

# Tenacidade à fratura e resistência mecânica do osso cortical bovino

**Maria de Castro Monteiro Loffredo**, Departamento de Engenharia dos Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP), e-mail: loffredo@fem.unicamp.br

**Itamar Ferreira**, Departamento de Engenharia dos Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP), e-mail: itamar@fem.unicamp.br

## Introdução

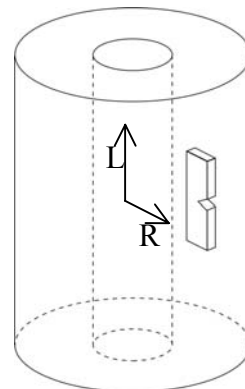
Os ossos estão frequentemente sujeitos à fadiga, sendo que estas ocorrem na forma de microtrincas, as quais podem evoluir para uma fratura, chamada neste caso, de fratura de “stress”. As fraturas de “stress” têm sido definidas como uma fratura parcial ou total do osso normal e intacto, sem história de trauma (REEDER et al., 1996). Devido ao carregamento cíclico, os micro-traumas acumulados podem exceder a capacidade reparativa do osso (FLECK e EIFLER, 2003; BURR et al., 1998). Porém, devido ao fato de não serem causadas por trauma agudo, essas fraturas são influenciadas não só pelo carregamento cíclico. Em um nível microscópico, as microestruturas ósseas desempenham uma função importante na prevenção de propagação das trincas e conseqüente fratura. Até os dias atuais, as microestruturas citadas que desempenham tal função são as fibras colágenas, osteons e os diversos canais vasculares (MARGEL-ROBERTSON, 1973; RITCHIE et al., 2005). Por isso, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico do osso cortical e analisar seus mecanismos de fratura.

## Materiais e Métodos

Vinte espécimes de osso cortical foram obtidos a partir de tíbias bovinas (10 machos com idade entre 24-36 meses). Imediatamente após a retirada dos ossos, os mesmos foram congelados a  $-10^{\circ}\text{C}$ . A usinagem dos corpos-de-prova (CPs) foram feitos em uma fresadora ferramenta a partir do eixo longitudinal e retirados da face lateral do ponto médio da diáfise das tíbias (Figura 1).

Os espécimes foram divididos em grupos, de acordo com o ensaio mecânico a ser realizado. Dez CPs com o formato de uma barra retangular sem entalhe foram usados no ensaio de flexão em três pontos, e os outros dez CPs, usinados a partir daqueles, foram

usados no ensaio de tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ), como representado na Figura 1.



**Figura 1. CPs de tenacidade à fratura retirados da tíbia bovina com orientação L-R (longitudinal e radial).**

Os ensaios mecânicos foram conduzidos em uma máquina servohidráulica, MTS, modelo 810/TestStar II. Ensaio de flexão em três pontos foram realizados a uma velocidade de  $0,02 \text{ mm/s}$  com célula de carga de  $10 \text{ N}$ . O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (E) foram obtidos a partir da curva carga-deslocamento gerada nos ensaios.

Para o ensaio de tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ), uma pré-trinca de fadiga foi introduzida no espécime por carregamento cíclico com controle de carga que variava de  $160$  to  $250 \text{ N}$ , a uma frequência de  $25 \text{ Hz}$ . Os valores de  $K_{Ic}$  foram obtidos por meio da eq. (1) e  $f(a/w)$  é dada pela ASTM E399-97.

$$K_Q = (P_Q S / BW^{3/2}) \cdot f(a/W) \quad (1)$$

onde  $K_Q$  é a tenacidade à fratura em deformação-plana,  $P_Q$  é a carga determinada,  $B$  é a espessura do espécime,  $S$  é a distância entre os dispositivos,  $W$  é a altura do espécime e  $a$  é o comprimento da trinca.

Antes dos ensaios, os espécimes foram descongelados naturalmente e mantidos em

solução fisiológica de NaCl 0,9% a 37°C durante 1 hora. Todos os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente.

A superfície de fratura dos espécimes após os ensaios mecânicos foi analisada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 840A-JEOL.

## Resultados

Os valores obtidos da curva carga-deslocamento no ensaio de flexão em três pontos e  $K_{Ic}$  estão descritos na Tabela 1.

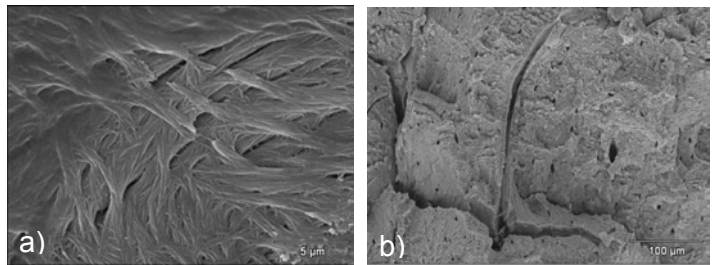
**Tabela 1. Carga de falha (P), Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de elasticidade (E) e valores de  $K_{Ic}$  obtidos por ensaio de flexão em três pontos nos espécimes de osso cortical bovino.**

Ensaio Mecânico	Média	DP
<b>Flexão em três pontos</b>		
$P_{máx}$ (N)	1197,7	88,6
$\sigma$ (MPa)	227,5	16,8
E (GPa)	7,8	1,9
<b>Tenacidade à fratura</b>		
$P_{máx}$ (N)	420,86	80,75
$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	9,6	1,8

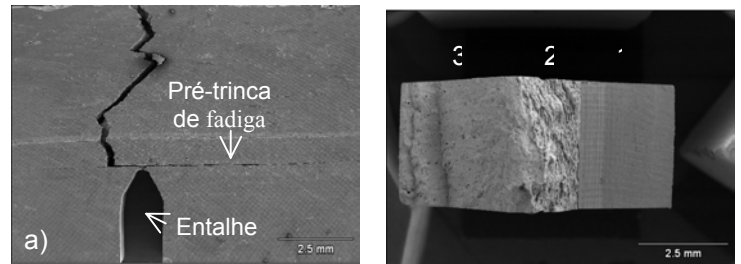
A análise fractográfica mostrou alguns mecanismos de fratura típicos do osso cortical, como mostram as Figuras 2 e 3. A pontificação das fibras colágenas pode ser vista na Figura 2-a). Este mecanismo evita a abertura da ponta da trinca (RITCHIE et al., 2005). A Figura 2-b) mostra outro mecanismo conhecido por “microcracking”, no qual microtrincas podem ser originadas nos canalículos e cavidades do osso. Por isso, muitas vezes essas estruturas são chamadas de concentradoras de tensões devido à irregularidade geométrica no interior da estrutura óssea (RHO et al., 1998). A Figura 3 mostra a propagação da trinca ao longo do CP e a característica da superfície de fratura dos espécimes  $K_{Ic}$  (Figura 3-b).

## Conclusões

Os resultados mostram que o osso cortical bovino é um material pouco rígido ( $E=7,8$  GPa), mecanicamente resistente ( $\sigma=227,5$  MPa), porém não tenaz ( $K_{Ic}=9,6$  MPa), e apresenta alguns mecanismos de fratura que atuam na propagação da trinca.



**Figura 2. pontificação das fibras colágenas; c) mecanismo de fratura chamado “microcracking”.**



**Figura 3. a) Fotografia do espécime  $K_{Ic}$  em vista frontal mostrando a pré-trinca de fadiga e a deflecção da trinca ao longo do CP; b) Espécime  $K_{Ic}$ , vista transversal, mostrando o entalhe usinado (1), a região da pré-trinca de fadiga (2) e a região da fratura final (3).**

## Referências

- Reeder, M. T.; Dick, B. H.; Atkins, J. K.; Pribis, A. B. Stress fractures – current concepts of diagnosis and treatment. *Sports Medicine*, v. 22, n. 3, p. 198-212, 1996.
- Fleck, C.; Eifler, D. Deformation behavior and damage accumulation of cortical bone specimens from equine tibia under cyclic loading. *Journal of Biomechanics*, v. 36, n. 2, p. 179-189, 2003.
- Burr, D. B.; Turner, C.; Naick, P.; Forwood, M.; Ambrosius, W.; Hasan, M. S.; Pidaparti, R. Does microdamage accumulation affect the mechanical properties of bone?. *Journal of Biomechanics*, v. 31, n. 5, p. 337-345, 1998.
- Margel-Robertson, D. R. *Studies of fracture in bone*, Stanford: Stanford University, Tese (Ph.D.), 222 p., 1973.
- Ritchie, R. O.; Kinney, J. H.; Kruzic, J. J.; Nalla, K. A fracture mechanics approach to the failure of cortical bone. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 28, n. 4, p. 345-371, 2005.