

ECOGRAFIA QUANTITATIVA PER UNA VALUTAZIONE NON INVASIVA DELL'OSSO EQUINO. UNA RASSEGNA

QUANTITATIVE ULTRASONOGRAPHY FOR THE NONINVASIVE ASSESSMENT OF EQUINE BONE. A REVIEW

BIANCA CARSTANJEN* PD, Dr med vet, Dr med vet habil, PhD, FTA für Pferde / Pferdechirurgie;

ANNICK GABRIEL** DVM, PhD

*Clinique Equine, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, France;

**Département de Morphologie et Pathologie, Service d'anatomie, Faculté de Médecine Vétérinaire,
Université de Liège, Sart Tilman, Liège, Belgium

Riassunto

Le lesioni muscoloscheletriche nei cavalli sportivi e da diporto, nonché nei giovani equini in crescita, sono un evento frequente. Esistono vari mezzi per la valutazione delle ossa di questi animali, ma l'identificazione precoce delle osteopatie, il monitoraggio seriale delle proprietà dell'osso, e la valutazione del suo metabolismo risultano ancora difficoltosi. Questo articolo presenta una rassegna dei dati disponibili sull'impiego dell'ecografia quantitativa per la valutazione non invasiva delle proprietà dell'osso corticale superficiale nei cavalli.

Summary

Musculoskeletal injuries frequently occur in sport- and leisure horses as well as in young growing horses. Various tools for equine bone assessment are available, but the early detection of bone diseases, the serial monitoring of bone properties and the evaluation of bone metabolism still remain difficult. This review article describes the use of quantitative ultrasonography for the noninvasive assessment of superficial cortical bone properties in horses.

INTRODUZIONE.

Le malattie muscoloscheletriche sono un'evenienza frequente nei puledri, nei cavalli da competizione e in quelli da diporto. Nell'industria del cavallo, queste patologie sono importanti sia dal punto di vista sociale che economico (Estberg *et al.*, 1996). Sono disponibili vari metodi per l'esame delle ossa equine, ma l'identificazione precoce delle osteopatie, il monitoraggio seriale delle caratteristiche dell'osso e la valutazione del suo metabolismo restano ancora difficili da effettuare (Jeffcott *et al.*, 1988; Lepage *et al.*, 2001). La qualità dell'osso può essere stabilita effettuando la valutazione della fase organica e inorganica del tessuto, nonché della sua architettura. Mediante istomorfometria e test biomeccanici, è possibile eseguire un esame preciso delle proprietà dell'osso, mediante un approccio *ex vivo*. Nei cavalli, sono stati descritti l'impiego, la potenziale applicazione e le limitazioni offerte dalle diverse tecniche non invasive di valutazione *in vivo* dell'osso (Jeffcott *et al.*, 1988; Lepage *et al.*, 2001). Le caratteristiche dell'osso di siti scheletrici ben definiti possono essere valutate utilizzando l'assorbimetria a singolo fotone (Jeffcott *et al.*, 1986), l'assorbimetria a doppia energia a raggi-x (McClure *et al.*, 2001), la tomografia computerizzata di tipo quanti-

tativo (Waite *et al.*, 2000) o la risonanza magnetica (Choquet *et al.*, 2000). Queste tecniche sono basate prevalentemente sull'impiego di radiazioni e risultano dispendiose o richiedono tempo. Un altro mezzo per esaminare il *turnover* dell'osso in corrispondenza di precisi siti scheletrici è la scintigrafia (Ueltschi 1975). È possibile valutare l'attività metabolica dell'intero scheletro mediante una quantificazione dei marker biochimici nel siero, nel plasma o nell'urina (Price 1998).

Un'alternativa alla valutazione dell'osso basata prevalentemente sulle radiazioni ionizzanti è l'ecografia quantitativa (QUS, *quantitative ultrasonography*). In medicina umana, sono stati messi a punto vari dispositivi QUS per misurare la velocità del suono (SOS, *speed of sound*) o l'attenuazione degli ultrasuoni a banda larga (BUA, *broadband ultrasound attenuation*). Questi strumenti vengono utilizzati nella diagnosi e nel monitoraggio dell'osteoporosi (Funke *et al.*, 1995) e delle malattie di sviluppo dell'osso (Gibbens *et al.*, 1988), nonché per la valutazione del rischio di frattura nei pazienti in età avanzata (Hans *et al.*, 1996) o negli atleti (Lappe *et al.*, 2005). L'obiettivo di questo articolo è quello di presentare una rassegna dei lavori sull'impiego della QUS nella valutazione non invasiva dell'osso negli equini.

PRINCIPI DI FISICA DEGLI ULTRASUONI

I principi della fisica degli ultrasuoni e la sua modalità di interazione con l'osso sono essenziali per avere una migliore conoscenza di questo mezzo d'indagine. Gli ultrasuoni sono onde acustiche ad elevate frequenze (da 20 kHz a 100 MHz), al di sopra del limite dell'udito umano. A differenza di quelle elettromagnetiche, le onde acustiche sono di tipo pressorio, prive di radiazioni ionizzanti.

La velocità (v) di un'onda longitudinale che proceda in una barra solida, diritta e uniforme e con un diametro inferiore alla lunghezza d'onda dell'ultrasuono che si propaga, è correlata alle proprietà del mezzo secondo la formula seguente:

$$v = \sqrt{E / \rho};$$

dove E è il modulo di Young e ρ è la densità del mezzo (Rho *et al.*, 1993; Pain 1999). Il modulo di Young è la misura della resistenza alla deformazione. La SOS è espressa in m/s. Tuttavia, l'applicazione di questa equazione all'osso è limitata dalla struttura anisotropa ed eterogenea dell'osso stesso.

La BUA esprime la perdita di energia di un fascio di ultrasuoni quando questo si propaga attraverso un mezzo. L'attenuazione è espressa in dB/MHz. I fattori che contribuiscono all'attenuazione comprendono la diffrazione, la diffusione, l'assorbimento e la conversione modale del fascio (Bamber e Tristram 1988). Il meccanismo di attenuazione predominante nell'osso corticale è l'assorbimento, mentre in quello spongioso si verifica la diffusione (Njeh *et al.*, 1997).

I dispositivi QUS consentono di determinare il valore di SOS e/o BUA. Sono disponibili due tipi di dispositivi QUS: quelli a sito singolo, che effettuano le misurazioni soltanto a livello di uno specifico sito periferico utilizzando la modalità di trasmissione trasversale, e quelli multi-sito, che impiegano la modalità di trasmissione assiale.

L'ECOGRAFIA PER LA VALUTAZIONE DELL'OSSE NEGLI EQUINI

L'impiego di ultrasuoni come strumento per la valutazione non invasiva dell'osso degli equini è stato descritto oltre due decenni fa (Pratt 1980; Rabin *et al.*, 1983). Le misurazioni furono effettuate con due trasduttori separati che rilevarono una velocità apparente delle onde ultrasoniche trasmesse attraverso il terzo osso metacarpale (MC III) (McCartney e Jeffcott 1987). Le caratteristiche progettuali del dispositivo impiegato restrinsero le misurazioni ecografiche alla parte distale dell'arto. La precisione e la riproducibilità risultarono essere, rispettivamente, dello 0,3% e 0,8% (Buckingham *et al.*, 1992). Tuttavia, i risultati delle misurazioni furono influenzati dai tessuti molli circostanti, dalle aree delle sezioni trasversali, dalla forma e dalla temperatura dell'osso (Jeffcott e McCartney 1985; Buckingham *et al.*, 1992).

È stato riferito che il dispositivo QUS di trasmissione tibio-assiale (Soundscan 2000™, Myriad Ultrasound Systems Ltd., Revohrt, Israel) non risulta utile negli equini perché impiega un trasduttore di grandi dimensioni (Le-page *et al.*, 2001).

Il sistema QUS multi-sito (Omnisense™, Sunlight Medical Ltd, Tel Aviv, Israel) è un dispositivo portatile che include una semplice sonda inserita in un manipolo, da applicare per via percutanea alla zona che deve essere esaminata. Un set di trasduttori all'interno del manipolo della sonda consente le misurazioni della SOS nella modalità di trasmissione assiale lungo la corticale delle varie regioni di interesse (ROI, *region of interest*). Fra le diverse sonde poste in commercio dal produttore, quella più adatta alle misurazioni QUS negli equini è la più grande (sonda CM). Il dispositivo genera onde acustiche pulsanti con un centro di frequenza di 1,25 MHz (250 kHz-1,5 MHz) attraverso strumenti di trasmissione-trasduzione localizzati all'interno della sonda ad ultrasuoni. L'onda sonora penetra nell'osso con un angolo critico, si propaga al suo interno fino ad una profondità di 3-5 mm e parallelamente alla sua superficie ed esce in direzione dei trasduttori riceventi con lo stesso angolo critico (Barkmann *et al.*, 2000). Questa tecnica si basa sulla legge di Snell per ciò che concerne le modalità con cui l'onda sonora viene rifratta quando entra nell'osso, percorre il tessuto osseo, viene diffusa al suo esterno e poi è rilevata dai ricevitori (Fig. 1). Viene registrata la velocità dell'onda sonora più veloce. Per misurare il tempo più breve di propagazione dell'onda sonora attraverso l'osso e per calcolare la velocità degli ultrasuoni si utilizza un software. Di conseguenza, i valori di SOS registrati sono indipendenti dallo spessore dei tessuti molli fino ad un limite, oltre al quale non viene effettuata alcuna misurazione.

Ogni giorno, prima che inizino le valutazioni SOS, occorre effettuare una verifica della qualità del sistema per testare l'accuratezza della misurazione attraverso l'impiego di uno spettro (Perspex phantom, Sunlight Ultrasound Technologies, Tel Aviv, Israel). Si localizzano e contrassegnano le ROI e si applica alla cute un mezzo di accoppiamen-

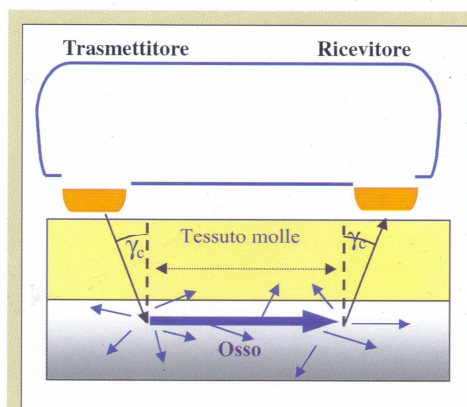


FIGURA 1 - L'onda acustica viaggia dal trasmettitore al ricevitore. Le traiettorie del segnale vengono determinate sulla base delle modalità in cui l'onda sonora viene rifratta attraverso un angolo critico, si propaga lungo l'osso e viene diffusa dall'osso stesso attraverso un angolo critico. Si registra il tempo che intercorre nel passaggio dai trasduttori ai ricevitori e si calcola la velocità del suono. Trasmettitore = trasduttore che trasmette. Ricevitore = trasduttore che riceve. γ_c = angolo critico (modificato secondo Carstanjen *et al.*, 2002a).

to (e.g. Aquasonic 100™; Parker Laboratories Inc., Fairfield, USA), senza alcuna rasatura preventiva. Le misurazioni si effettuano senza muovere la sonda. Ogni ciclo di scansione QUS richiede approssimativamente 20 secondi. Il software del computer controlla da tre a cinque cicli successivi per verificarne la costanza e la qualità, al fine di ottenere un risultato significativamente valido.

In uno studio in vivo nei cavalli è stato dimostrato che le misurazioni SOS ottenute a livello del MC III non sono influenzate dalla presenza dei tessuti molli (Carstanjen *et al.*, 2003a). Invece, il mezzo di accoppiamento influiva sui risultati delle stesse misurazioni SOS (Carstanjen *et al.*, 2002a). Nell'uomo, per la tibia è stata riscontrata un'associazione fra i valori SOS, le proprietà dei materiali (ad es., la densità dell'osso e la densità corticale (Lee *et al.*, 1997). Inoltre, nell'uomo (Knapp *et al.*, 2001) e nel cavallo (Carstanjen *et al.*, 2003a) è stata descritta una correlazione, da debole a modesta, tra le misurazioni dei valori di SOS e quelli dell'assorbimetria a doppia energia a raggi-x. Nei pazienti umani, si è rilevata una correlazione significativa fra i valori di SOS e la densità minerale dell'osso e lo spessore corticale delle falangi (Fan *et al.*, 1997). Questi riscontri indicano che i valori di SOS possono dipendere dalla geometria e dalla densità della corticale ossea.

Le misurazioni QUS si possono ottenere facilmente nei cavalli in piedi e non sedati, dal MC III (Fig. 2), dalla

parte distale del radio (Fig. 3) e dal tratto distale della tibia. Il coefficiente di variazione (CV) *in vivo* per le successive misurazioni QUS andava dall'1,8% per il MC III fino all'1,9% per il radio ed al 3,1% per la tibia (Carstanjen *et al.*, 2002a). Il CV fra i vari esaminatori era <3% per le valutazioni ottenute a livello del MC III. I valori di SOS nell'osso corticale dei cavalli warmblood era compreso fra 3800 e 4200 m/s, a seconda della ROI con-



FIGURA 2 - Il dispositivo di ecografia quantitativa (QUS) multi-sito (Dimisense™ Sunlight Medical Ltd., Tel Aviv, Israel) viene fornito con numerose sonde. Per le misurazioni in vivo negli equini risulta più adatta la grande sonda CM. Le valutazioni QUS del terzo osso metacarpale (MC III) si eseguono posizionando lo strumento a metà distanza tra l'estremità prossimale del quarto osso metacarpale e l'apice dell'osso sesamoide prossimale laterale. La sonda è stata posta in direzione assiale e perpendicolare appoggiandola sul MC III e le misurazioni sono state effettuate a livello della faccia laterale, dorsale e mediale.

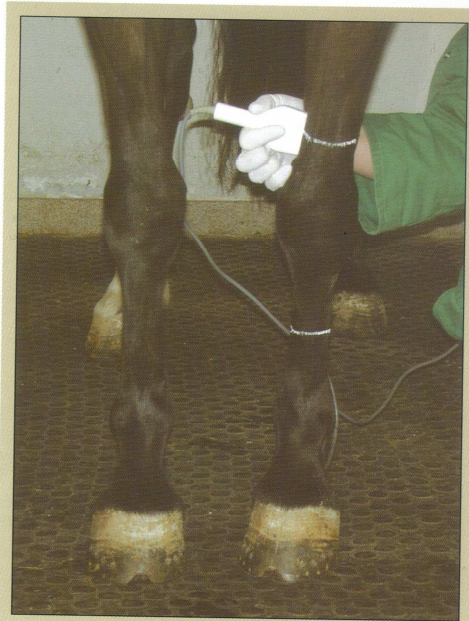


FIGURA 3 - Il dispositivo di ecografia quantitativa (QUS) multi-sito viene utilizzato per valutare le proprietà dell'osso a livello del tratto distale del radio nel cavallo in stazione, non sedato. Dopo aver tracciato dorso-lateralmente una linea orizzontale che origina dal margine distale della castagnetta, sono state valutate la faccia mediale e quella laterale del radio utilizzando il dispositivo QUS e servendosi della sonda CM.

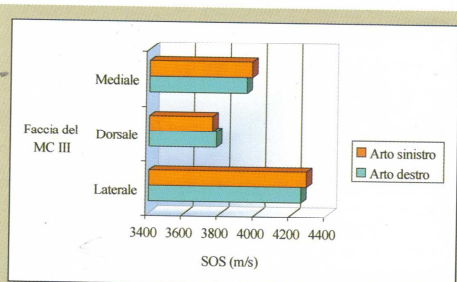


FIGURA 4 - Profilo dei valori di misurazione della velocità del suono (SOS) rilevati a livello della faccia laterale, dorsale e mediale del tratto intermedio del terzo osso metacarpale (MC III) in nove cavalli Warmblood. Non si è riscontrata alcuna differenza significativa nei valori di SOS fra l'arto destro ed il sinistro ($P > 0,05$).

siderata (Fig. 4; Carstansen *et al.*, 2002a,b). Questi risultati sono in accordo con ulteriori osservazioni ottenute impiegando lo stesso dispositivo QUS nei purosangue (Carstansen *et al.*, 2003b). Le onde sonore si propagano ad un valore di SOS di 4200 m/s e ad una frequenza di 1,25 MHz, ad una profondità massima di circa 3,3 mm (Njeh *et al.*, 2001). Le ROI selezionate, cioè il MC III, il radio e la tibia, corrispondono ad aree in cui si hanno variazioni delle caratteristiche ossee associate all'attività fisica, ai trattamenti con farmaci, alle osteopatie o alle malattie di sviluppo dell'osso (Nunamaker *et al.*, 1989; Funck *et al.*, 1996; Pande *et al.*, 2000). Nella maggior parte delle indagini effettuate è stato esaminato il MC III perché si tratta di un osso ampiamente studiato nel cavallo (Stover *et al.*, 1992) ed è anche la sede di svariate patologie, come l'osteopatia metacarpale dorsale, la frattura corticale da stress incompleta o completa e la frattura spontanea parasagittale (Riggs 1999). In uno studio longitudinale sul campo, è stato effettuato il monitoraggio di entrambi i MC III di 75 cavalli purosangue di età compresa fra 2 e 4 anni, eseguendo le misurazioni QUS ad intervalli di 5 - 7 settimane durante un periodo di attività fisica di 9 mesi (Carstansen *et al.*, 2003b). I risultati hanno indicato che i giovani purosangue da corsa che svolgevano attività fisica presentavano delle variazioni di misurazione della SOS del MC III che dipendevano da età, sesso e ciclo di misurazione, il che può riflettere l'esistenza di modificazioni di adattamento nelle proprietà dell'osso corticale superficiale del MC III. Nei giovani purosangue da corsa, la periostite metacarpale si forma principalmente nella parte dorsale del MC III (Bertone 2002). I cavalli colpiti da questa malattia non presentavano alcuna differenza significativa nei valori di SOS ottenuti a livello del MC III rispetto a quelli di altri purosangue di età e sesso corrispondenti (Carstansen *et al.*, 2003b).

Tuttavia, quando si è considerato il profilo SOS di ogni singolo cavallo, alcuni purosangue hanno mostrato un brusco calo dei valori di SOS dorsale associato ad una periostite metacarpale clinicamente manifesta. Un altro studio ha dimostrato risultati promettenti circa l'impiego della QUS nello screening dell'osteopatia metacarpale dorsale (Davies 2002). Tuttavia, sono necessarie ulteriori ricerche; l'impiego di popolazioni più ampie e di intervalli di misurazione più flessibili dovrebbe consentire di valutare la possibilità di effettuare lo screening dei cavalli da corsa colpiti da osteopatia metacarpale dorsale mediante QUS a trasmissione assiale.

È necessario riconoscere i limiti delle tecniche non invasive di valutazione dell'osso. L'anamnesi e l'esame clinico del cavallo continueranno ad essere uno strumento importante nella valutazione delle patologie dell'osso degli equini. Tuttavia, i mezzi di indagine non invasivi possono aiutare i veterinari ippisti a riconoscere le patologie ossee o ad identificare i cavalli a rischio ed a decidere quali animali sottoporre a screening (Lepage *et al.*, 2001). Le tecniche complementari, come ad esempio l'impiego dei marker biochimici dell'osso e la QUS, forniscono il potenziale per mettere a punto una strategia di screening efficace con la quale arrivare ad identificare i giovani cavalli in crescita a rischio di sviluppo di patologie scheletriche, nonché a prevenire le lesioni ossee del cavallo atleta.

Parole chiave

Cavallo, Osso, Ecografia quantitativa, QUS, Densitometria.

Key words

Horse, Bone, Quantitative ultrasonography, QUS, Densitometry.

Bibliografia

1. Bamber JC, Tristram M (1988) Diagnostic ultrasound. In: Webb S, Ed.: The physics of medical imaging. Adam Hilger, Bristol. Pp. 319-386.
2. Barkmann R, Kantorovich E, Singal C, Hans D, Genant HK, Heller M, Glüer CC (2000) A new method for quantitative ultrasound measurements at multiple skeletal sites: first results of precision and fracture discrimination. *J. Clin. Densitom.* 3, 1-7.
3. Bertone A. (2002). The metacarpus and metatarsus. In: Stashak TS, Ed.: Adam's lameness in horses. 4th ed, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, USA. Pp. 800-829.
4. Buckingham SH, McCarthy RN, Anderson GA, McCartney RN, Jeffcott LB (1992) Ultrasound speed in the metacarpal cortex - a survey of 347 thoroughbreds in training. *Equine Vet. J.* 24, 191-195.
5. Carstansen B, Lepage OM, Detilleux J, Duboeuf F, Amory H (2002a) Use of multi-site quantitative ultrasonography for non invasive assessment of bone in horses. *Am. J. Vet. Res.* 63, 1464-1469.
6. Carstansen B, Detilleux J, Amory H, Lepage OM (2002b) Einsatz der quantitativen Ultrasonometrie in der Knochenagnostik beim Warmblutpferd. Proc. 17th DVG Congress "Pferdekrankheiten" Hannover, Germany. Pp. 249-252.
7. Carstansen B, Duboeuf F, Detilleux J, Lepage OM (2003a) Equine third metacarpal bone assessment by quantitative ultrasound and dual-energy x-ray absorptiometry: an ex vivo study. *J. Vet. Med. A.* 50, 42-49.
8. Carstansen B, Lepage OM, Hars O, Langlois P, Duboeuf F, Amory H (2003b) Speed of sound measurements of the third metacarpal bone in young exercising Thoroughbred racehorses. *Bone.* 33, 411-418.
9. Choquet P, Sick H, Constantinesco A (2000) MRI of the equine digit with a dedicated low-field magnet. *Vet. Rec.* 20, 616-617.
10. Davies HM (2002) Dorsal metacarpal cortex ultrasound speed and bone size and shape. *Equine Vet. J. (Suppl.)* 34, 337-339.
11. Estberg L, Stover SM, Gardner IA, Drake CM, Johnson B, Ardans A (1996) High-speed exercise history and catastrophic racing fracture in thoroughbreds. *Am. J. Vet. Res.* 57, 1549-1555.
12. Fan B, He YQ, Hans D (1997) A comparison between ultrasound velocity at the phalanx with site matched cortical thickness and bone density. *Osteoporos. Int. (Suppl.)* 7, 62.
13. Funck C, Wuster C, Alenfeld FE, Pereira-Lima JF, Fritz T, Meeder PJ, Gotz M, Ziegler R (1996) Ultrasound velocity of the tibia in the normal German women and hip fracture patients. *Calcif. Tissue Int.* 58, 390-394.
14. Funke M, Kopka L, Vosshenrich R, Fischer U, Ueberschaer A, Oestmann JW, Grabbe E (1995) Broadband ultrasound attenuation in the diagnosis of osteoporosis: correlation with osteodensitometry and fracture. *Radiol.* 194, 77-81.
15. Gibbens DT, Gilsanz V, Boechat MI, Dufer D, Carlson ME, Wang CI (1988) Osteoporosis in cystic fibrosis. *J. Pediatrics.* 113, 295-300.
16. Hans D, Dargent-Molina P, Schott AM, Sebert JL, Comier C, Kotzki PO, Delmas PD, Pouilles JM, Breart G, Meunier PJ (1996) Ultrasonographic heel measurements to predict hip fracture in elderly women: the EPIDOS prospective study. *Lancet.* 348, 511-514.
17. Jeffcott LB, McCartney RN (1985) Ultrasound as a tool for assessment of bone quality in the horse. *Vet. Rec.* 116, 337-342.
18. Jeffcott LB, McCartney RN, Speirs VC (1986) Single photon absorptiometry for the measurement of bone mineral content in horses. *Vet. Rec.* 118, 499-505.
19. Jeffcott LB, Buckingham SH, McCarthy RN, Cleeland JC, Scotti E, McCartney RN (1988) Non-invasive measurement of bone: a review of clinical and research applications in the horse. *Equine Vet. J. (Suppl.)* 6, 71-79.
20. Knapp KM, Blake GM, Spector TD, Fogelman I (2001) Multisite quantitative ultrasound: precision, age- and menopause-related changes, fracture discrimination, and T-score equivalence with dual-energy X-ray absorptiometry. *Osteoporos. Int.* 12, 456-464.

21. Lee SC, Coan BS, Bouxsein ML (1997) Tibial ultrasound velocity measured in situ predicts the material properties of tibial cortical bone. *Bone*. 21, 119-125.
22. Lappe J, Davies K, Recker R, Heaney R (2005) Quantitative ultrasound: use in screening for susceptibility to stress fractures in female army recruits. *J. Bone Miner. Res.* 20, 571-578.
23. Lepage OM, Carstansen B, Uebelhart D (2001) Non-invasive assessment of equine bone: an update. *Vet. J.* 161, 10-23.
24. McCartney RN, Jeffcott LB (1987) Combined 2.25 MHz ultrasound velocity and bone mineral density measurements in the equine metacarpus and their in vivo applications. *Med. Biol. Engin. Comp.* 25, 620-626.
25. McClure SR, Glickman LT, Glickman NW, Weaver CM (2001) Evaluation of dual energy x-ray absorptiometry for in situ measurement of bone mineral density of equine metacarpus. *Am. J. Vet. Res.* 62, 752-756.
26. Njeh CF, Boivin CM, Langton CM (1997) The role of ultrasound in the assessment of osteoporosis: a review. *Osteoporosis Int.* 7, 7-22.
27. Njeh CF, Saeed I., Grigorian M., Kandler DL, Fan B, Sheperd J, McClung M, Drake WM, Genant HK (2001) Assessment of bone status using speed of sound at multiple anatomical sites. *Ultrasound in Med. & Biol.* 27, 1337-1345.
28. Nunamaker DM, Butterweck DM, Provost MT (1989) Some geometric properties of the third metacarpal bone: a comparison between the thoroughbred and standard racehorse. *J. Biomech.* 22, 129-134.
29. Pain HJ (1999) *The physics of vibrations and waves*. 5th ed., Chichester: Wiley.
30. Pande KC, Bernard J, McCloskey EV, de Takats D, Kanis JA (2000) Ultrasound velocity and dual-energy X-ray absorptiometry in normal and pagetic bone. *Bone*. 26, 525-528.
31. Pratt GW (1980) An in vivo method of ultrasonically evaluating bone strength. *Proc. 26th Annu. Meet. Am. Assoc. Equine Pract.* Pp. 295-306.
32. Price JS (1998) Biochemical markers of bone metabolism in horses: potentials and limitations? *Vet. J.* 156, 163-165.
33. Rabin DS, Rantanen NW, Seder JA, Miller P, Hellhake P (1983) The clinical use of bone strength assessment in the thoroughbred racehorse. *Proc. 28th Annu. Meet. Am. Assoc. Equine Pract.* Pp. 343-351.
34. Rho JY, Ashman RB, Turner CH (1993) Young's modulus of trabecular and cortical bone material: ultrasonic and microtensile measurements. *J. Biomech.* 26, 111-119.
35. Riggs CM (1999) Aetiopathogenesis of parasagittal fractures of the distal condyles of the third metacarpal and third metatarsal bones - Review of the literature. *Equine Vet. J.* 31, 116-120.
36. Stover SM, Pool RR, Martin RB, Morgan JP (1992) Histological features of the dorsal cortex of the third metacarpal bone mid-diaphysis during postnatal growth in thoroughbred horses. *J. Anat.* 181, 455-469.
37. Ueltschi G (1975) 1st results of scintigraphic skeletal examinations in horse using ^{99m}Tc phosphates as tracers. *Schweiz. Arch. Tierheilkd.* 117, 383-392.
38. Waite KL, Nielsen BD, Rosenstein DS (2000) Computed tomography as a method of estimating bone mineral content in horses. *J. Equine Vet. Sci.* 20, 49-52.