

51303L

Efeitos da variação da intensidade acústica na consolidação ultra-sônica de fraturas experimentais

Effects of variation of ultrasonic intensity on the healing of bone fractures

SILVIA J. M. COLOMBO

Professor do Departamento de Fisioterapia (UNIMEP)

LUIZ R. DUARTE

NELSON F. SILVA JUNIOR

Professores da Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

RESUMO: Os parâmetros ultra-sônicos devem ser cuidadosamente determinados para estimular o metabolismo ósseo de forma correta. O uso do ultra-som com intensidades mais elevadas pode causar reabsorção óssea, além dos perigos potenciais de bloqueio nervoso e de outros danos nos tecidos. O presente trabalho tem o propósito de determinar os efeitos biológicos do ultra-som de baixa (19,5 mW/cm²) e média intensidades (700 mW/cm²) na consolidação de osteotomias experimentais. Foram utilizadas avaliações radiológica e histológica para avaliar a consolidação das osteotomias tratadas por ultra-som. Os resultados preliminares mostram que a intensidade de 700 mW/cm² é deletéria à consolidação óssea, por causar lesões do tecido mole adjacente ao foco de fratura e derrame sangüíneo no tecido ósseo. A intensidade de 19,5 mW/cm² demonstrou ação osteogênica e ausência de danos aos tecidos.

Palavras-chaves: FRATURA OSSEA - OSTEOTOMIA - PIEZOELETRICIDADE - ULTRA-SOM

ABSTRACT: The ultrasonic parameters must be carefully determined to stimulate the bone metabolism in a correct way. The use of ultrasound with medium or high therapeutic intensities may cause bone resorption as well as potential risk of nervous blockade among other injuries. This work presents the biological differences caused by low intensity (19,5 mW/cm²) and medium therapeutic intensity (700 mW/cm²) in the treatment of rabbits fibular osteotomies. Radiological and Histological evaluations have been made: The results have shown, so far, that the intensity of 700 mW/cm² injurious to tissues causing soft tissues burning and bleeding in bone tissue. Up to this moment we didn't detect bone healing due to the medium intensity, while we have observed osteogenic action and absence of injuries caused by 19,5 mW/cm² intensity.

Key words: BONE FRACTURE - OSTEOTOMIE - PIEZOELECTRICITY - ULTRASOUND

A necessidade de se abreviar o tempo de consolidação das fraturas ósseas é evidente quando se observa ser a fratura óssea um fator incapacitante. Esta necessidade levou vários pesquisadores a estudarem o osso, explorando

1991

Revista de
CIÊNCIA & TECNOLOGIA 73

st. 844763

Piracicaba
v. 1, n. 1

C 718 e

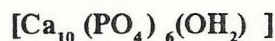
suas propriedades físicas, com o intuito de se ter uma resposta biológica acelerada da sua consolidação.

O osso é basicamente um material constituído por componentes orgânicos (matriz orgânica), sais minerais (matriz mineral) e células. As células que constituem o osso são os osteoblastos, responsáveis pela regeneração óssea e que se diferenciam em osteócitos, células indiferenciadas e abundantes no periosteio (camada de tecido fibroso que envolve o osso externamente, de grande importância na regeneração óssea) e no endosteio (camada que envolve o osso internamente). O tecido ósseo possui ainda células denominadas osteoclastos que são responsáveis pela reabsorção e remodelamento.

A matriz orgânica é formada por fibras colágenas (95%) constituídas de colágeno do tipo I e por pequena quantidade de substância amorfa que contém proteoglicanas e glicoproteínas.

A matriz mineral representa cerca de 50% do peso da matriz óssea. Os íons mais encontrados são o fosfato e o cálcio. Há também bicarbonato, magnésio, potássio, sódio e citrato em pequenas quantidades. O cálcio e o fósforo formam cristais de hidroxiapatita.¹¹

A associação de fibras colágenas e



hidroxiapatita é responsável pela dureza e resistência característica do tecido ósseo.¹

O tecido ósseo, entre outros tecidos biológicos, despertou grande interesse por suas propriedades bioelétricas. Essas propriedades são responsáveis pela diferenciação das células mesenquimais em osteoblastos, capazes de sintetizar matriz óssea, e osteoclastos, capazes de promover reabsorção óssea. A osteogênese, a osteoclasia e os mecanismos homeostáticos do tecido ósseo possuem uma natureza nitidamente bioelétrica.

Assim, a diferenciação celular no osso estaria diretamente relacionada à polarização elétrica local do tecido, ocorrendo for-

mação de tecido ósseo nas regiões eletronegativas e absorção nas regiões eletropositivas.

¹Os potenciais elétricos gerados por esforços mecânicos são interpretados segundo diversas visões, dentre as quais se destacam o efeito piezoelétrico. O efeito piezoelétrico consiste na propriedade exibida por certos materiais de produzir polarização elétrica mediante a aplicação de tensão mecânica, ou seja, transformar energia mecânica em energia elétrica. O efeito piezoelétrico reverso também é possível, de forma que a aplicação de um campo elétrico a um material piezoelétrico produz variação dimensional do material.

O estudo experimental da estimulação da consolidação de fraturas ósseas usando a eletricidade como estímulo baseado nas propriedades elétricas do osso, em particular a piezoeletricidade, teve início já no nosso século. A piezoeletricidade do osso foi descoberta por Fukada e Yasuda⁷ em 1957, ao demonstrarem que o osso, quando submetido a esforços mecânicos, desenvolve campos elétricos em sua superfície. A ação de um campo elétrico sobre a velocidade de diferenciação celular foi descrita por Becker² em 1972.

A piezoeletricidade óssea é devido ao colágeno, pois o osso, após desmineralização em solução ácida, continua a mostrar o efeito piezoelétrico.⁸

O conhecimento das propriedades piezoelétricas do osso⁷ e dos efeitos da propagação de ondas mecânicas nos materiais levaram Duarte^{3,4} (1977, 1983) a postular o princípio da estimulação ultra-sônica do calo ósseo.

O método de Duarte obteve resultados experimentais positivos na consolidação de osteotomias em coelhos¹³ e vem sendo aplicado clinicamente¹⁵ desde 1979. O método ultra-sônico, que é não invasivo, apresenta um percentual de sucesso da ordem de 80% no tratamento de retardos de consolidação e pseudo-artroses e uma redução estatisticamente significativa no tempo de consolidação de fraturas recentes.¹³

O ultra-som é energia mecânica de alta frequência que se propaga como onda de pressão e que não pode ser detectada pelo ouvido humano, cujo limite de frequência audível é de aproximadamente 20 KHz.¹²

(Ocuno, 1986). No caso de um meio sólido, a propagação ultra-sônica promove um movimento das partículas em torno da posição de equilíbrio, sem que ocorra deformação permanente do meio, isto é, as partículas retornam à posição de equilíbrio após a propagação da onda.^{6,9}

As ondas ultra-sônicas são produzidas por transdutores piezoelétricos, que convertem a energia elétrica de excitação em vibração mecânica de alta frequência.

São exemplos de transdutores piezoelétricos naturais o quartzo e a turmalina, e de transdutores sintéticos, o sulfato de lítio, o fosfato dihidratado de amônia, o titanato de bário e o titanato zirconato de chumbo (PZT). Este último é largamente utilizado nos equipamentos de ultra-som para uso médico. O cristal deve ser cortado de forma que um campo elétrico nele aplicado produza variações em sua espessura. O corte do cristal determina também o modo de propagação da onda acústica produzida, que em meio sólido pode ser longitudinal ou transversal. No modo longitudinal a vibração das partículas é paralela à direção de propagação, sendo perpendicular no modo transversal.

O ultra-som é denominado contínuo quando o sinal elétrico de excitação não tem descontinuidade no tempo e é denominado pulsado em caso contrário.

Segundo Frederick⁶ (1965), uma onda acústica é caracterizada pelos seguintes parâmetros:

— Comprimento de onda (λ): é a distância entre dois planos do meio cujas partículas encontram-se em um mesmo estado de movimento ao longo do tempo;

— amplitude (A) do movimento oscilatório: é o máximo deslocamento de uma partícula a partir de sua posição de equilíbrio;

— período (T) da onda: tempo que decorre para que uma partícula realize o ciclo completo de movimento;

— frequência (f) da onda: número de vezes que uma partícula realiza um ciclo oscilatório por unidade de tempo;

— velocidade da onda (C): velocidade com que a perturbação move-se ao longo do meio, ou seja, a velocidade de grupo do movimento ondulatório.

Para a caracterização da energia do

campo ultra-sônico, são utilizados os seguintes parâmetros (HAAR, 1978)⁹:

— Potência (P): Energia total do campo ultra-sônico por unidade de tempo, medida em watts (W).

— Intensidade (I): Energia que atravessa uma unidade de área numa unidade de tempo, medida em watts por centímetro quadrado (W/cm²).

— Tempo de irradiação: é o tempo total de exposição do tecido ao campo acústico.

Os principais mecanismos de ação biológica do ultra-som são o térmico e o cavitacional.

Mecanismo Térmico

A atuação de uma onda acústica ocorre sempre que ela atravessa um meio, e, em consequência a intensidade é reduzida em função da distância. Vários fatores podem contribuir para essa atenuação, tais como: desvio do feixe paralelo, conversão no modo de propagação, espalhamento por refletores não especulares e a absorção, quando, então, a energia ultra-sônica é convertida em calor.^{12,13}

O aumento da temperatura de um meio biológico depende da intensidade do ultra-som que nele se propaga e da condutividade térmica do meio.

Mecanismo Cavitacional

Cavitação é a formação de cavidades ou bolhas em um meio líquido, contendo quantidades variáveis de gás ou vapor (devido à propagação do ultra-som), o volume dessas bolhas pode ser alterado pelo campo acústico, com acréscimo e decréscimo do mesmo, segundo a variação de pressão do campo (cavitação estável), ou através de grandes variações de volume que levam ao colapso (cavitação transiente) com grande liberação de energia.^{12,19}

No caso de células biológicas, o ultra-som pode produzir alterações estruturais e funcionais em consequência da cavitação, pois o colapso das bolhas libera energia que pode romper as ligações moleculares, provocando a produção de radicais livres H⁺ OH⁻, altamente reativos e, como consequência, causar mudanças químicas na célula.

Hill (1968) determinou o limiar de intensidade acústica, I > 0,1 W/cm² acima do

qual tem origem o fenômeno de cavitação em meio aquoso na presença de ar.

São bastante distintos os efeitos da aplicação de ultra-som de média e baixa intensidades, uma vez que existe um valor limite de intensidade a partir do qual tem lugar o fenômeno da cavitação acústica transitente que consta da formação de bolhas instáveis no interior de um líquido.

Este trabalho investigou os efeitos biológicos do ultra-som pulsado de baixa intensidade ($19,5 \text{ mW/cm}^2$) e de média intensidade (700 mW/cm^2), uma vez que enquanto o primeiro apresenta um efeito estimulante do reparo ósseo, o segundo poderia apresentar um efeito deletério sobre o processo de ossificação, pois a ocorrência de cavitação pode inviabilizar o processo de síntese de matriz óssea, causando até o processo de reabsorção óssea.

MATERIAL E MÉTODO

O procedimento experimental foi composto de três fases distintas:

- a) *osteotomia;*
- b) *tratamento: aplicações diárias de ultra-som no sítio da osteotomia por via transcutânea, e*
- c) *avaliação: uso de técnicas convencionais (exames histológicos e radiológicos).*

Os animais osteotomizados foram coelhos com pesos entre 2,0 e 3,0 Kg, de ambos os sexos. Durante as cirurgias, e também no período pós-operatório foram tomadas todas as precauções de rotina para a prevenção de infecções ou complicações que pudessem influir na avaliação dos resultados.

As práticas cirúrgicas foram realizadas sob anestesia geral, mediante administração intramuscular de uma associação de Ketalar+Rompur+Acepran (com dosagens variando de acordo com o peso de cada animal).

A dieta de laboratório (composta de 200 g de ração balanceada por animal, por dia e água *ad libitum*) foi seguida rigorosamente para todos os animais utilizados no experimento.

O osso escolhido para a osteotomia foi

a fíbula para se minimizar os problemas de locomoção pós-cirúrgica do animal. A osteotomia constou de corte transversal do terço médio da fíbula, iniciando-se o tratamento após 24 horas. A amostra foi de 24 animais, sendo estes divididos em três grupos.

Grupo A

8 animais: Osteotomia unilateral do terço médio da fíbula.

Tratamento: Aplicações diárias de 20 minutos de ultra-som pulsado de baixa intensidade.

Grupo B

8 animais: Osteotomia unilateral do terço médio da fíbula.

Tratamento: Aplicações diárias de 20 minutos de ultra-som contínuo de média intensidade.

Grupo C

8 animais: Osteotomia bilateral do terço médio de fíbula.

Tratamento: Aplicações diárias de 20 minutos (em cada fíbula) de ultra-som pulsado de baixa intensidade (de um lado) e ultra-som contínuo de média intensidade (do outro lado).

A extensão total do tratamento foi de 15 dias para todos os grupos experimentais.

Foram utilizados dois equipamentos de ultra-som para o tratamento das osteotomias:

a) um equipamento comercial de fisioterapia (Sonostat, Siemens - Brasil) operando com média intensidade com os seguintes parâmetros:

- ultra-som contínuo
- intensidade acústica de 700 mW/cm^2
- frequência do transdutor: 0,9 MHz

b) um equipamento de baixa intensidade (Estimulador ultra-sônico de regeneração óssea), cujo circuito eletrônico e transdutor ultra-sônico foram projetados e montados no grupo de Bioengenharia da EESC-USP, operando com os seguintes parâmetros:

- ultra-som pulsado
- largura de pulso de 200 μs

- frequência de repetição de 1 KHz
 - intensidade acústica de 19,5 mW/cm²
 - frequência do transdutor: 1,5 MHz
- As potências acústicas dos transdutores foram periodicamente medidas utilizando-se um dosímetro de ultra-som de precisão (Ultrasonic — Power Meter, Modelo UPN-ATN, EUA)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação histológica dos tecidos ósseos tratados por ultra-som ainda não foi concluída. A avaliação radiológica mostrou que as osteotomias tratadas com intensidade de 19,5 mW/cm² apresentaram reparo ósseo com considerável área de calo e nenhum efeito deletério nos tecidos.

A avaliação radiológica é consistente com os resultados de Duarte ³, que em sua pesquisa sobre a ação do ultra-som de baixa intensidade na consolidação de osteotomias em coelhos (baseando-se no efeito piezoelétrico do osso) mostrou que há uma redução de 50% no tempo de consolidação quando existe o estímulo ultra-sônico.

Um modelo teórico proposto por Silva ¹⁴ explica como a transdução da energia mecânica em elétrica pelo osso (efeito piezoelétrico) atua sobre os canais de transporte

ativo das células ósseas, favorecendo o influxo dos íons para o interior das células e, deste modo, estimulando o processo de osteogênese.

A avaliação radiológica das osteotomias tratadas com o ultra-som de média intensidade (I=700 mW/cm²) revelou uma reabsorção óssea com conseqüente ausência de formação do tecido ósseo.

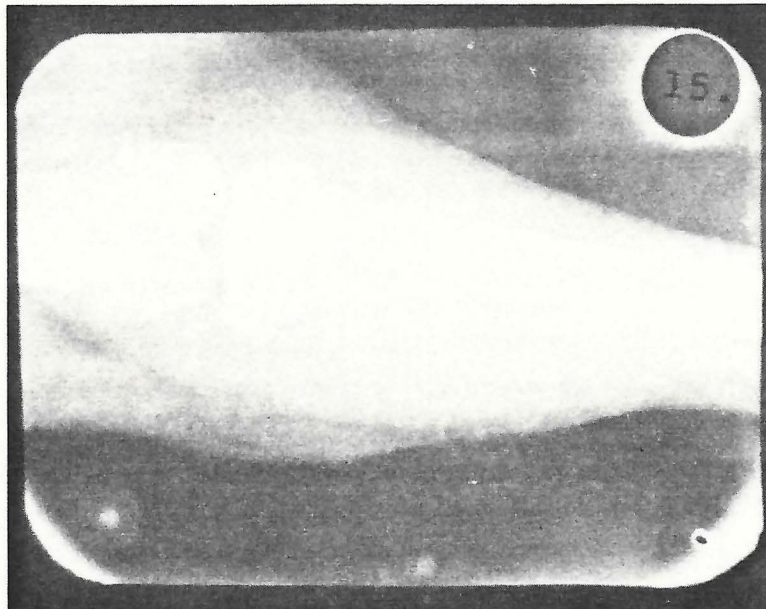
Os resultados radiológicos permitiram concluir que a provável causa dos resultados obtidos com a intensidade de 700 mW/cm² foi a ocorrência do fenômeno de cavitação, ainda que o limiar para a existência de cavitação (I > 100 mW/cm²) determinado por Hill ¹⁰ seja válido para meio aquoso com a presença de ar.

Assim sendo, o fenômeno da cavitação impede o processo de síntese de matriz óssea, utilizando-se uma intensidade acima desse limiar (I > 100 mW/cm²).

CONCLUSÕES

1 O uso do ultra-som de baixa intensidade no tratamento de fraturas ósseas estimula a regeneração óssea e não produz danos nos tecidos adjacentes à fratura.

2 Intensidades médias já são suficientes



Radiografia de animal do Grupo A após osteotomia do terço médio da fíbula (e)

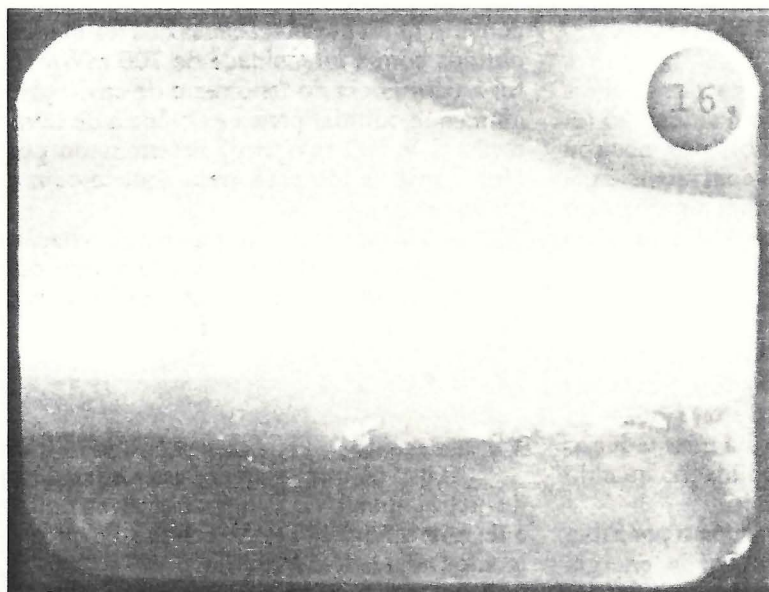
para causar danos aos tecidos adjacentes à fratura, produzindo reabsorção óssea e, conseqüentemente, a não consolidação de fraturas.

3

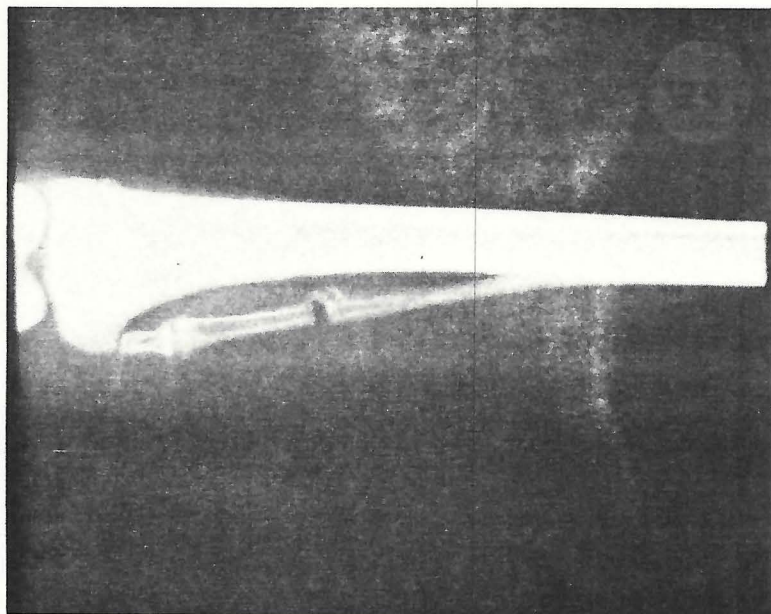
Os equipamentos de ultra-som fisioterápico não podem ser utilizados para o tratamento de fraturas ósseas, pois as intensidades acús-

licas transmitidas por esses equipamentos ($I > 100 \text{ mW/cm}^2$) são prejudiciais ao processo de regeneração óssea.

A estimulação ultra-sônica da regeneração óssea deve ser realizada com parâmetros de ultra-som apropriados^{3,4,10} e através de equipamentos especialmente projetados para aquela finalidade.

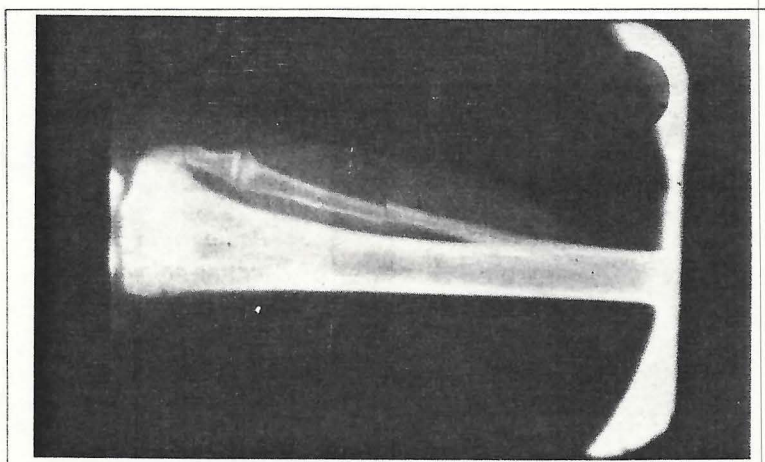
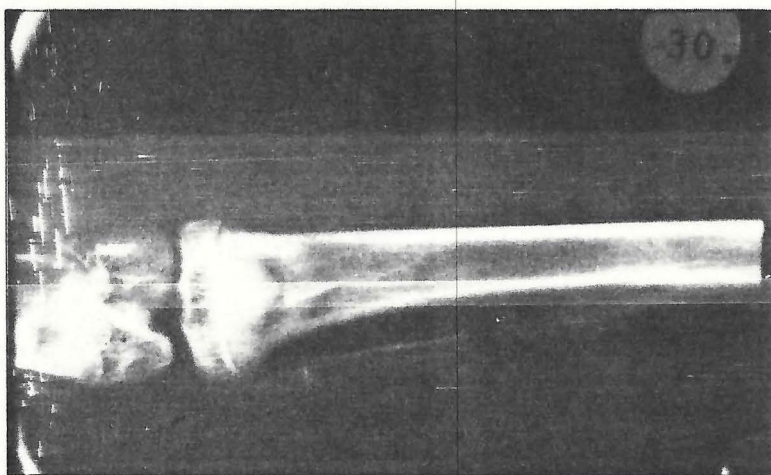


Radiografia do mesmo animal após estimulação com ultra-som pulsado de baixa intensidade



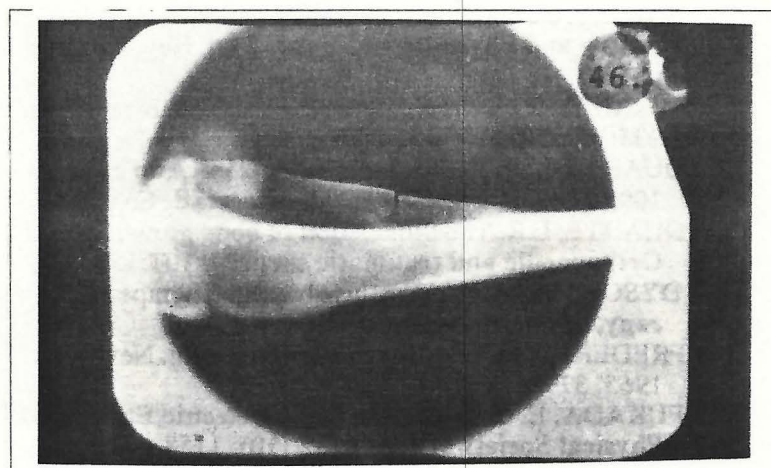
Radiografia de animal do Grupo B após osteotomia do terço médio da fíbula (d)

Radiografia do mesmo animal após estimulação com ultra-som contínuo de média intensidade

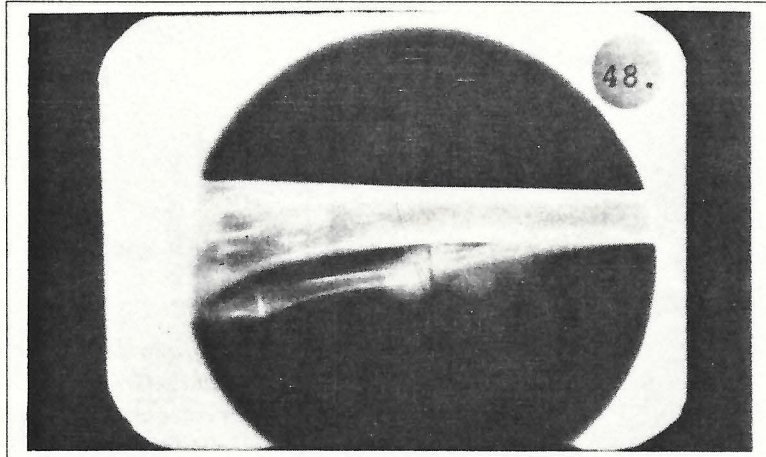
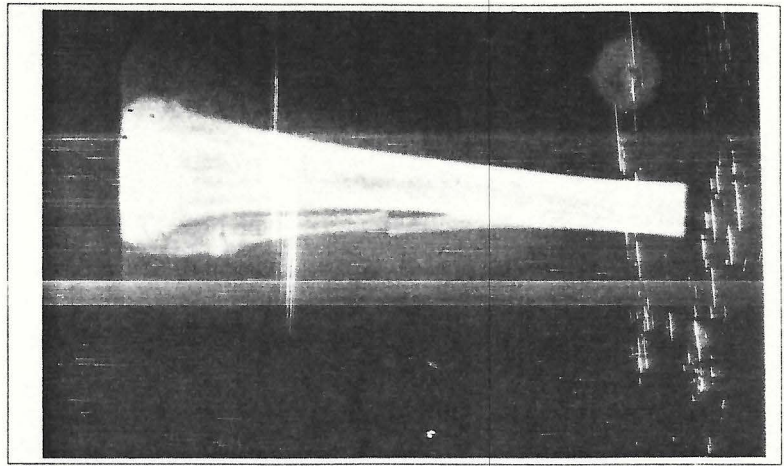


Radiografia de animal do Grupo C após osteotomia do terço médio da fibula (d)

Radiografia do mesmo animal após estimulação com ultra-som contínuo de média intensidade



Radiografia do mesmo animal após osteotomia do terço médio da fíbula (e)



Radiografia do mesmo animal após estimulação com ultra-som pulsado de baixa intensidade

NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ BASSET, C.A.L. Biophysical Principles Affecting Bone Structure In: **Biochemistry and Physiology of Bone**. 2 ed. New York: Academic Press, 1971, p. 1-69.
- ² BECKER, R.O. Stimulation of partial limb regeneration in rats. **Nature**, 235:109, 1972.
- ³ DUARTE, L. R. **Estimulação ultra-sônica do calo ósseo**. São Carlos, 1977, 109p. (Tese — Livre Docência — Escola de Engenharia de São Carlos/USP).
- ⁴ DUARTE, L.R. The Stimulation of bone growth by ultrasound. **Archives of Orthopaedic and traumatic surgery**. 101:153-159, 1983.
- ⁵ DYSON, M. Mechanism Involved in Therapeutic Ultrasound. **Physiotherapy**, 73(3):116-120, mar. 1987.
- ⁶ FREDERICH, J.R. **Ultrasonic engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1965, 379p.
- ⁷ FUKADA, E. & YASUDA, I. Piezoelectric Effect of Bone. **Journal of the Physical Society of Japan**, 12 (10): 1158 — 1162, 1957.

- ⁸ FUKADA, E. & YASUDA, I. Piezoelectric Effect in Collagen. **Applied Physics**, 3 (2): 164-169, 1964.
- ⁹ HAAR, G. Basic Physics of Therapeutic Ultrasound. **Physiotherapy**, 73(3): 110-112, 1978.
- ¹⁰ HILL, C.R. The possibility of hazard in medical and industrial applications of ultrasound. **British Journal of Radiology**, 41:561-569, 1968.
- ¹¹ JUNQUEIRA, L.C. & CARNEIRO, J. *Histologia Básica*. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1974. 482p.
- ¹² OKUNO, E.; CALDAS, J.L.; CHOW, C. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1986. 490p.
- ¹³ PILLA, A.A. et alii. Acceleration of Bone Repair by Pulsed Line wave Ultrasound: Animal Clinical and Mechanistic Studies. Em: BRIGHTON, C.T., POLLACK, S. R. (ed). **Electro-magnetics in Medicine and Biology**. San Francisco, jun. 1991, p. 331-341.
- ¹⁴ SILVA, O.L. **Estudo do mecanismo de ação do ultra-som na estimulação do crescimento ósseo**. São Carlos, 1987. 209p. (Dissertação de Mestrado — Escola de Engenharia de São Carlos/USP)
- ¹⁵ XAVIER, C.A.M. & DUARTE, L.R. Estimulação ultra-sônica do calo ósseo. **Revista Brasileira de Ortopedia**, 18:73-80, 1983.
- ¹⁶ WELLS, P.N.T. **Biomedical Ultrasonics**. London: Academic Press, 1977. 635p.