

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TENDÕES CALCÂNEO BOVINO SOB DEFORMAÇÕES CÍCLICAS

Mechanical behaviour of bovine calcaneous tendon under cyclic deformations

Sergio Rocha Piedade¹, Inácio Maria Dal Fabbro², Martha Maria Mischan³,
Daniel Albiero⁴, Giovanni Francisco Rabelo⁵

RESUMO

Este trabalho teve por finalidade analisar o comportamento de tendões calcâneo bovino submetidos a ensaios mecânicos cíclicos. Para cada corpo de prova foram aplicados três ensaios de dez ciclos de tração e três níveis de deformação: 2,5%, 3% e 4%. Ao término de cada ensaio o tendão era mantido em repouso por 300 s. A velocidade de carregamento adotada foi de 10% do comprimento do corpo de prova, por segundo. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com delineamento de parcelas subdivididas no tempo e blocos casualizados nas subparcelas. Conclui-se que o pré-tensionamento de tendões realizado através da deformação relativa permanece como parâmetro mais seguro, por atuar dentro dos limites fisiológicos do tendão, evitando os efeitos nocivos do sobretensionamento.

Termo para indexação: Relaxamento cíclico.

ABSTRACT

This research work reports an experimental study on the mechanical behavior of bovine calcaneous tendons. A total number of 03 cyclic relaxation tests with 10 cycles respectively at 2,5%, 3%, and 4% of deformation were performed for each specimen. The specimens were kept at rest for 300 s between tests. Deformation rates were maintained at 10% of initial length per second. Cyclic relaxation tests carried on all tendons showed that the average force correspondent to the first cycle was statistically significantly greater than the average force correspondent to the tenth cycle. This also emphasizes the occurrence of a force relaxation phenomena. It can be concluded that tendons pre-tensioning by means of specific deformations stands for a safer parameter because it acts within the tendon biological limits avoyding the overtensioning negative effects.

Index terms: Cyclic stress relaxation.

(Recebido para publicação em 7 de junho de 2005 e aprovado em 26 de setembro de 2005)

INTRODUÇÃO

No ser humano, as lesões ligamentares, como as do joelho, são um problema comumente enfrentado pelo ortopedista. Na grande maioria dos casos o tratamento cirúrgico é realizado por meio da reconstrução do ligamento lesado com enxerto de tendões do próprio paciente. Embora a cirurgia apresente resultados clínicos satisfatórios, diversos fatores podem influenciar na evolução clínica final. O alongamento excessivo do enxerto do tendão que pode ocorrer no pós-operatório permanece como uma das causas mais importantes de falha cirúrgica. Com o intuito de se minimizar os efeitos do alongamento, o pré-tensionamento do enxerto é realizado rotineiramente durante o procedimento cirúrgico. Entretanto, a literatura ainda não apresenta

consenso sobre os níveis ideais de pré-tensionamento. Tendões e ligamentos são estruturas desenvolvidas para suportar cargas tensionais e apresentam comportamento tempo e história dependente, característico dos materiais viscoelásticos. Portanto, o sucesso do tratamento cirúrgico pode estar associado ao comportamento mecânico dos tendões. Estudos realizados em modelo animal têm auxiliado na evolução dos procedimentos cirúrgicos e os pacientes têm se beneficiado desse conhecimento.

Neste trabalho, dez tendões de calcâneo bovino foram submetidos a deformações cíclicas. Foi analisada a resposta mecânica apresentada pelo tendão no primeiro e no décimo ciclo de deformação constante, obtidos nos três níveis de deformação (2,5%, 3% e 4%).

¹ Professor Doutor do Departamento de Ortopedia e Traumatologia da Faculdade de Ciências Médicas/UNICAMP – Rua Dr. Carlos Gumarães, 248, apto. 114 – Campinas, SP – 13.024-200 – piedade@unicamp.br

² Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP – Cx. P. 6011 – Campinas, SP – 13.081-490

³ Professora Doutora do Departamento de Bioestatística (I. B. B.)/UNESP – Rubião junior – Botucatu/SP – Cx. P. 510 – 13.024-200

⁴ Engenheiro Agrícola Mestre – Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP – Cx. P. 6011 – Campinas, SP – 13.081-490

⁵ Engenheiro Eletrecista Doutor – Departamento de Engenharia – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37.200-000 – Lavras, MG.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dez tendões calcâneo bovino, de macho da raça Nelore, com peso aproximado de 450 kgf e idade média de 3 anos. A necessidade de se manterem as propriedades físicas dos corpos de prova, associada à dificuldade prática de realizar os ensaios no momento da sua obtenção, levaram a estocagem dos tendões à temperatura de -20°C . Para a realização dos ensaios foi feito o descongelamento à temperatura ambiente (27°C). Estes procedimentos seguiram a mesma metodologia empregada por Hernandez et al. (1993), Pfaffle et al. (1996), Salomão et al. (1994) e Woo et al. (1986). Os ensaios viscoelásticos foram conduzidos numa máquina de ensaios, inteiramente automatizada, modelo TA 500, fabricado pela LLOYD INSTRUMENTS LTD. Este texturômetro, de origem inglesa possui célula de carga de 500 N e resolução de 0,01%, Figura 1. O sistema está acoplado a um computador Pentium Pro®, com 64 MB de memória RAM. A aquisição automática dos dados foi feita utilizando o "software" Nexygen 3.0.

O tendão foi fixado na máquina de ensaios por meio de um sistema de garras, Figura 2. Este sistema consistiu de duas placas metálicas acopladas uma contra outra e fixas por quatro parafusos que receberam um torque médio de 2,5 N.mm, por meio um torquímetro de estalo tipo AVT 100, marca Bristol, com escala de 2,5 a 11 N.mm. A face interna dessas placas possui ranhuras sinusoidais que conferiu confiabilidade ao sistema de fixação, evitando o

escorregamento do tendão durante a realização dos ensaios. A padronização destes procedimentos foi definida após testes preliminares.

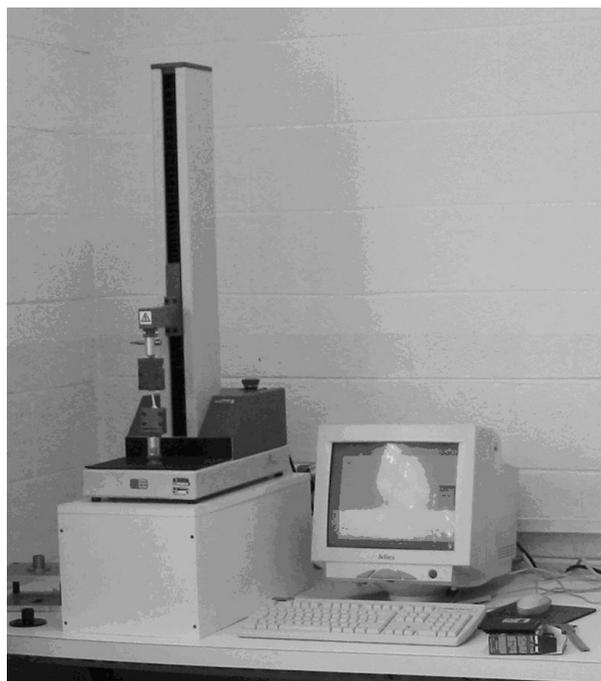


FIGURA 1 – Texturômetro, modelo TA 500, acoplado a um computador Pentium Pro® e corpo de prova fixado ao sistema de garras.

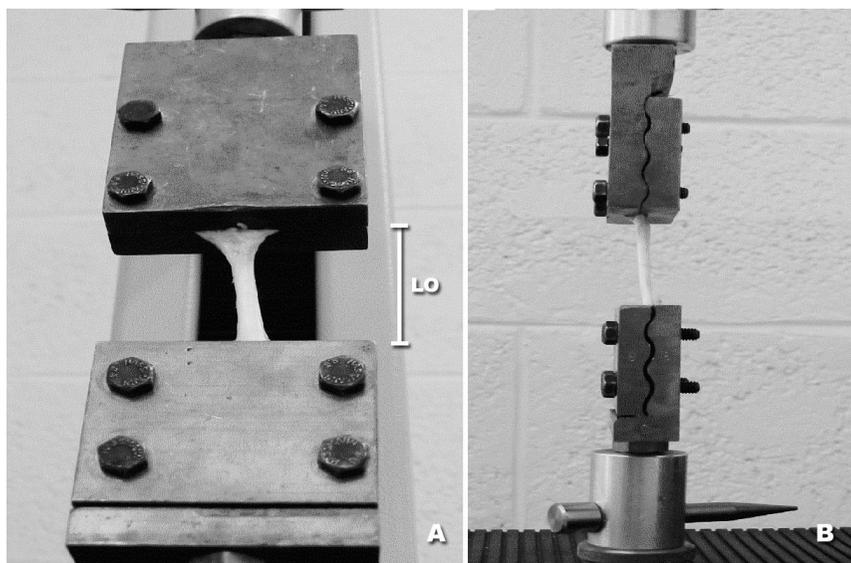


FIGURA 2A e B – Detalhe do tendão fixo ao sistema de garras sinusoidais, e disposição dos quatro parafusos em cada canto das placas metálicas, vistos de frente e perfil, respectivamente.

O corpo de prova analisado (L₀), Figura 2-A, foi definido como o segmento de tendão presente entre as garras. A medida do seu comprimento, em milímetros (mm), foi registrada com o auxílio de um paquímetro digital, Quadro 1.

QUADRO 1 – Descrição da medida do comprimento, em milímetros (mm), dos corpos de prova.

Corpo de prova	Comprimento (mm)
1	32,08
2	28,85
3	23,15
4	26,60
5	20,60
6	25,36
7	26,08
8	32,97
9	27,48
10	30,72

O ensaio consistiu de uma fase de carregamento e outra de descarregamento, realizados a uma velocidade de deformação relativa de 10% do comprimento do tendão,

por segundo. Inicialmente, o corpo de prova foi submetido à taxa de deformação relativa foi 2,5%. Uma vez atingida a deformação máxima de 2,5%, iniciava-se a fase de descarregamento até o corpo de prova atingir o seu comprimento inicial (L₀), correspondendo ao primeiro ciclo.

Cada corpo de prova foi submetido a dez ciclos de alongamento. Após dez ciclos, com deformação máxima de 2,5%, o corpo de prova retornava ao comprimento inicial (L₀), sendo mantido em repouso por 300 s. A seguir, novo teste de relaxamento cíclico se iniciava, mas agora a uma deformação máxima de 3%. Ao completar dez ciclos, um novo período de repouso de 300s foi observado. Finalizando, foi aplicado mais um teste de relaxamento cíclico, com dez ciclos, à deformação máxima de 4%. A escolha dos níveis de deformação e os intervalos de repouso realizados seguiram procedimentos empregados por Fung (1990), Haut & Pawlison (1990) e Lam et al. (1993). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com delineamento em parcelas subdivididas no tempo, e blocos casualizados (os tendões) nas parcelas. As três porcentagens de deformação máxima foram os tratamentos (A) aplicados às parcelas e os dois ciclos (inicial e final), os tratamentos (B) aplicados às subparcelas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

TABELA 1 – Valores de força no 1º e 10º ciclo obtidos para o tendão calcâneo bovino, submetido a deformações cíclicas (2,5%, 3% e 4%).

Corpo de prova (número)	Deformação máxima					
	2,5%		3%		4%	
	1º ciclo (N)	10º ciclo (N)	1º ciclo (N)	10º ciclo (N)	1º ciclo (N)	10º ciclo (N)
1	23.50	21.08	34.64	29.36	45.51	36.51
2	28.08	20.87	40.02	31.60	49.58	38.98
3	35.18	24.08	30.04	22.38	55.53	38.28
4	15.75	10.28	21.95	15.32	25.68	21.69
5	8.77	5.30	9.06	6.11	16.24	12.61
6	18.89	13.50	22.08	15.93	30.58	23.71
7	40.85	30.12	63.99	56.16	88.36	79.20
8	34.93	29.86	36.54	31.96	55.26	48.81
9	8.48	6.58	10.28	9.07	17.78	14.17
10	12.13	8.73	19.42	14.39	32.56	24.89
Média	22,66	17,04	28,80	23,23	41,71	33,89
Desvio padrão	11,71	9,37	16,24	14,74	21,89	19,73
Coefficiente variância	51,71	55,00	56,37	63,48	52,49	58,22

O pré-tensionamento do enxerto de tendão realizado durante a cirurgia para reconstrução ligamentar do joelho é fundamental para a evolução clínica pós-operatória. Entretanto, o tensionamento excessivo deve ser evitado, pois pode promover deformações permanentes do tendão, gerando o enfraquecimento e até mesmo sua ruptura.

A falta de consenso na literatura sobre os níveis ideais de carga ou deformação a serem aplicados no tensionamento, tem estimulado a realização de inúmeras pesquisas abordando o comportamento mecânico dos enxertos tendíneos. Dentro de limites fisiológicos, tendões e ligamentos sofrem deformações não destrutivas, ou seja, deformações que não excedem o limite elástico que é de 5% de deformação relativa (FUNG).

Os ensaios viscoelásticos são realizados dentro deste limite fisiológico, onde a deformação ou carga empregada ao material pode ser de forma cíclica ou constante. A retirada do estímulo mecânico permite ao material biológico recuperar o seu comprimento inicial. Este fenômeno de recuperação ocorre de forma mais intensa no primeiro minuto após a retirada do estímulo mecânico.

Neste trabalho, as deformações máximas observadas não ultrapassaram o limite superior de 5%, e o intervalo de recuperação foi cinco vezes superior ao período em que ocorre a maior taxa de recuperação.

Para melhor visibilizar os resultados obtidos, na Tabela 1, elaborou-se a Figura 3.

TABELA 2 – Valores percentuais da diferença de força no 1º e 10º ciclos, em relação aos valores de força no 1º ciclo, obtidos para o tendão de calcâneo bovino submetido a ensaio de relaxamento cíclico de força.

Corpo de prova (número)	Nível de deformação		
	2,5%	3%	4%
1	10.31	15.25	19.78
2	25.67	21.04	21.38
3	31.53	25.50	31.06
4	34.72	30.20	15.52
5	39.54	32.55	22.32
6	28.50	27.86	22.46
7	26.28	12.23	10.36
8	14.52	12.52	11.67
9	22.43	11.83	18.62
10	28.01	25.89	23.57
Média	26,15	21,49	19,67
Desvio padrão	8,76	7,98	6,07
Coefficiente variância	33,50	37,13	30,86

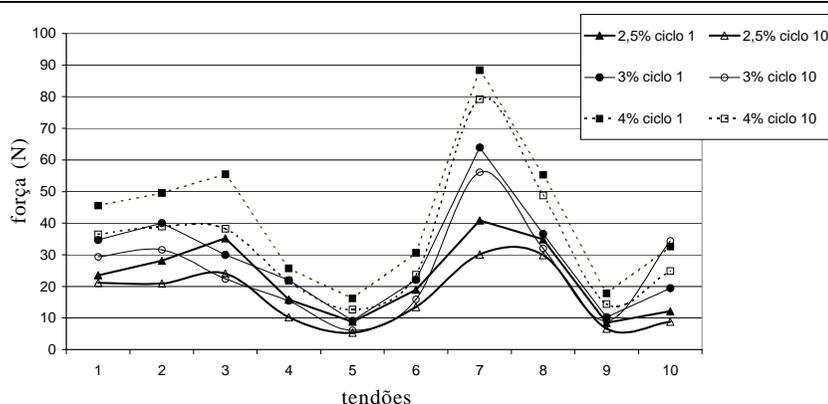


FIGURA 3 – Valores de força no primeiro e décimo ciclo, obtidos para os tendões calcâneo bovino, submetidos a ensaios de relaxamento cíclico de força com três níveis de deformações.

Observando a Figura 3, nota-se que as forças, no primeiro ciclo, durante os três níveis de deformação, foram comparativamente maiores às registradas no décimo ciclo. A seguir, foi aplicada análise de variância, conforme apresentada na Tabela 3.

A análise mostrou diferença significativa para o confronto entre as médias das forças nas deformações menores (2,5% e 3%) em relação a maior (4%). Registrou-se acréscimo das médias das forças com o aumento do nível de deformação, no entanto não mostraram diferença estatística significativa entre as deformações de 2,5% e 3%. Observou-se diferença estatística entre as médias dos

ciclos de força, nos três níveis de deformação, conseqüência do relaxamento de força, conforme apresentado na Tabela 3.

Pode-se constatar que dentro dos limites fisiológicos, a força necessária para se manter o mesmo nível de deformação máxima decresce com passar do tempo. Esta ocorrência deve ser considerada, na cirurgia, durante o pré-tensionamento do enxerto de tendão, pois a força representa um parâmetro de difícil controle.

A seguir, com os resultados apresentados na Tabela 2 foi elaborada a Figura 4.

TABELA 3 – Valores médios das forças (N) no primeiro e décimo ciclos dos ensaios de relaxamento cíclico de força obtidos para o tendão calcâneo bovino, em três níveis de deformação (2,5%, 3% e 4%). Comparações entre as médias pelo teste de Tukey¹.

	2,5 %	3%	4%	Média dos ciclos
Ciclo 1	22,66	28,80	41,71	31,05 (A)
Ciclo 10	17,04	23,23	33,91	24,73 (B)
Média	19,85 (b)	26,01 (b)	37,81 (a)	

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas comparam médias na linha e maiúsculas, na coluna.

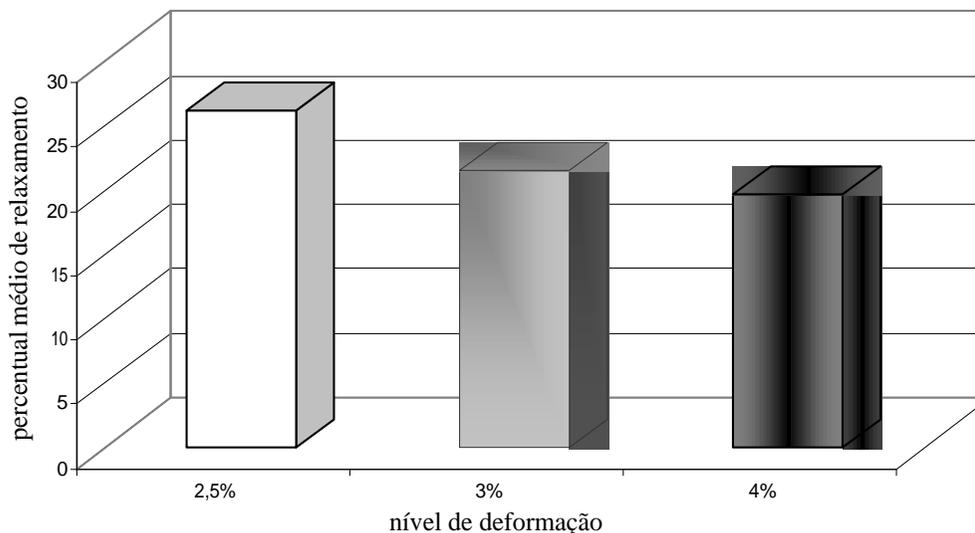


FIGURA 4 – Valores médios de relaxamento percentual da diferença de força no primeiro e décimo ciclo, relacionado ao primeiro ciclo, obtidos para os tendões calcâneo bovino submetido a ensaios de relaxamento cíclico de força, com três níveis de deformação

Na Figura 4, indica-se que existe diferença numérica entre as médias dos percentuais de relaxamento de 2,5%, 3% e 4%. A partir dos dados obtidos da Tabela 2 foi feita análise de variância, conforme apresentada na Tabela 4.

TABELA 4 – Resultados do Teste Tukey ($p < 0,05$) para o confronto do relaxamento percentual médio da diferença de força no primeiro e décimo ciclo, em relação ao primeiro ciclo, em ensaios de relaxamento cíclico de força para os tendões calcâneo bovino, com três níveis de deformação (2,5%, 3% e 4%).

Tratamento	Médias
2,5 %	26,15 (a)
3%	21,49 (b)
4%	19,67 (b)

A análise estatística mostrou diferença significativa entre a média de relaxamento percentual médio de força na deformação de 2,5% em relação aos demais relaxamentos percentuais (3% e 4%). Nota-se que partindo dos valores médios do relaxamento percentual de força na deformação de 2,5% até o relaxamento percentual médio de força obtido para a deformação maior (4%) há uma trajetória decrescente.

CONCLUSÃO

O pré-tensionamento de tendões realizado através da deformação relativa permanece como parâmetro mais seguro, por atuar dentro dos limites fisiológicos do tendão evitando os efeitos nocivos do sobre-tensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FUNG, Y. C. The meaning of the constitutive equation. In: _____, **Biomechanics: mechanical properties of living tissues**. New York: Springer, 1990. p. 23-65.
- HAUT, R. C.; POWLISON, A. C. The effects of test environment and cyclic stretching on the failure properties of human patellar tendon. **Journal of Orthopaedic Research**, [S.l.], v. 8, p. 532-540, 1990.
- HERNANDEZ, A. J.; REZENDE, M. U.; UHLENDORFF, E. F. von; LEIVAS, T. P.; CAMANHO, G. L. Estudo mecânico dos complexos colaterais do joelho. **Revista Brasileira de Ortopedia**, São Paulo, v. 28, n. 8, p. 565-569, 1993.
- LAM, T. C.; FRANK, C. B.; SHRIVE, N. G. Changes in the cyclic and static relaxations of the rabbit medial collateral ligament complex during maturation. **Journal of Biomechanics**, Oxford, v. 26, p. 9-17, 1993.
- PFAFFLE, H. J.; TOMANO, M. M.; GREWAL, R.; XU, J.; BORDMAN, N. D.; WOO, S. L. Y.; HERDON, J. H. Short communication tensile properties of the interosseus membrane of human forearm. **Journal of Orthopaedic Research**, New York, v. 14, n. 5, p. 842-845, 1996.
- SALOMÃO, O.; FERNANDEZ, T. D.; CARVALHO JUNIOR, A. E.; LEIVAS, T. P.; TRANCHITELLA, F. B.; NARDELLI, J. C. C.; ALVARENGA FILHO, J. H.; KOKRON, A. E. V. Avaliação das propriedades mecânicas do tendão do músculo tibial posterior submetido a ensaio de tração axial. **Revista Brasileira de Ortopedia**, São Paulo, v. 29, p. 483-486, 1994.
- WOO, S. L. Y.; ORLANDO, C. A.; CAMP, J. F.; AKENSON, W. H. Effects of postmortem storage by freezing on ligament tensile behaviour. **Journal of Biomechanics**, Oxford, v. 19, p. 399-404, 1986.