

Revisão

Estudo do efeito ultra-sônico na consolidação óssea *Study of the ultrasonic effect in bone consolidation*

Alexsander Roberto Evangelista*, Camila de Souza Furtado**, Nilton Petrone Vilardi Jr.***,
Bruno Mazziotti de Oliveira Alves****

.....

*Graduando em fisioterapia da Universidade Estácio de Sá-UNESA (RJ), **Coordenadora das Clínicas da Universidade Estácio de Sá-UNESA (RJ) e Mestrando em Engenharia Biomédica COPPE-UFRJ, ***Sub-Reitor da área de saúde da Universidade Estácio de Sá-UNESA (RJ) e Diretor da clínica R9 (Fisioterapia), ****Coordenador da clínica R9 (Fisioterapia)

Palavras-chave:

Consolidação da fratura,
eletrotermofototerapia,
terapia por ultrassom.

Key-words:

Fracture healing,
electrotermophotherapy,
ultrasonic therapy.

Resumo

As pesquisas na área da eletrotermofototerapia precisam de constante e criteriosa revisão para orientação de novos estudos e uso sensato desta prática terapêutica. Salientamos nesta revisão autores e bibliografias emblemáticas para o direcionamento de nosso estudo e futuros incentivos a novas pesquisas. A partir deste levantamento bibliográfico estabelecemos critérios através de procedimentos laboratoriais de ensaio e dados biofísicos, para que os aspectos usados nesta revisão de alguma forma fossem comprovados com certa margem de segurança. Embora alguns autores tendem a desconfiança da técnica ultrasônica para a prática clínica *in vivo*, buscamos orientações que fundamentem a real expectativa sobre o efeito ultra-sônico na consolidação óssea.

Abstract

The researches in the area of the electrotermophotherapy need constant and discerning revision for orientation of new studies and wise use of this therapeutic practice. We pointed out in this revision authors and emblematic bibliographies for orientation of our study and futures incentives to new researches. Starting from this bibliographical rising we established criteria through biological procedures and biophysical data, so that the aspects used in this revision in some way were proven with certain margin of safety. Although some authors tend the distrust of the ultrasonic technique for the practice clinical *in vivo*, we looked for orientations that base to real expectation on the ultrasonic effect in the bone consolidation.

Recebido em 10 de dezembro de 2002; aceito em 15 de fevereiro de 2003.

Endereço para correspondência: Alexsander Roberto Evangelista, Rua Grão Magriço, 72/101 Penha 21020-110 Rio de Janeiro RJ,
Tel: (21) 3884 9914/9921 8990, E-mail: alexfjio2002@bol.com.br

Introdução

Em função das estruturas de proteção e de sustentação, a fisiologia óssea, mais precisamente suas propriedades mecânicas, foram o principal alvo de estudos no passado. Interessantes idéias foram alvos de hipóteses de Bourgerly [1] e de Ward [2]. O físico-matemático Cullmann em estudos com Meyer [3] pesquisaram a composição física trabecular nos ossos longos.

À luz de algumas descobertas daquela época, adiantaram a hipótese de que a remodelação óssea poderia ser encarada como um sistema controlado por realimentação, tendo como entrada estímulos mecânicos e como saída o crescimento orientado, aquele que nos referimos como o que dita a arquitetura do osso, podendo-se citar o padrão trajetorial encontrado no osso esponjoso. O esqueleto tem três funções importantes: sustentação para o sistema musculoesquelético; proteção de órgãos internos vitais e reservatório metabólico, trabalhando para hematopoese e homeostase do cálcio. 40% do osso trabecular é reciclado anualmente e 10% do osso cortical [4]. O osso cortical tem três superfícies[5]:

- a) envelope endosteal: a superfície em contato com a cavidade medular;
- b) envelope periosteal: a superfície externa do osso;
- c) envelope intracortical: tecido ósseo entre o endóstio e o perióstio.

A atividade de remodelação óssea varia em cada envelope, dependendo da idade e do status reprodutivo, como se segue:

- a) crianças: a neoformação óssea no perióstio excede a destruição óssea do endóstio, havendo aumento real no diâmetro externo do osso [4];
- b) adolescentes: a formação óssea ocorre na superfície endosteal e na periosteal, com aumento de massa óssea total [4];
- c) adultos jovens: a perda óssea endosteal aumenta e começa a superar a aposição óssea, indicando o início do decréscimo da massa óssea, relacionado à idade/menopausa, resultando em estreitamento do envelope intracortical e expansão da cavidade medular [4].

A estrutura do osso trabecular é semelhante a um favo de mel, formada por lâminas horizontais e verticais que se interconectam, assegura força mecânica. A remodelação óssea dá-se nos envelopes externos e internos de cada trabécula e ela determina a força óssea. O osso velho é fraco e o novo é mais forte [4,5].

Sem que os mecanismos fisiológicos sejam compreendidos completamente, a discussão de alguns destes possíveis mecanismos seguir-se-á à apresentação de assuntos e discussões sobre a fisiologia e mecanismos prováveis de remodelação óssea.

Esta revisão busca esclarecimentos práticos e objetivos, e desta forma disponibilizamos um material comprometido

com a ciência para estudos de futuras pesquisas sobre o processo de remodelação óssea pelo sinal ultra-sônico.

Sinal ultra-sônico

Embora compreendidas algumas das relações de origem mecânica, capazes de produzir um tecido com características adequadas às funções finais, dúvidas ainda existem com relação à natureza do sinal que facilitaria, ou mais propriamente, que controlaria o processo de remodelação do osso. Embora se saiba que tensões mecânicas são capazes de induzir transformações ósseas, desconhecem-se os níveis e as frequências de estimulação adequada para ligar o processo. Colombo [6] *“tece considerações a respeito das intensidades de estimulação ultra-sônica do osso, mostrando que intensidades acústicas baixas, na faixa dos 19,5 mw/cm² são estimulantes da regeneração óssea, no entanto, intensidades da ordem de 700 mw/cm² produzem reabsorção óssea talvez de senso comum que as grandes pressões sobre os ossos levam à sua reabsorção, caso típico dos pés das antigas chinesas e dos conhecidos sinais radiológicos de aneurisma aórtico pela destruição de corpos vertebrais vizinhos”*.

Nos anos 50, certamente motivados pelos recursos instrumentais disponíveis, experimentos realizados no Japão por Yasuda *et al.* [7], evidenciaram que quando ossos longos eram submetidos à flexão, surgiam distribuições de cargas elétricas opostas nas faces ósseas submetidas à tração e à compressão, mostrando também que a estimulação elétrica deste tecido podia induzir o que Fukada e Yasuda [8], em continuidade ao estudo, concluíram, que o efeito elétrico está associado ao colágeno, tendo sido atribuído a distorções nas pontes de hidrogênio entre resíduos peptídicos vizinhos na molécula do tropocolágeno. As décadas que se seguiram foram fartas em trabalhos sobre as propriedades elétricas do tecido ósseo [9]. O efeito piezoelétrico mostrou-se incapaz, de explicar em teoria o sinal detectado no osso “in vivo”, passando este a receber a designação de potencial gerado por tensão (SGP), estando hoje sua origem creditada a efeitos eletroquímicos, isto é, potenciais devidos a fluxos iônicos ou *Streaming Potentials* [10].

Neste meio tempo, embora não completamente compreendidos os mecanismos fisiológicos outrora na teoria do sistema de controle, a estimulação elétrica do tecido saiu dos laboratórios para a clínica, tendo sido empregada como recursos de tratamento complementar ou único, em casos de retardo de consolidação de fraturas ou de pseudoartroses [11]. A transdução mecanoelétrica, razão de ser de todas as pesquisas sobre remodelação, vem sendo utilizada também com finalidades terapêuticas por alguns pesquisadores [12, 6], com resultados promissores.

A última década conciliou a tendência física já estudada por cientistas com os novos rumos da ciência biológica, à luz das novas descobertas de mediadores químicos, mensageiros celulares e fatores de crescimento β [13, 14].

Biofísica do ultrassom

Ondas

Ultrassom é uma forma de energia mecânica que consiste de vibrações de alta frequência. As ondas ultra-sônicas são ondas longitudinais e provocam oscilações nas partículas do meio onde se propagam. As frequência das ondas ultrasônicas variam de 20.000 a 20.000.000 ciclos/s (1 ciclo/s = 1 Hertz (Hz), 1 KHz = 1000 Hz, 1MHz = 1.000.000) as quais são mais altas que a faixa da audição humana, que varia de 20 a 20.000 ciclos por segundo. A frequência médica para diagnóstico de imagem varia de 5 a 20 MHz e para terapia de 0,7 a 3 MHz [15].

O cristal contrai sobre a influência de uma corrente elétrica em uma determinada direção e expande-se quando a corrente elétrica for revertida. Quando a corrente for desligada, o cristal retorna a sua forma original [16].

O transdutor ultrasônico produz uma vibração mecânica de alta frequência (0,75 MHz a 3 MHz)[16, 17].

Atenuação

A amplitude e intensidade diminuem à medida que as ondas de ultra-som sob sua forma de feixe passam através de qualquer meio. Esta diminuição de intensidade é causada pela difusão do som em um meio heterogêneo, pela reflexão e refração nas interfaces e pela absorção do meio. O feixe tem sua intensidade original reduzida pela metade a determinada distância, a qual é chamada de *Half-Value-distance* (D/2). O D/2 depende da natureza do meio e da frequência das ondas. Quanto mais alta for a frequência, menor será o comprimento da onda e maior será sua absorção. Cada tecido possui valores diferentes de atenuação [18,16].

Tabela 1 - Tabela de redução

| Tabela de redução (50%) | | | |
|-------------------------|---------|----------|-------------------------------|
| | 1MHz | 3MHz | Observações |
| Tecido ósseo | 2.1mm | — | |
| Pele | 11.1mm | 4mm | |
| Cartilagem | 6mm | 2mm | |
| Ar | 2.5mm | 0.8mm | |
| Tecido tendinoso | 6.2mm | 2mm | |
| Tecido muscular | 9mm | 3mm | Feixe perpendicular ao tecido |
| | 24.6mm | 8mm | Feixe paralelo ao tecido |
| Tecido adiposo | 50mm | 16.5mm | |
| Água | 11500mm | 3833.3mm | |

Fonte: Hoogland [16]

Absorção

A absorção do ultrassom ocorre a nível molecular. Esta absorção de ultrassom dentro do meio ocorre quando a

energia vibracional é transformada em energia molecular ou em movimentos moleculares aleatórios. Segundo Garcia [19], as proteínas são as que mais absorvem (devido à presença de tecidos macromoleculares).

Ultrassom é bem absorvido por:

- Proteína em tecido nervoso;
- Ligamentos;
- Cápsulas intra-articulares;
- Tendões com alta concentração de colágeno;
- Proteína no músculo;
- Hemoglobina;

Exemplo:

A 1 MHz sua intensidade diminui de 50% ao atravessar 0,9 cm de músculo.*

A 3 MHz sua intensidade diminui de 50% ao atravessar 0,3 cm de músculo.**

A temperatura superficial do tecido pode definir a absorção da onda sonora na superfície da pele. Portanto, quanto maior a temperatura do tecido, menor será a penetração em tecidos profundos, então: gelo para estruturas profundas; aquecimento para estruturas superficiais [15].

Nos casos de lesões profundas, não é aconselhável o prévio aquecimento superficial da região, pois com a elevação da temperatura dos tecidos superficiais ocorre maior absorção de ultra-som diminuindo, portanto a efetividade em tecidos profundos.

Quando se deseja tratar com eficiência as lesões profundas são aconselháveis o resfriamento da área com gelo [15].

Entretanto, Andrews [20] discorda, ao afirmar que quanto mais denso o tecido, maior a propagação, ou seja, maior interação das ondas sonoras com o meio e conseqüente maior absorção e diminuição da sua penetração.

Efeitos térmicos

Para o crédito das teorias de funcionamento do ultrassom, é necessário fundamentarmos fisicamente o princípio dos efeitos terapêuticos do gerador. A quantidade de calor gerado depende de alguns fatores como, por exemplo, o regime de emissão modo contínuo produz mais calor que o pulsado, a intensidade, a frequência e a duração do pulso. O som atenua-se à medida que atravessa um meio ou diminui sua intensidade durante este trajeto. Esta atenuação deve-se à conversão da energia em calor por absorção e o restante, pela refração e reflexão do feixe. Se realmente a absorção ocorre pelo aquecimento do tecido, necessitamos equacionar a produção de calor [21,22,23].

Taxa de aquecimento = $0,055\alpha I$ (Fórmula de Nyborg)

- Taxa de aquecimento = produção de calor em

Tabela 2 - Revisão de não-consolidação ósseas tratadas no Brasil por ultra-som pulsado de baixa intensidade.

| Ossos | Números de fraturas | Fraturas tratadas com sucesso | Porcentagem do sucesso | Tempo médio de consolidação |
|-----------|---------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Tíbia | 166 | 141 | 84.9 | 85 |
| Fêmur | 94 | 82 | 87.2 | 89 |
| Rádio | 47 | 38 | 80.8 | 60 |
| Ulna | 40 | 34 | 85 | 64 |
| Escafóide | 28 | 26 | 92.8 | 36 |
| Clavícula | 5 | 3 | 60 | 83 |
| Total | 380 | 324 | 85.2 | 77 |

Fonte: Luiz Romariz Duarte (20th World Congress SICOT), 1996 [25].

cal/cm³ no tecido exposto, por seg.

• \dot{A} = coeficiente de absorção em decibéis/cm (Db/cm) seu valor depende da frequência do tecido.

• I = intensidade em W/cm²

Ex: quanto maior a intensidade, maior a produção de calor:

Taxa de aquecimento = $0,055 \times 0,12$ (coeficiente de absorção muscular à 1Mhz) $\times 0,8w/cm^2 = 0.32 \text{ cal/cm}^3/\text{min} = 1,6 \text{ graus}/5\text{min}$ [15].

Outras fórmulas podem determinar a taxa de aquecimento produzido pelo ultra-som. Por exemplo, Lehmann [24] utiliza uma fórmula pesquisada por Dunn & Frizzell sendo mais útil quando a condução de calor for mais intensa:

$$2\alpha I = \rho C K \frac{dT}{dt} \text{ \& \; } k \frac{d^2T}{dx^2}$$

$\frac{dT}{dt}$ = taxa de aquecimento (C/S)

I = Intensidade acústica

α = Coeficiente de absorção em Db/cm

ρC = Capacidade de aquecimento por unidade volume do meio (ρ é a densidade e C é a capacidade por unidade de massa por C)

K = Equivalente mecânico do calor (4,2 J/cal)

k = Condutividade do meio.

É fundamental comentar que estas fórmulas não levam em consideração o aquecimento produzido pelas ondas transversais em tecidos moles, interface do osso e outros tipos de interfaces. As produções de calor em interfaces de ossos poderão ser mais altas. Muitas pesquisas têm mostrado que o coeficiente de absorção para ondas transversais é quase o dobro do coeficiente para ondas longitudinais [15,24].

Interface osso/periósteo

“Ocorre pouca reflexão entre as camadas dos tecidos moles, ao contrário do que ocorre na superfície do osso (interface osso / periósteo). Até 30% poderão ser refletidos a partir do osso e 70% poderão ser absorvidos. A energia total do periósteo é igual à incidência total, acrescida da onda refletida. Isto também causa ondas transversais ao redor do periósteo. As partículas dos dois meios oscilam em ângulos

retos com a direção das ondas de som que causam ondas transversais. Estas ondas transversais são absorvidas pelo periósteo como calor e podem causar superaquecimento do periósteo, considerando-se que ali não existe efeito de resfriamento da circulação. Se houver esse superaquecimento, o paciente irá relatar sensações de calor e dor, pois o periósteo é altamente inervado. O terapeuta deverá mover o cabeçote transdutor do ultra-som mais rapidamente ou diminuir a intensidade para prevenir este processo” [15,21,23].

Uma revisão de tratamento de fraturas no Brasil pela técnica ultra-sônica está sumarizada na tabela abaixo por Duarte [25]. O registro de pacientes é relativo ao período de 1980 a

1996 e participaram do estudo 251 pacientes masculinos e 129 femininos com idade variando de 3 a 83 anos. O tempo de tratamento mínimo para consolidação foi de 77 dias.

Vários estudos diferentes demonstraram que o ultra-som pode ser usado para estimular a formação do calo ósseo. Fraturas fibulares demonstraram uma restauração acelerada quando tratadas em fases de inflamação e início de proliferação (1 MHz ou 3 MHz, pulsado 2 mseg/8 mseg à 0,5 w/cm² por 5 minutos, 4 vezes por semana). Dyson afirma que o tratamento durante as primeiras duas semanas poderá acelerar a união óssea [15,26,27,28]. Depois de alguns estudos alertando para o não funcionamento do ultrassom *in vivo* [29], os pesquisadores e os resultados clínicos continuam dando ênfase ao seu uso e sua eficácia [12,15,16,17,25,26,27,28].

Discussão

Nosso trabalho preocupou-se em demonstrar revisões bibliográficas capazes de elucidar a capacidade terapêutica do ultra-som, uma vez que o princípio básico de qualquer aparelho é a fundamentação física e, que passada para experimentos *in vivo* e *in vitro* devam ser avaliadas com o objetivo principal, que é a obtenção de resultados positivos em nossos pacientes.

Ao longo da jornada de nossa profissão, presenciamos resultados muito significativos em nossos pacientes, o que não seria interessante dizer que o ultrassom não funciona terapêuticamente. Os efeitos biofísicos freqüentemente descritos sobre o ultra-som não evidenciaram que ocorra função *in vivo* sob condições terapêuticas ou não foi provado que tem um efeito clínico sob estas condições. Backer *et al* [29] “revela que as atuais evidências biofísicas são insuficientes atualmente para prover uma fundamentação científica para o uso clínico de ultra-som terapêutico para o tratamento das pessoas com dor e dano de tecido macio”. Hoogland [16] cita que os efeitos piezelétricos no corpo humano são observados especialmente no tecido ósseo, nas fibras de colágeno e proteínas corporais. É possível que esses efeitos influenciem

nos efeitos biológicos do ultrassom. Numa outra significativa colaboração de uma pesquisa de campo, Duarte [25] relata percentuais muito significativos da consolidação óssea com a técnica ultrasônica.

Seria interessante destacar que estudos científicos na Europa visam a aprimorar a segurança da engenharia de determinados geradores terapêuticos, inclusive do ultrassom, mostrando que o investimento no setor ainda é de grande importância para a fisioterapia. A verdadeira relevância do estudo do ultrassom dá-se pelos resultados positivos obtidos até os dias de hoje e pela fundamentação que a física quântica nos concede.

Conclusão

Baseados em práticas clínicas e na física quântica, estudiosos darão continuidade a estudos que ainda nos dão créditos importantíssimos do uso do ultra-som em nossas atividades terapêuticas. Somos de opinião que o ultra-som quando devidamente utilizado, respeitando indicações e técnicas de aplicação, os resultados serão sempre satisfatórios.

Diante dos resultados obtidos até os dias de hoje, com base no referencial teórico e considerando as limitações do presente objeto, podemos concluir que a prática clínica com o ultra-som devidamente indicado e aplicado pode produzir resultados positivos *in vivo*. Isto não significa dizer que os estudos atuais podem ser definitivos e absolutos, portanto, novas pesquisas devem continuar o rumo norteado pelo compromisso da verdade.

A remodelação óssea pela técnica ultra-sônica pode ser eficiente para a prática da clínica fisioterápica, se respeitadas as técnicas disponíveis para tratamento de fraturas [18].

Referências

1. Bourguery. *Traité Complet de l'anatomie de l'homme*. Tome I. Paris: CA Delaunay; 1832.
2. Ward FO. *Outlines of human osteology*. London: Henry Renshaw; 1838; p. 370.
3. Meyer HV. Die Architekturen der spongiosa. *Arch F Anat Physiol und Wissensch Med* 1867;34:615-628.
4. Woolff AD & Dixon ASJ. Osteoporose: um guia clínico; 1999.
5. Arthur C, Guyton M. D. *Fisiologia Humana*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 1996.
6. Colombo SJM, Duarte LR, Silva Jr NF. Efeitos da variação da intensidade acústica na consolidação ultra-sônica de fraturas experimentais. *Rev Ciência e Tecnol* 1991: 73-81
7. Yasuda I, Noguchi K, Sata T. Dynamic Callus and Electric Callus. *J Bone Jt Surg* 1995;1292-1293.
8. Fusada E, Yasuda I. Piezoelectric Effects in collagen. *J Appl Phys Jap* 1964;3:117-121.
9. Fonseca JCP. *Electrical Properties of Bone: A Composite Material Model* [Tese] Pennsylvania: Pennsylvania State University; 1984. p.202.
10. Anderson J, Eriksson C. Piezoelectric Properties of Dry and Wet Bone. *Nature* 1970;227:491-492
11. Lavine SL, Lustrin IMH, Moss ML. The influence of electrical current on bone regeneration in vivo. *Acta Orthop Scand* 1971; 42:305-314
12. Duarte LR. *Estimulação ultra-sônica do calo ósseo*. [Tese] São Carlos: USP Escola de Engenharia de São Carlos; 1977. p.109.
13. Rodan GA, Bourret LA, Harvey A, Mensi T. Cyclic AMP and cyclic GMP: Mediators of the effects on bone remodeling. *Science* 1975;189: 467-469
14. Duncan RL, Turner CH. Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain. *Calcif Tissue Int* 1995;57:344-358
15. Furini N, Longo GJ. *Ultra-Som. KLD Biosistemas Equipamentos Eletrônicos*. São Paulo: Amparo; 1996.
16. Hoogland R. *Terapia ultra-sônica*. Enraf Nonius. Delft. Holanda; 1986.
17. Gann N. *Ultrasound current concepts*. *Clin. Management* 1991;11:64-69.
18. Einhorn TA. Current concepts review - Enhancement of fracture healing. *J Bone Joint Surg* 1995;77-A(6):940-956.
19. Garcia EAC. *Biofísica*. São Paulo: Savier; 1998. p.79-82
20. Andrews R, Harrelson GL, Wilk KE. *Reabilitação física das lesões desportivas*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2000. p.61-95.
21. Kottke FJ, Lehamann JF. *Tratado de medicina física e reabilitação de Krussen*. São Paulo: Manole; 1994.
22. Guirro E, Guirro R. *Fisioterapia em estética*. In: *Fundamentos, Recursos e Patologias*. São Paulo: Manole; 1996.
23. Young S. *Terapia por ultra-som*. In: *Eletroterapia de Clayton*. São Paulo: Manole; 1998. p.235-258.
24. Lehmann JF. *Diathermie*. In: Krusen FH, Kottke FJ, Elwood PM Jr. *Handbook of physical medicine and rehabilitation*. Philadelphia; 1965.
25. Duarte LR. *Revisão de não-consolidação ósseas tratadas no Brasil por ultra-som pulsado de baixa intensidade*. In: *20th World Congress SICOT 1996 August 18-23, Amsterdam*. p. 538.
26. Dyson M, Franks C, Suckling J. *Stimulation of healing of varicose ulcers by ultrasound*. *Ultrasonic*. 1976.
27. Dyson M. *Biological Effects of therapeutic Ultrasound*. *Reumatol E Rehab* 1973;12:209-213.
28. Dyson MJ. *Suckling. Stimulation of Tissue Repair by Ultrasound: A survey of the Mechanisms Involved*. *Physiotherapy* 1978; 4;64.
29. Baker KG, Robertson VJ, Duck FA. *A review of therapeutic ultrasound: biophysical effects*. *Phys Ther* 2001;81:351-1358. ■