizando-se a versatilidade e a praticidade do método dos elementos finitos, rea-

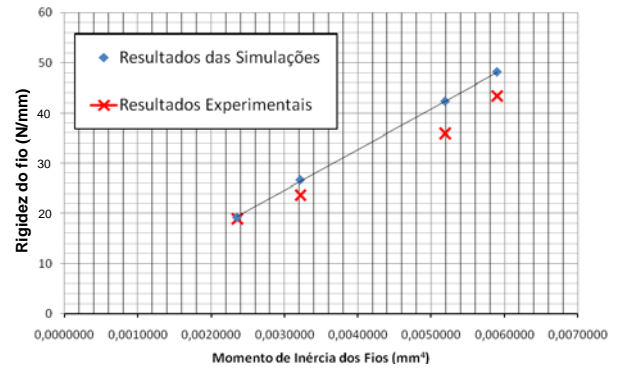


Fig. 8 – Resultados das simulações numéricas e dos procedimentos experimentais para o fio de aço inoxidável de 0,41 mm x 0,41 mm ($E=170$ GPa)

lizou-se um estudo paramétrico por simulação, considerando variações dos valores das dimensões transversais dos fios e dos módulos de elasticidade dentro dos limites toleráveis pela norma ISO 15481 (2006), de $\pm 0,01$ mm para cada dimensão do fio e de $\pm 10\%$ para o módulo de elasticidade.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para o fio de 0,41 mm x 0,41 mm, como exemplo. Observa-se que os resultados apresentam variações $-20,86\%$ e $+17,58\%$, respectivamente para o valor mínimo (15,67 N/mm) e o valor máximo (23,28 N/mm) com relação ao valor nominal de 19,80 N/mm (S_{aD5} na Tabela 2).

Tabela 5 - Rigidez obtida para ensaios de flexão em três pontos segundo montagem da norma ISO 15841 (2006) para fios de aço inoxidável de 0,41 mm x 0,41 mm com variação nas dimensões e no módulo de elasticidade

Dimensões do fio (mm)	Simulações Numéricas (Aço Inoxidável)		
	E=153 (GPa) -10%	E=170 (GPa)	E=187 (GPa) +10%
0,40 x 0,40	15,67	17,41	19,15
0,40 x 0,41	16,06	17,84	19,63
0,40 x 0,42	16,45	18,28	20,11
0,41 x 0,40	16,87	18,75	20,62
0,41 x 0,41	17,29	19,80	21,14
0,41 x 0,42	17,72	19,68	21,65
0,42 x 0,40	18,14	20,15	22,17
0,42 x 0,41	18,59	20,66	22,72
0,42 x 0,42	19,04	21,16	23,28

Segundo ainda a Tabela 5, a influência apenas da variação das medidas da bitola do fio no valor da rigidez nominal simulada de 19,80 N/mm, mantendo constante o valor do módulo de elasticidade nominal (170 GPa), ficou na faixa de -12,07% a +6,87%, correspondendo respectivamente aos valores mínimo (17,41 N/mm) e máximo (21,16 N/mm) dessa variação. Por outro lado, a influência apenas da variação do valor do módulo de elasticidade dos fios com bitola nominal de 0,041 mm x 0,041 mm ficou na faixa de -12,68% a +6,77%, correspondendo aos valores mínimo (17,29 N/mm) e máximo (21,14 N/mm), respectivamente.

3.3- Influência da inclusão de brackets nos experimentos e simulações

Com relação aos experimentos com dois e três brackets, pode-se notar que a inclusão tanto de dois quanto de três brackets aumentou os esforços medidos para as mesmas deflexões.

A Figura 9 mostra um exemplo dos diagramas obtidos nos ensaios de flexão para o fio de aço inoxidável de 0,48 mm x 0,64 mm, considerando a montagem conforme a norma ISO 15841 (2006) (Figura 9a), para dois brackets (Figura 9b) e três brackets (Figura 9c) incluídos no sistema, todos com slot de 0,56 mm de altura e 0,71 mm de largura.

Observa-se que a força máxima medida no ensaio de flexão em três pontos para o sistema original (28 N) aumenta em 86% com a inclu-

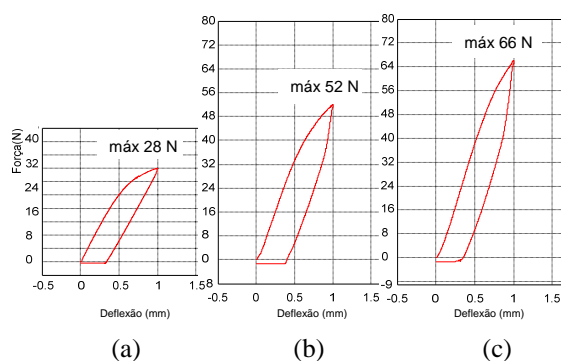


Fig. 9 - Resultados experimentais para fio de aço inoxidável 0,48 mm x 0,64 mm: (a) montagem conforme a norma ISO 15841 (2006), (b) com dois brackets e (c) com três brackets, com slot de 0,56 mm de altura e 0,71 mm de largura

ção de dois brackets (52 N) e em 136% com a inclusão de três brackets (66 N) nesse caso específico.

3.4 - Influência da variação da altura dos slots do bracket

As simulações incluindo a variação da altura dos slots do bracket mostraram um efeito direto nos esforços estimados para a deflexão do fio. A utilização do bracket de 0,46 mm em substituição ao de 0,56 mm (redução da altura) aumentou os valores dos esforços estimados em até 15% no caso do fio de 0,41 mm x 0,56 mm. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos. A Figura 10 apresenta, como exemplo das simulações, as forças de reação nos brackets centrais de alturas diferentes para o sistema com três brackets com fio de 0,41 mm x 0,41 mm.

Tabela 6 - Rigidez obtida para simulações de flexão em três pontos com brackets de alturas de 0,46 mm e de 0,56 mm

Dimensões do fio (mm)	Altura do bracket	
	0,46 mm (N/mm)	0,56 mm (N/mm)
0,41 x 0,41	36,14	31,55
0,41 x 0,56	52,95	46,22
0,46 x 0,64	(*)	79,69
0,48 x 0,64	(*)	97,30

(*) altura do slot menor ou igual à dimensão do fio

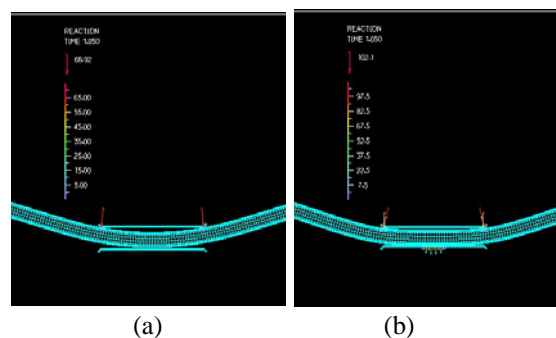


Fig. 10 - Forças de reação dos brackets centrais nas simulações numéricas para o fio 0,41 mm x 0,41 mm nos brackets de alturas (a) 0,46 mm e (b) 0,56 mm.

3.5 - Influência da variação da largura do bracket

Embora seja freqüente, na literatura a afirmação de que a variação das distâncias

entre os *brackets* influencia diretamente os esforços gerados pelos fios sobre os dentes, poucos estudos se preocupam com a largura dos *brackets* neste contexto.

Deve-se, então, chamar a atenção, por exemplo, para as alterações que ocorrem quando em testes de fios ortodônticos se varia a largura dos *brackets*. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para a variação desse parâmetro. Observa-se um aumento da rigidez do aparelho com o aumento da largura dos *brackets* de até 100% para o caso do fio de 0,48 mm x 0,64 mm.

Tabela 7 - Rigidez obtida para simulações de flexão em três pontos com *brackets* de larguras de 2,4 mm, 3,0 mm e 3,6 mm

Dimensões do fio (mm)	Largura do <i>bracket</i>		
	2,4 mm (N/mm)	3,0 mm (N/mm)	3,6 mm (N/mm)
0,41 x 0,41	23,33	31,55	41,88
0,41 x 0,56	33,74	46,22	61,47
0,46 x 0,64	60,45	79,69	107,58
0,48 x 0,64	68,11	97,30	136,22

3.6- Influência do material (coeficiente de atrito) entre o *bracket* e o fio

Com o objetivo de se verificar a influência do atrito entre o *bracket* e o fio na rigidez à flexão do fio, quatro combinações de *brackets* e fios foram simuladas (Tabela 3). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos. Verificou-se que para uma mesma geometria, os esforços aumentam com o aumento do coeficiente de atrito entre os materiais. Assim, a rigidez foi maior para o par *bracket* de porcelana e fio de TMA (PT), seguido sucessivamente pelos pares *bracket* de aço e fio de TMA (AT), *bracket* de porcelana e fio de aço (PA) e, por fim, *bracket* de aço e fio de aço (AA). O uso do par *bracket* de porcelana e fio de TMA pode incrementar a rigidez em até 28% quando comparado com o par *bracket* de aço e fio de aço.

Tabela 8 - Rigidez obtida para simulações de flexão em três pontos com diferentes coeficientes de atrito (μ) entre os materiais do fio e do *bracket*: aço (A), porcelana (P) e liga de titânio-molibdênio TMA (T)

Dimensões do fio (mm)	Materiais e coeficientes de atrito			
	AA	PA	AT	PT
	$\mu =$ 0,134 (N/mm)	$\mu =$ 0,225 (N/mm)	$\mu =$ 0,248 (N/mm)	$\mu =$ 0,270 (N/mm)
0,41 x 0,41	31,55	39,60	40,05	40,24
0,41 x 0,56	46,22	58,01	58,67	58,95
0,46 x 0,64	79,69	100,02	101,16	101,64
0,48 x 0,64	97,30	122,13	123,51	124,10

3.7 - Influência do modelo do *bracket*

Com relação aos três modelos de *brackets* utilizados na simulação numérica, nenhuma diferença foi encontrada entre os *brackets* simples e os geminados. No entanto, foi verificada uma importante redução (até 55% para o fio de 0,41 mm x 0,41 mm) na rigidez simulada com o uso de *brackets* com paredes arredondadas ao invés de planas (simples e geminados). A Tabela 9 mostra os resultados obtidos e a Figura 11 mostra um exemplo dessa simulação.

Tabela 9 - Rigidez obtida para simulações de flexão em três pontos com *brackets* de desenhos distintos

Dimensões do fio (mm)	Desenho do <i>bracket</i>	
	Paredes planas (N/mm)	Paredes arredondadas (N/mm)
0,41 x 0,41	31,55	14,07
0,41 x 0,56	46,22	25,42
0,46 x 0,64	79,69	42,87
0,48 x 0,64	97,30	52,15

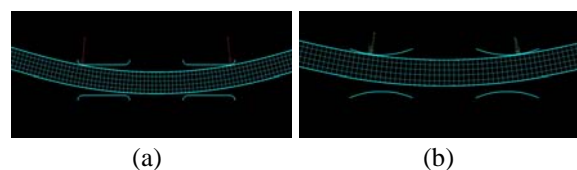


Fig. 11 - Forças de reação dos *brackets* (a) geminados planos e (b) geminados curvos para simulações numéricas com fio 0,41 mm x 0,41 mm

4 - CONCLUSÕES

Diante dos resultados de procedimentos experimentais e de simulações numéricas obtidos e comparados, pode-se concluir que uma forma mais adequada de se representar a rigidez dos fios é através de intervalos de valores dentro dos limites toleráveis da norma e não por valores isolados como a maioria dos estudos prévios apresenta.

Os modelos numéricos utilizados apresentaram correlação satisfatória com os resultados experimentais, demonstrando a adequação da metodologia ao estudo.

A comparação dos resultados numéricos e experimentais de diferentes esquemas de ensaio de flexão em três pontos (sem *brackets*, com dois *brackets* e com três *brackets*) auxiliou na quantificação do efeito da inclusão de dois e três *brackets* no sistema e demonstrou que o uso dos *brackets* nos experimentos e nas simulações resultou em esforços mais elevados do que aqueles previstos pela norma ISO 15841 (2006) (sem *brackets*).

Quanto à influência da variação da altura do *bracket*, verificou-se o aumento das forças em até 15% quando se diminuiu a altura dos *brackets*.

Em relação à influência da variação da largura do *bracket* observou-se que o aumento da largura acarreta um aumento nas forças produzidas pelos fios que pode chegar a 100% nos casos estudados.

Com respeito à influência do contato (coeficiente de atrito) entre o material do *bracket* e do fio, conclui-se que o aumento do coeficiente de atrito resultou em um aumento das forças medidas nos fios sob flexão, seguindo a ordem crescente de esforços: *bracket* de aço e fio de aço, *bracket* de aço e fio de TMA, *bracket* de porcelana e fio de aço e *bracket* de porcelana e fio de TMA. Esse aumento pode chegar a 28% para os pares fio-*bracket* estudados.

Quando foi analisado o modelo dos *brackets*, verificou-se que o uso de *brackets* simples e geminados (paredes planas) não apresentou variação na rigidez do sistema. No entanto, o uso de *brackets* de paredes

arredondadas proporcionou um aumento da rigidez do sistema de até 55%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à agência de fomento brasileira CAPES que possibilitou a cooperação internacional através da concessão de verbas para financiamento de viagens e estadias.

Agradecem ainda ao Prof. José Domingos Moreira da Costa do Laboratório de Mecânica Estrutural da Universidade de Coimbra, que gentilmente cedeu equipamentos e mão-de-obra para apoio na campanha de ensaios mecânicos.

Por fim, os demais autores gostariam de prestar uma homenagem póstuma ao colega e co-autor, Prof. Nuno Ferreira Rilo, de quem foram prematuramente privados da agradável convivência, profícua parceria e a leal amizade. Dedicamos esse trabalho à sua memória que contou com sua decisiva participação.

REFERÊNCIAS

- ADA 32 - Specification No. 32 for orthodontic wires not containing precious metals, American Dental Association, 1977.
- Bággio, P.E., Telles C.S., Domiciano J.B. Avaliação do atrito produzido por braquetes cerâmicos e de aço inoxidável, quando combinados com fios de aço inoxidável. Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial, 12(1):67-77, 2007.
- Gravina, M.A., Motta, A.T.S., Almeida, M.A.O., Quintão, C.C.A. Fios ortodônticos: propriedades mecânicas relevantes e aplicação clínica. Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial, 9(1):113-128, 2004.
- Gurgel, J.A., Ramos, A.L., Kerr, S.D. Fios ortodônticos. Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial, 6(4):103-114, 2001.
- ISO 15841 - Dentistry wires for use in orthodontics, International Organization for Standardization, 2006.
- Thorstenson. G.A, Kusy R.P. Resistance to sliding of orthodontic brackets with bumps in the slot floors and walls: effects of second-order angulation. Dental Materials, 20(9):881-892, 2004.