



DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA PARA MEDIR FORÇA APLICADA SOBRE TECLA DURANTE DIGITAÇÃO

Luiz C. Gertz

Milton A. Zaro

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Laboratório de Medições Mecânicas
CEP 90020-022 Porto Alegre -RS, Brasil E-mail: gertz@mecanica.ufrgs.br

Abstract. *This work describes the development of a load cell (with strain gages) for keyboard. This load cell consists of 4 bars. A strain gage is bonded at the upper face (tension) of one bar and one strain gage is bonded simetrically (compression) at another bar; the same is done with the other two bars. These strain gages are connected to a bridge amplifier (full bridge, providing temperature compensation). If a force is applied at the center of the key, each bar will suffer the same deformation; if the same force is applied at a corner of the key, the deformations at the bars will not be equal, but the total deformation will be the same of the first case, providing the same output signal.*

Keywords: *digitizer, dynamometry, force, keyboard, digitzer, typewriter.*

1. Introdução

Smutz, et al., em artigo publicado em 1994, diz que:

“...estudos epidemiológicos em diversos setores mostraram que as Lesões por Esforços Repetitivos estão associadas ao nível de esforço executado pelas mãos (Stock 1991, Armstrong 1987, Silverstein 1987)...”

“...a força de impacto do dedo durante a digitação está associada ao nível de risco de desenvolvimento de Lesões por Esforços Repetitivos (Armstrong 1993).”

Rempel, 1994 (b) afirma: *“A redução dos riscos associados à força e a postura podem compensar os efeitos negativos da repetitividade. Os efeitos da força de acionamento da tecla não são um fator de risco muito fácil de ser trabalhado, mas há amplas evidências que o risco causado pela postura incorreta dos punhos pode ser reduzido com o uso de teclados mais adequados”*

O estudo da força aplicada sobre o teclado fornece informações importantes na busca de soluções das lesões relacionadas com a digitação.

Armstrong et al., 1994, secciona a primeira fase de compressão da tecla em quatro etapas, que são definidas a seguir e mostradas na Figura 1.

- (I) Força inicial (*Make force*) - o pico de força precede o “retorno táctil” indicando o registro da tecla. Esta é a mínima força necessária para o acionamento da tecla.
- (II) Força de retorno táctil (*Breackaway force*) - é a diferença entre a máxima e a mínima força antes e depois do “retorno táctil”. Ocorre quando a tecla faz o “clique” que o usuário sente quando ela é acionada.
- (III) Deslocamento inicial (*Make travel*) - é o deslocamento correspondente à “força inicial”.
- (IV) Deslocamento Total (*Total travel*) - é a máxima distância entre o “deslocamento inicial” e o “fim de curso”.

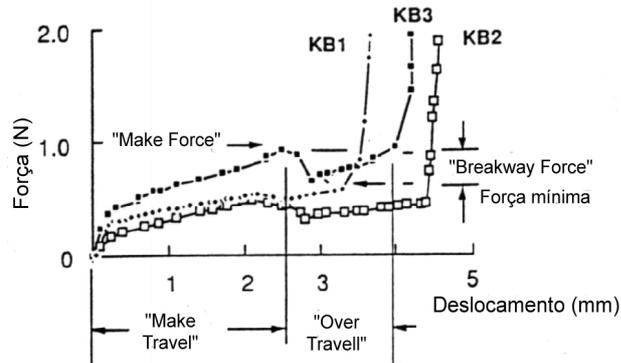


Figura 1 - Etapas durante a aplicação de força sobre a tecla definidas por Armstrong et al., 1994 (a).

Rempel et al., 1994 (a), divide a força aplicada sobre a tecla durante a digitação em três etapas (conforme é mostrado na Figura 2):

- (1) compressão da tecla
- (2) impacto do dedo
- (3) compressão da polpa do dedo e relaxamento

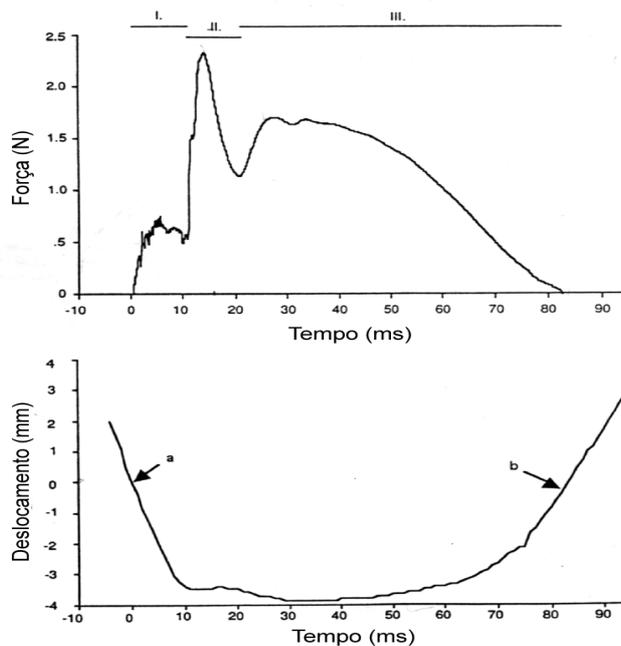


Figura 2 - As três fases para registro de força (N) e deslocamento (mm) x tempo (ms) durante digitação e deslocamento da tecla. Segundo Rempel et al., 1994 (a).

A compressão da tecla começa com o contato do dedo (deslocamento = 0) até o fim do curso de deslocamento da tecla. O “impacto do dedo” ocorre quando a tecla atinge o fim do curso de deslocamento e ocorre uma desaceleração, que está associado com a força máxima que ocorre durante um curto espaço de tempo. Outro pico de força máxima ocorre no início da “compressão da tecla”. A “compressão da polpa do dedo” é responsável por um deslocamento de 0.3 mm depois que a tecla está completamente comprimida e parada. A análise cinemétrica mostra que o movimento adicional foi devido à compressão da polpa do dedo. Na última metade desta fase a força decresce e a tecla sobe, retornando à posição inicial.

2. Objetivo

Desenvolver uma célula de carga para medição de força aplicada pelo dedo sobre a tecla, durante digitação. Ela deve possuir dimensões reduzidas que permitam que ela seja fixada em um teclado convencional, substituindo uma tecla comum.

3. A célula de carga

A célula de carga desenvolvida utiliza extensômetros resistivos do tipo *strain gages* e foi baseada na plataforma de força desenvolvida por Petersen, 1965.

Ela é composta por quatro vigas engastadas com 14,0 x 4,0 x 0,4 mm, de alumínio 6066-T6, cada uma com um sensor. Duas com extensômetros fixos no lado superior (em tração), e duas com extensômetros fixos do lado inferior (em compressão). Os sensores foram montados formando uma Ponte de Wheatstone completa.

Em cada extremidade das vigas fixou-se a placa onde a força é aplicada, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4. Quando a força é aplicada no centro da placa as quatro vigas sofrem a mesma deformação. Se a mesma força for aplicada em uma das extremidades a viga fixa nesta posição sofrerá a maior deformação; como a célula é montada em ponte completa, o desbalanço da ponte será semelhante ao caso em que a força é aplicada no centro. Assim, se a força aplicada pelo dedo estiver deslocada do centro da placa, a leitura da força não sofrerá distorções pois a célula foi projetada para compensar variações na posição de aplicação da carga.

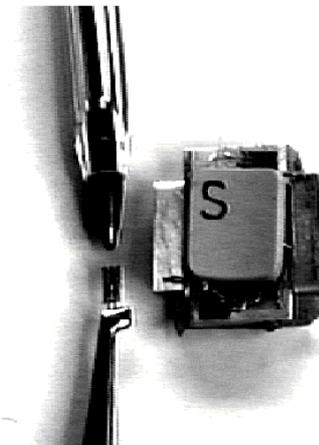
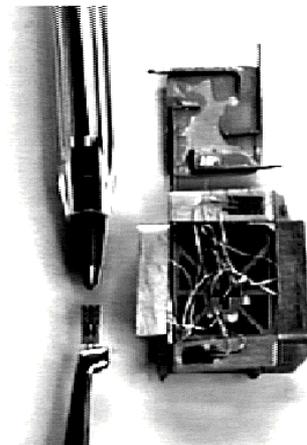


Figura - 3. Célula de carga aberta e sensor. Figura - 4. Célula de carga montada e sensor.

Foram utilizados sensores do tipo *strain gages* da marca KYOWA, modelo KFG-1-120-C1-23, para alumínio com 1 mm de grade. Para fixá-los na superfície das vigas de alumínio utilizou-se cola da marca MICROMEASUREMENTS (MB35); após feita a soldagem dos fios e terminais

dos sensores, aplicou-se uma camada de cola de silicone da marca MICROMEASUREMENTS, modelo 3140 RTV, com a finalidade de proteger o sensor e os fios de eventuais acidentes. Os passos da fixação dos sensores seguem a seguir:

1. Limpa-se a superfície com álcool isopropílico.
2. Lixa-se a superfície onde os extensômetros serão colados.
3. Limpa-se a superfície com álcool isopropílico.
4. Aplica-se uma camada de cola Micromerements M-Bond 43B.
5. Deixa-se secar por 20 min.
6. Coloca-se o extensômetro sobre a cola.
7. Coloca-se uma camada de lã de rocha sobre o extensômetro.
8. Coloca-se uma lâmina de aço sobre a lã de rocha.
9. Prensa-se a lamina de aço contra a superfície com o auxílio de um grampo.
10. Coloca-se em um forno a temperatura ambiente.
11. Eleva-se a temperatura até 175°C a uma taxa de 5°C/min.
12. Deixa-se a 175 °C durante uma hora.
13. Resfria-se até a temperatura ambiente a um taxa de 5 °C/min.
14. Limpa-se a superfície com algodão seco.
15. Aplica-se uma camada de cola Micromerements 3140 RTV para proteção.

4. Dimensionamento da Célula de Carga

A principal dificuldade encontrada na execução do projeto é o pequeno dimensionamento das teclas e a pequena distância existente entre elas quando fixadas no teclado.

Com o objetivo de compensar a variação da aplicação de carga sobre a plataforma da célula de carga optou-se por montar uma ponte de Wheatstone completa, composta por quatro vigas, com dois sensores trabalhando em compressão e dois em tração.

A opção inicial era construir a célula com quatro vigas em forma de cruz fixas pelo centro e pelas extremidades; porém, desta forma não existiria uma boa relação entre o comprimento e a largura. Para contornar esta dificuldade as vigas foram deslocadas para as arestas da tecla e foram fixadas em suas extremidades.

O material utilizado para a confecção das vigas foi o Alumínio 6066-T4, por ser leve, não deteriorar com o tempo e ser de fácil usinabilidade.

Propriedades mecânicas do Alumínio 6066-T4:

Tensão de Escoamento: $\sigma_e = 20,7 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Modulo de Elasticidade: $E = 700,0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

As formulas usadas para o dimensionamento da célula de carga desenvolvida foram retiradas de Popov, 1984.

$$\sigma_e = 20,7 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad E = 700,0 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$l = 14,0 \times 10^{-3} \text{ m} \quad b = 4,0 \times 10^{-3} \text{ m} \quad h = 0,4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

onde: l = comprimento, b = largura, h = espessura

Momento de Inércia I

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{4 \times 10^{-3} \times (4 \times 10^{-4})^3}{12} = 2,1 \times 10^{-14} \text{ m}^4 \quad (1)$$

Momento Angular W

$$W = \frac{I}{b/2} = \frac{2,1 \times 10^{-14}}{(4 \times 10^{-4})/2} = 1,1 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \quad (2)$$

Momento Máximo

$$M_{\max} = W \cdot \sigma_e = 1,1 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot 20,7 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 2,2 \times 10^{-2} \text{ N.m} \quad (3)$$

Força Máxima

$$F_{\max} = \frac{M_{\max}}{l} = \frac{2,2 \times 10^{-2} \text{ Nm}}{14 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1,6 \text{ N} \quad (4)$$

Para coeficiente de segurança $S=2$, $F_{\max}=0,8 \text{ N}$

A célula de carga é formada por quatro vigas engastadas, logo, a força máxima total é 3,2 N, para carga aplicada no centro da plataforma.

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot F \cdot x}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{6 \times 0,8 \text{ N} \times 13,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{700 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 4,0 \times 10^{-3} \text{ m} \times (4,0 \times 10^{-4} \text{ m})^2} = 1,5 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1500 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

onde ε é a deformação relativa

A menor deformação no sensor extensométrico necessária para provocar uma variação de voltagem é $\varepsilon = 1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$. Substituindo este valor na Equação 16 e isolando F tem-se a sensibilidade $5,3 \times 10^{-4} \text{ N}$ para uma das vigas da células de carga. Como ela é composta por quatro vigas a sensibilidade é $21,2 \times 10^{-4} \text{ N}$, aproximadamente 0,2 gf.

A célula de carga além de trabalhar com coeficiente de segurança 2 possui fim de curso para cada viga, com a finalidade de evitar deformações plásticas ou danificação do sensor de deformação.

5. Análise dos Resultados

Para executar a aferição utilizou-se um condicionador de sinais da marca SODIMEX, modelo IDE-101, com 0,5% de erro. Para calibração estática aplicou-se força conhecida (pesos mortos) no centro da tecla. A célula de carga mostrou-se repetitiva, com desvio padrão médio inferior a 2%. Os resultados apresentados na Figura 5 mostram a média de 5 medidas para cada ponto.

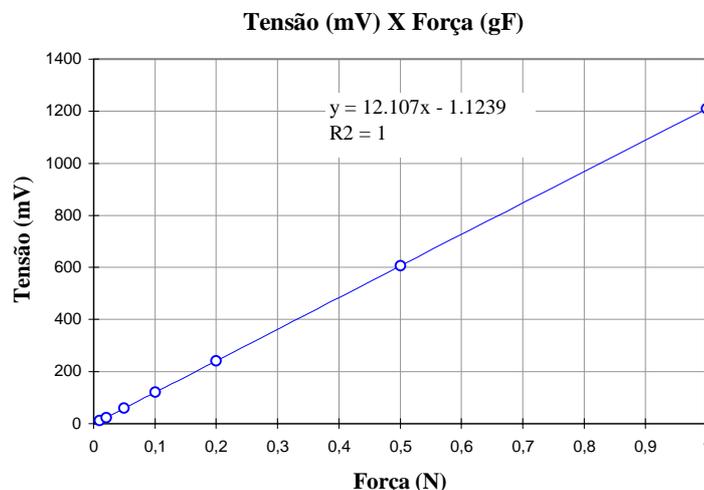


Figura - 5. O gráfico mostra o sinal referente a cargas aplicadas estaticamente de

0,010 N; 0,020 N; 0,050 N; 0,100 N; 0,200 N; 0,500 N e 1,000 N (erro = $\pm 0,001$ N).

Com a finalidade de verificar se ocorre a compensação do deslocamento da aplicação da força sobre a placa, aplicou-se 3 cargas estáticas de 0,230 N, 0,580 N e 0,920 N em cinco pontos: nos quatro cantos da tecla e no centro. Foram feitas cinco baterias de medidas e a média do sinal gerado referente à força aplicada, em cada posição, é mostrado na Figura 6.

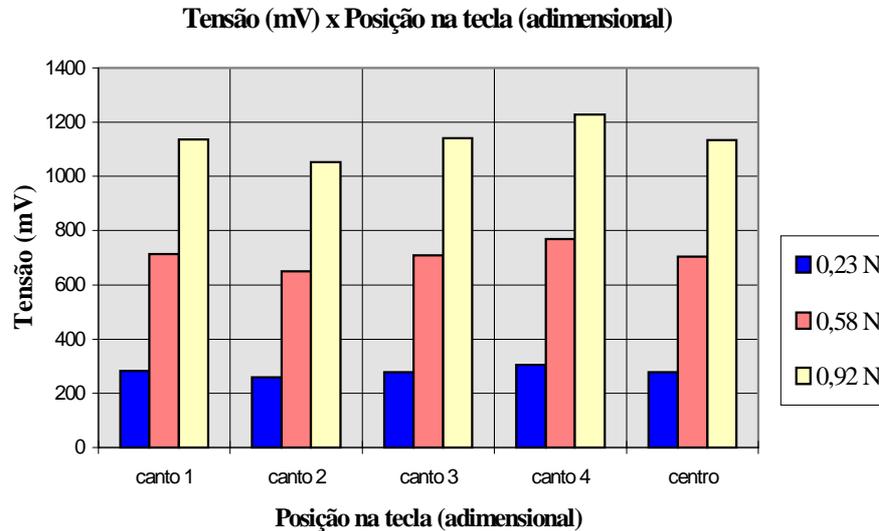


Figura - 6. Força estática de 0,230 N, 0,580 N, 0,920 N aplicada nos quatro vértices e no centro da plataforma da célula de carga..

Para a aplicação de força nas cinco áreas diferentes o maior erro foi de 14%. Considerando que a força foi aplicada através de haste em forma de agulha e que o dedo possui uma área de contato grande comparada com a área da tecla, quando a força é aplicada com o dedo, o erro é significativamente menor.

A frequência natural da célula de carga foi determinada através de ensaio de impacto e análise no domínio da frequência. A frequência encontrada fica entre 544 Hz e 548 Hz (Figura 7). Como a frequência de digitação é inferior a 20 Hz, a célula de carga projetada apresenta características que permitem, com boa margem de segurança, a análise da força aplicada sobre a tecla.

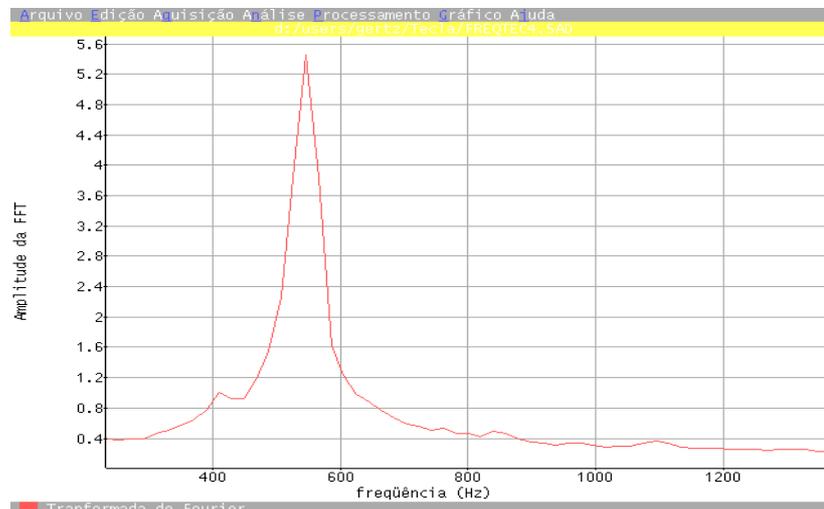


Figura - 7. Análise de ensaio de impacto no domínio da frequência.

6. Força Aplicada Durante Digitação

Nos teclados convencionais, geralmente, a tecla é composta por um sistema com duas molas, uma de aço que é responsável pela manutenção da posição de repouso; e outra de espuma com um contato metálico na extremidade inferior. Quando a tecla é comprimida, a mola de aço deforma-se, até que a peça de espuma com o contato metálico toque nos contatos que ativam a tecla. A finalidade da espuma é oferecer um retorno tátil para o digitador, com o objetivo de confirmar a ativação da tecla.

A espuma inicialmente oferece resistência a deformação; quando isto ocorre a estrutura que compõe a espuma desestabiliza-se e a resistência diminui.

Utilizando-se um teclado convencional, e com o auxílio da célula de carga, pode-se estudar o comportamento da força durante carregamento estático de uma tecla. A Figura 8 mostra que a força inicialmente cresce com o deslocamento de maneira linear. A característica de desestabilização da estrutura da espuma pode ser observada logo após esta primeira fase. Após a diminuição da resistência, a força cresce novamente de maneira linear com o deslocamento.

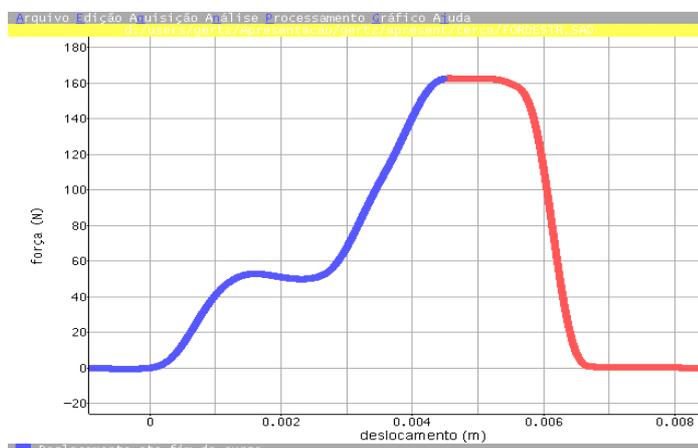


Figura - 8. Força (N) x Deslocamento (m), a linha azul mostra o deslocamento da tecla, da posição de repouso até o fim de curso.

A célula de carga desenvolvida neste trabalho foi utilizada para registrar a força aplicada sobre a tecla durante um rápido toque, e registrou o perfil mostrado na Figura 9. Pode-se observar que existe grande semelhança com o perfil mostrado por Rempel, et al., 1994 (a).

As três fases são identificadas através das cores.

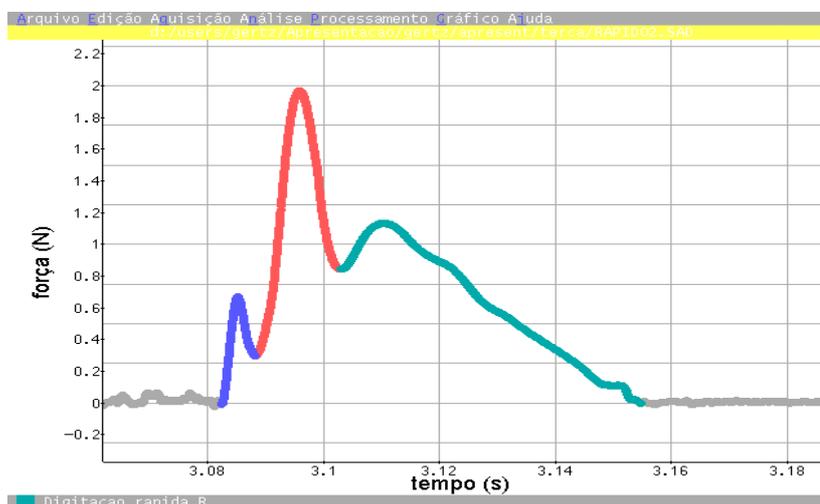


Figura - 9 - Registro de força aplicada na tecla durante digitação, obtido com a célula de carga desenvolvida neste trabalho.

7. Conclusão

A célula de carga foi projetada para estudar a força aplicada na tecla pelo dedo durante a digitação. Os resultados mostram que ela tem sensibilidade, velocidade, repetitividade, desacoplamento e precisão suficientes para este fim.

Como aprimoramento deste projeto sugere-se o desenvolvimento de uma nova célula de carga com usinagem mais refinada e com dimensionamento mais reduzido, possibilitando que ela fosse fixada no teclado sem alterar as teclas vizinhas.

BIBLIOGRAFIA

- Amstrong, T., Foulke, J.F., Martin, B.J, Gerson, J., Rempel, D.M., 1994, Investigation of applied forces in alphanumeric keyboard work, Am. Ind. Hyg. Assoc. J.(55), January.
- Petersen, W.A., Brookhart, J.M., Stone,S.A., 1965, A strain-gage plataform for force measurements, J. Appl. Physiol. 20(5), p. 1095-1097.
- Rempel, D., Dennerlein, J., Mote, C.D., Amstrong, T., 1994, A method of measuring fingertip loading during keyboard use, J. Biomechanics, v.27, n.8. p.1101-1104.
- Rempel, D., Klinenberg, E., Serina, E., Martin, B., Amstrong, T., Foulke, J.; Natarajan, S., 1994, Finger force during computer keyboard work, Part I: Relation of keyboard reaction force to finger flexor muscles surface emg, Occupational Health & Safety, v.2.
- Rempel, D., Klinenberg, E., Serina, E., Martin, B., Amstrong, T., Foulke, J., Natarajan, S., 1994, Finger force during computer keydoard work, Part II: Relation of keyswitch make force to applied force and surface emg, Occupational Health & Safety, v.2.
- Smutz, P., Serina, E., Rempel, David., 1994, A sistem for evaluating the effect of keyboards design on force, posture, confort, and productivity, Ergonomics, v.37, no.10, 1649-1660.
- Popov, E., 1998, Introdução a Mecânica dos Sólidos, Edgar Blücher LTDA, URSS.