

Projeto e construção de reômetro capilar para caracterização de alimentos para animais

Design and construction of a capillary rheometer to characterize feed ingredients

Marcos Fraiha^I João Domingos Biagi^{II} Antonio Carlos de Oliveira Ferraz^{II}
Claudio Sverzut^{II}

RESUMO

O princípio da reometria é relativamente simples, e a construção de equipamentos para avaliação do comportamento reológico de materiais pode ser realizada com poucos investimentos. O presente trabalho teve por objetivos projetar e construir um reômetro capilar para caracterizar ingredientes e misturas utilizadas em alimentação animal. Durante os testes, observou-se atrito desprezível (0,20 a 0,01% da força aplicada) entre pistão e cilindro e não se observou refluxo de amostra. A força necessária para o escoamento das amostras através do capilar foi de $986,02 \pm 52,05$; $559,60 \pm 52,24$ e $338,25 \pm 45,86N$, para as amostras com $29,04 \pm 0,08$, $31,91 \pm 1,01$ e $34,98 \pm 0,30\%$ de umidade, respectivamente. A partir da fundamentação teórica de reologia de materiais, foi possível construir um reômetro fundamental utilizando materiais e operações simples de tornearia, com custo total de R\$ 4.500,00.

Palavras-chave: taxa de cisalhamento, reologia, propriedades mecânicas de materiais.

ABSTRACT

The fundamentals of rheometry are relatively simple, and the construction of equipments to measure the rheological behavior of materials can be accomplished with small investment. The aim of this paper is to describe the design and construction of a capillary rheometer to characterize feed ingredients. The force required to extrude and maintain sample flow was 986.02 ± 52.05 ; 559.60 ± 52.24 and $338.25 \pm 45.86N$ for the samples with 29.04 ± 0.08 , 31.91 ± 1.01 and $34.98 \pm 0.30\%$ moisture, respectively, with negligible (0.20 to 0.01% of total force) friction among moving parts, neither any mass reflux between piston and cylinder. Based on the fundamentals of

rheology, it was possible to build a capillary rheometer using simple materials and operations usually available in an engineering laboratory at a total cost of R\$ 4,500.00.

Key words: shear rate, rheology, mechanical properties of materials.

INTRODUÇÃO

Os reômetros são instrumentos que permitem determinar a taxa de cisalhamento em dado escoamento e a tensão cisalhante correspondente e podem ser classificados em três categorias: fundamentais, empíricas e imitativas (RAO, 1992). Vários instrumentos são empregados para essas medições via métodos fundamentais, como o reômetro capilar, o cilindro concêntrico, o prato-cône e as placas paralelas.

Reômetros estão disponíveis no mercado, porém seu custo elevado pode inviabilizar sua aquisição. O fundamento básico da reologia é relativamente simples e com base nesse conhecimento pode-se projetar e construir um protótipo de reômetro com recursos relativamente simples.

Muitos fluidos não newtonianos não são puramente viscosos. No entanto, medidas de tensão e deformação cisalhante podem ser feitas para tais materiais em escoamentos estáveis, e a relação dessas

^IPrograma de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Cidade Universitária Zeferino Vaz, CP 6011, 13083-875, Campinas, SP, Brasil. E-mail: marcos.fraiha@feagri.unicamp.br. Autor para correspondência.

^{II}Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, SP, Brasil.

quantidades pode ser definida como uma característica reológica análoga à viscosidade newtoniana (DARBY, 1979).

Pelo fato dessa relação entre tensão e deformação cisalhante não ser constante para fluidos não newtonianos, ela define uma função designada como “viscosidade aparente”:

$$\eta = f(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Os objetivos deste trabalho foram projetar e construir um reômetro capilar, para estudo do comportamento reológico de alimentos utilizados para produção de rações animais submetidos a várias taxas de deformação e temperatura, a ser utilizado acoplado a uma máquina universal de ensaios.

MATERIAL E MÉTODOS

Fundamentação teórica

Considerando um fluido escoando através de um tubo de comprimento (L) e raio interno (R), a queda de pressão (δP) ao longo do comprimento é a causa do escoamento. O balanço de força sobre uma porção anular do fluido com raio r e comprimento L, equacionando a tensão cisalhante causadora do escoamento e a tensão cisalhante resistindo ao escoamento (o fluido), resulta em:

$$(\delta P)\pi r^2 = \tau 2\pi r L \quad (2)$$

que pode ser resolvido para τ :

$$\tau = \frac{(\delta P)r}{2L} \quad (3)$$

A equação (4) descreve a tensão cisalhante variando de zero na região central ($r = 0$) ao máximo na parede do tubo τ_p ($r=R$), em que a equação pode ser escrita como:

$$\tau_p = \frac{(\delta P)R}{2L} \quad (4)$$

A equação Rabinowitsch-Mooney expressa a relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento em um tubo (STEFFE, 1996; DARBY, 1979):

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{\int_0^{\tau_p} (\sigma)^2 f(\sigma) d\tau}{\tau_p} \quad (5)$$

em que Q é o escoamento volumétrico, R é o raio do tubo e τ_p é a tensão cisalhante na parede do tubo.

Rescrevendo a equação (5) pela definição para fluido newtoniano, integrando e substituindo a tensão cisalhante na parede do tubo dada pela equação (4), é obtida a equação de Poiseuille-Hagen para o escoamento volumétrico em um tubo:

$$Q = \frac{\pi (\delta P) R^4}{8L\mu} \quad (6)$$

Rescrevendo a equação (6) pela definição do fluido newtoniano, é obtida:

$$\dot{\gamma}_p = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (7)$$

em que $\dot{\gamma}_p$ é a taxa de cisalhamento na parede do tubo. Com base na equação (4), a tensão de cisalhamento na parede do capilar τ_{pc} pode ser relacionada à queda de pressão ao longo do capilar (ΔP_c) pela equação:

$$\tau_{pc} = \frac{\Delta P_c D_c}{4L_c} \quad (8)$$

A estimativa da queda da pressão ao longo do capilar requer algumas correções conforme descrito por outros autores (STEFFE, 1996; RAUWENDAAL, 1994; DARBY 1979).

Com base na equação (7), substituindo $R=D/2$, a taxa de cisalhamento aparente na parede do capilar ($\dot{\gamma}_{ap}$) pode ser determinada a partir do escoamento volumétrico Q_c no capilar e diâmetro interno do capilar D_c :

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{32Q_c}{\pi D_c^3} \quad (9)$$

E o escoamento Q_c é determinado pela área e velocidade v_p do pistão:

$$Q_c = \frac{v_p \pi D_p^2}{4} \quad (10)$$

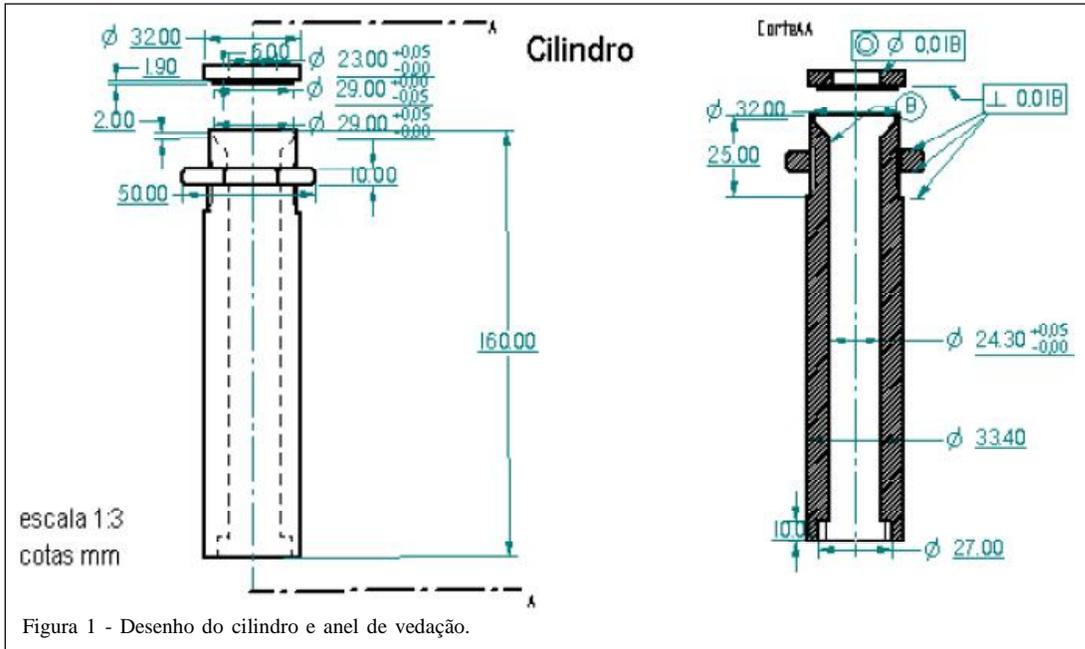
Por fim, a viscosidade aparente (η_{ap}) pode ser determinada por:

$$\eta_{ap} = \frac{\tau_{pc}}{\dot{\gamma}_{ap}} \quad (11)$$

Construção do reômetro

O reômetro projetado no presente trabalho é composto de pistão, pino e anel de alinhamento do pistão, cilindro, suporte da matriz, matrizes e placas e hastes de sustentação do reômetro. O material utilizado foi o aço inoxidável 304, exceto para as placas e hastes de sustentação, em que foi utilizado aço carbono.

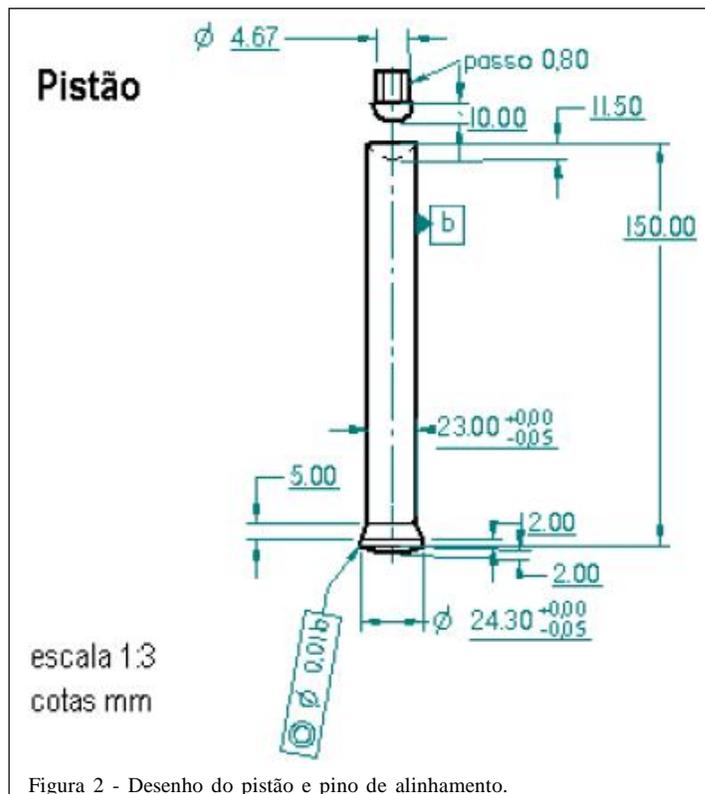
Para construção do cilindro do capilar, foi utilizado um tubo sem costura, com 150mm de comprimento e 24,3 e 33mm de diâmetros interno e externo, respectivamente, com 0,8 μ m de rugosidade (Figura 1). Projetou-se o diâmetro interno com tolerância de +0,05mm. O pistão foi usinado a partir de uma peça maciça. Para minimizar o atrito entre a parede interna do cilindro e o pistão, este foi usinado de forma a apresentar um perfil afilado-reto próximo a sua extremidade de trabalho, no formato de êmbolo (Figura 2). O corpo do



pistão mede 140mm de comprimento e 24mm de diâmetro, exceto no êmbolo, cujo diâmetro foi de 24,3mm, com tolerância de -0,05mm, de forma a evitar refluxo de material entre o êmbolo e a parede interna do cilindro durante a extrusão, porém permitindo movimento deslizante entre as peças. Para reforçar essa

característica do pistão, sua face de trabalho foi usinada em formato convexo.

A força motriz para o deslizamento do pistão foi gerado pelo motor elétrico da máquina de testes universal, cujo pistão é movimentado por uma rosca sem-fim única. Para evitar a transferência da oscilação



da rosca em movimento para o pistão, foi construído um pino de extremidade hemisférica, rosqueável à célula de carga ligada à prensa, cuja face convexa encaixa-se na extremidade superior do pistão, de formato côncavo, onde uma camada de óleo permite a redução do atrito durante o trabalho (Figura 2). Para evitar movimentos pendulares do pistão durante seu deslizamento pelo cilindro, um anel foi usinado para encaixar-se na extremidade de entrada do cilindro e dar sustentação e alinhamento ao pistão.

O conjunto cilindro-pistão fica apoiado sobre uma estrutura formada por uma base de 130x130mm, onde se assentam quatro hastes sextavadas, de 160mm de comprimento, que sustentam outra placa de aço de 130x130mm, em cujo centro o cilindro é rosqueado. As tolerâncias de paralelismo, coaxialidade e perpendicularidade entre as peças foram de $\pm 0,01$ mm.

O suporte da matriz consiste de uma peça cilíndrica vazada, com 10mm de comprimento, rosqueada internamente na extremidade final do cilindro, de forma que o diâmetro interno deste é reduzido para 18mm. A matriz consiste de uma peça cilíndrica vazada, com diâmetro externo de 24,3mm, tolerância de $-0,05$ mm e assenta-se sobre a parede do suporte da matriz. A entrada da matriz forma um ângulo de 45 graus em relação a sua parede interna, na forma de funil, para reduzir a queda de pressão na entrada do material. Foram construídas diversas matrizes com diferentes diâmetros internos e comprimentos.

Projetou-se um sistema de aquecimento com resistência elétrica de 500W, que envolve a parede externa do cilindro (HG Resistências, Campinas, Brasil). O controle da temperatura é realizado por um módulo digital (Tholz, Campo Bom, Brasil), garantindo temperatura na parede externa do cilindro de até 400 ± 1 °C.

Avaliação do funcionamento do reômetro

Para avaliar o funcionamento do reômetro, este foi acoplado a uma máquina universal de ensaios (Canners Machinery Ltda, Canadá), equipada com uma célula de carga, do tipo S, com capacidade máxima para 2500N.

Amostras de milho e soja foram moídas em moinho de facas e misturadas na proporção 70:30 (m:m), simulando uma ração para animais. Sua granulometria foi determinada segundo a metodologia ANSI/ASAE S319.3 (ASAE, 2004), e o diâmetro geométrico médio das partículas foi de $650 \pm 1,4$ µm (média \pm erro padrão).

A seguir, alíquotas do material foram umidificadas em três níveis diferentes, mantidas sobre refrigeração (7°C) por 12 horas para equilíbrio da umidade, e sua determinação foi feita pelo método

gravimétrico, com utilização de estufa de ar forçado, a 105°C, por 24 horas, resultando em $29,04 \pm 0,08$, $31,91 \pm 1,01$ e $34,98 \pm 0,30$ % (média \pm erro padrão, base úmida).

Foi realizada a extrusão das amostras em triplicata, mantendo-se a taxa de deformação constante, com velocidade de $0,46$ mm s⁻¹. A força aplicada foi registrada por sistema de aquisição de dados (Spider 8, Huttinger Balchuin Messtechnik, Alemanha). Foi permitido um tempo de aquecimento da massa por um período de quatro minutos, e a temperatura foi mantida constante para todos os tratamentos em 80°C e confirmada com auxílio de um termopar introduzido na saída da matriz. O diâmetro interno e o comprimento da matriz utilizada foram de 6 e 33,5mm, respectivamente.

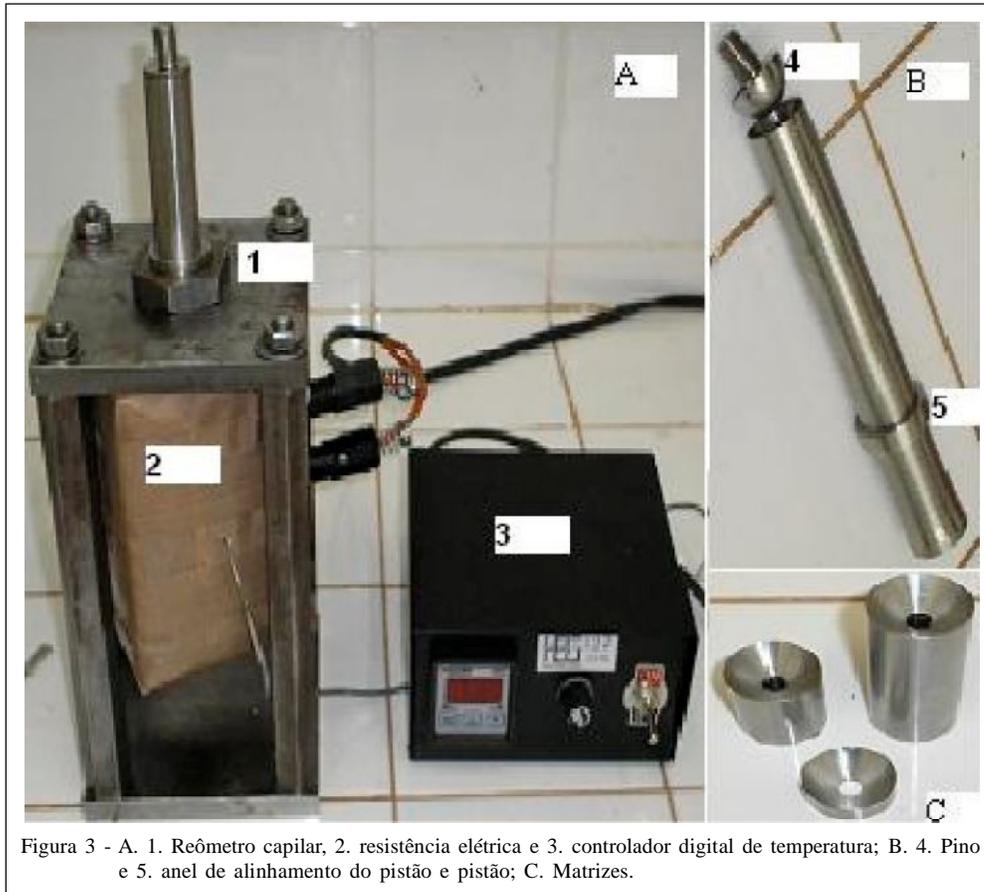
Para avaliar a ausência de atrito entre cilindro, pistão e anel de vedação, foram realizados avaliação e registro da força necessária para o deslocamento do pistão com o reômetro vazio, em quatro repetições. Para avaliar a ocorrência de refluxo de amostra, foi realizada a inspeção das paredes do cilindro e pistão após cada tratamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do funcionamento do reômetro. Alguns aspectos do reômetro construído podem ser observados na figura 3. Durante o desenvolvimento desse dispositivo, grande atenção foi dada ao processo de usinagem para garantir as tolerâncias de dimensão projetadas. Durante os testes de funcionamento do reômetro vazio, de 80 a 160°C, observou-se ruído desprezível (0,20 a 0,01%) no registro da força aplicada sobre o pistão, indicando ocorrência desprezível de atrito entre pistão e cilindro, causados por imperfeições nas paredes destes ou por falta de alinhamento entre essas peças e o eixo da prensa (Figura 4).

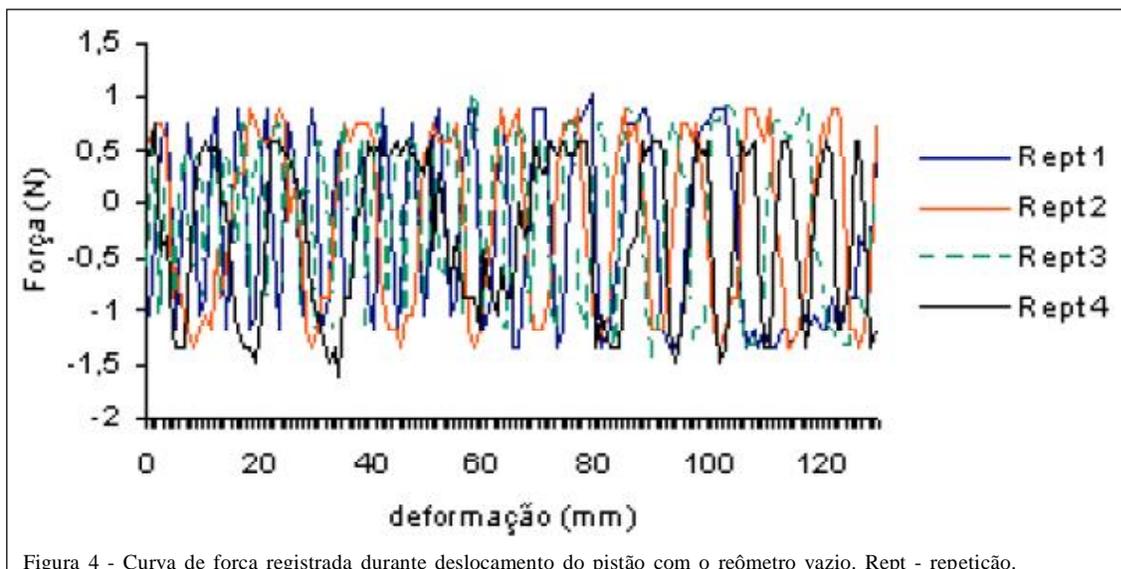
Tampouco se observou refluxo de material entre o pistão e o cilindro. A tolerância máxima projetada entre a cabeça do pistão e a parede interna do cilindro foi de 0,1mm, o que está bem abaixo da granulometria dos ingredientes moídos correntemente utilizada nas fábricas de ração.

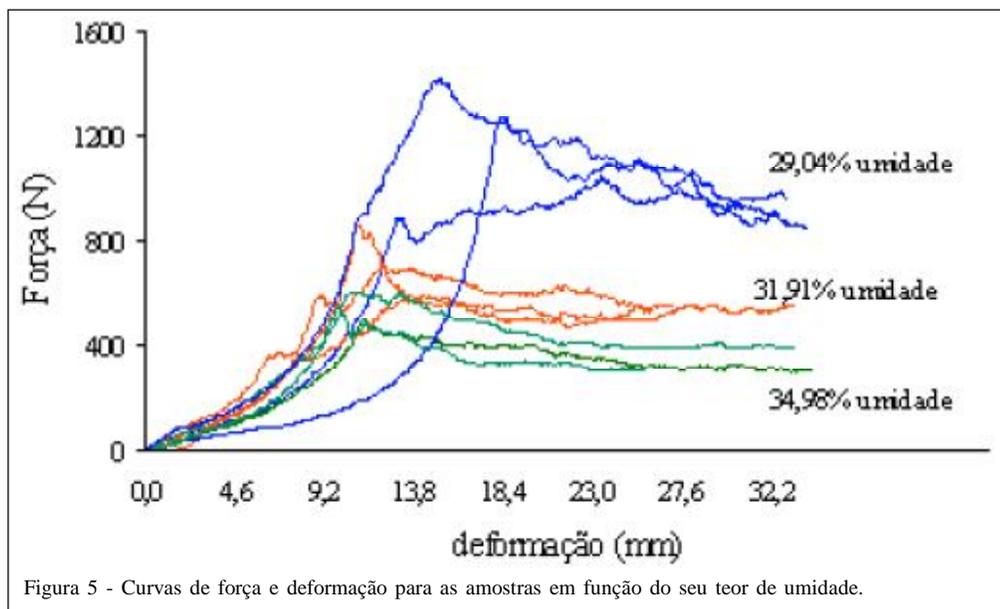
Outros autores têm avaliado a reologia de alimentos através da reometria capilar (SHIAU, 2004; YU & ANL, 2004; BREUILLET et al., 2002). Em outro experimento (FRAIHA, 2008), foi avaliado o comportamento reológico de mistura de cereais moídos, com a utilização do presente reômetro, e foi possível constatar que os resultados obtidos foram similares àqueles obtidos por CARVALHO et al. (2004), que utilizaram um reômetro de cilindro duplo (Bohlin Instruments Ltd, Inglaterra), SINGH & SMITH (1999), com um reômetro capilar (Rheometrics, Inglaterra), e



PADMANABHAN & BHATTACHARYA (1991), com um protótipo de reômetro acoplado diretamente a uma extrusora, para materiais e condições similares, indicando que os princípios fundamentais da reometria foram contemplados neste projeto.

Na figura 5, são apresentadas as curvas de força-deformação obtidas para as amostras estudadas, evidenciando que o sistema foi sensível para detectar diferenças de viscosidade causadas pela variação de 3% do teor de umidade das amostras, o que influencia





o nível de força necessário para seu escoamento pelo capilar. Essas curvas são representações típicas de materiais pseudoplásticos (RAUWENDAAL, 1994), mostrando alterações da resposta da tensão em função da deformação imposta às amostras. Observando a figura 5, no sentido positivo da abcissa, o início da curva representa o momento em que o pistão em movimento toca a amostra, e valores positivos para tensão são registrados. Segue-se um acúmulo repentino de energia referente à deformação da amostra no interior do cilindro, porém ainda não se observa escoamento da amostra pelo capilar. O pico da curva representa a tensão mínima necessária para o rompimento da inércia e o início do escoamento. Finalmente, a tensão necessária para manutenção da inércia do escoamento se estabilizaria, de onde se obtém a tensão média para os cálculos da tensão de cisalhamento.

A força necessária para o escoamento das amostras através do capilar foi de $986,02 \pm 52,05$; $559,60 \pm 52,24$ e $338,25 \pm 45,86$ N para as amostras com 29,04 \pm 0,08, 31,91 \pm 1,01 e 34,98 \pm 0,30% de umidade, respectivamente. Esses dados indicam que as amostras submetidas ao escoamento apresentam comportamento pseudoplástico e estão de acordo com FRAIHA (2008) e CARVALHO et al. (2004).

O custo financeiro total de materiais e serviços para construção desse protótipo foi de R\$ 4.500,00 (valores do ano de 2007). Seu planejamento e sua construção também propiciaram treinamento para alunos de graduação e pós-graduação.

CONCLUSÃO

Com base na fundamentação teórica da reometria, foi possível construir um reômetro capilar de baixo custo, sendo utilizados materiais e operações simples de tornearia. Apesar de contemplar uma linha de pesquisa específica, o equipamento ora apresentado propiciará outras aplicações no estudo da reologia. O presente projeto gerou oportunidade de aprendizagem e treinamento para alunos de graduação e pós-graduação.

REFERÊNCIAS

- ASAE. Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. ANSI/ASAE S319.3. In: ASAE. **Agricultural Engineers Yearbook of Standard**. 51.ed. St. Joseph:ASAE, 2004. p.578-581.
- BREUILLET, C. et al. Study of the anomalous capillary Bagley factor behavior of three types of wheat flour doughs at two moisture contents. **Journal of Texture Studies**, v.33, p.315-340, 2002. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/user/accessdenied?ID=119925796&Act=2138&Code=4717&Page=/cgi-bin/fulltext/119925796/PDFSTART>>. Acesso em: 02 set. 2007. doi: 10.1111/j.1745-4603.2002.tb01352.x.
- CARVALHO, C.W.P. et al. Capillary rheometry of maize and wheat: effect of sugar and temperature. **Alimentaria**, v.65, n.10, p.109-118, 2004.
- DARBY, R. **Viscoelastic fluids, an introduction to their properties and behavior**. New York: Marcel Dekker, 1979. 638p.

FRAIHA, M. **Efeitos da temperatura, pressão e taxa de cisalhamento sobre a viabilidade de esporo termodúrico durante a extrusão de alimentos para animais.** 2008. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, SP.

PADMANABHAN, M.; BHATTACHARYA, M. Flow behavior and exit pressures of corn meal under high-shear-high temperature extrusion conditions using a slit die. **Journal of Rheology**, v.35, n.3, p.315-342, 1991. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=JORHD200003500000300031500001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=no>>. Acesso em: 10 out. 2007. doi: 10.1122/1.550217.

RAO, V.N.M. Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods. In: RAO, V.M.A; STEFFE, J.F. (Eds.). **Viscoelastic properties of foods.** Londres: Elsevier, 1992. p.3-48.

RAUWENDAAL, C. **Polymer extrusion.** 3.ed. New York: Hanser Gardner Publishers, 1994. 568p.

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering.** 2.ed. East Leasing: Freeman, 1996. 417p.

SHIAU, S.Y. Effects of emulsifiers on dough rheological properties and the texture of extruded noodles. **Journal of**

Texture Studies, v.35, p.93-110, 2004. Disponível em: <<http://www.interscience.wiley.com/user/accessdenied?ID=119921240&Act=2138&Code=4717&Page=/cgi-bin/fulltext/119921240/PDFSTART>>. Acesso em: 02 set. 2007. doi: 10.1111/j.1745-4603.2004.tb00824.x.

SINGH, N.; SMITH, A.C. Rheological behavior of different cereals using capillary rheometry. **Journal of Food Engineering**, v.39, p.203-209, 1999. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1410839340&_sort=r&view=c&_acct=C00050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=790d3ba435dea869bb3c4e744c459da2>. Acesso em: 01 ago. 2007. doi: 10.1016/S0260-8774(98)00165-4.

YU, S.S.; ANI, Y. On-line measurements of rheological properties of wheat flour extrudates with oxido-reductants, acid and alkali. **Journal of Food Engineering**, v.62, n.2, p.193-202, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImp&_imagekey=B6T8J-497RB85-4-1S&_cdi=5088&_user=10&_pii=S0260877403002334&_orig=search&_coverDate=04%2F30%2F2004&_sk=999379997&view=c&wchp=dGLzVzb-zSkk&md5=7655865fc878988df151c26277787b77&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: 03 out. 2007. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00233-4.