



Doctoral Thesis

Analysis of distal radius bone strength using the finite element method

Author(s):

Pistoia, Walter

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004442313> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 14688

Analysis of Distal Radius Bone Strength Using the Finite Element Method

Dissertation for the degree of

DOCTOR OF THE TECHNICAL SCIENCES

of the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH, SWITZERLAND

Presented by

WALTER PISTOIA

Dipl. masch. Ing. ETH

Born on January 12, 1972

Citizen of Pregassona (TI), Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Niederer, examiner

Prof. Dr. P. Rügsegger, co-examiner

Prof. Dr. B. van Rietbergen, co-examiner

2002

Abstract

Bone strength is one of the most important factors in the assessment of bone fracture risk and efficacy of therapeutic interventions in osteoporosis. The propensity to fracture a bone is determined by extrinsic factors, such as the force of a fall as well as intrinsic factors which are defined by the strength of the bone, including the bone density, bone microarchitecture and matrix composition. The ultimate aim of therapeutic procedures is to decrease fracture risk by increasing bone strength. In most cases the bone density is used as a surrogate for fracture risk; however, bone density does not entirely account for fracture risk, or therapeutic effects. Thus in order to obtain a more complete description of the skeletal status of a patient, it is investigated if others factors potentially better reflect bone strength. Recently, a new approach, combining computational engineering methods (finite element -FE- methods) and three-dimensional (3D) high-resolution imaging technique have made possible to calculate the mechanical properties of bone specimens *in vitro*. More recently this approach has been applied to bones measured *in vivo*. That was possible thanks to a new generation of high-resolution imaging technique that provides a sufficient resolution to resolve the internal structure of bone. Although the results of FE simulations based on high-resolution images *in vitro* are well accepted, the usefulness of the FE-approach for *in vivo* examinations has still to be proven.

In this thesis, we show in a first step that the spatial resolution of a 3D-pQCT (three-dimensional peripheral computed tomography) device used for patient examinations is sufficient for an accurate FE analysis of bone elastic properties and loading. This conclusion is drawn from a study with fifteen bone specimens from human femoral heads that were imaged first with a 3D-pQCT scanner and a second time with a micro-CT scanner that can provide images with a much higher resolution. FE models were created from the micro-CT and the pQCT images. The results indicate that the bone elastic properties calculated from the FE technique using pQCT images are very similar to those calculated when using micro-CT images, albeit correction factors are needed. In combination with the FE technique it thus becomes possible to calculate *in vivo* bone mechanical properties and tissue loading. Since these parameters are indicative for bone strength, it is expected that the methods investigated here may provide a more accurate basis for the prediction of bone fracture.

The prediction of bone fracture in the distal radius is the focus of the ensuing studies of this thesis. In chapter 3 we aim to answer the question whether results of FE analyses of the distal

radius can lead to a better prediction of bone fracture load than predictions based on bone mass or structural parameters. For this purpose the distal 4-cm of 54 cadaver arms were measured *ex vivo* with a 3D-pQCT and FE simulations of a compression test were created and compared with experimentally measured values. Based on the results we conclude that, tissue level strain calculated from FE analyses can be a better predictor for bone fracture load ($R^2=0.75$) than bone mass ($R^2<0.48$) or structural indices ($R^2<0.57$). A major advantage of the mechanistic approach introduced here over stochastic models for bone failure prediction, such as those based on DXA data, is the fact that FE models directly account for the mechanical aspects of the full, patient-specific, bone architecture, making it potentially a more precise and versatile approach.

Chapter 4 shows, that even a simplified FE-model based on a smaller region (1-cm) of the distal radius provide better correlation ($R^2=0.66$) than traditional densitometric techniques ($R^2=0.48$) or bone structural parameters ($R^2=0.47$). This is important for practical reasons because imaging a 1-cm radius segment with the 3D-pQCT scanner requires only few minutes measuring time and thus is acceptable for patient examinations.

Aim of the 5th chapter was to study the mechanical influence of architectural changes that occur during metabolic bone diseases or by provision of bone supplementation drugs. We first investigate if different scenarios of bone atrophy, each of which affects the structure in a different way but results in the same amount of bone loss, would affect the strength of the bone in a different way. Second, we investigate if and to what extent the original strength of the affected bone can be recovered by supplementation of bone mass. The results of this study demonstrate that a modification in the cortical region affects the strength of the radius to a much larger extent than changes in trabecular architecture. We conclude that the application of these simulation techniques can provide new insights in the study of bone diseases and, it could also be a useful tool for pre-clinical evaluation of new bone drugs.

Sommaro

La resistenza meccanica delle ossa e' uno dei piu' importanti fattori nella valutazione del rischio di frattura e dell'efficacia degli interventi terapeutici in caso di osteoporosi. La tendenza alla frattura in un osso e' determinata da fattori esterni, quali le forze esercitate durante la caduta, e da fattori intrinseci che determinano la resistenza dell'osso, quali la densita', la microarchitettura e la composizione dell' osso. Lo scopo finale della medicina terapeutica applicata in questo campo, e' quello di diminuire il rischio di frattura incrementando la resistenza ossea. Nella maggioranza dei casi, la densita' ossea viene usata come surrogato nella classificazione del il rischio di frattura. Cio' malgrado la densita' ossea non e' sufficiente per definire il fattore di rischio e difficilmente rispecchia l'effetto terapeutico. Percio', in modo da ottenere una migliore identificazione dello stato di qualita' delle ossa dei pazienti, si e' iniziato a ricercare nuovi parametri che potenzialmente potrebbero meglio identificare la resistenza ossea. Recentemente un nuovo approccio che combina metodi ingegneristici computerizzati (metodo degli elementi finiti, EF) con tecniche di visualizzazione tridimensionali ad alta risoluzione, ha reso possibile la determinazione delle proprieta' meccaniche in campioni di ossa analizzate *in vitro*. Solo recentemente, questo metodo ha potuto essere applicato *in vivo*. Cio' e' stato reso possibile grazie all'avvento di una nuova generazione di apparecchi ad alta risoluzione che permettono di visualizzare la struttura ossea *in vivo*. Sebbene i risultati derivanti da simulazioni con gli EF basate su immagini tridimensionali ad alta risoluzione *in vitro* siano comunemente accettati, la validita' di questo approccio a partire da immagini *in vivo* non e' ancora stata provata.

In questa tesi e' stato in primo luogo dimostrato, che la risoluzione spaziale di un apparecchio 3D-pQCT (three-dimensional peripheral computed tomography), usato per l'esaminazione di pazienti, e' sufficiente per un'accurato calcolo delle proprieta' meccaniche delle ossa utilizzando il metodo degli EF. In questo studio quindici campioni di ossa umane estratti dal collo del femore sono stati visualizzati in un primo tempo utilizzando un scanner 3D-pQCT e, in un secondo tempo, con un micro-tomografo computerizzato (micro-CT) da cui si ottengono immagini ad un risoluzione molto piu' alta. I modelli di EF creati a partire dalle immagini derivanti da entrambi i sistemi indicano che le caratteristiche elastiche calcolate sono molto simili, anche se fattori di correzione si rivelano necessari. Usando il metodo degli EF e' quindi possibile calcolare le proprieta' meccaniche delle ossa *in vivo* e, visto che i valori ottenuti

sono indicativi della fragilit  delle osse, questo metodo potrebbe essere utilizzato per una migliore predizione delle fratture.

La predizione delle fratture nel radio distale e' il tema dei successivi studi di questa tesi. Nel terzo capitolo si e' cercato di dare un risposta alla seguente domanda: puo' il metodo degli EF applicato a modelli del radio distale portare ad una migliore predizione delle fratture rispetto a predizioni basate sulla densitometria o su parametri strutturali? A questo scopo 4-cm di radio distale in 54 cadaveri sono stati misurati *ex vivo* con lo scanner 3D-pQCT. Queste immagini tridimensionali sono state quindi utilizzate per simulare un test di compressione con il metodo degli EF. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono quindi stati comparati con risultati dei test di compressione sperimentali. Basandosi sul confronto dei dati, si puo' concludere che la deformazione a livello di tessuto simulata con il metodo degli EF, meglio predice la forza di rottura ($R^2=0.75$) che non la densitometria ($R^2<0.48$) o gli indici strutturali ($R^2<0.57$). Il maggior vantaggio dell'approccio meccanico introdotto qui, nei confronti dei metodi stocastici usati finora, e' il fatto che questo metodo considera direttamente gli aspetti meccanici della architettura ossea specifica del paziente, rendendo questo tipo di approccio potenzialmente piu' preciso e versatile.

Nel quarto capitolo di questa tesi si e' voluto dimostrare che, anche basandosi su un piu' limitato segmento di radio (1-cm), l'utilizzo del metodo degli EF fornisce una correlazione migliore ($R^2=0.66$) che con i metodi densitometrici ($R^2<0.48$) o gli indici strutturali ($R^2<0.47$). La visualizzazione di un segmento di 1-cm diminuisce considerevolmente il tempo di misurazione rendendo questa tecnica accettabile per un'applicazione clinica.

Lo scopo del quinto capitolo, e' di capire quali tipi di influenze a livello meccanico, possano portare dei cambiamenti nella morfologia ossea dovuti a malattie delle ossa o a terapie farmacologiche. Come primo passo, differenti scenari di atrofia ossea sono stati studiati. In ogni scenario la stessa quantita' di massa ossea e' stata sottratta intaccando la struttura in maniera differente. In un secondo tempo si e' voluto studiare se la resistenza delle osso originale poteva essere recuperata grazie a un totale ricupero della massa iniziale. I risultati delle simulazioni indicano che un cambiamento nella regione corticale ha effetti piu' marcati sulla resistenza dell'osso che una non una modifica nella regione trabecolare. Si puo' concludere che l'applicazione di queste tecniche di simulazione dovrebbe portare nuovi spunti nello studio delle malattie ossee e divenire un valido mezzo di supporto nella valutazione pre-clinica di nuovi tipi di farmaci.