

Dynamic Characterization of the Intervertebral Disc

Doctoral Thesis

Author(s):

Marini, Giacomo

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010551002>

Rights / license:

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

DISS. ETH NO. 22946

***DYNAMIC CHARACTERIZATION
OF THE
INTERVERTEBRAL DISC***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

GIACOMO MARINI

M.Sc. in Biomedical Engineering, Politecnico di Torino, Italy

born on 23rd February, 1977

citizen of Florence, Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stephen J. Ferguson, examiner

Prof. Edoardo Mazza, co-examiner

2015

Abstract

According to the World Health Organization, the average life expectancy has continued to grow in the last decades. This poses several challenges to the health care system. Low-back pain in particular, although not life threatening, can seriously compromise the quality of life and the associated costs are tremendous.

The spine, and especially the intervertebral disc, plays a fundamental role in the etiology of the low-back pain syndrome. Unfortunately, as one of the largest avascular soft tissue structures in the body, the disc has a limited ability for repair or regeneration. Furthermore, after the third decade of life, the disc begins to undergo a physiological degeneration, which affects both the mechanical and biochemical properties. Among the many causes which can trigger degeneration, high frequency loads have been postulated to accelerate the degenerative process, either by direct mechanical damage or by provoking changes to the biological homeostasis. Therefore, understanding how trauma or vibration might influence its state is essential to develop strategies to prolong the normal function of the disc.

Through technological advancement, the body is often subjected to some form of high frequency loads. Although numerous epidemiological studies have investigated the influence of these type of loads on the disc, the correlation between cause and effect is still rather vague. In addition, studies which characterized the disc dynamics reported often different findings with respect to the frequency range of the vertical mode. Importantly, no study reported any evidence of nonlinearities in the disc dynamic response even though mechanical systems with similar quasi-static response have peculiar nonlinear dynamics. To investigate the response of biological systems to different loads and boundary conditions, numerical analyses are normally preferred to performing countless experiments. However, to rely on the predicted response, a thorough validation of the model is required.

In this context, the aim of this thesis was to investigate *in silico* and *in vitro* the response of the intervertebral disc to high frequency loading, in order to gain new

insight into potential mechanisms of disc degeneration related to trauma and vibration.

In the first step, impact trauma were numerically investigated on a simplified disc geometry. The simulations showed that the oscillation of the system is largely nonlinear with a strong coupling between the axial and radial oscillation. The model predicted also a unique mechanism of the collagen fibres in absorbing and redistributing the energy transmitted from axial impacts within hundreds of milliseconds after the trauma. The comparison of the resonant frequency for the axial mode of oscillation predicted by the model with the literature indicated that further studies were required to fully characterize the dynamic response of the disc, especially regarding potential nonlinear effects.

Therefore, an experiment was designed to duplicate a base-excitation model with a focus exclusively on the axial response of the disc. Through a continuous increasing and decreasing frequency sweep, nonlinear effects in the dynamic response were considered. The tests showed that, depending on the testing conditions, the human lumbar intervertebral disc exhibits very complex nonlinear dynamics. Sudden changes of oscillation amplitude were exhibited at different frequencies and with initial and final amplitudes which differed depending on the previous path followed by the stimulus. These phenomena are typical for the dynamic behaviour of mechanical systems with similar nonlinear quasi-static response and are normally referred to as jump-phenomena. Their occurrence indicates that different stable conditions of oscillation exist for the disc, which results in loading shocks because of the sudden change between two stable states of oscillation.

Parallel to the experiments, the numerical model was further improved through the development of analytical approaches to describe three major aspects of the physiological system. Specifically: (i) the heterogeneous organisation of the outer ring of the disc (annulus fibrosus), both structural and constitutive (ii) the stress distribution induced by the intrinsic tissue swelling and (iii) the time-dependent response of the tissue. A specific requirement of the modelling methods was the ability to represent patient-specific geometries of the intervertebral disc. The approaches were developed in a finite strain mathematical framework and validated with the quasi-static tensile tests performed in the experiment and studies from literature.

In the last step, the dynamic response predicted by a one degree of freedom lumped parameters model was investigated. The simulations showed that a model which considers the nonlinear asymmetric tension-compression response of the disc is

able to accurately capture its complex non-linear dynamic axial response. The linearization of the disc quasi-static response should be thus avoided or restricted to study cases where the amplitude of the mechanical stimuli is relatively small. The model provided specific guidelines for the numerical approaches for future characterization of the nonlinear dynamic response with three-dimensional patient-specific models.

In conclusion, with the final aim to investigate *in silico* the potential mechanisms of disc degeneration following high frequency loads, this thesis provided several fundamental accomplishments. In particular, the first characterization of the non-linear dynamics in soft tissues structures was reported. This represents a pivotal finding for spinal biomechanics, where the effects of such mechanical phenomena on human physiology are still completely unexplored.

The study was conducted in the context of the SPINEFX Initial Training Network (FPT7-PITN-GA-2009-238690-SPINEFX), a collaborative program supported by the European Union Marie Curie Action.

Sommario

Secondo l'Organizzazione Mondiale per la Sanità, l'aspettativa di vita media è in continua crescita negli ultimi decenni. Questo pone vari problemi ai sistemi di assistenza sanitaria. In particolare la lombalgia, sebbene non abbia aspetti letali, può compromettere seriamente la qualità di vita e i costi associati sono enormi.

La spina dorsale, e specialmente il disco intervertebrale, gioca un ruolo fondamentale nell'eziologia delle lombalgie. Sfortunatamente, essendo tra i sistemi fisiologici più grandi privi di vascolarizzazione, il disco intervertebrale ha una capacità limitata di riparazione o rigenerazione. Inoltre, dopo la terza decade, il disco entra in un processo fisiologico che comporta alterazioni sia dal punto di vista meccanico che biochimico. Fra le varie cause che possono innescare simili meccanismi degenerativi, le sollecitazioni ad alta frequenza vengono ritenute capaci di accelerare tali processi sia attraverso il danneggiamento diretto della struttura o inducendo cambiamenti all'omeostasi del sistema. Perciò, comprendere come un trauma o vibrazioni possano influenzarne lo stato è essenziale per sviluppare strategie che prolunghino il normale funzionamento del disco.

A causa dello sviluppo tecnologico, il corpo è soggetto spesso a una qualche forma di sollecitazione ad alta frequenza. Sebbene diversi studi epidemiologici abbiano studiato l'influenza di tali tipo di sollecitazioni sul disco, la correlazione fra causa ed effetto rimane piuttosto vaga. Inoltre, quegli studi che hanno caratterizzato la risposta dinamica del disco riportano spesso valori diversi della frequenza del modo di oscillazione verticale. Soprattutto, nessuno studio riporta un qualsiasi segno di non-linearità nella risposta dinamica del disco nonostante sistemi meccanici con simili caratteristiche meccaniche presentino dinamiche non-lineari. Al fine di studiare la risposta di sistemi biologici in scenari differenti, simulazioni numeriche sono di solito preferite rispetto a effettuare innumerevoli serie di esperimenti. Tuttavia, per fare affidamento sulla soluzione ottenuta, è necessaria una accurata validazione del modello.

In questo contesto, lo scopo di questa tesi è di investigare *in silico* e *in vitro* la risposta del disco intervertebrale a sollecitazioni ad alta frequenza, al fine di ottenere ulteriori dati su potenziali meccanismi di degenerazione del disco connessi a trauma e vibrazioni.

Nella prima parte, traumi da impatto sono stati studiati numericamente con un modello semplificato del disco intervertebrale. Le simulazioni hanno evidenziato che l'oscillazione del sistema era composta da più di un modo di oscillazione con un forte accoppiamento tra la risposta oscillatoria assiale e radiale. Il modello ha predetto anche un meccanismo unico delle fibre di collagene per assorbire e ridirigere l'energia trasmessa nell'impatto che prende luogo nei primi millisecondi dopo l'impatto. Il confronto della frequenza per il modo verticale di oscillazione predetta dal modello con i valori riportati in letteratura indicano che ulteriori studi erano necessari al fine di caratterizzare pienamente la risposta dinamica del disco, specialmente per quanto riguarda potenziali aspetti nonlineari.

Un esperimento è stato pertanto pianificato per duplicare un modello con eccitazione applicata alla base per studiare la risposta assiale del disco. Grazie all'uso di uno sweep in frequenza, crescente e decrescente, ad ampiezza costante, gli effetti nonlineari sono stati considerati. I test hanno dimostrato che, a seconda delle condizioni, il disco intervertebrale esibisce dinamiche nonlineari molto complesse. Improvvisi cambiamenti dell'ampiezza di oscillazione sono stati esibiti a frequenze diverse e con ampiezze finali che differiscono a seconda del percorso seguito dall'eccitazione. Questi fenomeni sono tipici della risposta dinamica di sistemi meccanici con simile risposta quasi statica e sono di solito chiamati *salti*. La loro presenza indica che diverse condizioni stabili di oscillazioni esistono per il disco intervertebrale. Questo pertanto può comportare sollecitazioni di tipo shocks legate all'improvviso passaggio fra i due stati stabili di oscillazione.

In parallelo agli esperimenti, il modello numerico è stato ulteriormente migliorato attraverso di metodi analitici per la descrizione di tre aspetti fondamentali del sistema fisiologico. Nello specifico: (i) l'eterogenea organizzazione dell'anello esterno del disco (annulus fibrosus), strutturale e costitutiva (ii) la distribuzione degli stress indotta dall'espansione intrinseca del tessuto e (iii) la risposta dissipativa del tessuto. Un requisito specifico dei metodi sviluppati era l'abilità di rappresentare geometrie del disco intervertebrale paziente-specifiche. I metodi sono stati sviluppati secondo la teoria delle deformazioni finite e verificato con i tests quasi statici effettuati nell'esperimento e con letteratura specifica.

Nell'ultima fase, la risposta dinamica predetta da un modello a parametri concentrati a un grado di libertà è stato investigato. Le simulazioni hanno dimostrato che un modello che considera la risposta nonlineare asimmetrica del disco in tensione-compressione riesce a catturare accuratamente la sua complessa dinamica nonlineare assiale. La linearizzazione della risposta quasi statica del disco dovrebbe pertanto essere evitata o ristretta a casi studio dove l'ampiezza dello stimolo meccanico è relativamente piccola. Questo studio ha inoltre fornito linee guida per gli approcci numerici finalizzati a studiare la risposta dinamica nonlineare con modelli tridimensionali.

In conclusione, con lo scopo finale di investigare *in silico* i potenziali meccanismi di degenerazione del disco legati a sollecitazioni ad alta frequenza, questa tesi ha fornito diversi risultati fondamentali. In particolare, la prima caratterizzazione delle dinamiche nonlineari in strutture basate su tessuti molli è stata riportata. Questo rappresenta una scoperta fondamentale per la biomeccanica della spina dorsale i cui effetti sulla fisiologia umana sono completamente inesplorati.

Lo studio è stato condotto nel contesto dello SPINEFX Initial Training Network (FPT7-PITN-GA-2009-238690-SPINEFX), un programma di collaborazione tra vari istituti europei finanziato attraverso un European Union Marie Curie Action.