

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**“ADENSAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
UTILIZANDO HELICÓIDES CÔNICOS”**

**Autor: NEY BARROS DE AVELINO SIDOU**

**CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2007**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**“ADENSAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
UTILIZANDO HELICÓIDES CÔNICOS”**

Dissertação de mestrado submetida à  
banca examinadora para obtenção do  
título de mestre em Engenharia Agrícola.

**Autor: ENG. AGRO. NEY BARROS DE AVELINO SIDOU**

**Orientador: PROF. DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK**

CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

Si14a Sidou, Ney Barros de Avelino  
Adensamento do palhiço da cana-de-açúcar utilizando  
helicóides cônicos / Ney Barros de Avelino Sidou. --  
Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Oscar Antonio Braunbeck  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Energia da biomassa. 2. Biomassa vegetal. 3.  
Energia – Fontes alternativas. 4. Cana-de-açúcar. I.  
Braunbeck, Oscar Antonio. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.  
Título.

Título em Inglês: Compaction of sugar cane trash using helical cones

Palavras-chave em Inglês: Trash recovery, Compaction, Trash, sugarcane,  
renewable energy

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Antonio Carlos de Oliveira Ferraz, Franco Guiseppe  
Dedini

Data da defesa: 27/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Aos meus pais Maria Fani e Eurio

À minha irmã Nancy

Aos meus ancestrais

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck pelos ensinamentos, orientação, apoio e amizade.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos no período de realização da Dissertação.

À FAPESP pelo financiamento da construção da unidade de testes para palhiço.

Ao FEAGRI por ter propiciado todo o suporte para a realização dessa Dissertação.

Ao amigo Eder Buscarato pelo apoio no momento dos ensaios.

Aos colegas do Laboratório de Projetos.

Ao Laboratório de Laboratório de Tecnologia Pós-Colheita, ao Prof. Dr. Armando K. Fujii e à Dra. Juliana Tofano.

Ao Laboratório de Protótipos, ao Luiz Carlos S. Silva e ao Francisco F. dos Santos Fº.

Aos amigos: Carolina Alexandra Marchant Dinten, Daniel Gomes, Juliana Sarubbi, Marcio B. Michelazzo, Marcio A. P. Vieira, Patrícia Dias Barbosa, Roberta P. Mastropaschoa, Silvestre R. Oliveira, Dr. Victório L. Furlani Neto, que colaboraram de alguma maneira para a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	vi
Lista de tabelas .....	vii
Lista de Símbolos .....	viii
Resumo .....	x
Abstract.....	xi
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	3
3 Revisão Bibliográfica .....	4
3.1 Considerações sobre a queima prévia da cana-de-açúcar.....	4
3.2 Energia do palhiço .....	9
3.3 Sistemas mecânicos de enfardamento: .....	12
3.3.1 Enfardadora de fardos cilíndricos.....	12
3.3.2 Enfardadora de fardos prismáticos pequenos .....	13
3.3.3 Enfardadora de fardos prismáticos médios.....	13
3.3.4 Enfardadora de fardos prismáticos grandes.....	13
3.4 Comportamento mecânico dos materiais fibrosos.....	14
3.5 Considerações sobre coeficiente de atrito .....	15
3.6 Considerações sobre a revisão bibliográfica .....	16
4 Material e Métodos.....	17
4.1 Princípio de adensamento .....	17
4.2 Adensador de helicóides cônicos.....	17
4.2.1 Hipóteses simplificadoras.....	19
4.2.2 Capacidade do adensador .....	20
4.2.3 Velocidades e passos dos helicóides .....	21
4.2.4 Equilíbrio do elemento .....	23
4.2.4.1 Fluxograma de operação do modelo de adensamento .....	26
4.2.5 Avaliação das características mecânicas do palhiço.....	27
4.2.5.1 Metodologia de avaliação do comportamento do palhiço em processo de adensamento por abas helicoidais.....	31
4.2.5.2 Instrumentação, acionamento e simulação matemática.....	33
5 Resultados e Discussões .....	34
5.1 Determinação experimental da densidade aparente.....	35
5.2 Determinação experimental do coeficiente de atrito .....	38
5.3 Determinação experimental da pressão normal.....	40
5.4 Simulação do processo de adensamento por helicóides cônicos.....	42
6. Conclusões.....	49
7 Bibliografia Consultada.....	50
8 Anexo 1.....	53
9 Anexo 2.....	68
10 Anexo 3.....	84
11 Anexo 4.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração do adensador de helicóides cônicos proposto e ilustração da distribuição de densidade ao longo do adensador.....	18
Figura 2: Elemento de palhiço com sua base de coordenadas locais.....	20
Figura 3: Tendência da densidade do palhiço em função da pressão de entrada.....	21
Figura 4: Tendência do coeficiente de atrito entre as helicóides e palhiço .....	24
Figura 5: Equilíbrio do palhiço na câmara do adensador .....	24
Figura 6: Tendência da reação normal em função da pressão de entrada.....	25
Figura 7: Fluxograma da simulação do processo de adensamento pelo princípio de helicóides cônicos .....	27
Figura 8: Diagrama do funcionamento da unidade de testes de palhiço .....	28
Figura 9: Ilustração da unidade de adensamento de palhiço.....	29
Figura 10: Ilustração da unidade de testes com êmbolo na posição inicial de operação.....	30
Figura 11: Ilustração da unidade de testes com êmbolo na posição final após a operação .....	30
Figuras 12: (a) e (b) Ilustrações do equipamento construído .....	31
Figura 13: Curva de ajuste de Kanafojwski e dados observados para densidade aparente no tratamento P1V1E1T1 .....	36
Figura 14: Curva de ajuste linear e curva de dados observados para coeficiente de atrito para o tratamento P1V1E1T1 .....	39
Figura 15: Curva de ajuste polinomial de 3ª ordem e curva de dados observados para a pressão normal no tratamento P1V1E1T1 .....	41
Figura 16: Curvas de resposta para P1V1E1T1 com o coeficiente de atrito determinado experimentalmente .....	45
Figura 17: Curvas de resposta para P1V1E1T1 com metade do valor do coeficiente de atrito determinado experimentalmente .....	46
Figura 18: Principais componentes do adensador de helicóides cônicos .....	47
Figura 19: Componentes principais do adensador de fardos prismáticos .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios de umidade, massa e poder calorífico útil (PCU) obtidos por RIPOLI et al. (1991) para as diversas frações constituintes do palhiço .....	11
Tabela 2: Pressões de equivalência para ensaios de compressão de palhiço .....	32
Tabela 3: Código de identificação dos parâmetros experimentais .....	33
Tabela 4: Distribuição dos parâmetros experimentais nos tratamentos .....	33
Tabela 5: Massas admitidas na câmara de adensamento para cada tratamento e suas respectivas umidades em base úmida .....	35
Tabela 6: Parâmetros de ajuste para densidade aparente .....	37
Tabela 7: Equações de ajuste para coeficiente de atrito .....	40
Tabela 8: Equações de ajuste para pressão normal .....	41
Tabela 9: Parâmetros para simulação do adensador em cada tratamento .....	43
Tabela 10: Comprimento “x” do adensador para coeficiente de atrito reduzido .....	44
Tabela 11: Listagem dos processos do adensador de helicóides cônicos comparada com o adensador de fardos prismáticos .....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$  = Densidade aparente.

$\mu N$  = Força de adensamento provocado pelas abas dos helicóides sobre o palhiço [N].

$\rho_x$  = Densidade do palhiço na posição “x” [Kg . m<sup>-3</sup>].

$A_{\text{êmbolo}}$  = área do êmbolo da unidade de testes.

$A_{\text{placa}}$  = área da placa dinamométrica da unidade de testes.

$c$  = Centro geométrico do bloco de palhiço.

$C$  = Constante determinada experimentalmente O’Dogherty.

$D_m$  = Diâmetro médio da câmara de adensamento [m].

$dx$  = Comprimento no eixo “x” do bloco de palhiço [m].

$e$  = Largura do bloco de palhiço, (distância entre os cones interno e externo) [m].

$F_c$  = Força de adensamento [N].

$F_{hr}$  = Força hidráulica de restrição.

$F_N = P_N \cdot A_{\text{placa}}$ .

$F_t$  = Torque de acionamento [N.m].

$F_x = P_x \cdot A_{\text{êmbolo}}$ .

$F_z$  = Força adquirida experimentalmente que corresponde a força normal [N].

$k$  = Coeficiente de alteração do passo do helicóide.

$m$  = Constante determinada experimentalmente.

$Ma$  = Massa de palhiço admitida manualmente.

$Ms$  = Massa seca.

$Mu$  = Massa úmida.

$N$  = Reação normal provocada pelo adensamento do material [N].

$N_{ce}$  = Velocidade de rotação do cone externo [RPM].

$N_{ci}$  = Velocidade de rotação do cone interno [RPM].

$P$  = Pressão à qual o material está submetido.

$P_N = F_z \div A_{\text{placa}}$ .

$Pr_e$  = Passo da rosca externa [m].

$Pr_i$  = Passo da rosca interna [m].

$P_{xe}$  = Pressão de adensamento entrada [N.m<sup>-2</sup>].

$P_{.xs}$  = Pressão de adensamento saída [ $N.m^{-2}$ ].

$Ta$  = Taxa de adensamento.

$Vm$  = Vazão mássica [ $Kg . s^{-1}$ ].

$Vp_x$  = Velocidade de avanço do palhiço na posição “x” (inferior à velocidade da aba do helicóide)[ $m.s^{-1}$ ].

$V_{rel}$  = Velocidade relativa entre a aba do helicóide e a massa de palhiço [ $m . s^{-1}$ ].

$Vr_x$  = Velocidade da aba da rosca no sentido de seu eixo geométrico [ $m . s^{-1}$ ].

$x$  = Posição de um elemento ao longo da câmara do adensador.

## RESUMO

O aumento da capacidade produtiva de energia elétrica por meios renováveis em curto prazo é fundamental para ao desenvolvimento de países como o Brasil e o uso da fitomassa remanescente da cana-de-açúcar é uma opção viável e abundante em nosso país, entretanto, os métodos de recolhimento do palhiço não estão totalmente estabelecido havendo, então, a necessidade de novas propostas de métodos de recolhimento que atendam as necessidades qualitativas para o uso do palhiço como fonte energética. Uma unidade de testes foi construída para avaliar o comportamento mecânico do palhiço quando submetido ao princípio de adensamento por helicóides cônicos. Com esta unidade teste, foram realizados 16 ensaios combinando duas distâncias entre as helicóides, duas velocidades relativas, dois níveis de pressão de restrição e duas inclinações de taliscas. Os resultados experimentais mostraram relações entre pressão e densidade condizentes com a bibliografia. As pressões aplicadas na direção de carregamento mostraram relação exponencial de variação com as pressões registradas em direção perpendicular à mesma, atingindo valores máximos de  $0,3 \text{ N.mm}^{-2}$ . O princípio mecânico de adensamento por helicóides cônico mostrou-se eficaz para o adensamento do palhiço atingindo densidades aparentes entre  $188,8 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $293,5 \text{ kg.m}^{-3}$ . Os coeficientes de atrito determinados foram elevados, variando entre 3,7 e 1,16, e apresentaram uma tendência de queda com o aumento da pressão a qual o palhiço estava sendo submetido. Os valores experimentais de densidade, pressão normal e coeficientes de atrito gerados por uma talisca com comprimento de 200 mm foram alimentados ao modelo de simulação o qual simulou valores de densidade para comprimentos de talisca longos o suficiente para atingir a densidade final desejada. Verificou-se que os valores da densidade final próximos de  $200 \text{ kg.m}^{-3}$  que puderam ser obtidos com adensadores de altura reduzida, com peso e complexidade construtiva inferiores aos das enfardadoras convencionais.

**Palavras chave:** Enfardamento, Biomassa, Energia renovável.

## ABSTRACT

Production of renewable energy in the short run is fundamental to accomplish sustainable development in countries like Brazil where sugarcane residues are abundant even though trash recovery technology is not well established. New proposals are required to supply biomass with adequate cost and quality for energy generation. A test unit was designed and built to obtain data about the mechanical behavior of sugarcane trash required to simulate the performance of a dual helical cone compactor. Experimental work included 16 tests combining two spaces between the compactor cones together with two speeds, two back pressures and two slat inclinations. Experimental results showed relations between straw density and compaction pressures close to the ones reported in the bibliography. Pressures developed in the direction of the applied load showed exponential relation with normal pressures developed in a direction perpendicular to it, which took values of up to  $0,3 \text{ N.mm}^2$ . High values of friction coefficients were obtained, varying between 1,16 and 3,7, and showing a decreasing trend for increasing pressures. Experimental data and corresponding fitted curves were obtained for density, normal pressure and friction coefficients as a function of compaction pressures generated by a 200 mm length slat. This data were introduced into a model to simulate trash density for longer slats. The mechanical compaction principle using helical cones showed to be capable to increase trash densities to values between  $188,8 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $293,5 \text{ kg.m}^{-3}$ . Simulations indicate that current trash densities can be obtained using short cone type compactors, less complex than conventional bailers.

**Key words:** Trash recovery, compaction, trash, sugarcane, renewable energy

# 1 Introdução

A crise energética mundial é uma realidade e a busca de novos recursos que provoquem menores impactos ambientais é grande preocupação de diversos países como Inglaterra, Dinamarca e Alemanha. Um sintoma da crise energética no Brasil foi a escassez de energia elétrica ocorrida em 2001 devido ao baixo investimento no setor energético, à falta de planejamento, ao crescimento da demanda e aos baixos níveis de armazenamento hídrico das hidroelétricas, isso demonstrou a fragilidade da atual matriz energética brasileira.

A cultura da cana-de-açúcar, (FAO 2007), ocupou na safra 2004/2005 cerca de 5.631.741 ha no Brasil com uma produção 416.256.000 Gg. Isso caracteriza o grande potencial para o uso da fitomassa da cana-de-açúcar na geração de energia. Atualmente, os derivados da cana-de-açúcar como o álcool combustível e o bagaço são largamente utilizados na geração de energia.

Os restos culturais da cana-de-açúcar, tais como as folhas secas, folhas verdes e ponteiros (RIPOLI 1991), são considerados um combustível renovável e disponível em abundância. Por ser tratar de um material vegetal, o palhiço possui balanço de CO<sub>2</sub> neutro, porém no atual sistema de produção, em sua grande maioria, é desperdiçado com queimadas ou recolhido do solo já contaminado com materiais minerais estranhos (terra), o que aumenta os custos operacionais e reduz a vida útil das caldeiras. A matéria estranha mineral agregada ao palhiço provoca danos às caldeiras devido a desgastes das tubulações e a fusão do silício e minerais que ocasionam incrustações nas grelhas.

O uso do palhiço como combustível para usinas termoeletricas ou na co-geração de eletricidade por unidades sucroalcooleiras constitui uma alternativa para o aumento da disponibilidade de energia elétrica, minimizando assim futuras limitações no fornecimento.

As baixas densidades do palhiço encontrado no campo (por volta de 20 a 40kg.m<sup>-3</sup>) limitam economicamente a distância de transporte de seus locais de produção. Os veículos de transporte de carga estão limitados em relação a massa e ao volume que podem movimentar com segurança dentro dos limites de carga e dimensões das rodovias brasileiras. O adensamento desse material viabiliza o transporte em caminhões convencionais e para distâncias maiores.

A disponibilidade do palhiço vem crescendo devido à intensificação da colheita mecanizada de cana-de-açúcar sem queima prévia. Essa intensificação do uso de colhedoras deve-se a pressão social a qual gera leis e limitações ao uso da queima da cana. As colhedoras mecânicas de cana-de-açúcar fragmentam e distribuem o palhiço na superfície do solo, exigindo operações como aleiramento e recolhimento que aumentam o custo operacional da remoção desse palhiço.

Os métodos como briquetagem ou peletização necessitam de equipamentos que além de volumosos consomem grande quantidade de energia e não se prestariam a operação ao campo de colheita, assim como operação conjugada a colhedoras de cana de açúcar.

Uma solução possível para não se agregar terra (material estranho mineral) e reduzir os custos com o recolhimento do palhiço é recolhê-lo e adensá-lo antes de entrar em contato com o solo, porém, alguns aspectos do processo de recuperação do palhiço por enfardamento são proibitivos para o trabalho conjugado a colhedora de cana, como: custo relativo da amarração, massa do equipamento, capacidade operacional e enfardamento intermitente devido à fase de amarração do fardo.

Um adensador de roscas convergentes, acoplado diretamente a uma colhedora de cana-de-açúcar sem queima prévia, compactará o palhiço a semelhança de uma “corda” a qual poderá ser torcida e enrolada em um carretel dispensando a amarração.

## 2 Objetivos

1 – Modelar o processo de adensamento visando estimativas de densidade final em função das propriedades do material obtidas experimentalmente respeitando as características do processo de adensamento por helicóides cônicos.

2 – Verificar a viabilidade operacional do sistema de adensamento com base na modelagem elaborada.

## 3 Revisão Bibliográfica

### 3.1 Considerações sobre a queima prévia da cana-de-açúcar

Diversos autores discorrem sobre as vantagens e desvantagens da queima prévia da cana-de-açúcar para posterior colheita. Estão citados neste trabalho os autores mais relevantes no intuito de caracterizar a queima da cana-de-açúcar.

DELGADO (1985) cita os aspectos favoráveis e desfavoráveis da queima prévia em canaviais e os classificando do ponto de vista agrônômico, industrial econômico, operacional e energético, sendo que os mais relevantes são:

Do ponto de vista agrônômico:

Vantagens:

- a palha poderia ser incorporada ao solo aumentando seu potencial de matéria orgânica;
- facilidade nas operações de preparo do solo e cultivo;
- aumento do teor de cinzas do solo;
- eliminação de pragas da cultura;
- facilidade nas operações de corte, tanto manual como mecanizado.

Desvantagem:

- destruição dos inimigos naturais da broca da cana-de-açúcar (*Diatrea saccharalis*);

Do ponto de vista industrial:

Vantagens:

- aumento de brix e % fibra devido ao ressecamento dos colmos;

Desvantagens:

- aumento da infestação de microorganismos nos colmos, como resultado da exsudação, predispondo-os à deterioração.
- dificuldades na conservação e purificação do caldo;

Do ponto de vista econômico e operacional:

Vantagem:

- torna a colheita mais fácil e barata;

Desvantagens:

- complicações com tratamento de água de lavagem,
- pelo aumento de volume necessário e pela demanda biológica de oxigênio devido ao exsudado e pela solubilização de ceras.
- maiores prejuízos no caso de atraso no corte;

Do ponto de vista energético:

Desvantagem:

- a queima tem causado perdas da ordem de 30% da matéria bruta, deixando claro que, caso fosse aproveitada para a produção de biogás ou queimada em caldeiras, poderia ser geradora de energia de biomassa.

BASSINELLO et al. (s.d.) relaciona os aspectos favoráveis e desfavoráveis da colheita sem queima prévia da cana-de-açúcar, tendo como virtude a permanência dos restos culturais (palhiço) no campo:

Vantagens:

- manutenção da umidade do solo;
- controle de ervas daninhas sem a utilização ou com a diminuição da quantidade de herbicidas;
- melhor controle da erosão com proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva;
- aumento de matéria orgânica no solo pela adoção da prática por vários anos;
- redução da população de nematóides nocivos à cultura, pelo acréscimo de nematóides predadores e microorganismos resultantes do aumento da matéria orgânica no solo;
- possibilidade do melhor aproveitamento da cana-de-açúcar do ponto de vista energético, levando toda a fonte de energia (biomassa) para a indústria;
- melhoria da qualidade da matéria-prima entregue para industrialização;
- no caso de micro e mini-destilarias que exigem baixas toneladas diárias de matéria-prima, com dificuldades para a queima de talhões inteiros de cana, a

adoção da prática de colheita de cana crua iria beneficiar o processo, além de permitir a utilização de ponteiros para alimentação animal;

- redução da poluição atmosférica provocada pela queima da cana.

Desvantagens:

- dificuldade de mão-de-obra disponível para a adoção da técnica e resistência do próprio cortador em executá-la;
- rendimento de corte menor, tanto manual como mecânico, implicando em maiores custos de produção;
- aumento de impurezas vegetais e minerais na matéria-prima;
- tendência de apresentar o corte basal mais elevado, provocando perdas de matéria-prima e prejudicando a brotação da soqueira;
- dificuldades de brotação da soqueira devido à menor temperatura do solo e do sombreamento;
- maior foco de infestação para alojamento das pragas;
- impossibilidade de utilização dos implementos tradicionais nos tratos culturais de adubação e cultivo (subsolagem);
- necessidade de maior quantidade de nitrogênio na adubação de soqueira com a finalidade de suprir a parte imobilizada na decomposição da palha e aplicação no plantio de todo o fósforo exigido para o ciclo da cultura;
- perigo de fogo acidental no período de entre safra e durante a colheita;
- maior velocidade de deterioração da cana crua em relação à queimada após o corte;
- necessidade de maior cuidado na escolha de variedades apropriadas (sem joçal, despalha fácil, com menor problema de doenças e broca);
- aumento da necessidade de transporte pela empresa;
- aumento no teor de fibra e conseqüente redução na extração do caldo pelas moendas;
- colhedoras de cana picada ou de cana inteira foram basicamente desenvolvidas para o corte de cana queimada com raras exceções;

- diminuição da velocidade das colhedoras com aumento do consumo operacional e custo final;
- aumento da incidência de acidentes de trabalho no corte de cana crua (uso do facão provocando cortes, folha da cana ferindo os olhos, etc);
- na cana crua há maior incidência de animais peçonhentos (cobra, aranha) no momento do corte, provocando sérios acidentes;
- maior incidência de broca (*D. saccharalis*) e de cigarrinha da raiz (*M. fimbriolata*).

Para RIPOLI(1988) a queima prévia da cana-de-açúcar é consagrada em função de seus reflexos econômicos imediatos, e relaciona diversos inconvenientes dessa prática:

- riscos de descontrole, podendo provocar incêndio em outras áreas agrícolas ou matas e danos às redes de transmissão de energia elétrica;
- dificuldade de implantação de controle biológico de pragas;
- perda de sacarose por exsudação dos colmos e desperdício de cerca de 10 t.ha<sup>-1</sup> de massa vegetal que poderia ser incorporada ao solo melhorando suas propriedades físico-químicas ou aproveitada como fonte energia na agroindústria.

O tempo de queima até o momento da moagem foi estudado por STUPIELLO (1989) que classificou os períodos de queima em: períodos de queima quente, quando ocorre entre 12 e 16 horas do dia anterior a moagem e frio quando ocorre entre 19 horas (noite anterior) e 7 horas do dia da moagem, e conclui que a matéria-prima com queima no período frio tem sua qualidade favorecida comparada a cana permanece queimada antes da industrialização. Considera tal fato como reflexo de deteriorações biológicas, tecnológica e fisiológicas:

- biológicas, pela inoculação de microorganismos nas rachaduras provocadas nos colmos pelo fogo;
- tecnológicas, pela exsudação de caldo pelos colmos;
- fisiológicas, pela reativação das atividades fisiológicas da planta.

Todas as deteriorações acima citadas estão relacionadas com as perdas de açúcares.

Segundo SPAROVECK et al. (1997) a prática de queima dos canaviais é geralmente adotada nas diversas regiões canavieiras do Brasil e do mundo com o objetivo de

facilitar as operações de corte e carregamento, porém, tal prática está associada a impactos ambientais, tais como elevadas emissões de gases a atmosfera, degradação dos solos e poluição de mananciais e centros urbanos. Devido a isso, a recente tendência de adoção de práticas agrícolas que levem à uma maior sustentabilidade do sistema, pressiona a agroindústria sucroalcooleira a rever seus processos, incluindo a colheita da cana sem queima prévia ou sem despalha a fogo.

TRIVELIN et al. (1997) cita que nos últimos anos a área total de cana despalhada a fogo para posterior colheita manual diminuiu muito no Estado de São Paulo e em outras regiões do país, ocasionando um aumento das áreas colhidas mecanicamente sem prévia despalha a fogo.

MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) salientam ainda que, uma queimada descontrolada pode fazer com que o fogo atinja a temperaturas muito elevadas fazendo com que o colmo da cana-de-açúcar perca sua integridade estrutural, provocando perda de quantidade de açúcar e facilitando a ação dos microrganismos.

FURLANI NETO (1994) cita as vantagens e desvantagens da manutenção do palhicho no campo como cobertura morta da cana-de-açúcar, abaixo são relacionadas as principais:

Vantagens:

- Redução do impacto das gotas de chuva sobre os solos agrícolas;
- Maior conservação de umidade no solo, pelo efeito da palha sobre o solo;
- A palha em decomposição auxilia uma maior atividade microbiana no solo;
- Auxílio no controle de ervas daninhas promovendo redução do uso de herbicidas;
- Maior incorporação de matéria orgânica aos solos;
- Ausência de exsudação dos colmos, ocasionada pela queima do canavial;
- Diminui o impacto ambiental da queimada e seus efeitos (fumaça e fuligem) nas cidades próximas;
- Dispensa o processo de lavagem dos colmos, ajudando a evitar perdas de matéria-prima e, conseqüentemente, diminuindo os custos industriais.

Desvantagens:

- Diminuição da capacidade operacional das colhedoras;
- Redução da densidade de carga devido ao aumento de material vegetal, necessitando de acréscimo no número de veículos para transporte da matéria prima;
- Maiores desgastes dos componentes ativos da colhedora, pelo efeito abrasivo das folhas;
- A palha favorece a proliferação de pragas (como a cigarrinha que representa um problema para a cultura);
- Favorece a concentração de raízes na superfície, comprometendo a estabilidade da planta na fase adulta;
- Dificuldade de realizar as operações de cultivo;
- Eleva o índice de acidentes de trabalho durante o corte manual;
- Riscos constantes de incêndios no canavial

### **3.2 Energia do palhiço**

Renomados autores discutiram sobre as possibilidades do uso da biomassa como fonte renovável de energia seja ela: elétrica, térmica ou como combustível líquido para motores de combustão interna. Exemplos como o do Brasil no desenvolvimento do álcool de cana-de-açúcar como combustível para automóveis servem como referência mundial no uso da biomassa como fonte renovável de energia. A seguir serão citados os autores mais relevantes que citam as características do uso da biomassa em geral e do palhiço como fonte de energia renovável em curto prazo.

LANÇAS (1984) apresenta algumas vantagens do uso de biomassa como energia alternativa e alguns problemas sua utilização em larga escala:

- recursos abundantes, renováveis e disponíveis em diversas formas e grande variedade de uso;
- produção descentralizada, com recursos e locais mais apropriados;
- redução da poluição ambiental em relação aos combustíveis fósseis;
- colheita de grande quantidade de biomassa pode causar desequilíbrio ecológico em grandes proporções;

- baixa quantidade de energia por quantidade de massa;
- Sua viabilidade só poderá ser considerada quando preço do petróleo se elevar muito;
- problemas de armazenamento e transporte devido as várias formas de biomassa;
- devido à produção descentralizada, a necessidade de transporte para os centros de conversão pode tornar inviável sua produção, dependendo das distâncias;
- para melhor eficiência é necessário um sistema de pré-secagem devido à umidade da biomassa.

Segundo BRITO (1986), a biomassa pode constituir a base de um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial auto-sustentado, baseado em dados concretos da realidade regional e na integração do homem a um ambiente econômico em harmonia com seu ambiente natural, além de ser uma simples fonte de energia alternativa. Cita também que o componente energético é quem molda e sustenta as civilizações, concluindo que existem amplas oportunidades para uma participação efetiva dos combustíveis derivados de biomassa no Brasil e América Latina, existindo, entretanto, a necessidade da clara opção política e esforço tecnológico mais autônomo e que tal política terá como vetores de energia o etanol, os óleos vegetais e a biomassa florestal na propulsão de veículos e na geração de eletricidade.

RIPOLI et al. (1991) estudaram a energia contida em resíduos de colheita de cana crua nas variedades SP701284, SP701143, SP706163, SP711406 e NA5679 no Estado de São Paulo. A Tabela 1 apresenta alguns valores médios obtidos a partir do trabalho.

Tabela 1: Valores médios de umidade, massa e poder calorífico útil (PCU) obtidos por RIPOLI et al. (1991) para as diversas frações constituintes do palhiço.

Variáveis	Médias	CV(%)	DP
<b>Ponteiros</b>			
Umidade (%)	76,79	3,33	1,82
Massa (Gg.ha <sup>-1</sup> )	6,00	30,00	1,80
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	888,0	13,34	118,50
<b>Folhas verdes</b>			
Umidade (%)	66,21	5,90	3,88
Massa (Gg.ha <sup>-1</sup> )	6,87	29,80	2,05
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	1.344,8	12,41	166,95
<b>Palhas</b>			
Umidade (%)	8,81	27,47	2,42
Massa (Gg.ha <sup>-1</sup> )	8,74	32,38	2,83
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	3.609,0	0,67	24,25
<b>Palhiço Ponderal</b>			
Umidade (%)	46,11	11,23	5,18
Massa (Gg.ha <sup>-1</sup> )	21,61	23,80	5,14
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	45.783,4	24,40	11.152,1

CV= Coeficiente de variação; DP = Desvio padrão.

Segundo RIPOLI et al. (1990) a produção média de palhiço é de 9,7 Gg.ha<sup>-1</sup> e com Poder Calorífico Útil (PCU) da ordem de 2.280 kcal.kg<sup>-1</sup>. Desta forma estimaram também que em um canavial com produtividade de colmos de 70 Gg.ha<sup>-1</sup>, pode-se obter um equivalente energético de 20.877 Mcal em etanol, 31.326 Mcal no bagaço e 21.058 Mcal no palhiço.

RIPOLI (1991) desenvolveu modelos matemáticos relativos ao equacionamento dos balanços energético e econômico do palhiço da cana-de-açúcar. O autor realizou ensaios de campo na Usina Santa Lídia, no município de Ribeirão Preto, SP, com intuito de validar os modelos propostos e concluiu que, com base na aplicação dos modelos desenvolvidos a substituição do bagaço pelo palhiço nas usinas de açúcar pode ser altamente vantajosa.

Em estudo na Usina Santa Bárbara, SP, MOLINA JR. (1991) utilizou para o enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar uma enfardadora de forragem marca SODE, modelo JS-90, de fabricação Argentina, operando em um canavial recém colhido e sem queima prévia. Obteve os seguintes resultados: massa (base úmida) de palhiço 33,84 Gg.ha<sup>-1</sup>; energia contida no palhiço 50.701,27 Mcal.ha<sup>-1</sup>; massa média de palhiço por fardo 164,93 kg; densidade média dos fardos 189,64 kg.m<sup>-3</sup> e concluiu que o combustível, medido em quantidade de energia, consumido pelo conjunto trator enfardadora foi de apenas 1,16% da

energia contida no palhiço enfardado, o que comprovou o balanço energético positivo do processo.

CLEMENTE (2001) concluiu que as 308 usinas de açúcar do país poderiam acrescentar à matriz energética nacional, de imediato, megawatts suficientes para atender o consumo de cerca de 355 mil pessoas. O cálculo é considerado conservador. Leva em conta que, em média, 1,5 MW estaria sendo desperdiçado na co-geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. E que a indústria sucroalcooleira atinge auto-suficiência em energia na safra, de maio a novembro, período que coincide com a estiagem e agravamento da crise do setor. Nessa fase existe um excedente de energia nas usinas e que poderia ser comprada pelas concessionárias.

RIPOLI, M. (2002), constatou que a energia contida em um hectare de cana na forma de palhiço foi de 11,22 EBP (equivalente barril de petróleo) e comparou ao encontrado por RIPOLI (1991) citado pelo próprio autor, que foi de 30,90 EBP.ha<sup>-1</sup> sugerindo que a diferença seja em função da eficiência de recolhimento do sistema de enfardamento de fardo cilíndricos.

### **3.3 Sistemas mecânicos de enfardamento:**

O enfardamento constitui um processo de adensamento de materiais fibrosos em fardos transportáveis em densidades entre 160 e 200 kg.m<sup>-3</sup>.

Segundo THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY (1998) os sistemas de enfardamento mais utilizados na agricultura são:

- Enfardadora de fardos cilíndricos;
- Enfardadora de fardos prismáticos pequenos;
- Enfardadora de fardos prismáticos médios;
- Enfardadora de fardos prismáticos grandes;

Os quais serão descritos com mais detalhes a seguir.

#### **3.3.1 Enfardadora de fardos cilíndricos**

As enfardadoras de fardo cilíndrico estão no mercado europeu a aproximadamente 25 anos, produzem fardos de 1,2 m de altura e 1,5 m de diâmetro aproximadamente, que podem chegar a 244 kg com uma densidade de 110 kg.m<sup>-3</sup>. O sistema de fardo cilíndricos foi

o primeiro a ser comercializado, porém, atualmente na Europa é raramente visto (THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY 1998).

### **3.3.2 Enfardadora de fardos prismáticos pequenos**

O fardo pequeno típico apresenta dimensões aproximadas de 0,46 x 0,36 m com comprimento de 0,80 m, com massa de 12 kg e uma densidade entre 90 e 100 kg.m<sup>-3</sup>. Na Europa já foi largamente utilizado, mas atualmente somente é aplicado em pequenas áreas para enfardamentos de palha para camas de animais ou para pequenas caldeiras de aquecimento central. (THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY 1998).

### **3.3.3 Enfardadora de fardos prismáticos médios**

As enfardadoras de fardos prismáticos médios conquistaram uma posição segura na agricultura europeia na operação de enfardamento de cama e alimento para animais e para queima em pequenas caldeiras de aquecimento nas fazendas. É o mais comercializado pois as dimensões dos fardos são mais adequadas ao uso agrícola. As dimensões dos fardos são de 0,80 x 0,80 m, com o comprimento de 2,40 m, massa aproximada de 235 kg e densidade de 140 kg.m<sup>-3</sup>, sendo enfardadoras de dimensões maiores. (THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY 1998).

### **3.3.4 Enfardadora de fardos prismáticos grandes**

As enfardadora de fardos prismáticos grandes estão no mercado europeu a aproximadamente 20 anos e é o único formato de fardo aceito pelas unidades de aquecimento distrital, CHP e de geração de energia da Dinamarca. As dimensões dos fardos são de 1,20 x 1,30 m, com comprimento de 2,40 m, densidade de 139 kg.m<sup>-3</sup> e massa de 523 kg. O comprimento pode ser ajustado entre 1,10 m e 1,75 m, mas, por razões de transporte na Dinamarca se adota o comprimento de 2,40 m. (THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY 1998).

Os sistemas de colheita a granel, briquetagem e peletização não serão discutidos nesse trabalho, pois, as características finais do produto processado por estes sistemas se

encontram fora das características dos materiais processados por enfardadoras de baixa densidade.

### 3.4 Comportamento mecânico dos materiais fibrosos

Os modelos reológicos podem explicar o comportamento dos materiais fibrosos durante o processo de compressão serão citados neste trabalho os autores quais possibilitaram embasamento dos cálculos do comportamento mecânico do palhiço em compressão.

GUPTA (1983) propôs um modelo não-linear de sólidos viscoplásticos, com o objetivo de prever o comportamento de materiais viscoplásticos. As propriedades reológicas foram quantificadas pelas curvas de relaxação e de fluência.

FABORODE & O'CALLAGHAN (1989), apresentaram um modelo reológico não-linear de cinco elementos que, segundo os autores, mostrou-se adequado para explicar o processo de adensamento de materiais biológicos fibrosos. Este modelo mostrou dois limites chamados de ponto de densidade crítica, em que a resposta plástica começa, e o ponto elastoplástico, a partir do qual a deformação elastoplástica se inicia. Também observaram que o tempo de residência ideal para o material estudado (palha de cevada) foi de 2,5 a 5 segundos.

KANAFOJWSKI (1976) estudando a relação da pressão em função da densidade final, até a pressão de 74 MPa, em seus resultados encontrou uma relação exponencial entre as duas variáveis e concebeu a seguinte equação válida para densidades de até 400 kg.m<sup>-1</sup>, “C” e “m” são constantes determinadas experimentalmente:

$$P = C\gamma^m$$

O'DOGHERTY (1989) ressaltou a importância de conhecer as propriedades físicas do material que está sendo submetido a algum processo mecânico para interpretar seu comportamento.

No desenvolvimento de máquinas de adensamento, MUÑOZ & HERRERA (2002) ressaltam a importância do estudo do comportamento mecânico do material a ser compactado, principalmente quando este material é um material fibroso proveniente de resíduos agrícolas. Segundo os autores, estes materiais têm propriedades mecânicas que variam de acordo com as forças de tensão e pressão aplicadas, taxa de compressão, teor de umidade, temperatura, etc..

Uma vez que o comportamento do material biológico sob compressão e relaxação é complexo, uma forma de analisar seu comportamento é utilizando modelos reológicos e,

conseqüentemente, sua análise matemática através de equações diferenciais desenvolvidas da resposta do material sob efeito da compressão e relaxação. Basicamente, o material biológico apresenta concomitantemente as seguintes características: elástica, plástica, viscoelástica, viscoplástica e elastoplástica.

Com a variação do tempo de retenção entre 0 e 8 segundos em pequenos fardo de feno, foi notado por SRIVASTAVA et al (1981) que houve aumento da densidade aparente desses fardos. Assim, constata-se que o tempo de retenção deve ser considerado para que haja uma acomodação do material.

### **3.5 Considerações sobre coeficiente de atrito**

MOSHENIN (1970) cita que as leis básicas sobre o atrito foram primeiramente enunciadas por AMONSTONS e posteriormente verificadas por COULOMB, esses autores constataram que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento e da área de contato das superfícies deslizantes mas dependente da natureza dos materiais em contato e proporcional a carga normal.

A melhora das técnicas de medição em estudos mais recentes mostrou que alguns desses conceitos de atrito não podem ser explicados pelas de leis de COULOMB, BOWDEN e TABOR (2001) que propuseram teorias mais avançadas para as causas do atrito.

Os conceitos gerais relacionados com o atrito foram relacionados por SHERWOOD (1951):

- A força de atrito é definida como a força atuando no plano de contato;
- A força de atrito provém da força requerida para deformar as irregularidades superficiais e para vencer a adesão e coesão entre as superfícies;
- A força de atrito é proporcional à área de contato efetiva entre as superfícies;
- Força de atrito é dependente da velocidade relativa entre as superfícies de contato;
- A força de atrito é dependente da natureza dos materiais em contato;
- A força de atrito não é dependente da rugosidade das superfícies, excetuando condições extremas.

O coeficiente de atrito estático é definido como a força capaz de impedir o movimento relativo entre as superfícies dos corpos em contato, o coeficiente de atrito dinâmico ou de deslizamento é determinado pela força existente quando há movimento

relativo entre os dois corpos. Geralmente o coeficiente de atrito estático é maior que o dinâmico, como citado em diversos manuais de livros de física como RESNICK e HALLIDAY (1983), AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK (1972), entre outros.

DALCOLMO (1980) estudando o coeficiente de atrito para forrageiras sobre diversos tipos de superfícies, observa uma tendência de redução do coeficiente de atrito de 20 a 40% quando a umidade variou de 20 a 60%, o valor do coeficiente de atrito permaneceu constante para valores de umidade abaixo de 20 %, isso é concordante com BLEVINS e HANSEN e com WIENEKE citados por DALCOLMO(1980).

### **3.6 Considerações sobre a revisão bibliográfica**

Avaliando toda a revisão de bibliografia exposta, pôde-se observar a grande viabilidade do uso observar que o uso do palhiço como fonte de energia, a vantagens do recolhimento parcial (por volta de 70% do que se encontra sobre o solo) preservariam as características benéficas desse palhiço como cobertura vegetal morta do solo e possibilitaria o aproveitamento dessa energia que hoje em sua grande maioria se encontra desperdiçada pelas queimadas, essas que são cada vez mais restringidas pela sociedade ou pela decomposição microbológica no solo o que pode produzir além do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), o CH<sub>4</sub> (gás metano) que é cerca de 20 vezes mais poluente que o CO<sub>2</sub> como gás que colabora com a intensificação do efeito estufa no planeta.

Sobre o conhecimento consultado pôde-se contatar que há suficiente e disponível o material para embasar o desenvolvimento de novos conceitos e propostas de equipamentos para recolhimento de palhiço e haverá demanda mercadologia para novos equipamentos devido as expansões das áreas cultivadas de cana-de-açúcar e a crescente carência de métodos para produção de energia limpa (renovável).

## 4 Material e Métodos

### 4.1 Princípio de adensamento

O princípio de adensamento mecânico consiste em aplicar forças de compressão à massa de material vegetal fibroso contido em uma câmara rígida sendo que após a retirada desse material do adensador as forças de compressão devem ser mantidas para evitar a variação de densidade devido do fenômeno da recuperação do material. Nas enfardadoras convencionais desenvolvidas para feno, a recuperação é contida utilizando amarração do fardo com barbante. As simulações de custo de recuperação de palhiço efetuadas por MICHELAZZO (2005) mostram o barbante como componente de maior custo no processo. Por outro lado, a amarração com barbante incorpora mecanismos adicionais ao equipamento adensador e uma intermitência na formação dos fardos.

### 4.2 Adensador de helicóides cônicos

O mecanismo de adensamento proposto neste estudo visa atingir os níveis de adensamento correspondentes às enfardadoras de feno e outras prensas convencionais utilizadas para algodão ou biomassa energética em geral. A densidade do palhiço, solto no campo, que corresponderia aproximadamente a densidade de liberação do palhiço do despalhador das colhedoras mecânicas de cana-de-açúcar, é da ordem de  $20 \text{ kg.m}^{-3}$  (RIPOLI 1991). O adensamento máximo por ação mecânica simples de compressão, sem tratamento térmico ou incorporação de aglutinantes, que hoje é aplicado em equipamentos comerciais, é da ordem de  $180 \text{ kg.m}^{-3}$ . Resulta, portanto, na razão de adensamento de 9:1 ( $Ta = 180/20$ ), a qual foi considerada para o dimensionamento do adensador de helicóides cônicos

O processo de adensamento proposto desenvolve-se em três etapas, sendo a primeira um pré-adensamento executado por um par de rolos aletados, solidários ao cone giratório externo como ilustrado na Figura 1 Os rolos aletados promovem a alimentação do equipamento e elevam da baixíssima densidade, cerca de  $20 \text{ kg.m}^{-3}$ , para uma densidade da ordem  $50 \text{ kg.m}^{-3}$ , a qual facilita o início da segunda fase do processo de adensamento.

Na segunda fase a pressão de alimentação desenvolvida na fase 1 aumenta a carga normal que as abas (helicóides) dos cones externo e interno exercem sobre o material em adensamento aumentando conseqüentemente a força de atrito, que se soma à pressão de alimentação aumentando gradativamente a pressão exercida e a densidade do material até a extremidade de saída do adensador. Os helicóides cônicos giram em sentidos opostos e possuem abas helicoidais, também em sentidos opostos, sobre suas superfícies. As abas promovem o movimento descendente do material através de forças de atrito.

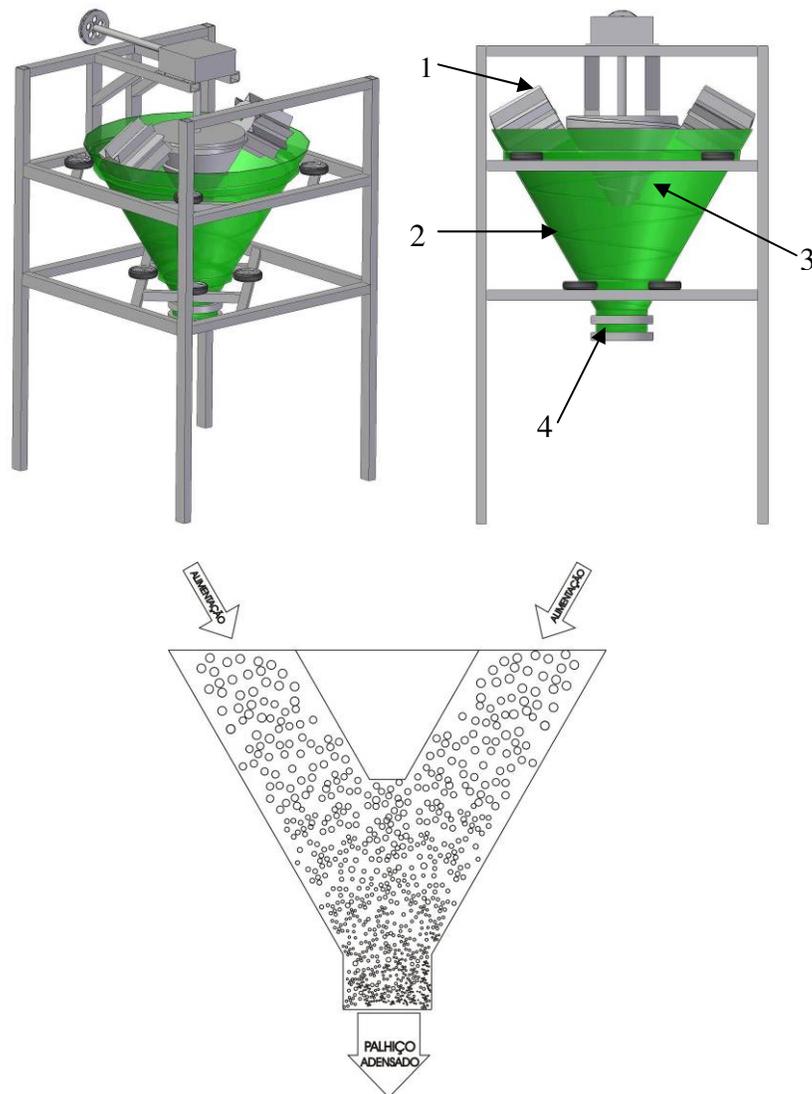


Figura 1: Ilustração do adensador de helicóides cônicos e da distribuição de densidade ao longo do adensador.

- 1 – Rolo pré-adensador;
- 2 – Helicóide externo com helicóide interno em sentido direito;

- 3 – Helicóide interno com helicóide externo em sentido esquerdo;
- 4 – Extremidade de saída;

Na terceira fase o material é submetido a um processo de torção que tem por objetivo, além de um aumento final de densidade, gerar uma corda de palhiço estruturada pela acomodação helicoidal das fibras. Nesse processo as fibras são submetidas a tensões normais internas e correspondentes forças de atrito, que são preservadas finalmente pelo enrolamento da corda em uma bobina que inibe a recuperação do material, conservando a densidade final do processo. Os rolos aletados e o cone duplo devem elevar a densidade de  $20 \text{ kg.m}^{-3}$  para  $140 \text{ kg.m}^{-3}$  a qual implica em uma redução do volume de 7:1. Na fase de adensamento por torção pretende-se obter a densidade restante de 140 para  $180 \text{ kg.m}^{-3}$ , o que corresponde a uma redução de volume de 1,28:1, totalizando o adensamento de 9:1 citado anteriormente.

O adensador de helicóides cônicos será projetado com área superior de  $0,0549 \text{ m}^2$  e área final de saída com  $0,00785 \text{ m}^2$ , de forma a conseguir a referida redução de volume de 7:1.

Com relação à altura das abas das helicóides dos cones não foram localizados dados científicos específicos, no entanto por observação, as colhedoras de grãos têm utilizado, nos rolos helicoidais da plataforma de alimentação, alturas que variam de 50 a 150 mm. A altura das abas será uma das variáveis da experimentação.

O projeto do adensador proposto necessita hipóteses simplificadoras, dados experimentais ligados fundamentalmente ao comportamento mecânico do material que juntamente com equações cinemáticas e de equilíbrio, relacionem as variáveis do equipamento de forma a efetuar seu dimensionamento visando atingir o resultado final acima descrito.

#### **4.2.1 Hipóteses simplificadoras**

As dimensões do adensador proposto foram determinadas de forma a viabilizar o fluxo do palhiço produzido pela colhedora e a condição de compactação final proposta, de acordo com as seguintes hipóteses, Figura 2.

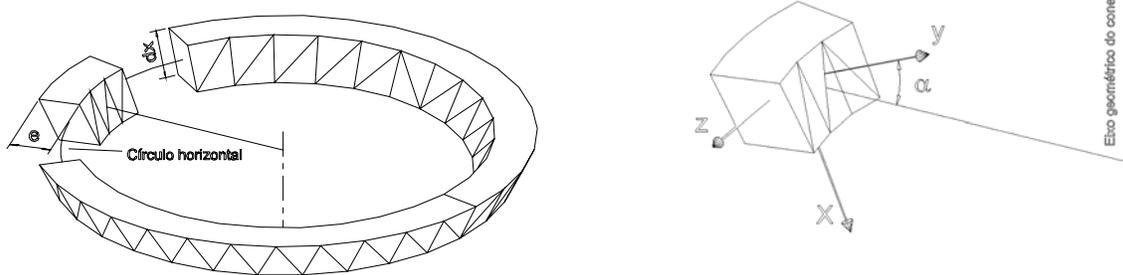


Figura 2: Elemento de palhiço com sua base de coordenadas local.

- A vazão mássica “ $V_m$ ” permanece constante ao longo do percurso do material dentro do compactador. Esta hipótese evita o acúmulo ou ausência de material em pontos da câmara de adensamento;
- Ambos os helicóides têm uma relação de velocidades angulares constante, inicialmente adotadas como valor unitário. Esta hipótese visa evitar deslocamento do palhiço ao longo do eixo “ $z$ ” da Figura 2, o qual é tangente ao círculo horizontal passante pelo centro de massa do elemento em estudo. Esta hipótese contempla a condição de relação de transmissão constante impostas pelas transmissões mecânicas que acionam os cones;
- Os passos das helicóides, interna e externa, são iguais em qualquer posição “ $x$ ” ao longo da câmara de adensamento. Esta hipótese visa também evitar deslocamento do palhiço ao longo do eixo “ $z$ ” da Figura 2;
- Por motivos construtivos considerou-se que o diâmetro da câmara varia linearmente ao longo do eixo geométrico dos helicóides adensadores.
- Existe deslizamento entre as abas dos helicóides cônicos e o palhiço, o qual está em função apenas da carga normal atuante entre palhiço e o helicóide, do ângulo dos helicóides com relação ao eixo “ $z$ ” da Figura 3 e da altura da aba dos helicóides;

#### 4.2.2 Capacidade do adensador

Com base na hipótese de vazão mássica uniforme ao longo da câmara de compactação pode-se escrever a equação (1), na qual a densidade do material  $\rho_x$  aumenta a medida que o mesmo desce pela câmara do equipamento com diâmetros progressivamente menores. Nesta análise considera-se um elemento com espessura “ $e$ ”, comprimento “ $dx$ ” e largura correspondente ao perímetro do círculo horizontal ilustrado na Figura 2.

$$Vm = \rho_x \cdot e \cdot \pi \cdot D_{mx} \cdot Vp_x \quad (1)$$

$$D_{mx} = \frac{(D_{ix} + D_{ex})}{2}$$

Onde:

$Vm$  = Vazão mássica [ kg . s<sup>-1</sup> ];

$x$  = Localização de um elemento de palhiço ao longo da geratriz do cone do adensador.

$\rho_x$  = Densidade do palhiço na posição “ $x$ ” [ kg . m<sup>-3</sup> ];

$D_{mx}$  = Diâmetro médio da câmara de adensamento na posição “ $x$ ” [m];

$D_{ix}$  ,  $D_{ex}$  = Diâmetros dos cones interno e externo na posição “ $x$ ”;

$Vp_x$  = Velocidade de avanço do palhiço na direção “ $x$ ” e na posição “ $x$ ” (inferior à velocidade da aba do helicóide).

A densidade do palhiço  $\rho_x$  depende da pressão de adensamento  $P_{xe}$  na entrada do elemento e do tempo durante o qual essa pressão permanece aplicada essa curva foi determinada experimentalmente, Figura 3.

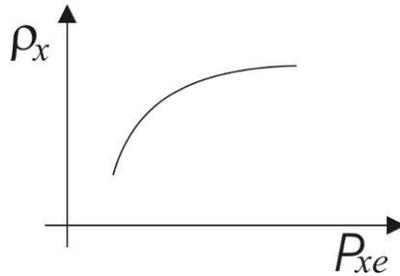


Figura 3: Tendência da densidade do palhiço em função da pressão de entrada.

#### 4.2.3 Velocidades e passos dos helicóides

As abas das roscas possuem duas componentes de velocidade, sendo uma componente tangencial, “ $Vr_z$ ”, contida em um plano perpendicular ao eixo geométrico do cone, e uma componente longitudinal “ $Vr_x$ ”, no sentido da geratriz do cone, que corresponde ao eixo “ $x$ ” representado na Figura 2.

A componente de velocidade tangencial do helicóide  $Vr_x$ , depende do diâmetro da rosca  $D_x$  e da velocidade de rotação do cone  $Nc$ , equação (2).

$$Vr_z = \pi \cdot D_x \cdot Nc \quad (2)$$

$Vr_x$  = Velocidade linear da aba da rosca no sentido de avanço do palhiço [ m . s<sup>-1</sup> ];

A componente de velocidade longitudinal do helicóide “ $Vr_x$ ”, depende do passo da rosca “ $pr_x$ ” e da velocidade de rotação do cone, equação (3).

$$Vr_x = \frac{Nc \cdot pr_x}{60} \quad (3)$$

$pr_x$  = Passo do helicóide variável ao longo da geratriz do cone [ m ];

As velocidades tangenciais das abas dos helicóides, interno e externo, foram consideradas de sentidos opostos, tal como indicado pelo sinal negativo contido na equação (3b). Esta condição visa evitar a rotação da massa de palhiço em torno do eixo geométrico vertical dos cones. A relação “ $k_t$ ” entre as magnitudes dessas velocidades permite uma certa velocidade de rotação da corda de palhiço na boca de saída do adensador, necessária para promover o processo de torção da corda. Esta condição sugere uma relação constante entre as velocidades de rotação de ambos os cones expressa pela equação (3c).

$$Vr_{zi} = -k_t Vr_{ze} \quad (3b)$$

$$\pi \cdot D_{ix} \cdot Nc_i = -k_t \pi \cdot D_{ex} \cdot Nc_e$$

$$Nc_i = -k_t \frac{D_{ex}}{D_{ix}} Nc_e \quad (3c)$$

$Nc_i$  = Velocidade de rotação do cone interno [ RPM];

$Nc_e$  = Velocidade de rotação do cone externo [ RPM];

As componentes de velocidade longitudinal das abas dos helicóides, interno e externo, foram consideradas iguais para evitar rotação do elemento em torno do eixo “z”.

$$Vr_{xi} = Vr_{xe}$$

Para satisfazer esta condição, e levando em consideração as equações (2) e (3c), os passos das roscas devem manter uma relação de proporcionalidade, dada pela equação (4). A relação negativa entre os passos indica que os helicóides das roscas devem ser opostos, dessa forma, as roscas virando em sentidos opostos promovem avanço do material no mesmo sentido.

$$Nc_i \cdot pr_{xi} = Nc_e \cdot pr_{xe}$$

$$\begin{aligned}
Nc_i &= -k_t \frac{D_{ex}}{D_{ix}} Nc_e \\
-k_t \frac{D_{ex}}{D_{ix}} Nc_e pr_{xi} &= Nc_e pr_{xe} \\
pr_{xe} &= -k_t \frac{D_{ex}}{D_{ix}} pr_{xi}
\end{aligned} \tag{4}$$

As equações (3c) e (4) apresentam relações idênticas que especificam a proporção que deve existir entre as velocidades de rotação e os passos das roscas para se satisfazer as condições de velocidade tangencial e longitudinal acima descritas.

A velocidade de avanço do palhão “ $V_{px}$ ” está determinada pela capacidade de processamento desejada para o adensador, equação 1, e está relacionada com a velocidade longitudinal da aba do helicóide e com o deslizamento que existe entre esta e o palhão. A velocidade relativa entre o palhão e a aba da rosca é dada pela equação (5).

$$V_{rel} = Vr_x - Vp_x \tag{5}$$

$V_{rel}$  = Velocidade relativa entre a aba do helicóide e o palhão;

A velocidade relativa aumenta com a pressão desenvolvida na câmara de compressão até atingir em seu limite o valor de velocidade  $Vr_x$ , no instante que isso ocorre a velocidade do palhão se torna nula com a velocidade de deslizamento de 100 %.

Além das relações geométricas resultantes das hipóteses cinemáticas acima descritas, qualquer elemento de palhão está sujeito às condições de equilíbrio estático correspondentes à operação em regime permanente do equipamento.

#### 4.2.4 Equilíbrio do elemento

O palhão em processo de adensamento está submetido às forças externas “ $F_{x_e}$ ”, “ $F_{x_s}$ ” e “ $N$ ”, aplicadas nas faces do elemento. À medida que o palhão avança ao longo da câmara de adensamento a pressão deve aumentar para promover o aumento de densidade esperado. Este aumento da pressão ao longo da câmara surge fundamentalmente das forças de atrito “ $\mu N$ ” aplicadas pelas abas dos cones interno e externo.

O coeficiente de atrito “ $\mu$ ”, que atua entre a aba e o palhão, foi determinado experimentalmente na unidade de teste em função da e a pressão de entrada, Figura 4.

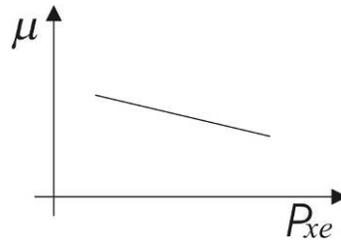


Figura 4: Tendência do coeficiente de atrito entre as helicóides e palhiço.

O equilíbrio estático do palhiço, figura 5, em regime permanente dentro da câmara do adensador, na direção “x”, é dado pela equação 5 que deve ser analisada com auxílio da Figura 6, considerando uma massa de comprimento “dx”, com espessura “e”, largura unitária e densidade  $\rho_x$ .

$$\sum F_x = F_{xe} + 2\mu_x N_x + e \pi D_{mx} \rho_x g \cos(\alpha) dx - F_{xs} = 0 \quad (5)$$

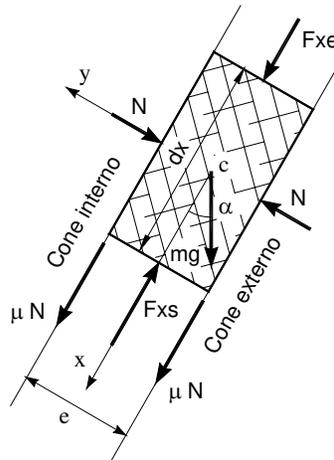


Figura 5: Equilíbrio do palhiço na câmara do adensador.

$e$  = Espessura do elemento, (distância entre as paredes dos cones interno e externo) [m];

$dx$  = Comprimento do elemento de palhiço;

$c$  = Centro geométrico do bloco de palhiço;

$N_x$  = Reação normal aplicada pelas paredes do adensador na posição “x”;

$\mu_x N_x$  = Força de atrito (arrasto) atuante entre as abas dos helicóides e o palhiço;

$F_{xe}$  = Força na entrada do elemento, na posição “x”;

$F_{xs}$  = Força na saída do elemento, na posição “x”.

A força na entrada do primeiro elemento, no topo da câmara de adensamento, é dada pelos rolos pré-adensadores ilustrados na figura 1. Essa pressão é tomada como partida para o cálculo numérico seqüencial aplicado aos elementos finitos contidos entre a entrada e a saída do adensador. A pressão de saída pode ser obtida substituindo a equação 5b na equação 5 do que resulta a equação 6.

$$F_{xe} = e \pi D_{mx} P_{xe} \qquad F_{xs} = e \pi D_{mx} P_{xs} \qquad (5b)$$

$$N = dx \pi D_{mx} P_N$$

$$P_{xs} = P_{xe} + \frac{2\mu_x P_N dx}{e} + \rho_x g \cos(\alpha) dx$$

$$P_{xs} = P_{xe} + \left( \frac{2\mu_x P_N}{e} + \rho_x g \cos(\alpha) \right) dx \qquad (6)$$

$P_{xe}$  = Pressão de adensamento entrada [ $N.m^{-2}$ ].

$P_{xs}$  = Pressão de adensamento saída [ $N.m^{-2}$ ].

A aplicação da equação 6 requer os resultados experimentais que forneçam valores para as variáveis  $N_x$ ,  $\mu_x$  e  $\rho_x$ .

A reação normal das superfícies dos helicóides é função da pressão de entrada aplicada sobre o palhico. Essa relação entre pressão de alimentação e reação normal dos cones foi obtida experimentalmente na unidade de teste, Figura 6.

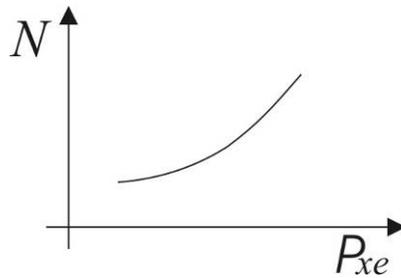


Figura 6: Tendência da reação normal em função da pressão de entrada.

#### 4.2.4.1 Fluxograma de operação do modelo de adensamento

As simulações e dimensionamento serão baseadas no modelo matemático acima descrito e o software MatLab 6.5 será utilizado para a operação e desenvolvimento do modelo e no intuito de simplificar e organizar a lógica de programação em MatLab, foram elaborados o algoritmo e o fluxograma do modelo, Figura 7. Para o cálculo com a rotina de modelagem as curvas  $N=f(P_{xe})$ ,  $\mu_l=f(P_{xe})$ ,  $\rho_x=f(P_{xe})$  deverão ser determinadas experimentalmente e acrescentadas à estrutura do programa para a solução adequada do modelo.

Algoritmo de cálculo:

- 1) Adotar uma pressão de entrada inicial “ $P_{xe}$ ”, “ $e$ ”, e “ $\alpha$ ”;
- 2) Determinam-se os valores de  $N=f(P_{xe})$ ,  $\mu_l=f(P_{xe})$  e  $\rho_x=f(P_{xe})$ ;
- 3) A equação (6) é executada gerando um novo valor de “ $P_{xe}$ ”;
- 4) Enquanto a condição de parada não for atingida a rotina assume a “ $P_{xs}$ ” como “ $P_{xe}$ ” e o cálculo é reiniciado.

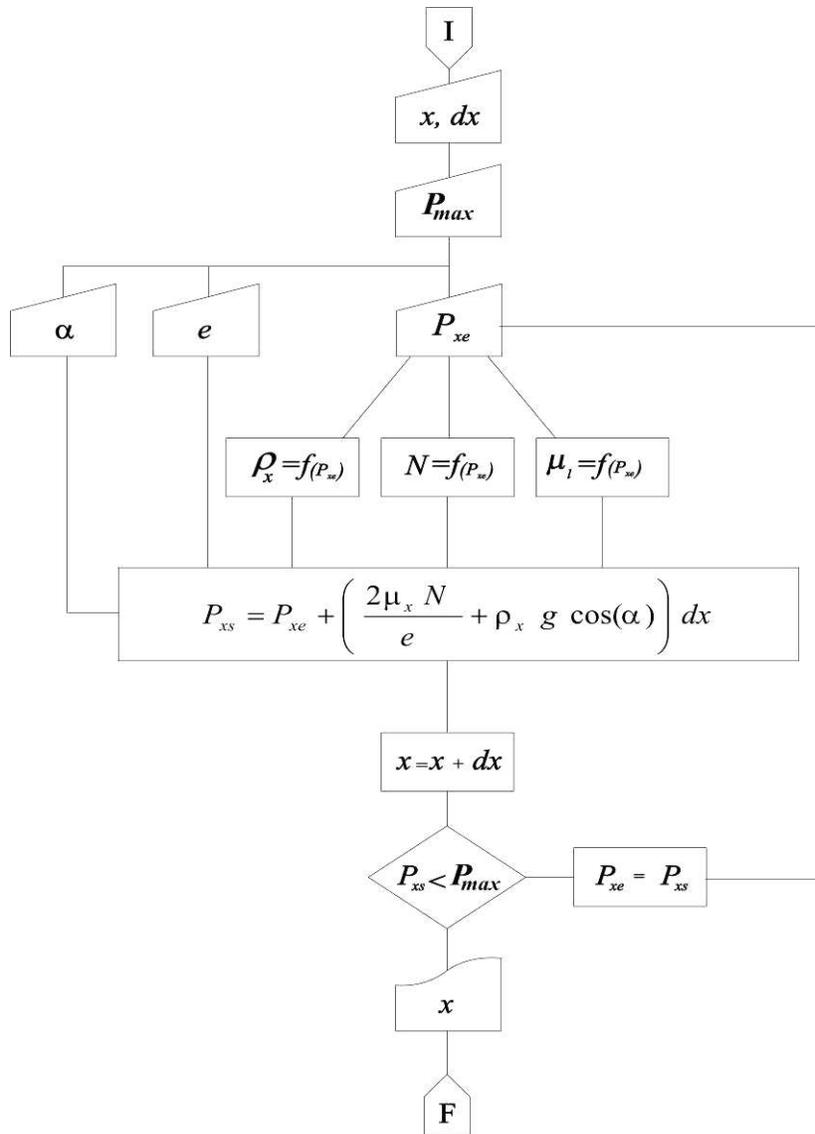


Figura 7: Fluxograma da simulação do processo de adensamento pelo princípio de helicóides cônicos.

#### 4.2.5 Avaliação das características mecânicas do palhicho.

O processo de compactação de cone duplo proposto envolve a ação mecânica de abas helicoidais fixadas sobre a superfície de cones rotativos. A inclinação das abas com relação à direção circunferencial do movimento promove componentes de forças de atrito que atuam tanto no sentido circunferencial quanto na direção do orifício de saída do palhicho, estas últimas responsáveis pela compactação do palhicho propriamente dita. As pressões exercidas pela câmara de compressão durante o processo de compactação produzem reações normais nas

paredes dessa câmara essas forças normais são necessárias para a existência das forças de atrito.

Durante o processo de compactação as abas deslizam sobre o palhiço sob o efeito de carga normal aplicadas pelo material adensado. A modelagem das forças de atrito como função pressão de saída “ $P_{xe}$ ” que age sobre o material é necessária para o dimensionamento do sistema adensamento por helicóides cônicos.

Para a determinação experimental dos dados necessários para a modelagem foi projetada e construída uma unidade de teste de compressão de palhiço como ilustra a Figura 8, 9, 10, 11, 12 e 13. A unidade de testes conduz um volume de palhiço entre duas laterais de altura ajustável onde foram colocados os perfis dos helicóides que representaram os helicóides cônicos, interno e externo. O adensamento é possível, pois o êmbolo de compressão “ $P_{xs}$ ” empurra o palhiço contra um êmbolo opositor que tem seu movimento restringido pelo cilindro hidráulico “ $P_{xe}$ ” e terá sua pressão de funcionamento regulada para a obtenção de vários valores de restrição, isso somado a força de atrito “ $F_{\mu}$ ” resultante da interação da massa de palhiço e as laterais ajustáveis com perfis de rosca conforme descrito na Figura 8. A velocidade máxima foi de  $0,14 \text{ m.s}^{-1}$  a pressão máxima adotada para o ensaio consultado KANAFOJWSKI (1976) foi de 3 bar para densidade de  $180 \text{ kg.m}^{-3}$  de materiais fibrosos. A célula de carga indicada na Figura 9 foi capaz de medir os esforços nos eixos da placa instrumentada que para as análises representam a reação normal “ $N$ ”, força de atrito dinâmico “ $F_{\mu}$ ” e torque de acionamento. As figuras 10 e 11 ilustram a posição inicial e final respectivamente do êmbolo de compressão da unidade de teste.

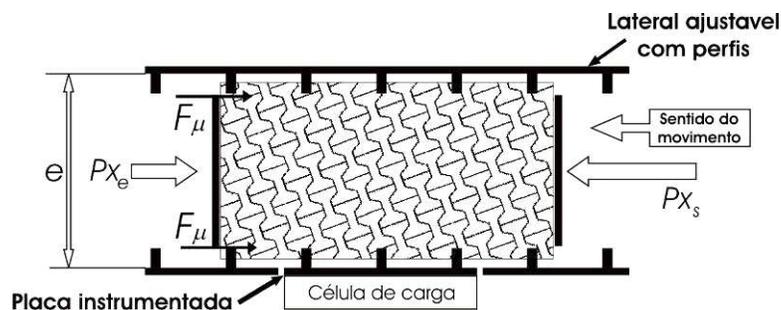


Figura 8: Diagrama do funcionamento da unidade de testes de palhiço.

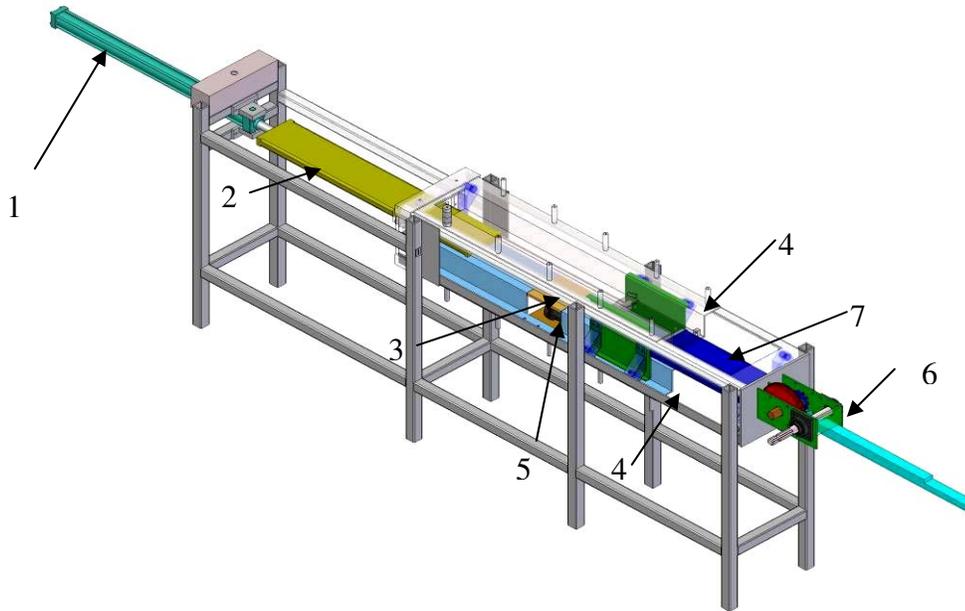


Figura 9: Ilustração da unidade de adensamento de palhiço.

- 1 – Cilindro hidráulico que impõe resistência ao movimento para compressão do palhiço;
- 2 – Êmbolo movido para obtenção de “ $P_{xe}$ ”;
- 3 – Câmara de compressão;
- 4 – Laterais ajustáveis que possibilitam variação de “ $e$ ” e alojamento dos perfis de rosca;
- 5 – Conjunto da célula de carga ortogonal triaxial;
- 6 – Conjunto redutor e cremalheira de acionamento;
- 7 – Embolo de compressão “ $P_{xs}$ ”.

Com a unidade de teste podem ser determinadas as seguintes variáveis:

- a) Torque de acionamento “ $F_t$ ”;
- b) Força de adensamento “ $F_c$ ”;
- c) Relação entre pressão de adensamento e densidade do palhiço;

- d) A Normal aplicada pelo palhico nas abas das roscas “N”;
- e) Coeficiente de atrito “ $\mu$ ” da interação do palhico e a placa com perfis de helicóide.

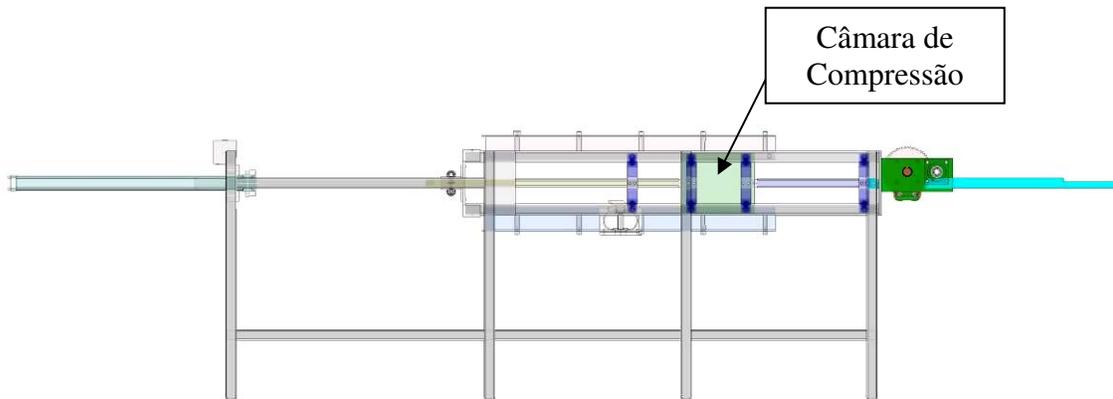


Figura 10: Ilustração da unidade de testes com êmbolo na posição inicial de operação.

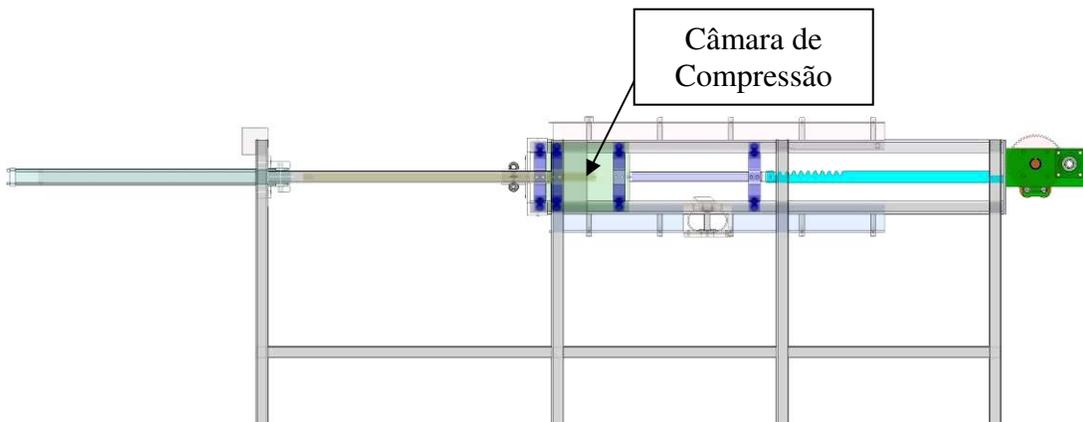
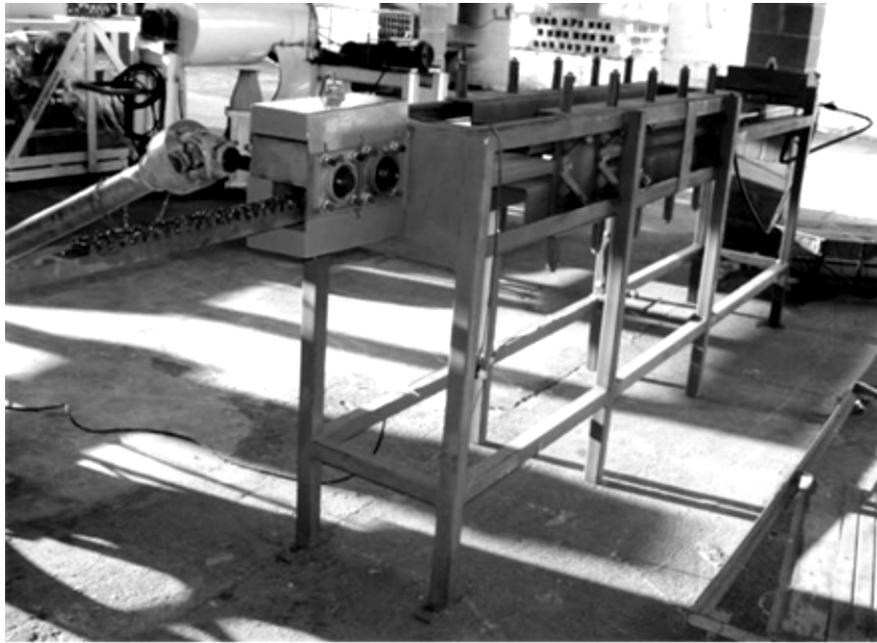
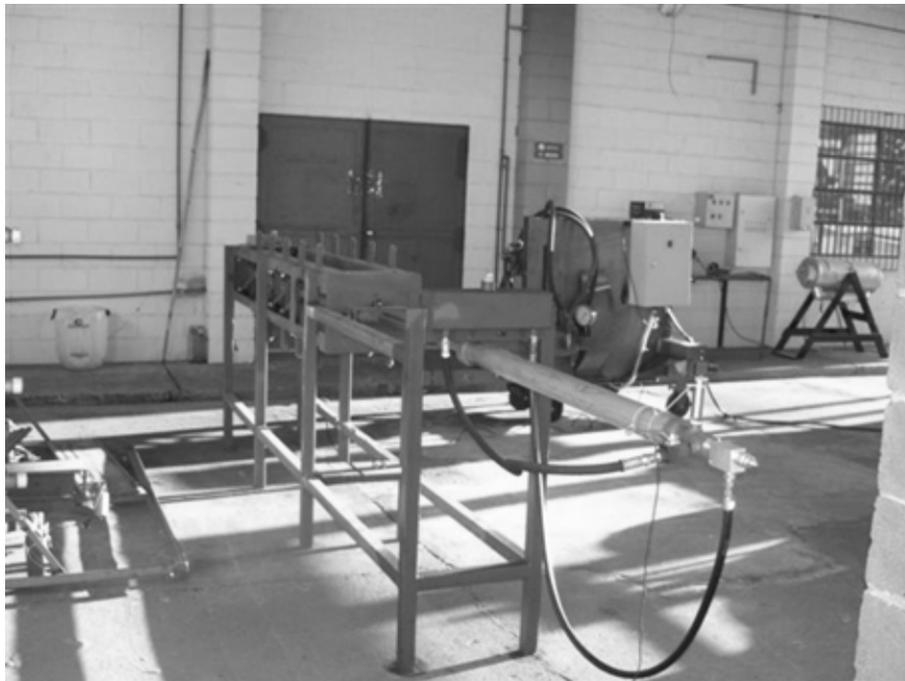


Figura 11: Ilustração da unidade de testes com êmbolo na posição final após a operação.



(a)



(b)

Figura 12 (a) e (b) Ilustrações do equipamento construído.

#### **4.2.5.1 Metodologia de avaliação do comportamento do palhço em processo de adensamento por abas helicoidais.**

O palhico foi coletado do clone varietal SP 891115 em 1º corte na Usina Rafard localizada ao município de Rafard, Estado de São Paulo, Fazenda Sobradinho, Zona 44, Talhão 63. Este corte foi destinado à produção de mudas, o que conseqüentemente manteve boa integridade do palhico. Posteriormente, este palhico foi submetido a secagem natural ao ar livre e homogeneizado por agitação manual. As amostras equivalentes aos volumes das câmaras de compressão foram retiradas para avaliação e acondicionadas entre as placas de compressão das câmaras de adensamento, que possuem o volume de 0,00267 m<sup>3</sup> para o êmbolo de 40 mm de altura 0,0133 m<sup>3</sup> para o êmbolo de 200 mm de altura.

Para pressões de 1 Bar e 2 Bar nos êmbolos de compressão, a pressão no cilindro de restrição foi regulada conforme a tabela 2, pois as áreas do embolo do cilindro de restrição e do êmbolo de compressão são diferentes, por isso houve a necessidade dessa equivalência de pressões.

Tabela 2: Pressões de equivalência para ensaios de compressão de palhico.

Êmbolo [mm]	Pressão no palhico [Bar]	Pressão no cilindro de restrição [Bar]
40	1,0	2,6
40	2,0	5,2
200	1,0	13,0
200	2,0	25,9

As velocidades de deslocamento relativo entre o palhico e as taliscas foram de aproximadamente 0,073 m.s<sup>-1</sup> e 0,14 m.s<sup>-1</sup>. Os perfis da talisca utilizados foram de 25 mm de altura, e ângulos de ataque de 5° e 20°.

A umidade será calculada em base úmida, pois representa adequadamente a porcentagem total de água constante na amostra no momento do ensaio, equação (7).

$$\left( \frac{Mu - Ms}{Mu} \right) \times 100 \quad (7)$$

*Mu*: Massa úmida.

*Ms*: Massa seca.

Para identificação dos parâmetros experimentais foi utilizado o código de letras e números descrito na Tabela 3 e a Tabela 4 descreva a distribuição destes parâmetros nos respectivos tratamentos:

Tabela 3: Código de identificação dos parâmetros experimentais.

Parâmetro	Descrição
P1	Para pressão máxima de compressão do palhiço de 1 bar
P2	Para pressão máxima de compressão do palhiço de 2 bar
V1	Para a velocidade relativa de $0,07 \text{ m.s}^{-1}$
V2	Para a velocidade relativa de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$
E1	Para a distância “e” de 85mm
E2	Para a distância “e” de 245mm
T1	Para a talisca de $5^\circ$
T2	Para a talisca de $20^\circ$

Tabela 4: Distribuição dos parâmetros experimentais nos tratamentos.

Tratamento	Parâmetros			
1	P1	V1	E1	T1
2	P1	V1	E1	T2
3	P1	V1	E2	T1
4	P1	V1	E2	T2
5	P1	V2	E1	T1
6	P1	V2	E1	T2
7	P1	V2	E2	T1
8	P1	V2	E2	T2
9	P2	V1	E1	T1
10	P2	V1	E1	T2
11	P2	V1	E2	T1
12	P2	V1	E2	T2
13	P2	V2	E1	T1
14	P2	V2	E1	T2
15	P2	V2	E2	T1
16	P2	V2	E2	T2

#### 4.2.5.2 Instrumentação, acionamento e simulação matemática.

Os dados foram coletados através do coletor Spider8 conectado à célula de carga triaxial de fabricação FEAGRI, um transdutor de pressão marca Zurich modelo PSI-420 para 400 Bar foi utilizado na entrada do cilindro hidráulico para a verificação da pressão de restrição que corresponde a “ $P_{xe}$ ” o sinal para controle da velocidade foi obtido por um sensor indutivo de marca Sense e modelo PS15-30GM50-A instalado na engrenagem de acionamento

da cremalheira. O sistema Spider8 foi conectado a um notebook para a aquisição dos sinais o deslocamento relativo das placas de compressão foi medido pelo sensor linear potenciométrico marca Gefran modelo LT. Os datasheets dos sensores utilizados para a realização dos ensaios se encontram no Anexo 4.

Como sistema de acionamento foi utilizada a unidade hidrostática desenvolvida pela FEAGRI.

Para o ajuste das curvas foi utilizado o software Origin 6.1 e para a elaboração do modelo computacional o software Matlab 6.5.

## 5 Resultados e Discussões

Foram realizados 16 ensaios combinando dois níveis de pressão de restrição, duas velocidades da cremalheira, duas alturas de êmbolo e duas inclinações de talisca. No início de cada ensaio o palhiço era disposto manualmente dentro da câmara de compressão. A velocidade da cremalheira foi ajustada posicionando a placa da bomba hidrostática de acionamento, em duas posições correspondentes a velocidades próximas de 70 e 140 mm.s<sup>-1</sup>.

Durante o ensaio a cremalheira avança iniciando a compressão do palhiço pela redução do comprimento da câmara de compressão. Atingida a pressão no pistão hidráulico de restrição equivalente a pressão de compressão sobre o palhiço desejada, inicia-se o deslocamento da haste desse pistão e assim a massa de palhiço pode se deslocar em relação à talisca localizada na placa dinamométrica inferior e a talisca fixa na parte superior da câmara. Nesta fase do ensaio são registradas as forças longitudinal, transversal e normal juntamente com o deslocamento da cremalheira, a pressão de restrição no cilindro hidráulico. O comprimento da câmara de adensamento continua a se reduzir durante o ensaio até atingir um limitador de curso, a partir do qual permanece com volume constante. Embora a placa dinamométrica tenha um comprimento de 200 mm o comprimento de palhiço em contato com a mesma, foi normalmente menor e calculado ponto a ponto com os dados registrados. Após completar o ensaio, o material era retirado manualmente da unidade de ensaio e fechado hermeticamente em sacos de polietileno para posterior pesagem e determinação de umidade. As umidades e as massas das amostras ensaiadas estão relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5: Massas admitidas na câmara de adensamento para cada tratamento e suas respectivas umidades em base úmida.

Tratamento				Massa [g]	Umidade [%]
P1	V1	E1	T1	638	27,12
P1	V1	E1	T2	564	17,50
P1	V1	E2	T1	1082	20,01
P1	V1	E2	T2	1035	19,49
P1	V2	E1	T1	498	19,86
P1	V2	E1	T2	522	19,18
P1	V2	E2	T1	980	17,49
P1	V2	E2	T2	1166	21,20
P2	V1	E1	T1	494	21,06
P2	V1	E1	T2	586	23,84
P2	V1	E2	T1	1116	19,58
P2	V1	E2	T2	1023	13,75
P2	V2	E1	T1	548	20,29
P2	V2	E1	T2	548	22,33
P2	V2	E2	T1	956	13,86
P2	V2	E2	T2	1020	15,31

Para a operação e validação do modelo matemático de adensamento por helicóides cônicos proposto foi necessário determinar experimentalmente a densidade aparente “ $\rho_x$ ”, o coeficiente de atrito “ $\mu$ ” e a pressão normal “ $P_N$ ” essas variáveis foram determinadas em função da pressão em “ $x$ ” denominada aqui como “ $P_x$ ”.

### 5.1 Determinação experimental da densidade aparente

As equações do comportamento da densidade aparente para todos os tratamentos foram confeccionadas em função da pressão em “ $x$ ” registradas na unidade de testes e que resulta da somatória das pressões que agem sobre a massa de palhiço contida na câmara de compressão, e descrita pela equação (6), essas pressões são: Pressão de restrição imposta pelo cilindro de restrição e a pressão das taliscas. Soma-se o dobro da pressão das taliscas, pois o palhiço sofre a ação de duas taliscas, correspondentes aos cones, interno e externo. Assumiu-se que as forças das duas taliscas foram iguais. Equação (8).

$$P_x = 2(P_t) + P_r \quad (8)$$

$P_t$ : Pressão exercida pelas taliscas. [N.mm<sup>-2</sup>]

$P_r$ : Pressão de restrição exercida pelo cilindro hidráulico. [N.mm<sup>-2</sup>]

A densidade aparente para efeito de cálculo, foi expressa em kg.mm<sup>-3</sup>. A Tabela 6 contém todas as equações ajustadas utilizando o modelo exponencial de Kanafojwski para densidades abaixo de 400 kg.m<sup>-3</sup>, equação (9). A Figura 14 nos dá um exemplo do comportamento das demais curvas e os dados experimentais encontram-se no Anexo 1.

$$P = C\gamma^m \quad (9)$$

$P$  = Pressão à qual o material está submetido.

$\gamma$  = Densidade aparente.

$C$  = Constante determinada experimentalmente.

$m$  = Constante determinada experimentalmente.

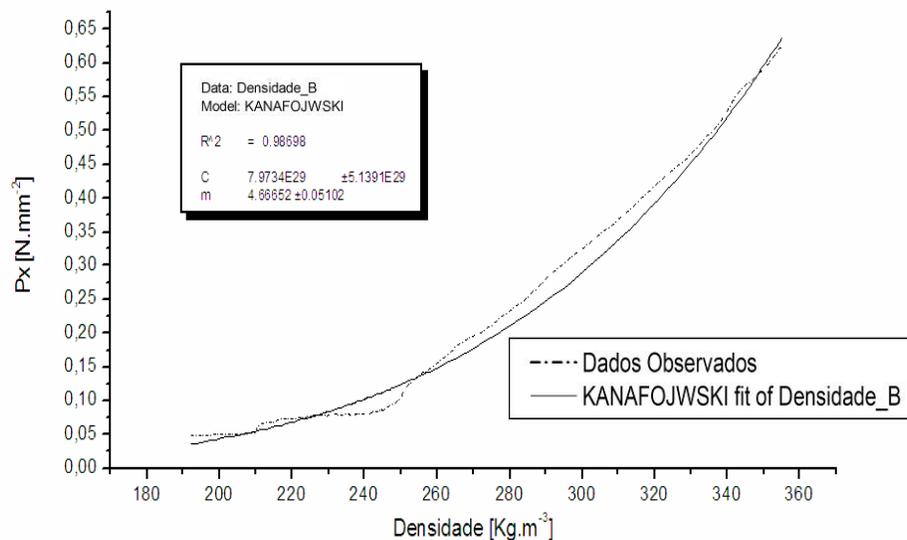


Figura 13: Curva de ajuste de Kanafojwski e dados observados para densidade aparente no tratamento P1V1E1T1.

Tabela 6: Parâmetros de ajuste para densidade aparente.

Tratamentos	Parâmetros para densidade		R <sup>2</sup>
	C	m	
P1V1E1T1	7,9734e29	4,66652	0,986
P1V1E1T2	3,6966e20	3,1838	0,992
P1V1E2T1	1,6540e9	1,5118	0,986
P1V1E2T2	1,2301e8	1,33501	0,955
P1V2E1T1	5,0794e16	2,60246	0,845
P1V2E1T2	1,2951e20	3,10655	0,986
P1V2E2T1	2,1314e10	1,64518	0,960
P1V2E2T2	1,4055e10	1,78409	0,967
P2V1E1T1	5,5771e7	1,04397	0,894
P2V1E1T2	3,9117e17	2,74866	0,906
P2V1E2T1	8,7371e11	1,89871	0,978
P2V1E2T2	1,3095e10	1,62849	0,987
P2V2E1T1	1,8613e13	2,08854	0,872
P2V2E1T2	9,967e15	2,5512	0,892
P2V2E2T1	8,6335e10	1,73193	0,989
P2V2E2T2	3,9914e11	1,84018	0,986

Para coerência com modelo de simulação de adensamento por helicóides cônicos a densidade aparente deve ser em função da pressão no caso do modelo a pressão em “ $x$ ”, “ $Px$ ”, para isso a equação de Kanafojwski, equação (9), foi rearranjada em função da densidade aparente, equação (10).

$$\gamma = \sqrt[m]{\frac{P}{C}} \quad (10)$$

A curva de densidade aparente apresenta tendência a se estabilizar para pressões de aproximadamente 3 Bar [0,3 N.mm<sup>-2</sup>] na distância “ $e$ ” de 85 mm, enquanto que para a distância “ $e$ ” de 245 mm a estabilidade da densidade aparente ocorreu para uma pressão próxima de 1,6 Bar [0,16 N.mm<sup>-2</sup>]. Este comportamento ocorre, pois as alturas das taliscas permaneceram as mesmas para as duas distâncias de “ $e$ ” e essa altura possui menor influência sob o maior volume de palhiço presente na câmara de 245 mm, quando comparado com “ $e$ ” de 85 mm. As densidades máximas obtidas com “ $e$ ” de 85 mm foram em média de 293,50 kg.m<sup>-3</sup> e para o “ $e$ ” de 245 mm a densidade máxima atingiu 188,86 kg.m<sup>-3</sup>.

A densidade aparente pode ser calculada a cada instante, pois a variação do comprimento ( $dx$ ) da câmara de compressão foi registrada e a massa de palhiço admitida manualmente foi pesada após o ensaio, equação (10)

$$\rho_x = dx \times Ma \quad (10)$$

$\rho_x$ : Densidade aparente.

$dx$ : Comprimento da câmara de compressão.

$Ma$ : Massa de palhiço admitida manualmente.

## 5.2 Determinação experimental do coeficiente de atrito

Por definição o coeficiente de atrito dinâmico é determinado pela força existente entre duas superfícies em contato quando há movimento relativo entre esses dois corpos, RESNICK e HALLIDAY (1983). O coeficiente de atrito dinâmico foi calculado como a relação entre a força de acionamento em “x” subtraindo-se dela a resistência hidráulica do cilindro de restrição, dividido essa diferença pela força normal aplicada pelas placas superior e inferior da câmara, Equação (11).

As forças foram obtidas pelo produto da pressão em “x” “ $P_x$ ” e a Pressão Normal “ $P_N$ ” aplicadas sobre as áreas do êmbolo “ $A_{\text{êmbolo}}$ ” e da placa sensora “ $A_{\text{placa}}$ ”, respectivamente.

$$\mu = \frac{(F_x - F_{hr})}{F_N} \quad (11)$$

$F_x$ :  $P_x \cdot A_{\text{êmbolo}}$ .

$F_N$ :  $P_N \cdot A_{\text{placa}}$ .

$F_{hr}$ : Força hidráulica de restrição.

Para o cálculo da área da placa “ $A_{\text{placa}}$ ”, foi considerada somente a porção da placa sensora em contato com o palhiço.

O coeficiente de atrito é dependente das características físicas dos dois materiais que estão em contato, entre os quais existe uma velocidade relativa. A distribuição espacial aleatória dos componentes do palhiço acarreta uma grande variação do valor “ $\mu$ ” segundo ilustra a Figura 14, porém, na maioria dos tratamentos este valor apresentou uma tendência decrescente com o aumento da pressão “ $P_x$ ”. Devido a esta dispersão de dados optou-se por

um modelo linear de ajuste, Tabela 7, com baixo coeficiente de correlação. As curvas de ajuste e dados experimentais se encontram no anexo 1.

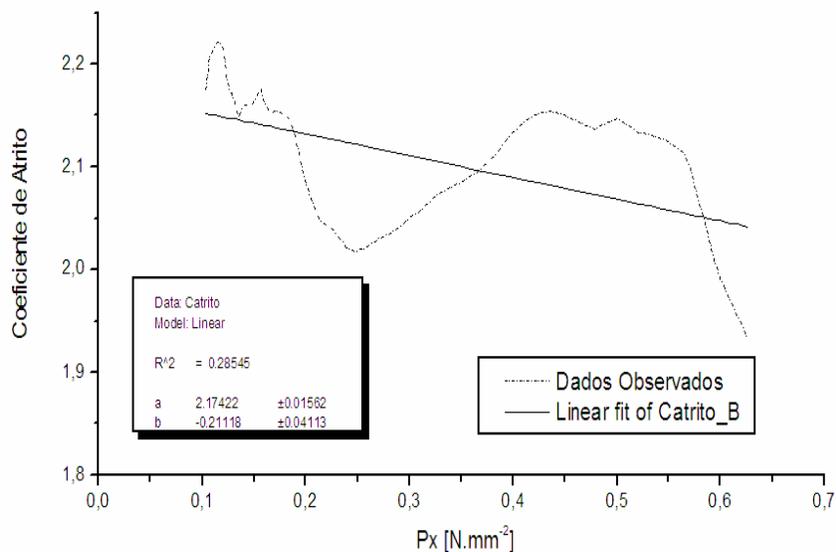


Figura 14: Curva de ajuste linear e curva de dados observados para coeficiente de atrito para o tratamento P1V1E1T1.

O coeficiente de atrito foi determinado até cargas máximas de 350 kgf [3.437 N] com o intuito de preservar a integridade do dinamômetro ortogonal utilizado. Mesmo com a adoção desta restrição ocorreu o cisalhamento da chaveta de uma das engrenagens do sistema redutor da unidade de testes, a qual foi que ser redimensionada, quando utilizados os êmbolos de 200 mm de altura. Nos ensaios realizados não foi possível a estabilização da variável “ $\mu$ ” que permaneceu decrescente em suas equações de ajuste, entretanto, os dados provenientes dessas equações foram suficientes para as simulações necessárias possibilitando as comparações dos valores obtidos experimentalmente com os valores simulados. No tópico 5.4 serão descritas as condições para validade das equações do coeficiente de atrito.

Tabela 7: Equações de ajuste para coeficiente de atrito.

Tratamentos	Equação do Atrito	R <sup>2</sup>
P1V1E1T1	y=2,17422-0,21118 x	0,285
P1V1E1T2	y=2,23379-0,77561 x	0,612
P1V1E2T1	y=2,6996-5,192 x	0,504
P1V1E2T2	y=3,0944-6,4739 x	0,336
P1V2E1T1	y=1,5397+0,33593 x	0,818
P1V2E1T2	y=2,74918-2,00026 x	0,925
P1V2E2T1	y=1,16436+2,75207 x	0,168
P1V2E2T2	y=2,93116-8,15742 x	0,799
P2V1E1T1	y=2,16348-197905 x	0,914
P2V1E1T2	y=3,54104-2,96766 x	0,994
P2V1 E2T1	y=7,10914-20,91562 x	0,865
P2V1E2T2	y=3,70097-10,19484 x	0,718
P2V2E1T1	y=2,05616-0,92848 x	0,189
P2V2E1T2	y=3,25517-2,4609 x	0,924
P2V2E2T1	y=5,67862-14,61187 x	0,614
P2V2E2T2	y=4,09944-8,93111 x	0,635

### 5.3 Determinação experimental da pressão normal

Para o cálculo da pressão normal “ $P_N$ ” através da equação (12) foi considerada apenas a área em que o palhiço entra em contato com a placa instrumentada e esta área nunca foi maior que a distância “ $dx$ ” na unidade de testes que corresponde ao comprimento da câmara de compactação medida durante os ensaios. O modelo de ajuste adotado foi o polinomial de 3ª ordem que mostrou coeficientes de correlação elevados quando comparados com outros modelos, Figura 15. As equações de ajuste da pressão normal estão relacionadas para cada tratamento na tabela 8.

$$P_N = \frac{F_Z}{A_{placa}} \quad (12)$$

$F_Z$ : Força adquirida experimentalmente que corresponde a força normal.

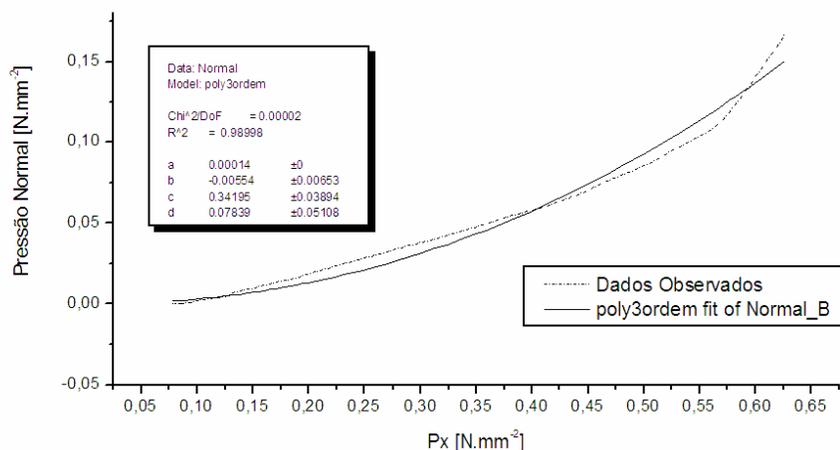


Figura 15: Curva de ajuste polinomial de 3ª ordem e curva de dados observados para a pressão normal no tratamento P1V1E1T1.

As demais curvas de ajuste e dados estão discriminadas no anexo 1.

Tabela 8: Equações de ajuste para pressão normal.

Tratamentos	Equação da Pressão Normal	R <sup>2</sup>
P1V1E1T1	$y=0,00014-0,00554 x+0,34195 x^2+0,07839 x^3$	0,990
P1V1E1T2	$y=0,00001-0,08312 x+0,57685 x^2-0,24471 x^3$	0,992
P1V1E2T1	$y=0,21192-4,71909 x+29,16083 x^2-37,82978 x^3$	0,989
P1V1E2T2	$y=0,15563-2,97373 x+15,9367x^2-12,48182x^3$	0,945
P1V2E1T1	$y=1,23e-6-0,12075 x+0,58886 x^2+0,12578 x^3$	0,967
P1V2E1T2	$y=7,858e-6-0,00939 x-0,00579 x^2+0,67462 x^3$	0,989
P1V2E2T1	$y=0,57449-12,06432 x+76,08585 x^2-126,25878 x^3$	0,963
P1V2E2T2	$y=1,84e-6+2,52005 x-416968 x^2+17467969 x^3$	0,924
P2V1E1T1	$y=1,5573e-6+0,033183 x-2,3319 x^2+4,14158 x^3$	0,991
P2V1E1T2	$y=1,2517e-7-0,40458 x+0,40458 x^2+0,03935 x^3$	0,996
P2V1 E2T1	$y=1,45649-16,15899 x+54,45763 x^2-50,15354 x^3$	0,958
P2V1E2T2	$y=6,27815-82,34748 x+353,4047 x^2-492,89224 x^3$	0,962
P2V2E1T1	$y=1,414e-8-0,01816 x-0,07434 x^2+0,61711 x^3$	0,989
P2V2E1T2	$y=4,6363e-6+0,12226 x-0,69817 x^2+1,19623 x^3$	0,969
P2V2E2T1	$y=1,124-11,45628 x+29,91033 x^2-9,7364 x^3$	0,807
P2V2E2T2	$y=0,158-14,16327 x-47,23303 x^2+39,02439 x^3$	0,750

#### 5.4 Simulação do processo de adensamento por helicóides cônicos

O trabalho experimental de adensamento teve por objetivo obter os comportamentos da densidade aparente, a pressão normal e o coeficiente de atrito em função da variação de pressão atuante sobre o palhiço. Estes comportamentos permitem simular a processo de adensamento por helicóides cônicos segundo o modelo apresentado na equação.

Os dados de pressão, densidade aparente, pressão normal e coeficiente de atrito foram obtidos a partir dos registros de força do dinamômetro e pressão no cilindro de restrição juntamente com os valores das massas determinadas na balança. A pressão de compressão variou entre 0,4 e 3 bar ao longo do ensaio. Valores superiores a 3 bar não foram ensaiados em função de limitações de resistência mecânica dos elementos de transmissão. As curvas ajustadas para densidade, pressão normal e coeficiente de atrito utilizaram dados de pressão na referida faixa. Os resultados simulados para valores de pressão fora dessa faixa não correspondem com a realidade experimental.

No simulador de adensamento as pressões freqüentemente ultrapassam o limite superior dos modelos de “ $\rho_x$ ”, “ $P_N$ ” e “ $\mu$ ”, como conseqüência, as curvas passam a ter formas não previstas e que não representam a realidade, assim, no momento da introdução das condições iniciais do modelo, tomou-se o cuidado para que os valores da pressão em “ $x$ ” não fossem inferiores e nem excedessem os valores obtidos experimentalmente. Isso foi possível, pois foram estabelecidas pressões iniciais compatíveis com os valores experimentais e também foi limitado comprimento máximo do adensador simulado, para que a pressão não ultrapasse o valor de 3 bar. O programa em linguagem Matlab para a simulação do processo de adensamento por helicóides cônicos se encontra no anexo 3. Os resultados obtidos nas simulações computacionais são apresentados graficamente no anexo 2.

O modelo de pressões para adensamento helicoidal cônico foi capaz de atingir densidades aparentes compatíveis com os dados experimentais, entretanto as alturas calculadas do adensador foram pequenas, tabela 9. A maior altura foi de 700 mm para o ensaio P1V2E1T2 e as menores alturas, de 280 mm, corresponderam aos ensaios P2V2E2T1 e P2V2E2T2, Tabela 10. A massa de palhiço possui comportamento viscoelástico e o tempo em que esse material fica sob a ação das pressões de compressão e um fator determinante da acomodação do material viscoelástico esse tempo é denominado como tempo de residência do material, assim as alturas pequenas do adensador de helicóides cônicos, estão associadas com

tempos de residência curtos do palhiço dentro da câmara de compressão, isso para uma dada velocidade das taliscas correspondente à capacidade de adensamento desejada. Velocidades menores com maiores alturas das taliscas são desejáveis do ponto de vista de obter um maior tempo de residência e carga sobre o material, desse modo possibilitando maior densidade final.

As alturas pequenas obtidas nas simulações de adensamento são consequência dos elevados coeficientes de atrito encontrados, resultantes da proporção entre a altura das taliscas adotadas e a altura “e” da câmara de compressão. Uma possível solução para o aumento do comprimento do adensador e consecutivo aumento do tempo de residência do material, seria a redução da altura das taliscas. Esta simulação foi realizada reduzindo o coeficiente de atrito pela metade ao multiplicar a equação de “ $\mu$ ” pelo fator 0,5. A tabela 9 ilustra os resultados de altura de adensador correspondentes ao coeficiente de tração reduzido.

Tabela 9: Parâmetros para simulação do adensador em cada tratamento.

Tratamentos	$P_{x_0}$ [N.mm <sup>-2</sup> ]	“e” [mm]	“dx” [mm]	Comprimento do adensador [mm]	Inclinação [graus]
P1V1E1T1	0,08	85	10	700	30
P1V1E1T2	0,16	85	10	700	30
P1V1E2T1	0,12	245	10	380	30
P1V1E2T2	0,1	245	10	430	30
P1V2E1T1	0,2	85	10	700	30
P1V2E1T2	0,17	85	10	670	30
P1V2E2T1	0,115	245	10	400	30
P1V2E2T2	0,115	245	10	320	30
P2V1E1T1	0,285	85	10	500	30
P2V1E1T2	0,3	85	10	490	30
P2V1E2T1	0,21	245	10	700	30
P2V1E2T2	0,2	245	10	450	30
P2V2E1T1	0,27	85	10	550	30
P2V2E1T2	0,28	85	10	420	30
P2V2E2T1	0,21	245	10	280	30
P2V2E2T2	0,2	245	10	330	30

Tabela 10: Comprimento “ $x$ ” do adensador para coeficiente de atrito reduzido.

Tratamentos	Comprimento do adensador “ $x$ ” [mm]
P1V1E1T1	1400
P1V1E1T2	1200
P1V1E2T1	710
P1V1E2T2	750
P1V2E1T1	1400
P1V2E1T2	1340
P1V2E2T1	450
P1V2E2T2	640
P2V1E1T1	1000
P2V1E1T2	960
P2V1E2T1	1200
P2V1E2T2	900
P2V2E1T1	1100
P2V2E1T2	840
P2V2E2T1	530
P2V2E2T2	660

A Figura 16 ilustra as curvas de resposta obtidas pelo modelo de simulação em linguagem Matlab, neste conjunto de gráficos estão as curvas de densidade aparente em função da pressão em  $x$  “ $Px$ ”, o coeficiente de atrito em função “ $Px$ ” e a pressão normal em função da “ $Px$ ”, e também estão dispostos os comportamentos dessas variáveis em função da posição em “ $x$ ”. A Figura 17 corresponde às mesmas funções, porém com os valores do coeficiente de tração reduzidos pela metade, para representação da redução da altura das taliscas. As figuras para todos os tratamentos são apresentados no anexo 2.

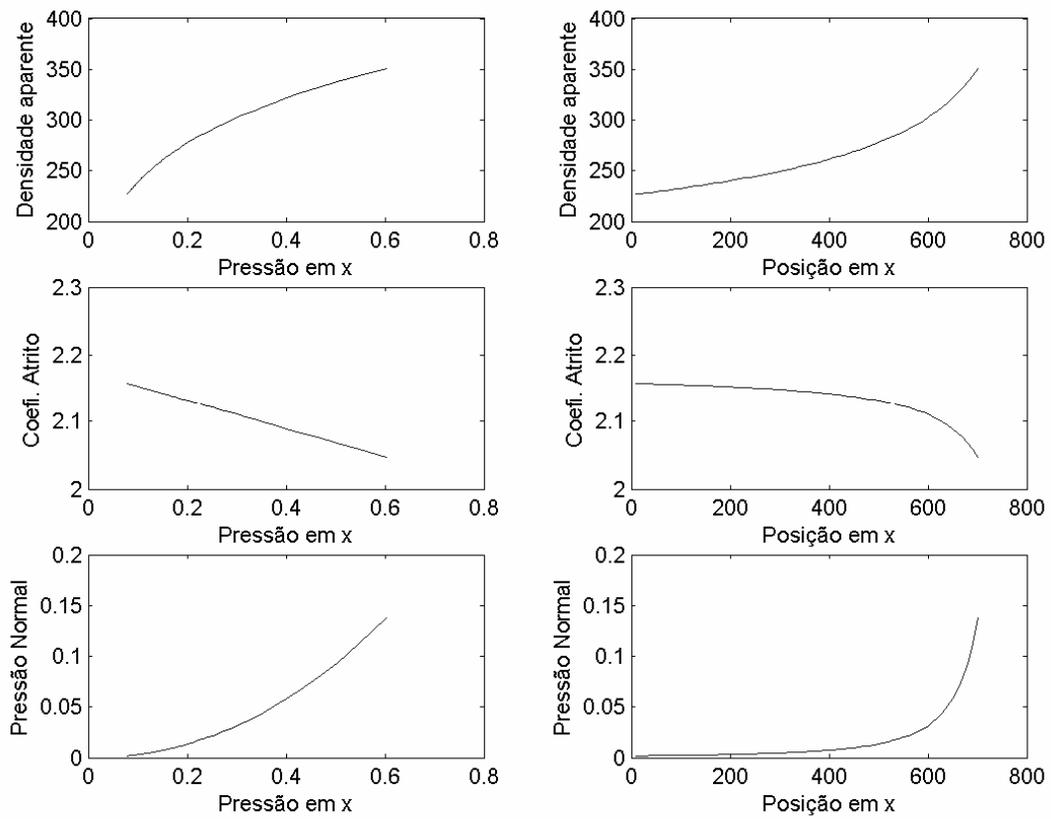


Figura 16: Curvas de resposta para P1V1E1T1 com o coeficiente de atrito determinado experimentalmente, Pressão [N/mm<sup>2</sup>]; Posição [mm].

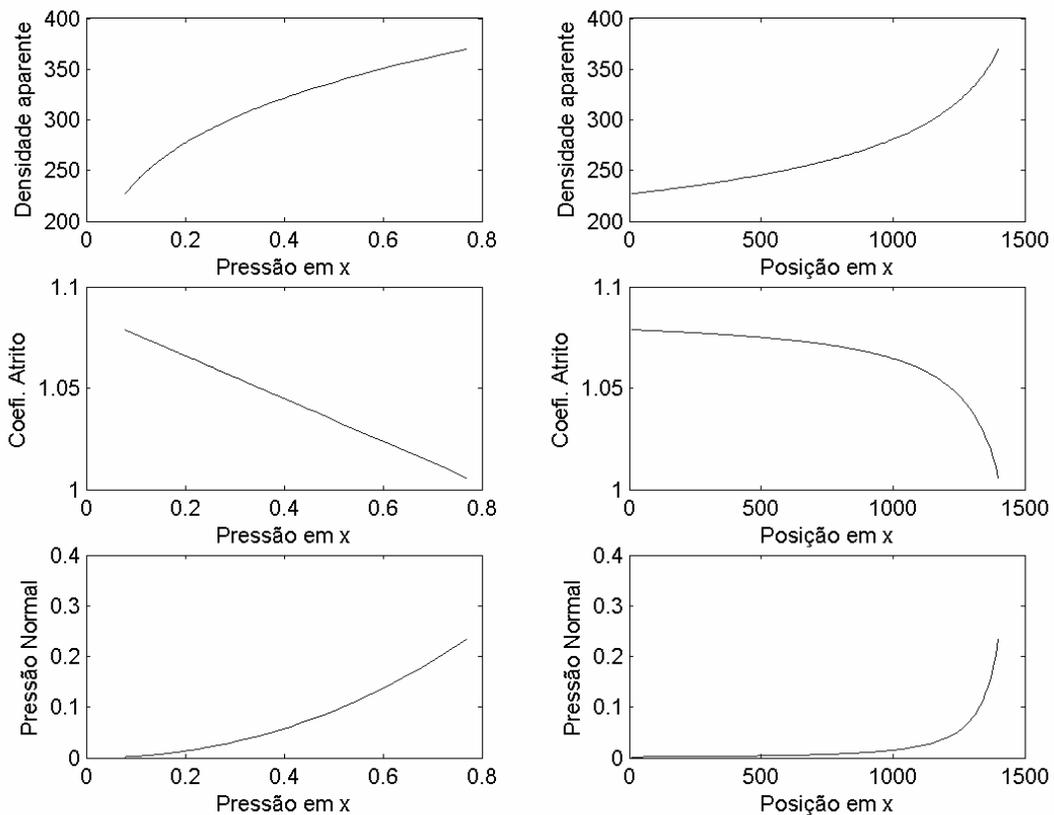


Figura 17: Curvas de resposta para P1V1E1T1 com metade do valor do coeficiente de atrito determinado experimentalmente, Pressão [N/mm<sup>2</sup>]; Posição [mm].

O sistema de adensamento por helicóides cônicos é construtivamente mais simples quando comparado aos sistemas de adensamento prismáticos, nas figuras 18 e 19 estão indicados os componentes básicos de cada sistema e a tabela 11 inclui a descrição dos mesmos. Os equipamentos de enfardamento convencionais como os de fardos trapezoidais são compostos basicamente de um alimentador de dedos elásticos que retira o palhiço ou a forragem do nível do solo e deposita o material fibroso na unidade alimentadora da câmara de compressão a câmara de compressão é acionada por um sistema composto por biela e manivela e êmbolo de compressão que por sua vez comprime o material fibroso contra a câmara de atrito, no instante em que o fardo atinge um volume predeterminado é acionado o sistema de amarramento para a contenção da recuperação da densidade inicial do material fibroso, assim, com o amarreamento, é possível a manutenção da maior parte da densidade

obtida no processo de compressão. Já no sistema de adensamento por helicóides cônicos a o aumento da densidade se dará pela redução do diâmetro dos cones a alimentação da câmara de compressão ocorrerá pela ação dos roletes pré-adensadores e a manutenção da densidade pela torção da massa de palhiço e enrolamento em forma de carretéis.

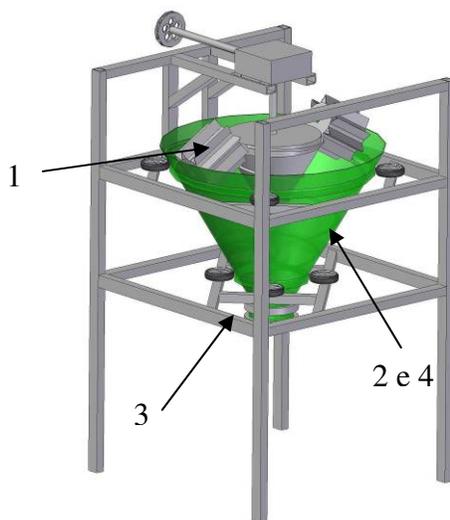


Figura 18: Principais componentes do adensador de helicóides cônicos

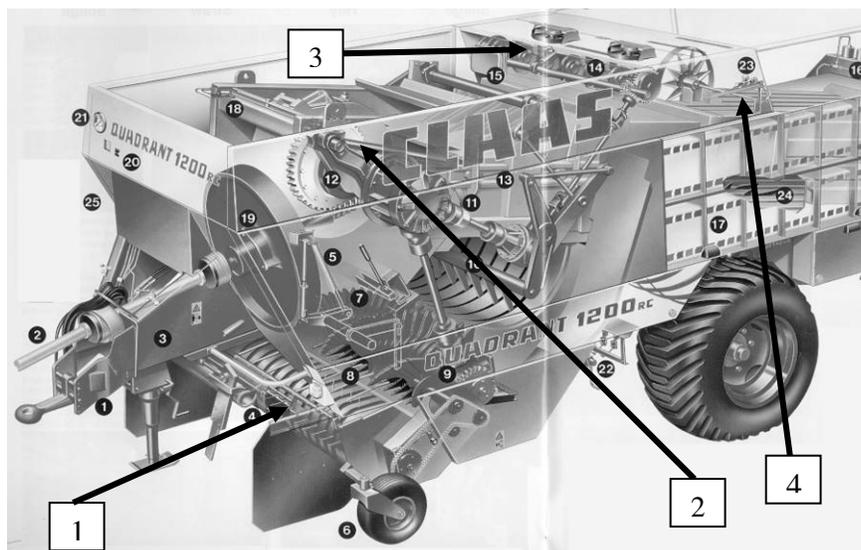


Figura 19: Componentes principais do adensador de fardos prismáticos.

Tabela 11: Listagem dos processos do adensado de helicóides cônicos comparada com o adensador de fardos prismático.

Processos	Princípio de adensamento	
	Fardos prismáticos	Helicóides cônicos
(1) Alimentação	Recolhedor de dedos elásticos	Roletes de pré-adensamento
(2) Compressão	Garfo alimentador pantográfico Biela manivela	Helicóides cônicos
(3) Restrição	Câmara de atrito	Redução do diâmetro
(4) Contenção da recuperação	Mecanismo de amarração	Roletes torção

## 6. Conclusões

1 - O princípio proposto de adensamento através de pressões geradas por taliscas deslizando sobre a massa de palhiço mostrou-se capaz de atingir densidades próximas de  $300 \text{ kg m}^{-3}$ , na faixa das pressões obtidas pelas enfardadoras de feno convencionais.

2 - As simulações indicam que as densidades finais podem ser obtidas com adensadores de altura reduzida, com peso e complexidade construtiva inferior a das enfardadoras convencionais.

3 - O modelo proposto para simulação do processo de adensamento com helicóides cônicos gerou resultados de densidade e pressão próximos aos resultados experimentais.

4 - A configuração de talisca adotada gerou coeficientes de atrito elevados que resultam em alturas reduzidas do adensador de cone duplo.

## 7 Bibliografia Consultada

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK, Editor Dwight E. Gray. 3 ed. New York. McGraw-Hill, 1972.

BASSINELLO, A. I.; FURLANI NETO, V. L.; MACEDO, N.; PARRAZI, C.; CASAGRANDE, J. C. **Implicações agrícolas e industriais da colheita de cana crua.** Araras, IAA-PLANALSUCAR, s.d. 55p.

BOWDEN F.P.; TABOR D. **The friction and lubrication of solids.** Oxford : Clarendon ; New York : Oxford University, 2001. 374 p.

BRITO, S. S. **Energia de biomassa: uma alternativa para os trópicos.** In: CONGRESO PANAMERICANO DE ENERGIA, 3., CONVENCION DE LA UNION PANAMERICANA DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS. 19., Guatemala, 1986. São Paulo, CONFEAL.CREA, 1986. 20p.

CLEMENTE, I. Bagaço de cana daria luz a 355 mil pessoas. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 20 maio 2001. p.A11.

DALCOLMO, E. L. **Coefficientes de atrito de forragens picadas em varias superfícies.**1980. 70 p.

DELGADO, A.A. Os efeitos da queima dos canaviais. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.3, n.6, p.42-45, jul/ago. 1985.

FABORODE, M.O. & O'CALLAGHAN, J.R. **A Rheological Model for the Compaction of Fibrous Agricultural Materials.** J. agric. Engng. Res., 1989, v. 42, p. 165-178.

FAO **Food and Agriculture Organization, of the United Nations.** Disponível em <<http://www.fao.org>>. Acesso em 28 de janeiro de 2007.

FURLANI NETO, V.L. Colheita mecanizada da Cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, p.89, 1994.

GUPTA, K. **A Rheological Model of Nonlinear Viscoplastic Solids.** Journal of Rheology, 1983, 27(5), p. 411-431.

KANAFOJWSKI, C. Z.; KARWOWSKI. T. **Agricultural Machines, Teori and Constrution**, v.2. Washington DC. Department of Agricultural and National Science Fondation, 1976

LANÇAS, K.P. **Avaliação das alternativas energéticas com a crise do petróleo e a projeção da biomassa.** Botucatu: UNESP, 1984. 34p.

MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. A colheita de cana-de-açúcar: atualidades e perspectiva. In: Congreso Ingeniería Rural , 1998, La Plata. **Anais... Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en Ámbito Latino Americano**, p. 262-271, 1998.

MICHELAZZO, M. B. **Análise técnica e econômica de processos alternativos para recuperação do palhço da cana-de-açúcar**. 2005. Dissertação de mestrado em fase conclusão.

MOLINA JR., W. F. **Enfardamento de resíduos de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): avaliação dos desempenhos operacional e econômico**. Piracicaba, 1991. 101p. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MOSHENIN, N. N. Physical properties of plants and animal materials. v.1. Gordon & Breach Science Pub, 1970

MUÑOZ, Guillerrmo & HERRERA, Pedro. Multidimensional Modeling of Agricultural Fibrous Materials in Densification: Compression Stage. **Transactions of the ASAE**, 2002. Paper no. 02-3151.

O'DOGHERTY, M. J., WHEELER, J. A. **A Compression of Straw to High Densities in Closed Cylindrical Dies..** J. agric. Eng. Res., London, 1984 v.29, n.1, p. 61-72.

O'DOGHERTY, M.J. **A Review of the Mechanical Behaviour of Straw when Compressed to High Densities**. J. agric. Eng. Res., 1989, v. 44, p. 241-265.

RIPOLI, M.L.C. **Mapeamento do palhço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e do seu potencial energético**. 111p. Dissertação de mestrado em Agronomia na área de concentração de Maquinas Agrícolas. ESALQ Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP Univesidade de São Paulo, Piracicaba. 2002

RIPOLI, T.C. Fogo na palha? **Notícias da ESALQ**, Piracicaba, v.1, n.5, p.2-3, novo 1988.

RIPOLI, T.C. Utilização do material remanescente de colheita de cana-de- açúcar (*Saccharum spp*) -Equacionamento dos balanços energético e econômico. Piracicaba, 1991. 150p. Tese (Livre-Docência) -Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

RIPOLI, T.C.; MIALHE, L.G.; BRITO, J.O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível! **Álcool & Açúcar**, v.10, n.54, p.18-23. 1990.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JR., W.F.; J.P. STUPIELLO; M.C. NOGUEIRA; J.6. SACCOMANO. Potencial energético de residuos de cosecha de la caña verde. **Revista da STAB**. v.1a, n.1, p.22-26, set./out. 1991.

RESNICK, R.; HALIDAY, D. **Física I**. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. v.1. 4ª ed. 358 p. 1983.

SHARPE, P. **Ethnobotanical Leaflets**. Southern Illinois University Carbondale disponível em <<http://www.siu.edu/~ebl/leaflets/sugar.htm>>. Acesso em 28 de junho de 2003.

SHERWOOD, R. S. **The mechanism of dry friction**. Engineering report nº6. Iowa Eng. Exp. Sta. Ames, Iowa. 1951

SPAROVECK, G. ALLEONI, L.R.F.; PEREIRA, I.C.; ROSSETO, R. Aptidão das terras de Piracicaba para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 15, n. 5, p. 14-17, 1997.

STUPIELLO, J. P. Alguns aspectos da qualidade da matéria-prima. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, 7 (3/5):52-4, jun./jul., 1989.

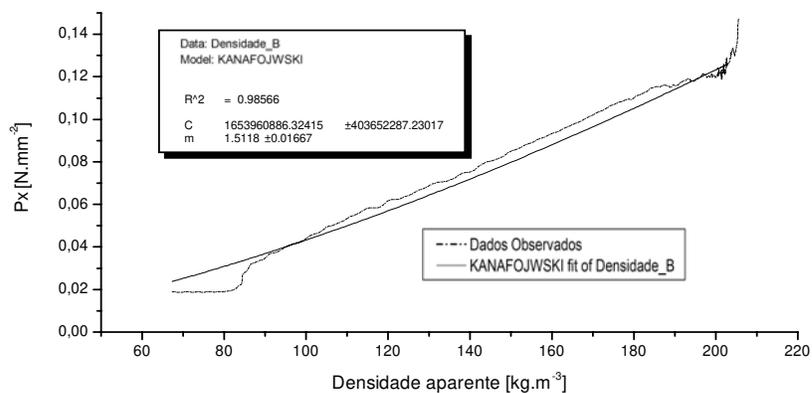
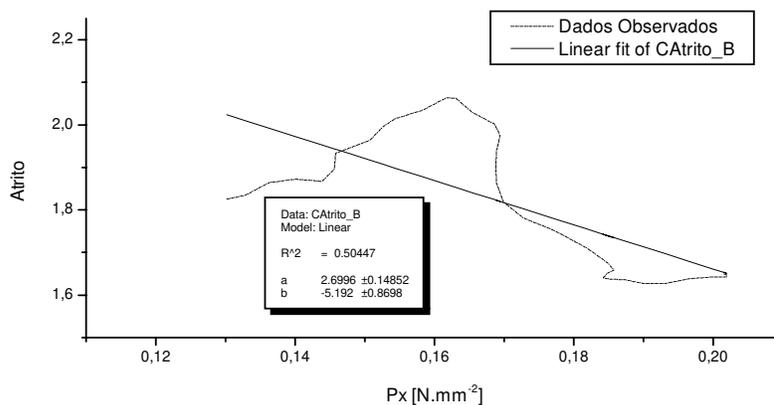
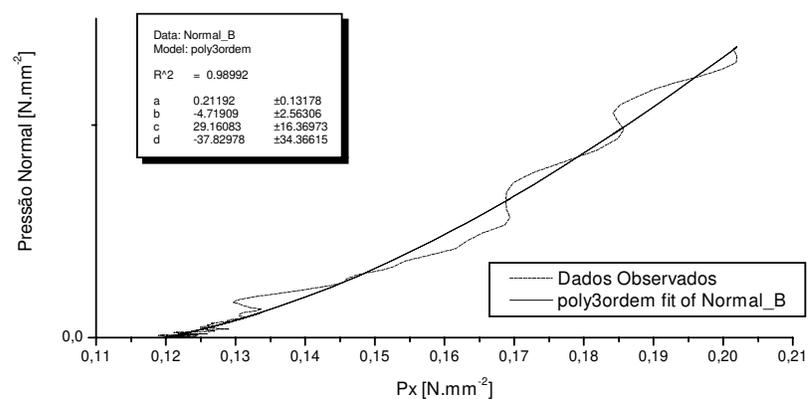
THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY. **Straw for Energy Production**. 2a ed. Dinamarca 1998.

TRIVELIN, P. C. O.; BENDASSOLLI, I.A.; OLIVEIRA, M. W. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo: I. Estabilidade química da mistura. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 16, n. 2, p. 26-29, 1997.

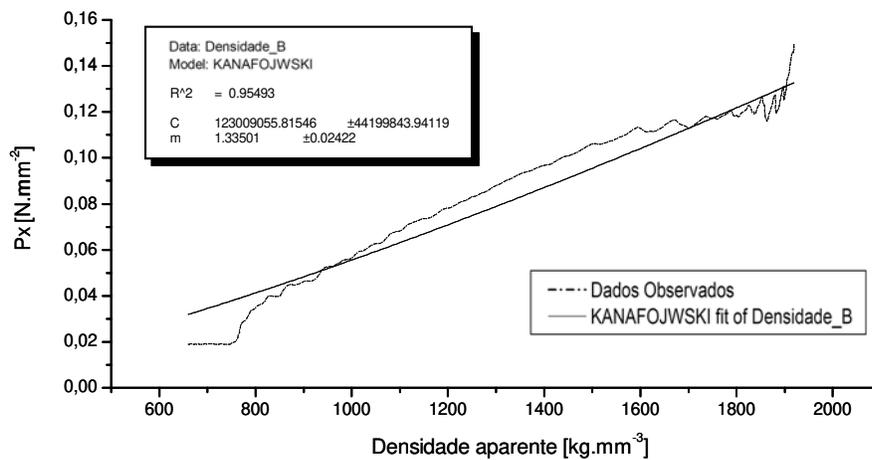
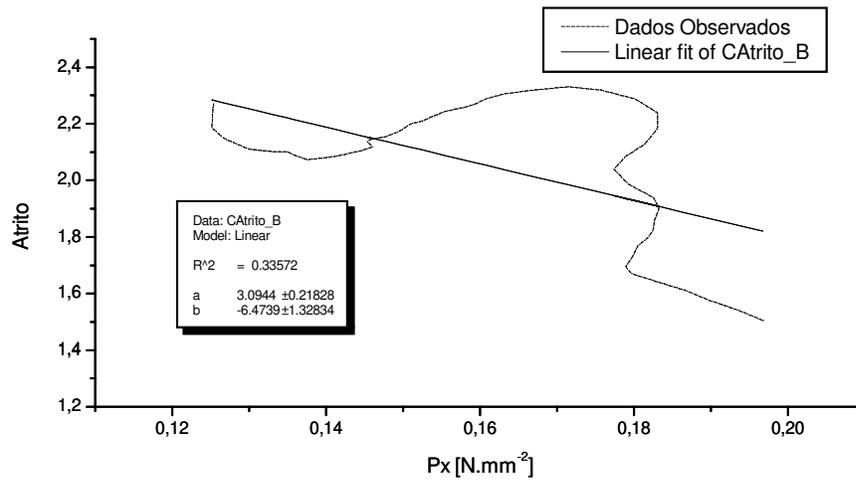
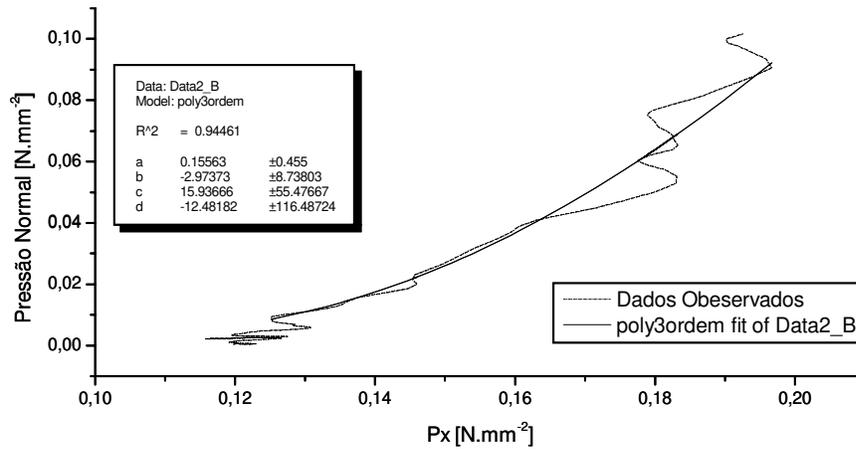
## 8 Anexo1

Gráficos de Pressão Normal, Coeficiente de atrito e Densidade aparente respectivamente para todos os tratamentos. Estão indicados nos gráficos os tipos de equação utilizadas para os ajustes assim como os valores assumidos para seus parâmetros.

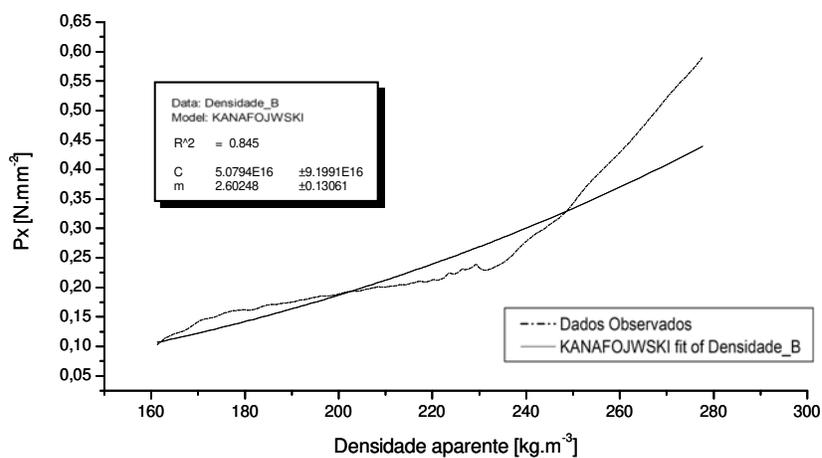
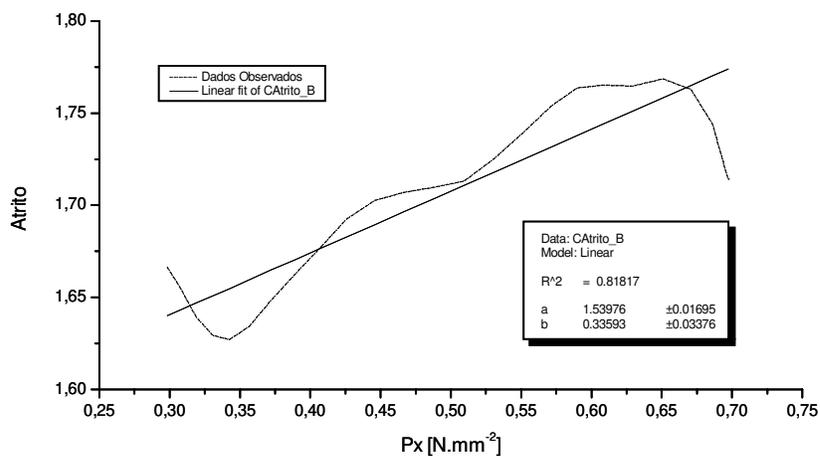
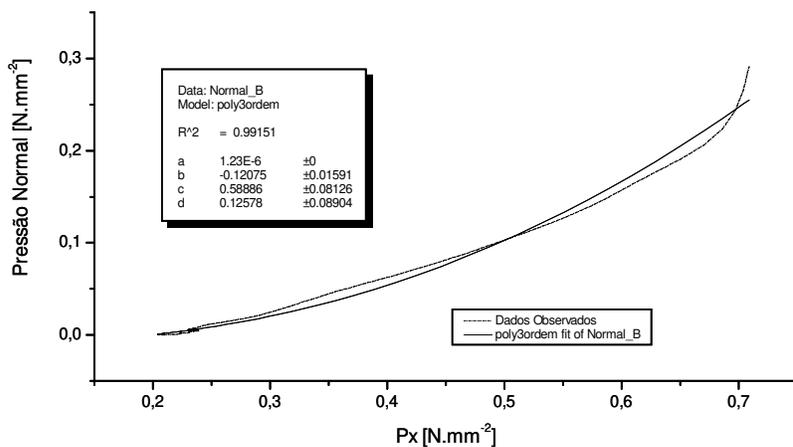
Gráficos para P1V1E2T1



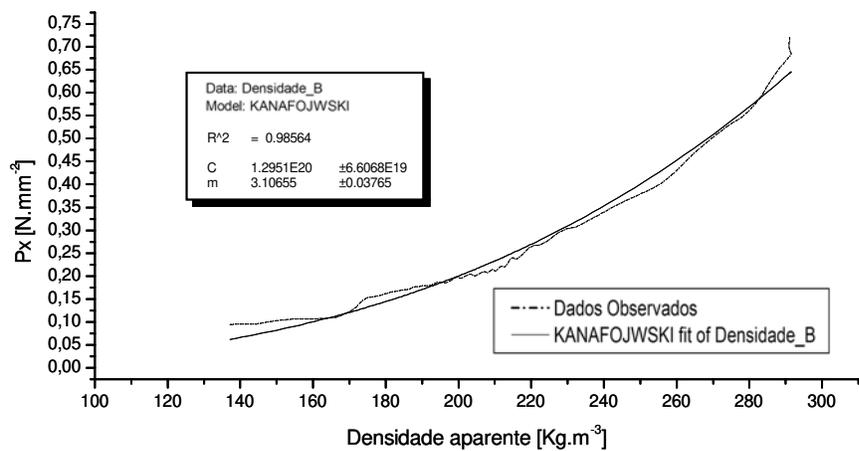
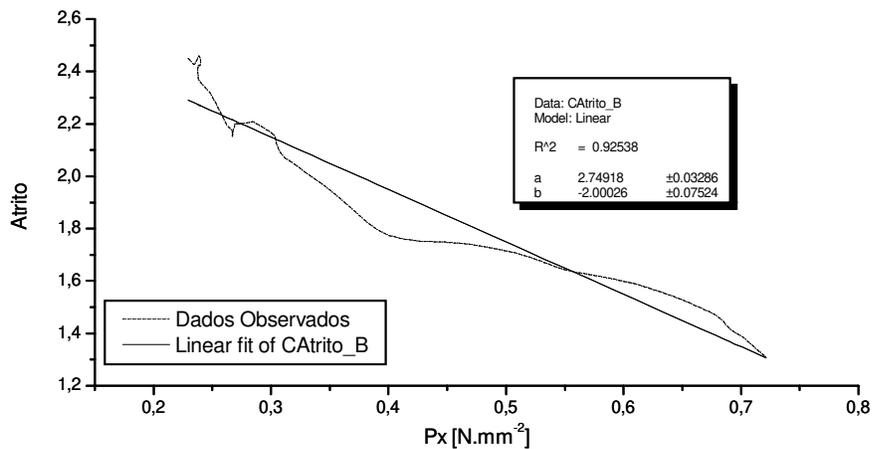
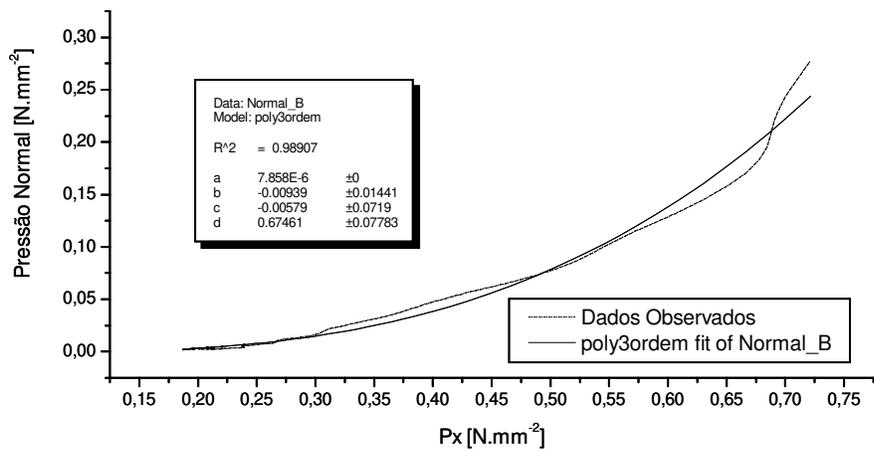
### Gráficos para P1V1E2T2



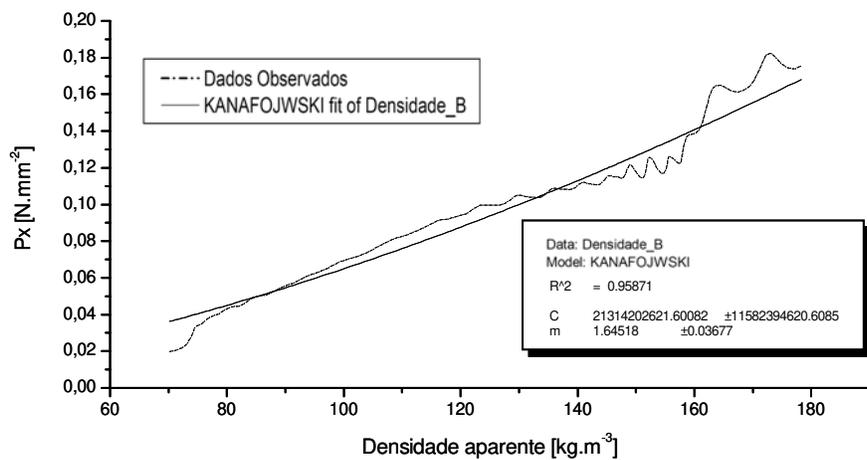
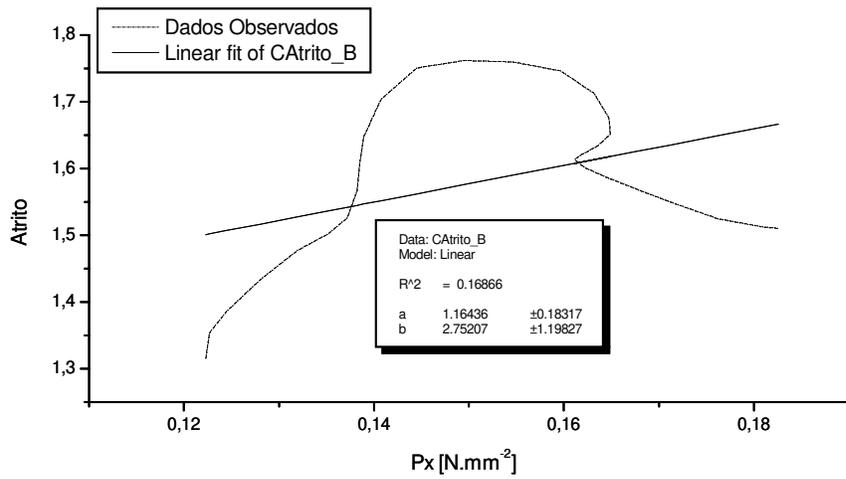
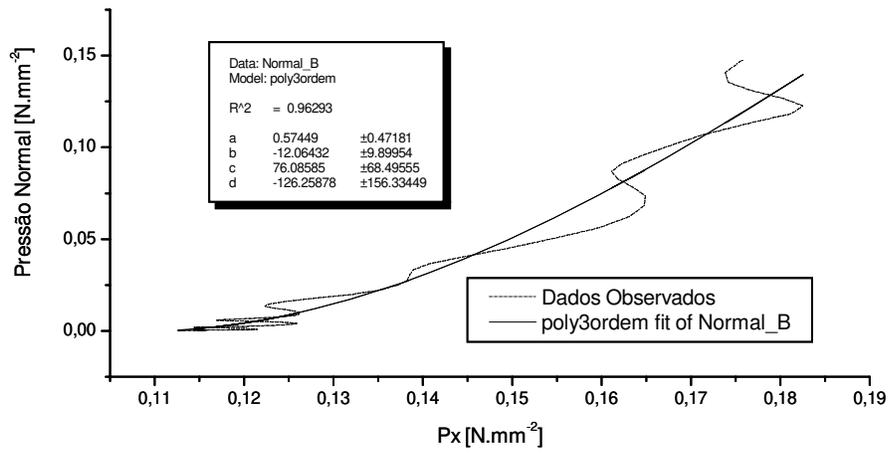
### Gráficos para P1V2E1T1



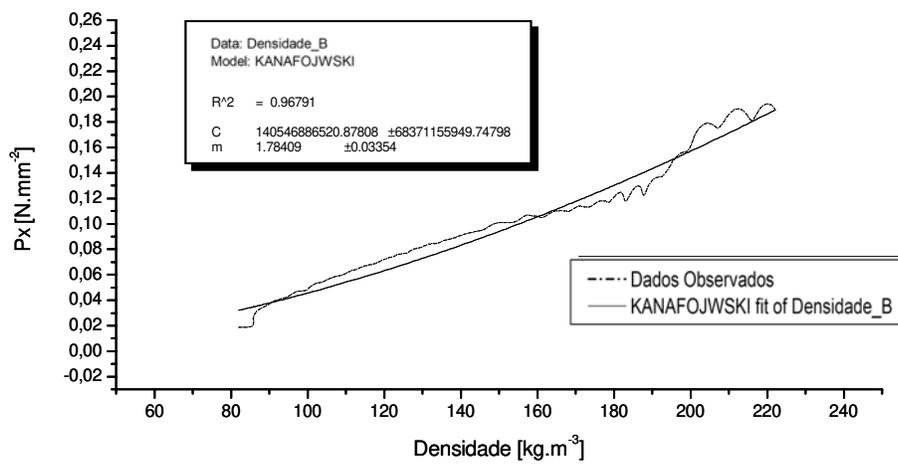
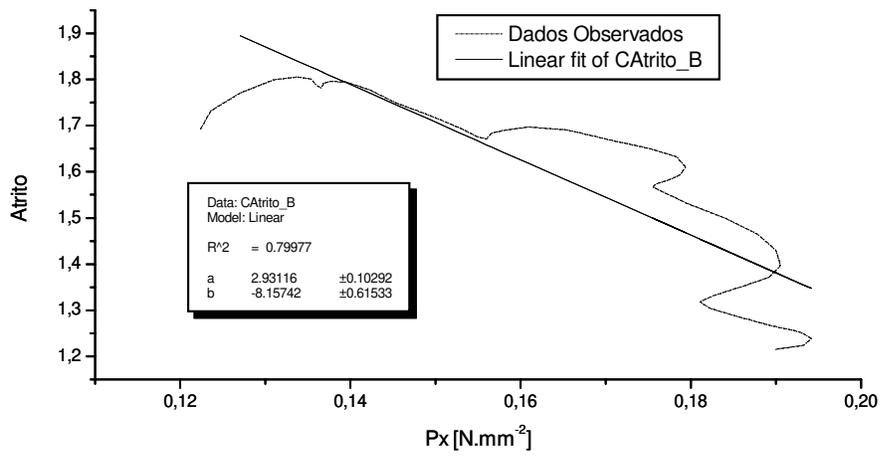
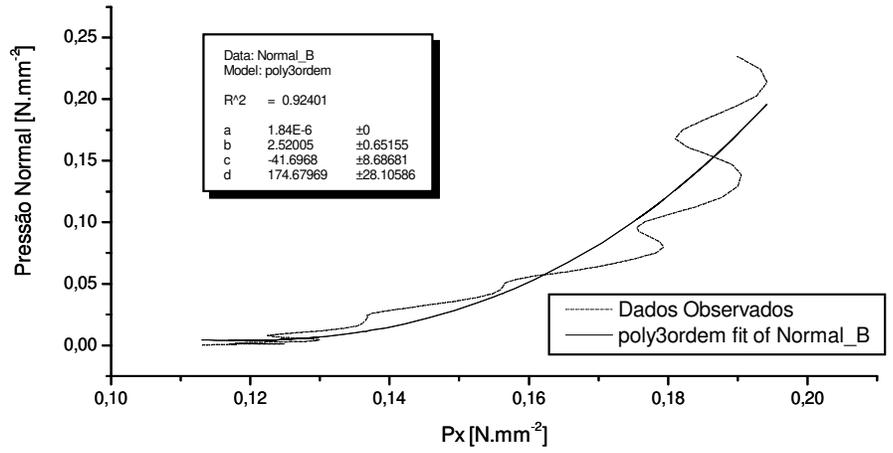
### Gráficos para P1V2E1T2



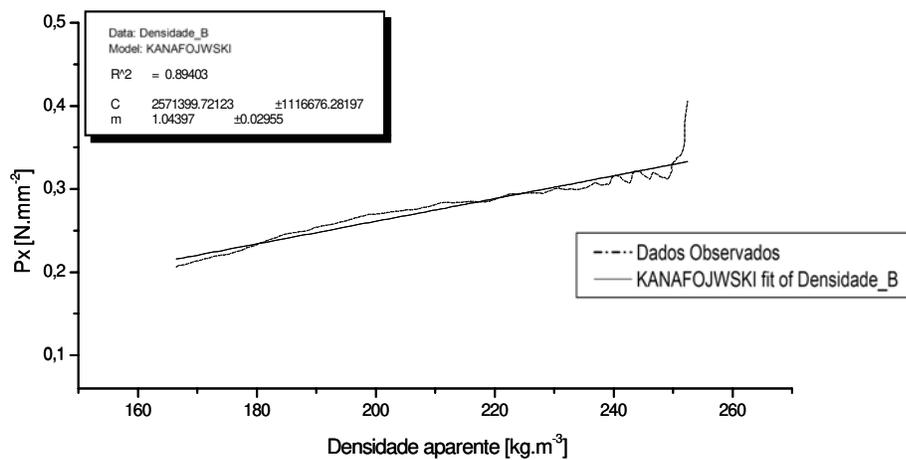
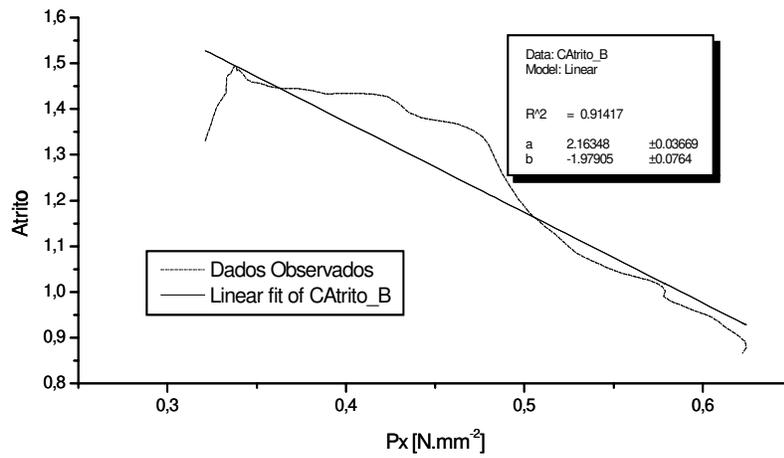
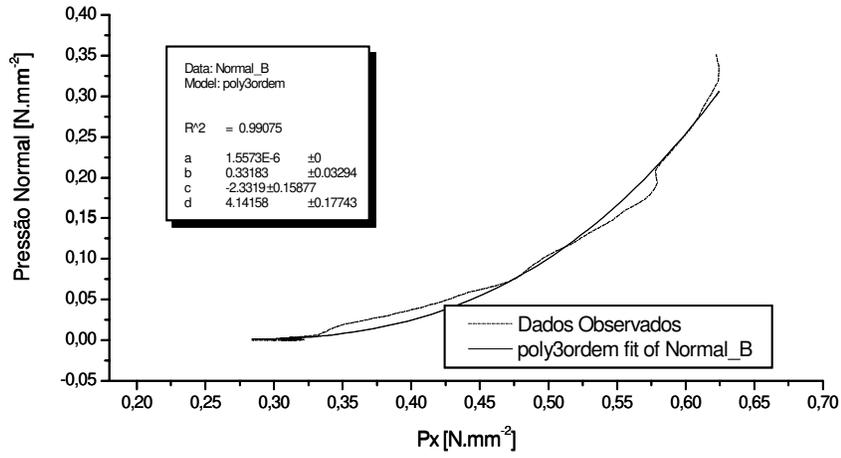
### Gráficos para P1V2E2T1



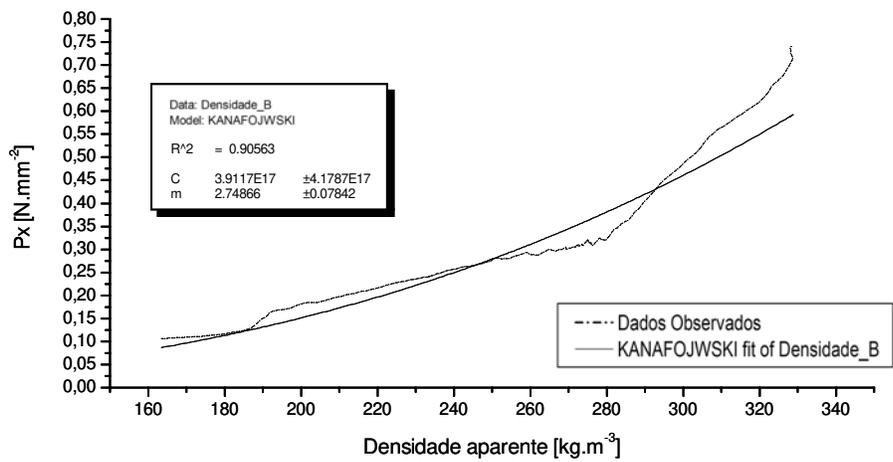
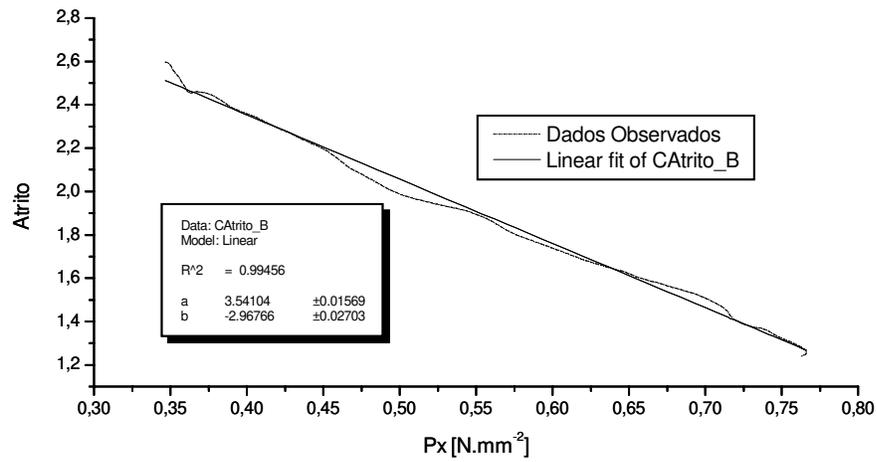
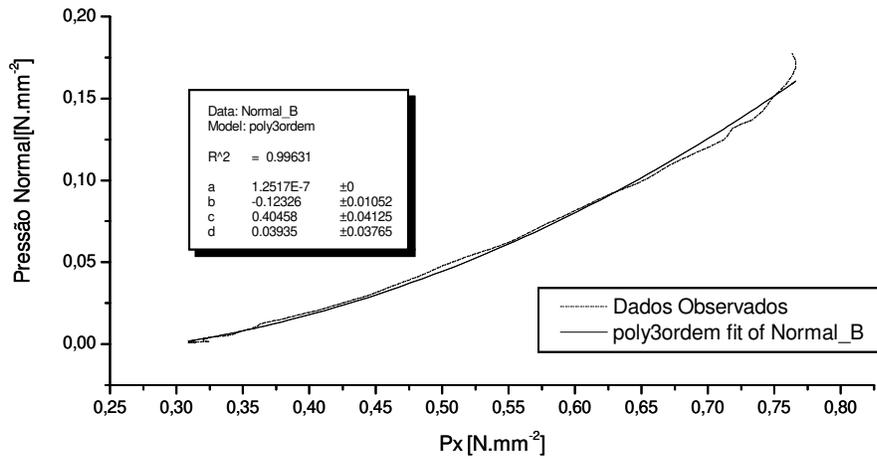
### Gráficos para P1V2E2T2



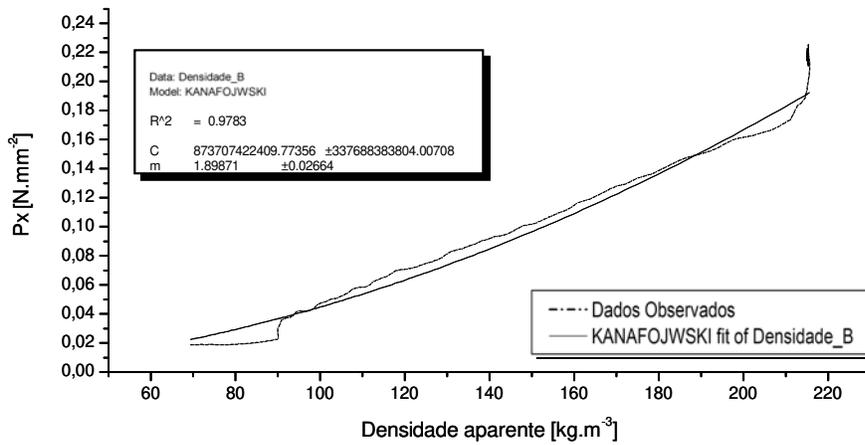
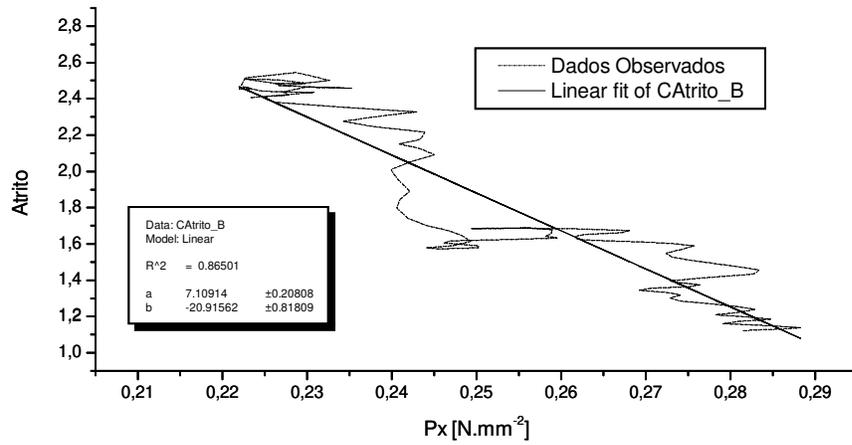
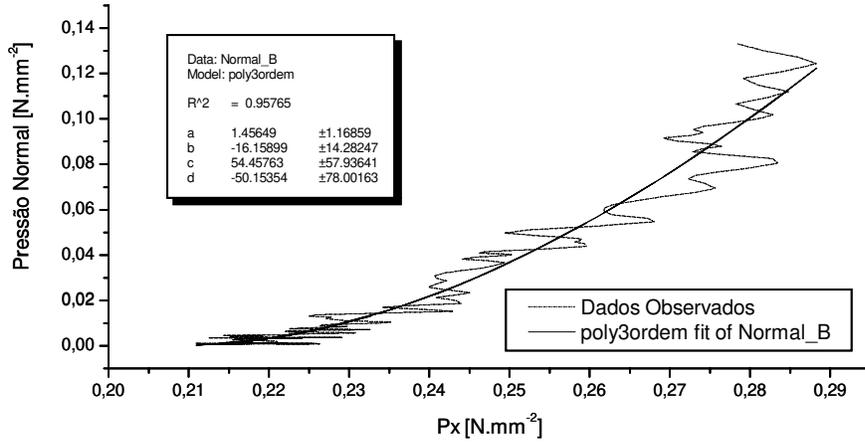
### Gráficos para P2V1E1T1



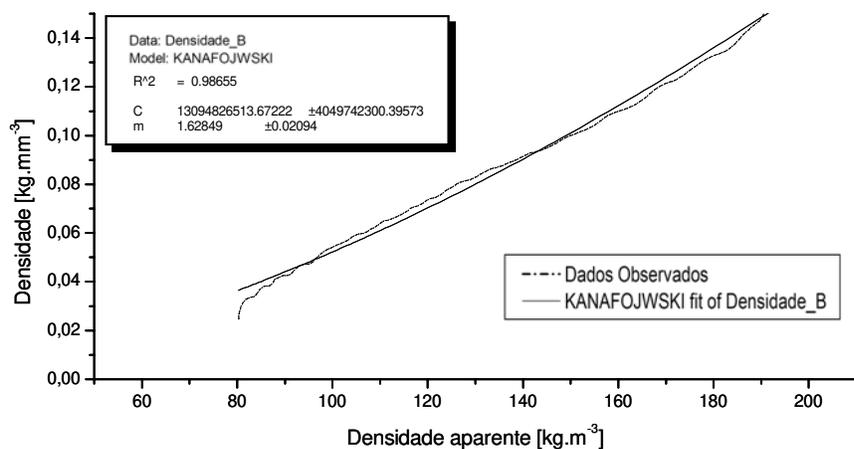
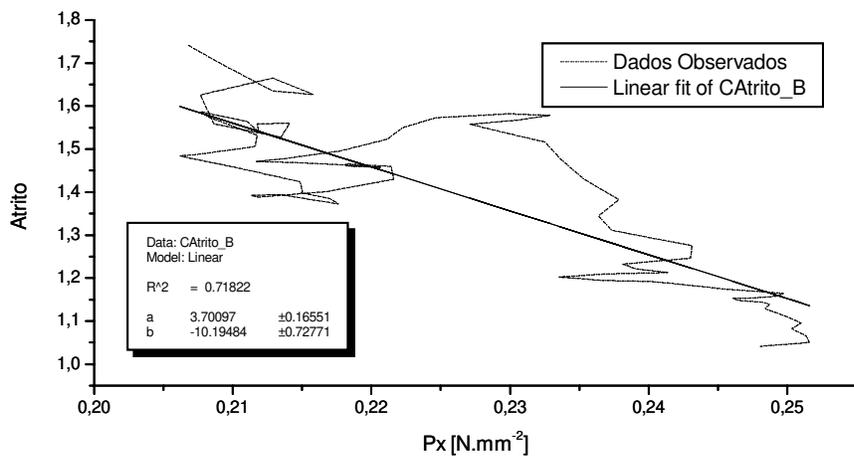
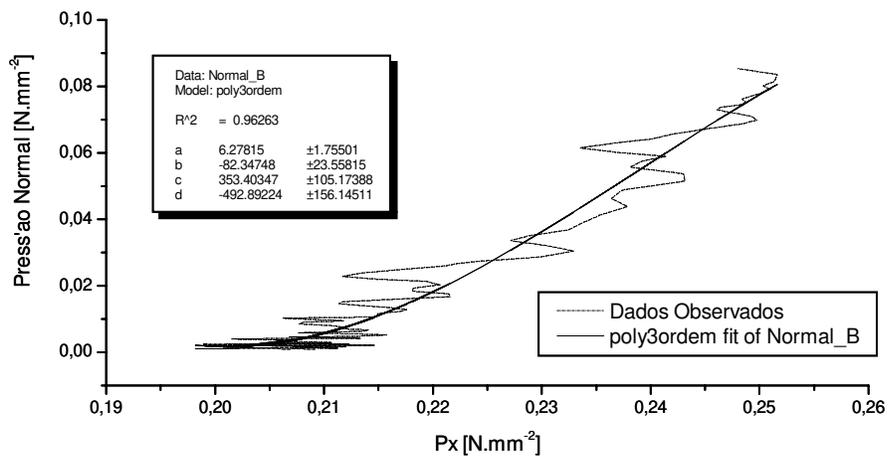
### Gráficos para P2V1E1T2



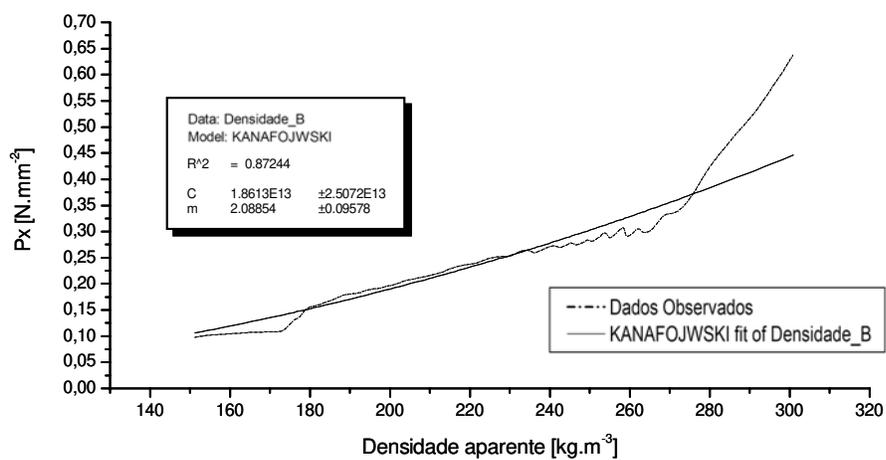
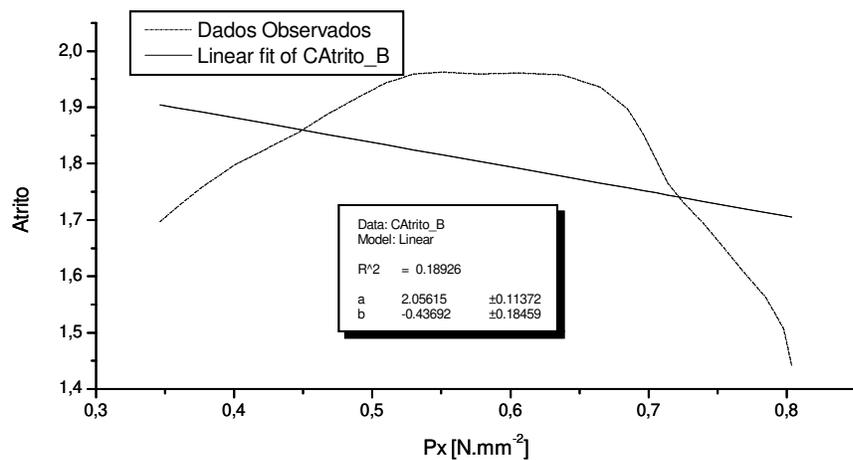
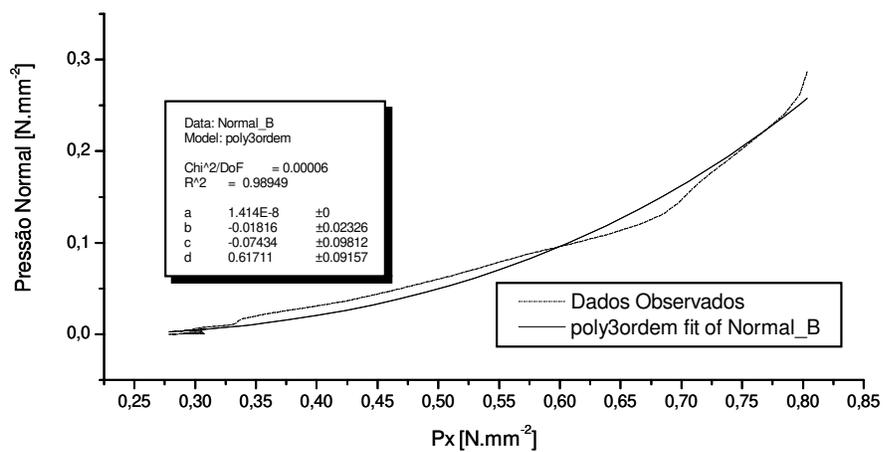
### Gráficos para P2V1E2T1



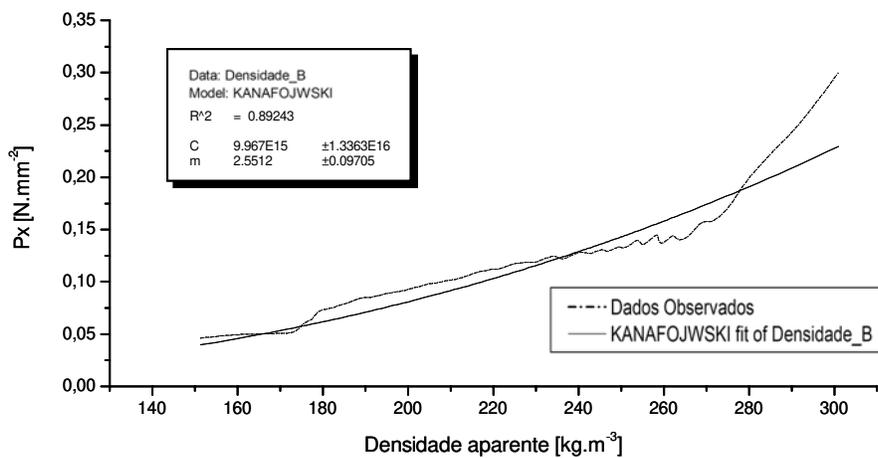
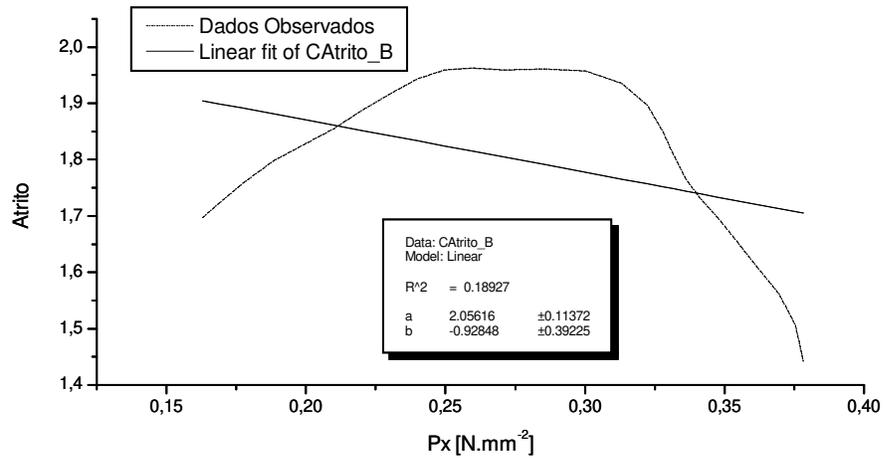
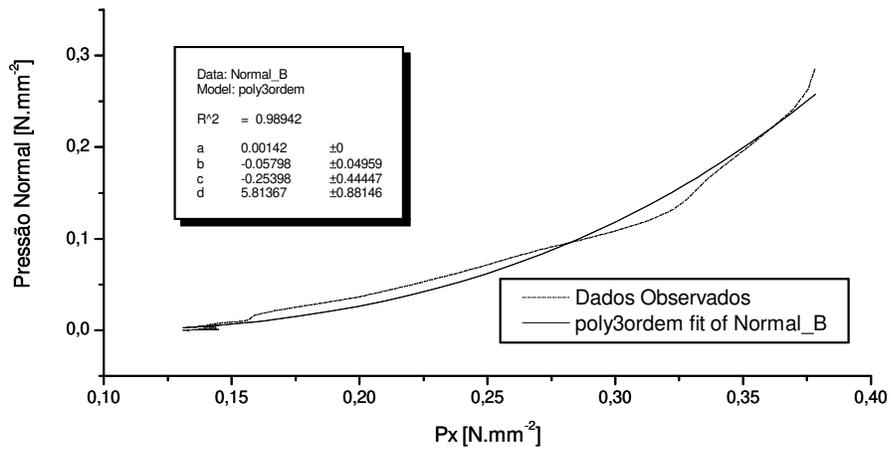
### Gráficos para P2V1E2T2



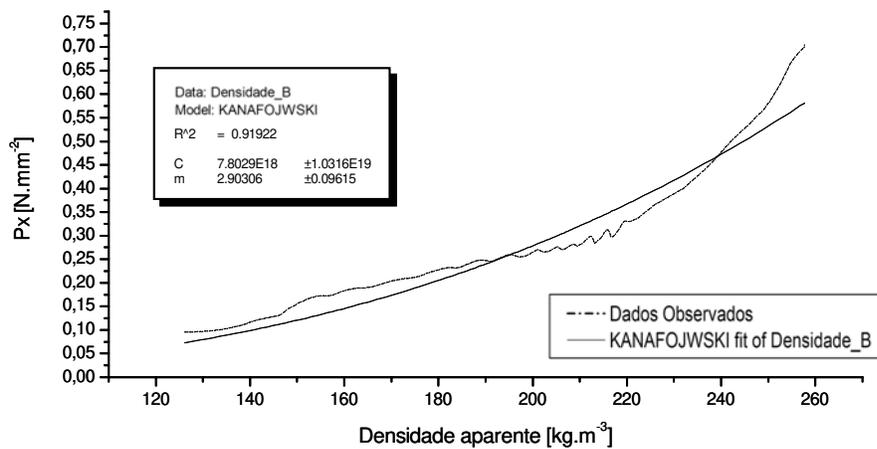
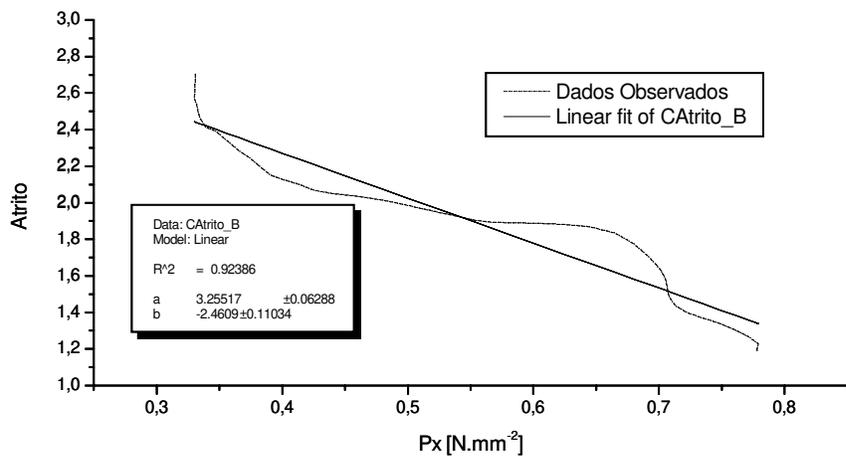
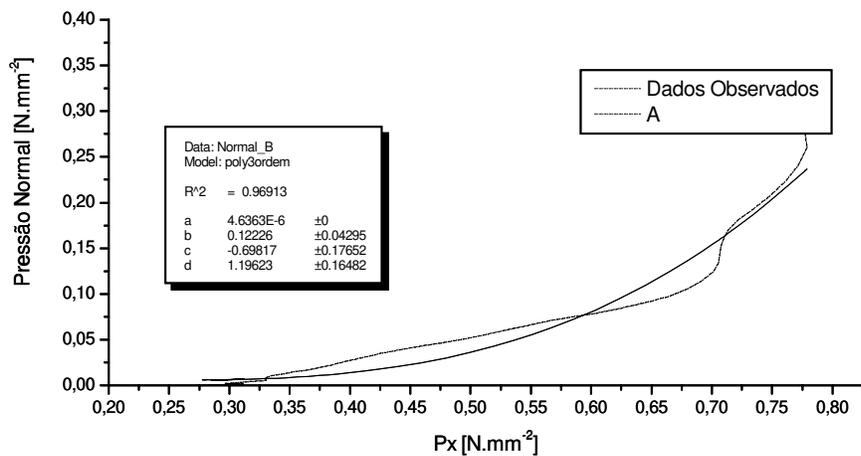
### Gráficos para P2V2E1T1



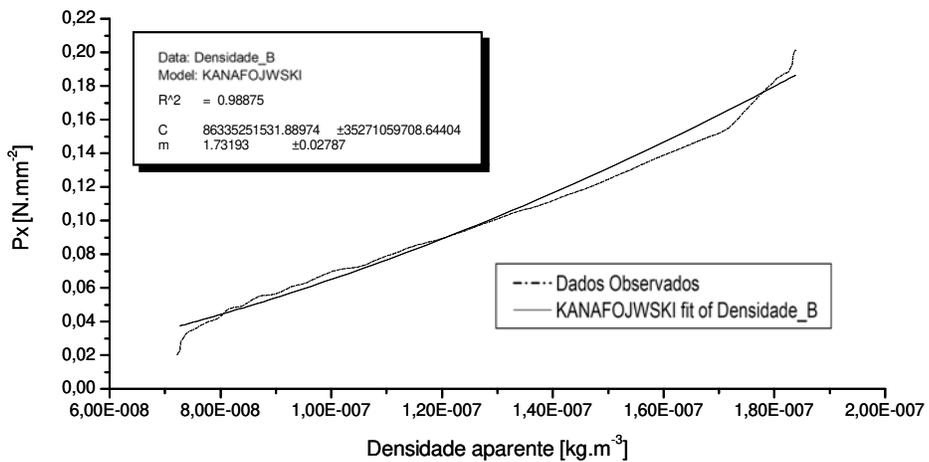
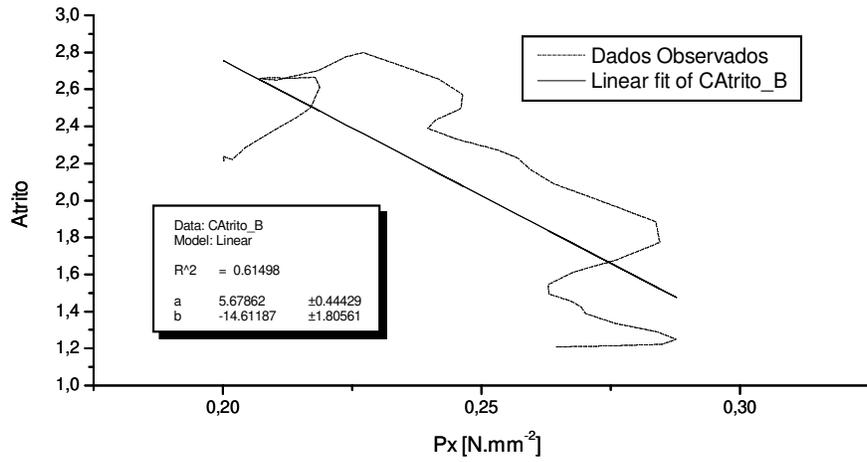
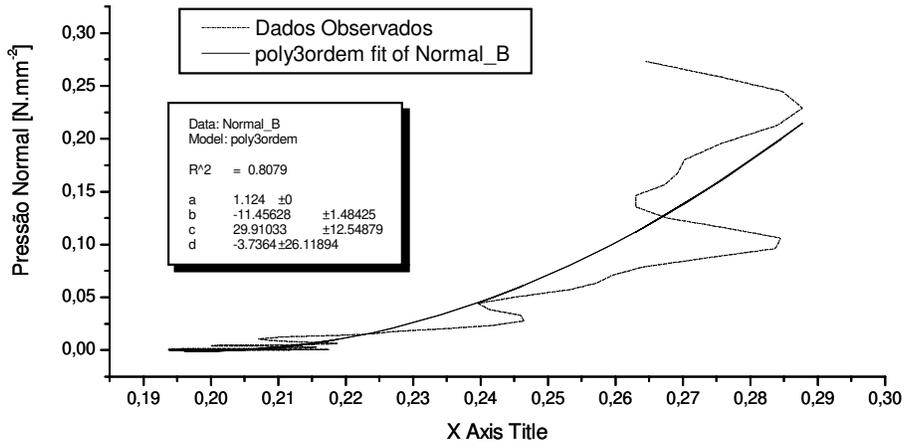
### Gráficos para P2V2E1T1



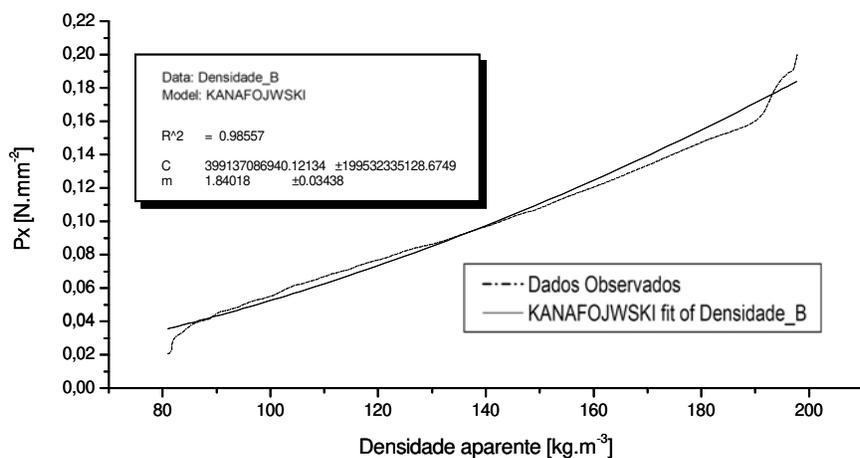
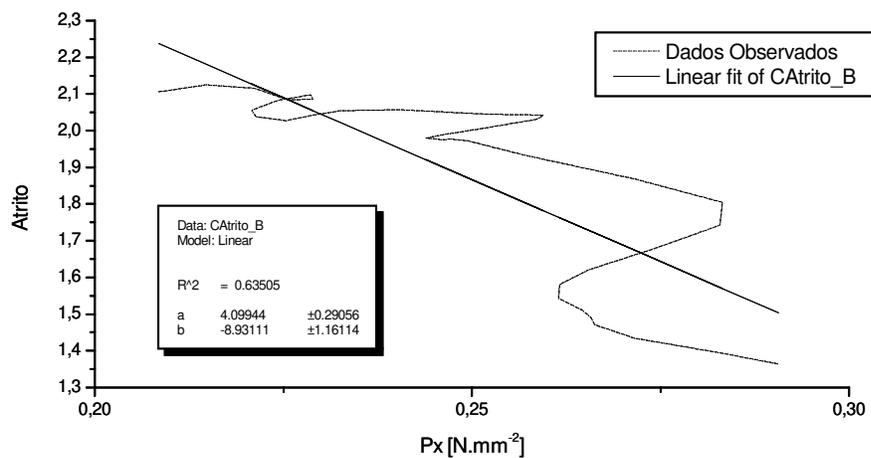
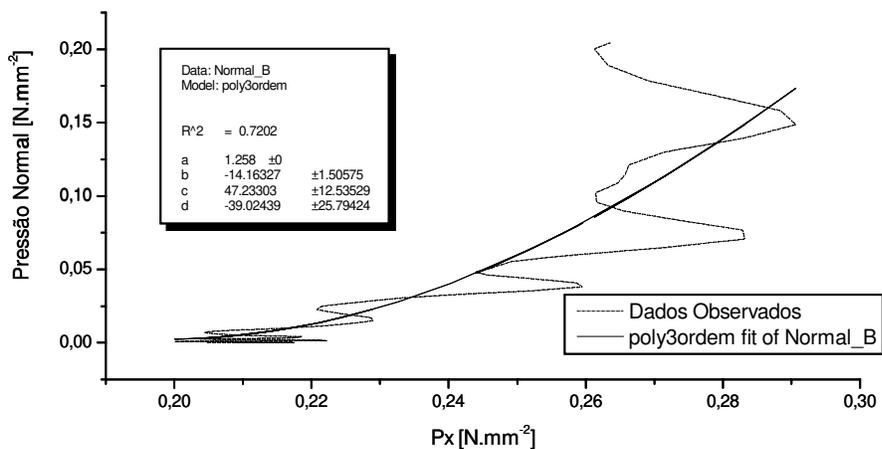
### Gráficos para P2V2E1T2



Gráficos para P2V2E2T1



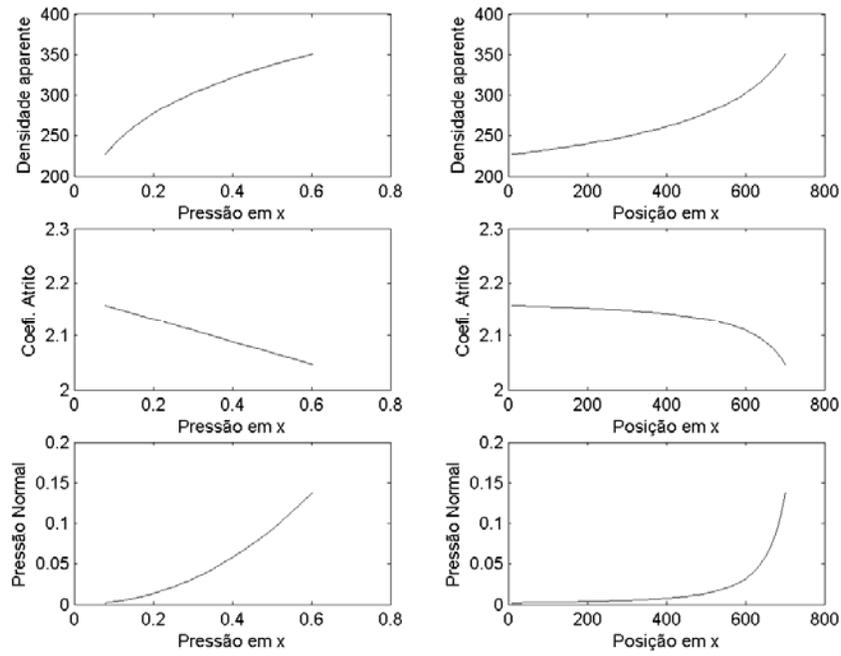
### Gráficos para P2V2E2T2



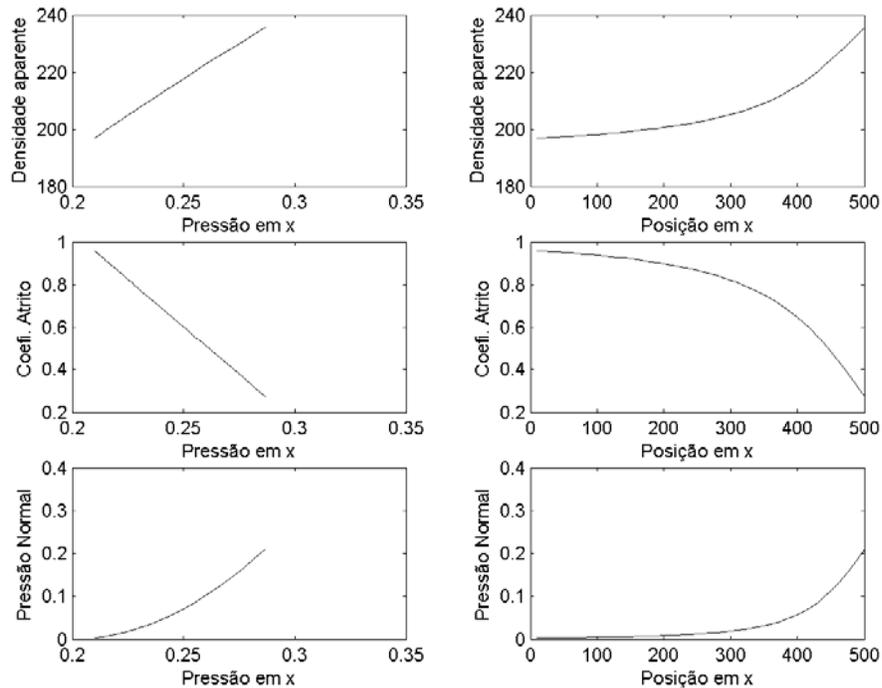
## 9 Anexo 2

Curvas de resposta simuladas com os dados experimentais e com os valores do coeficiente de atrito multiplicado pelo fator 0,5.

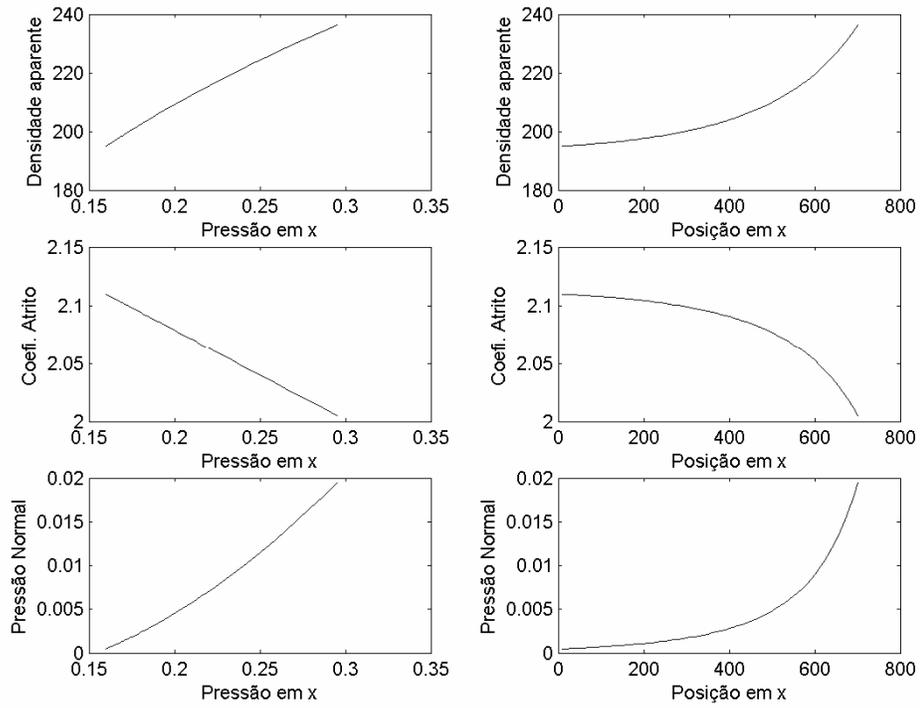
P1V1E1T1



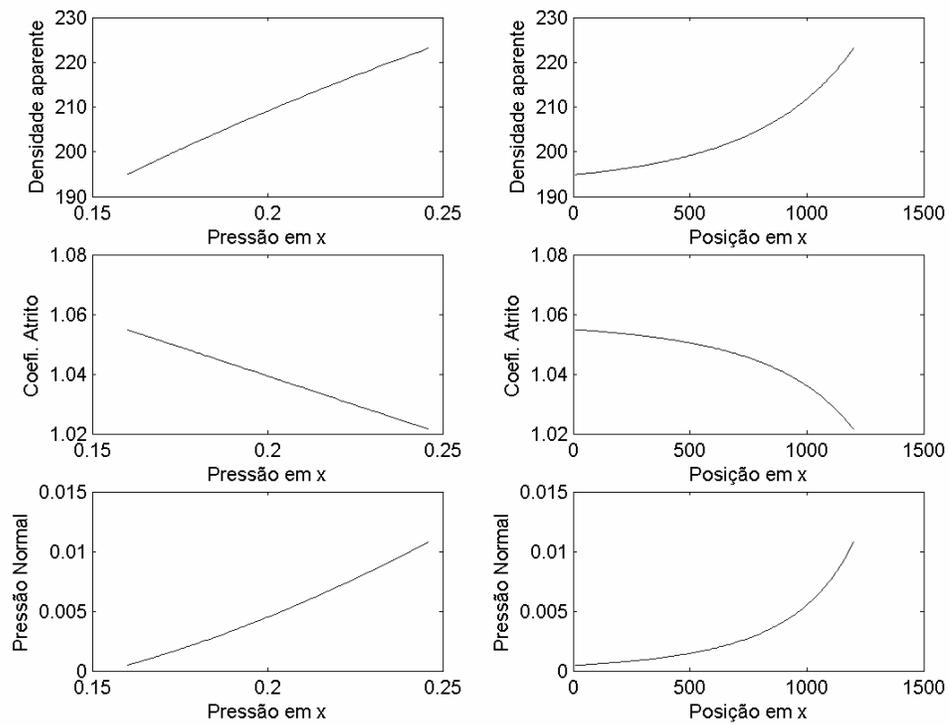
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



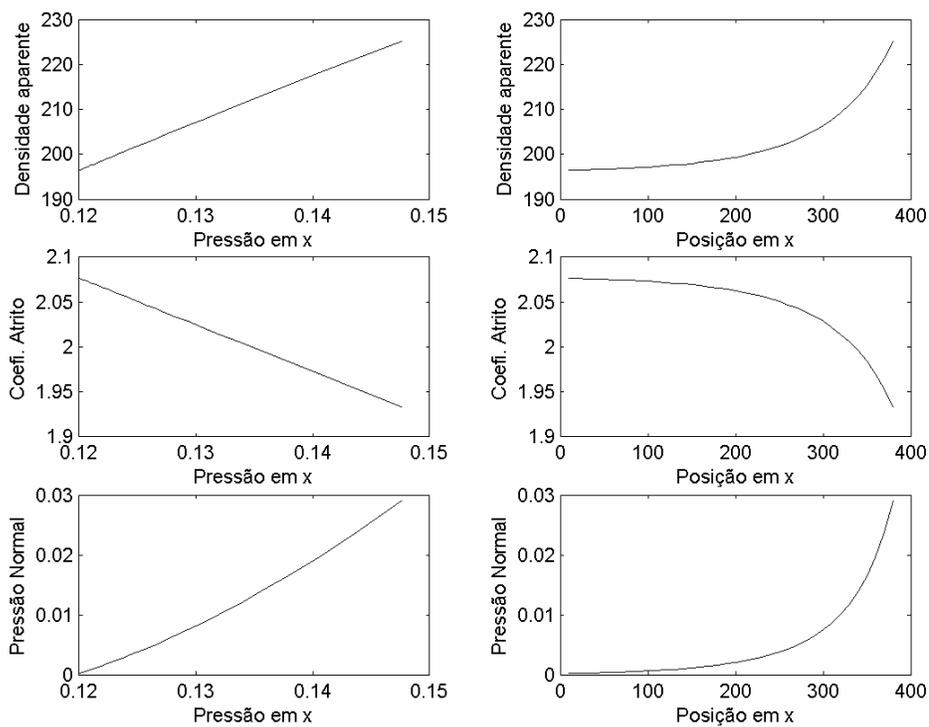
## P1V1E1T2



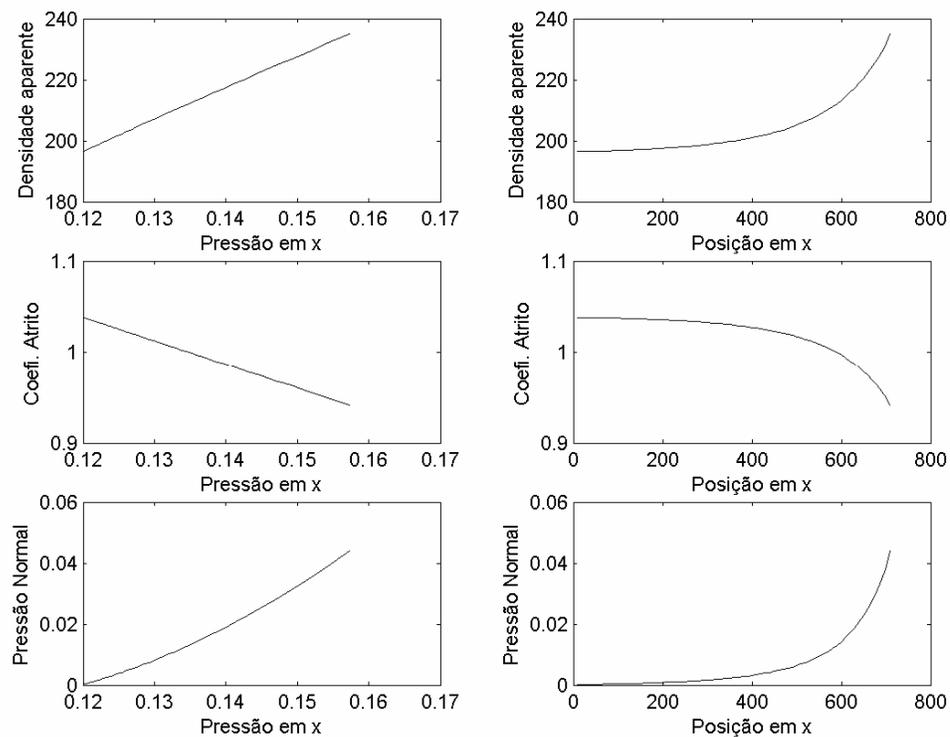
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



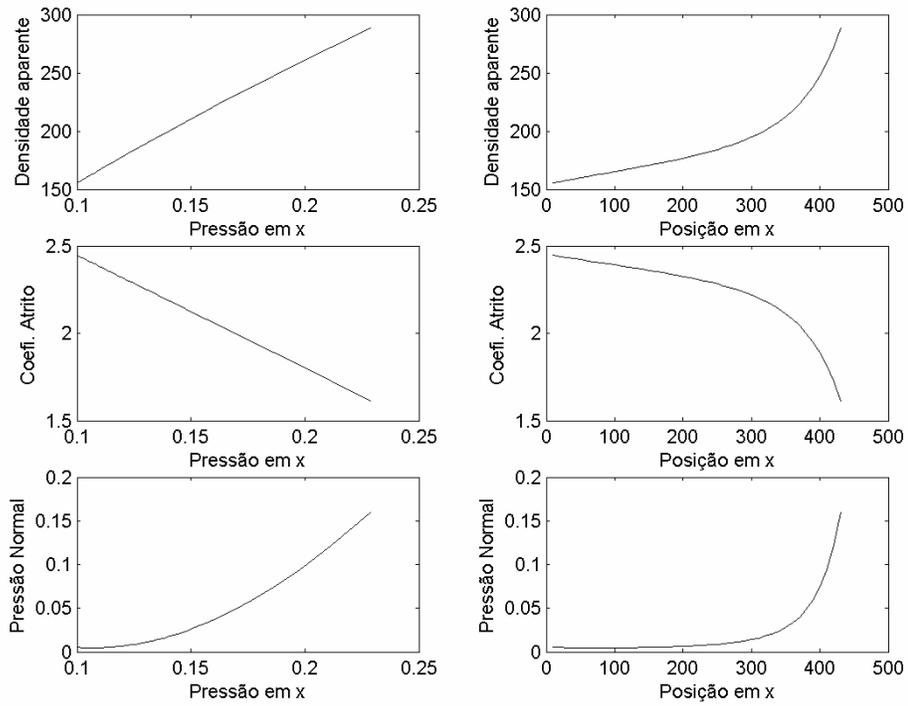
# P1V1E2T1



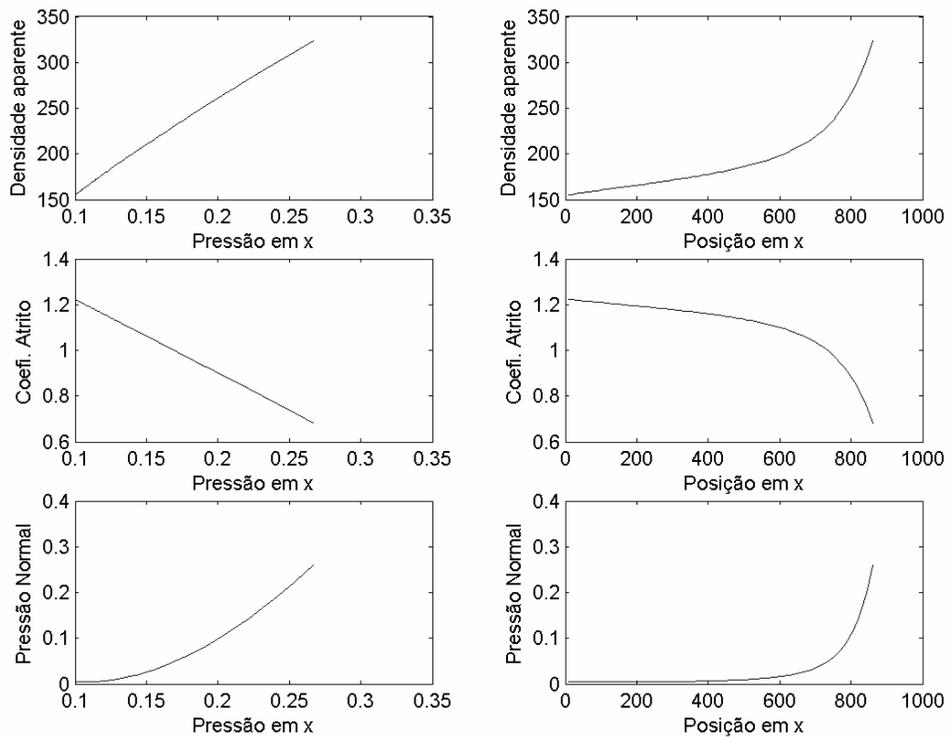
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



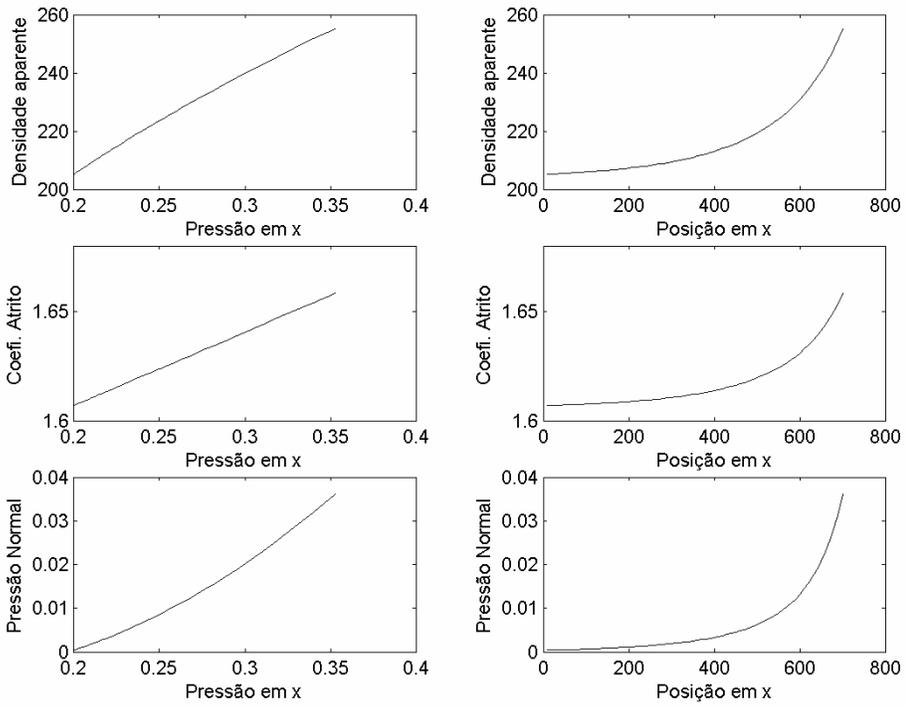
## P1V1E2T2



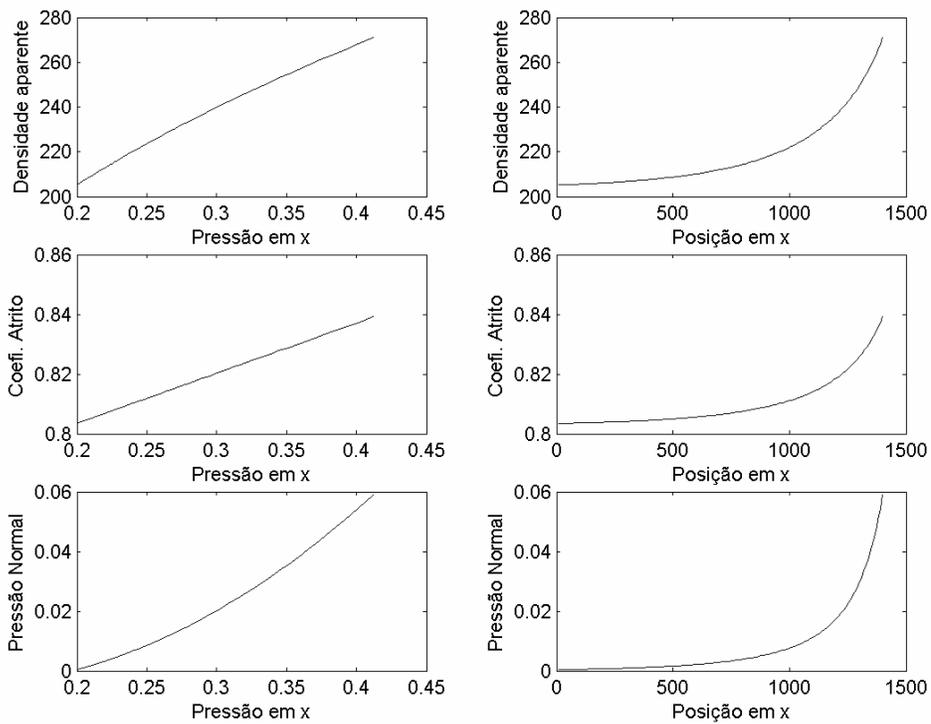
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



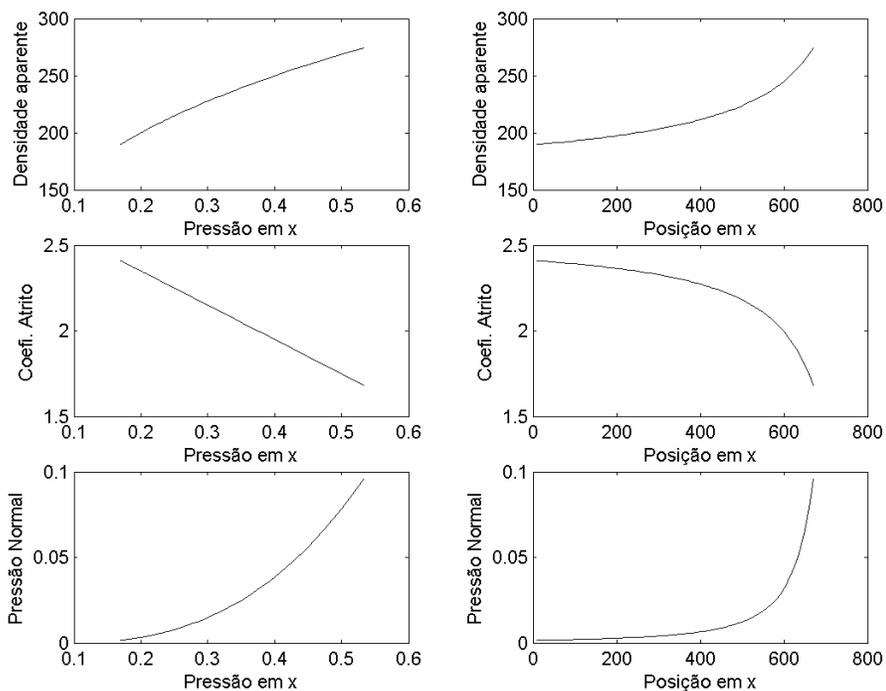
# P1V2E1T1



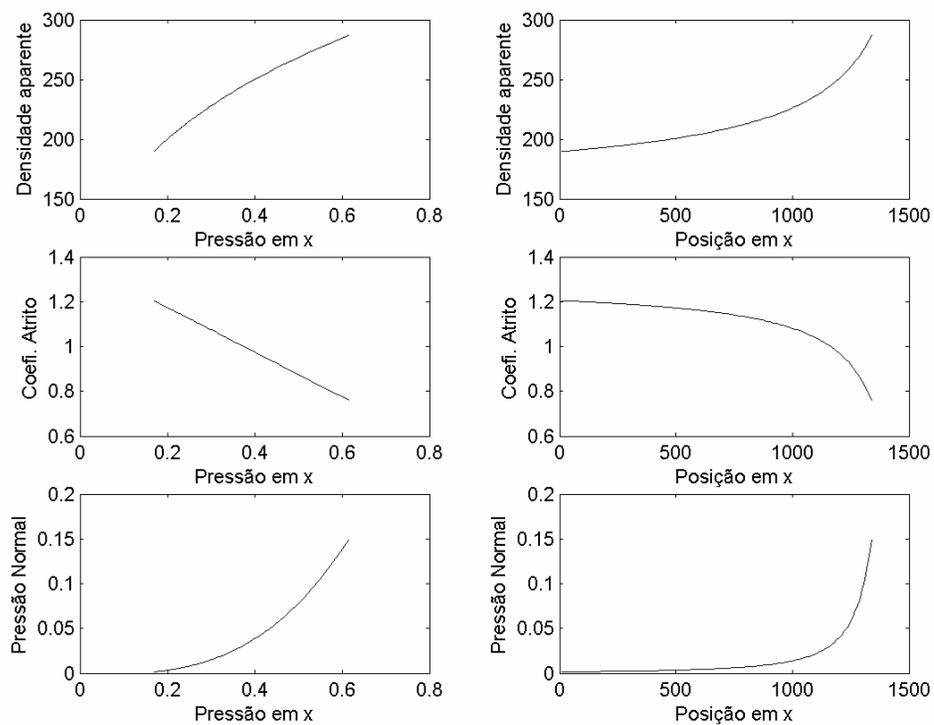
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



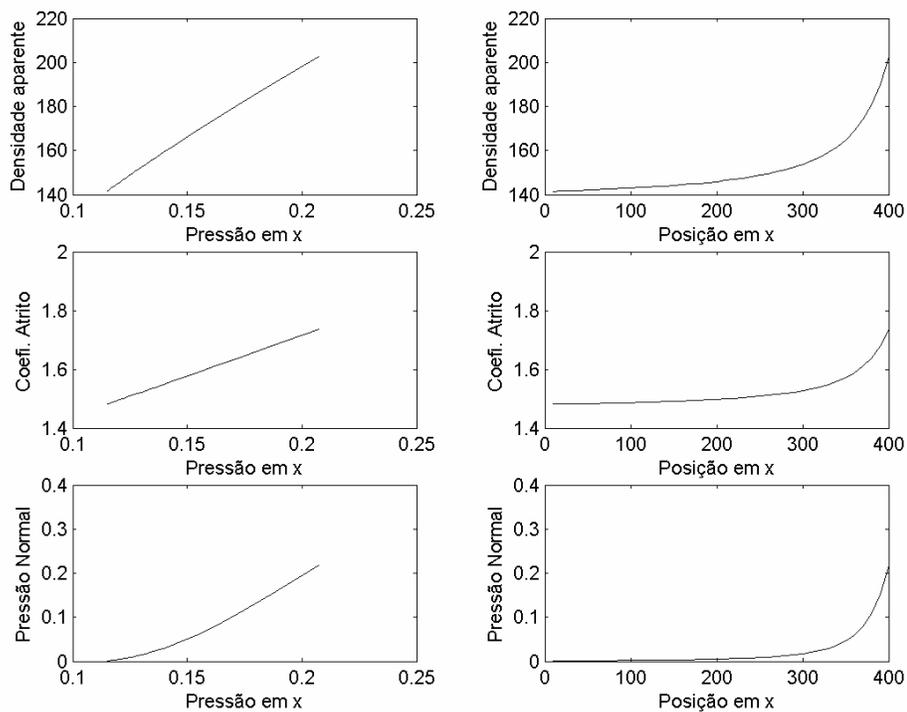
# P1V2E1T2



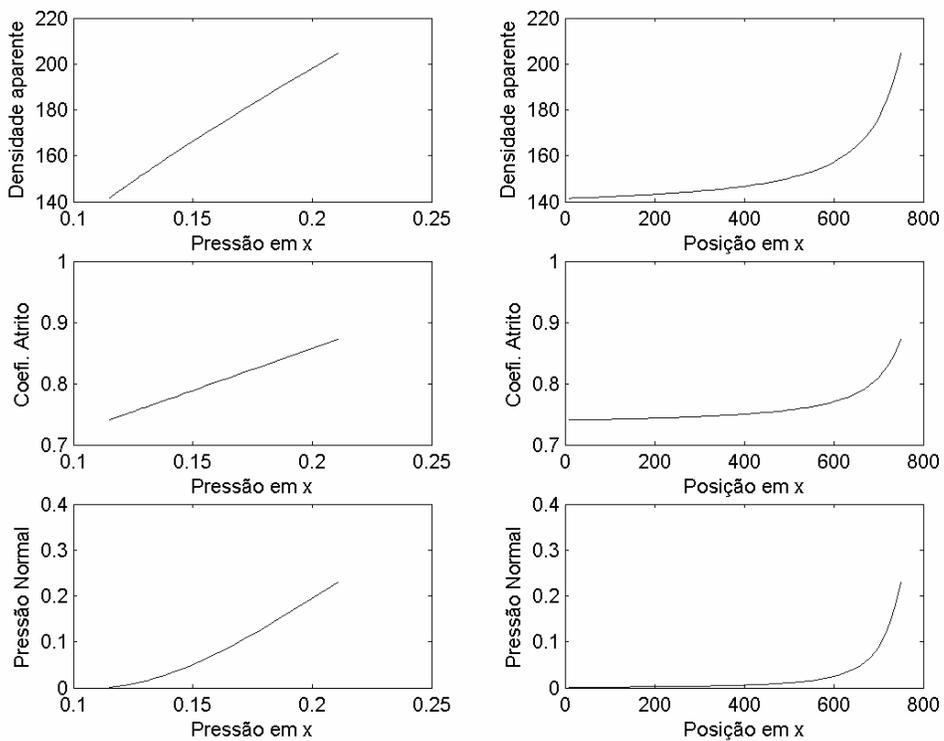
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



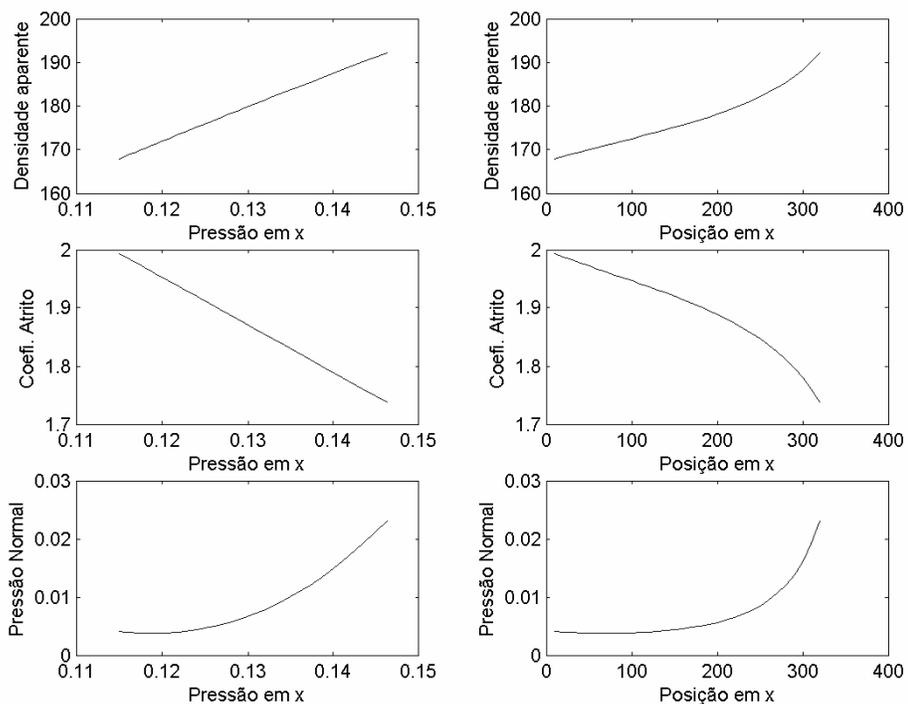
P1V2E2T1



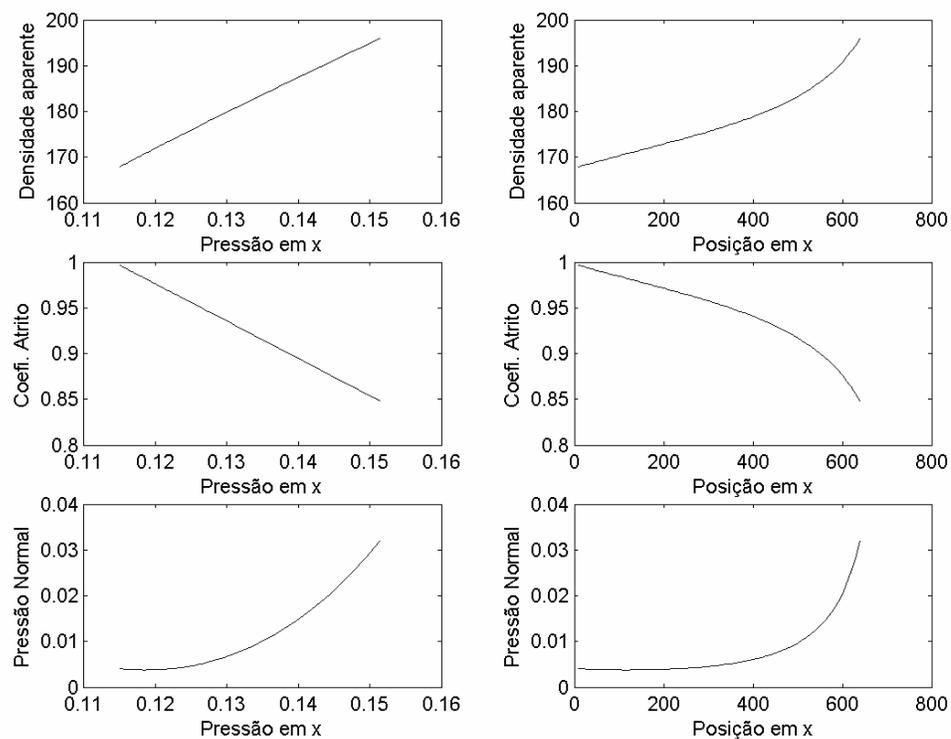
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



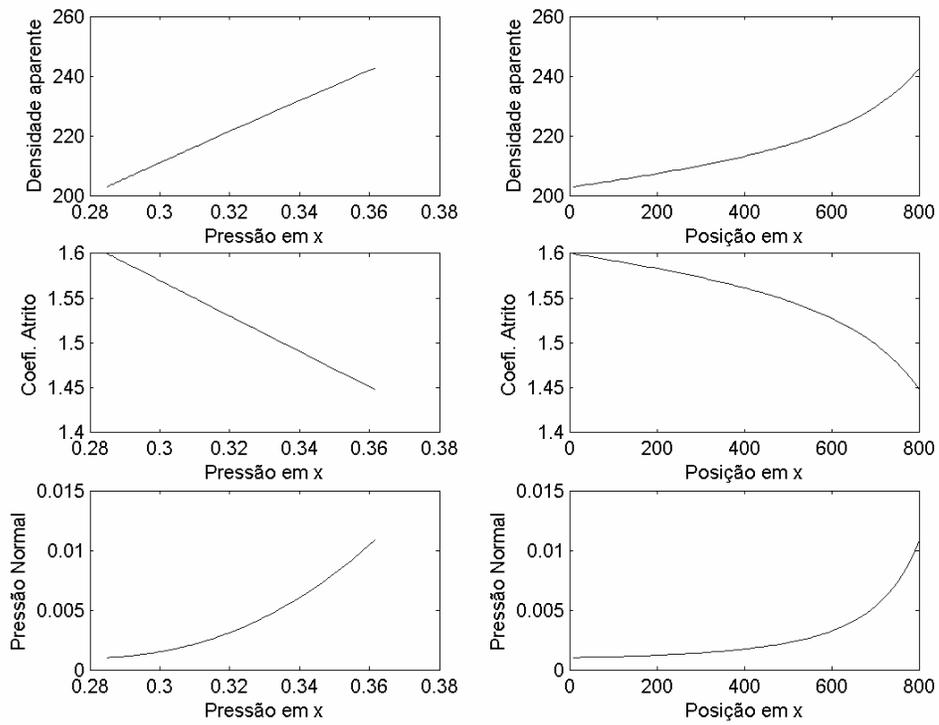
# P1V2E2T2



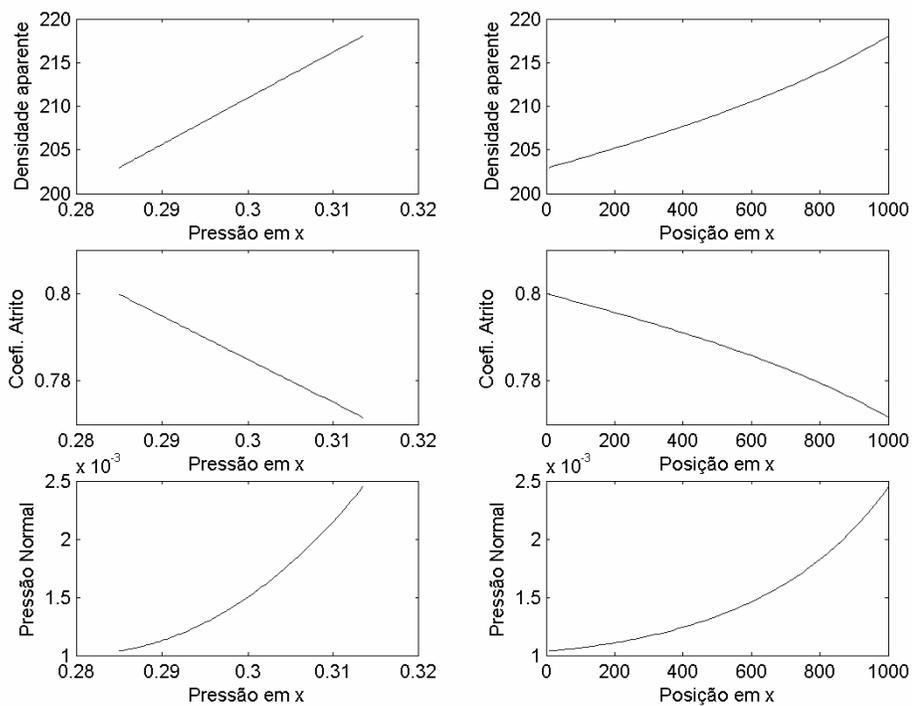
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



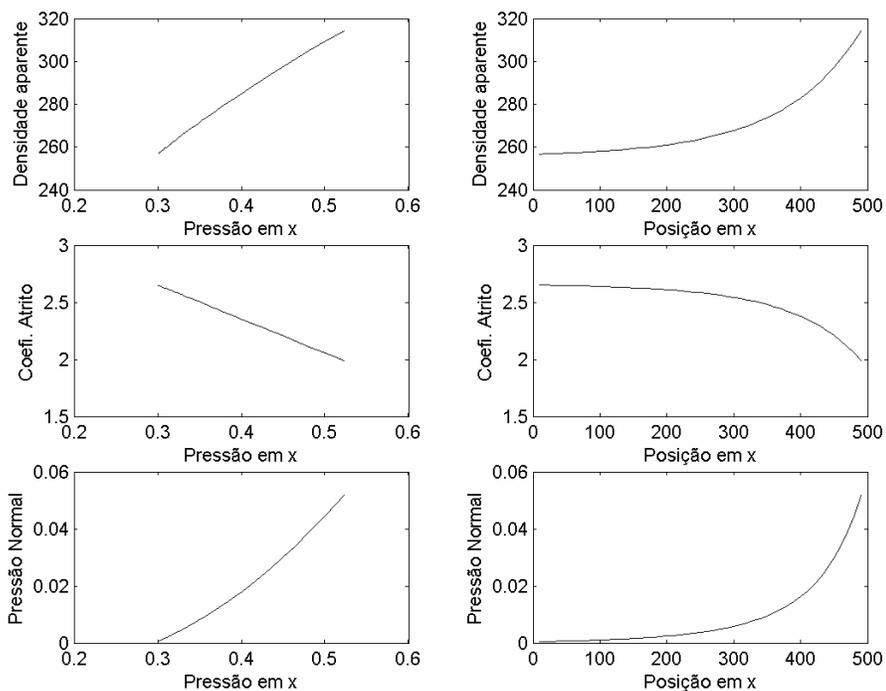
P2V1E1T1



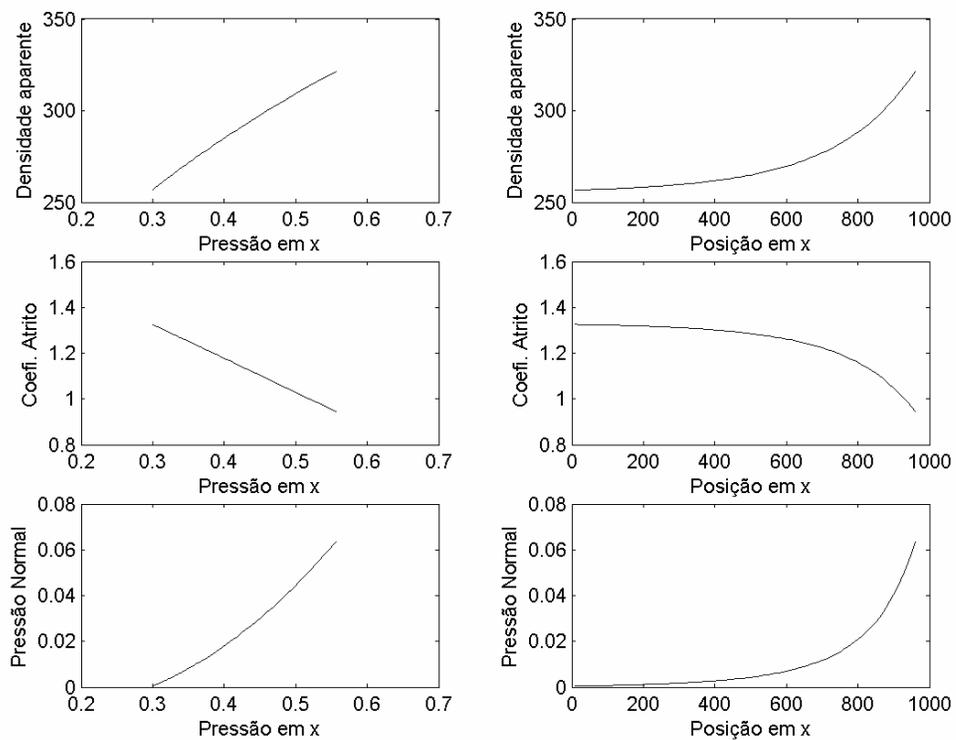
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



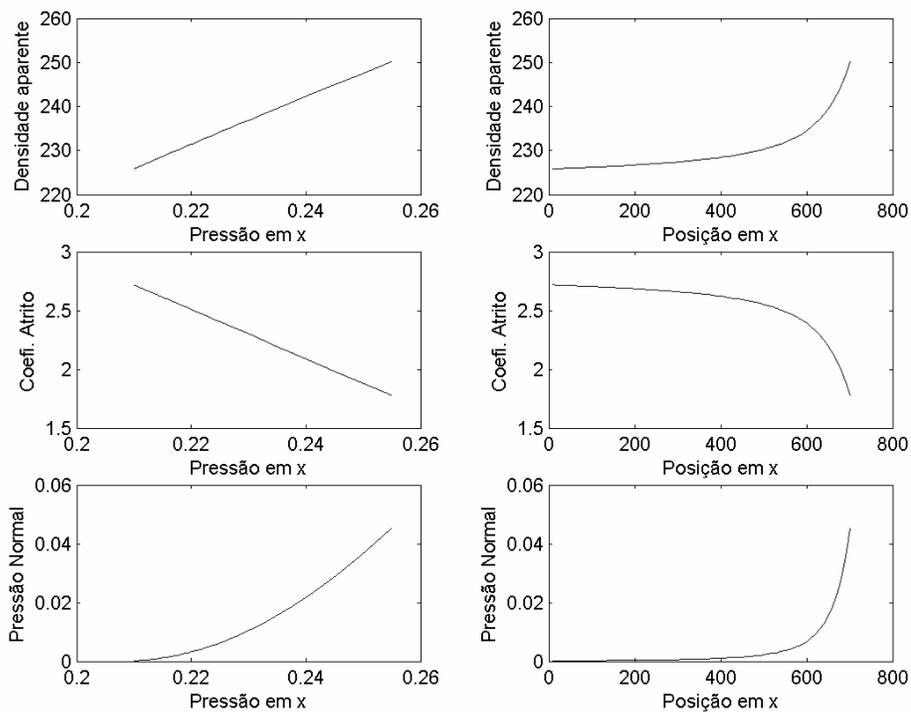
## P2V1E1T2



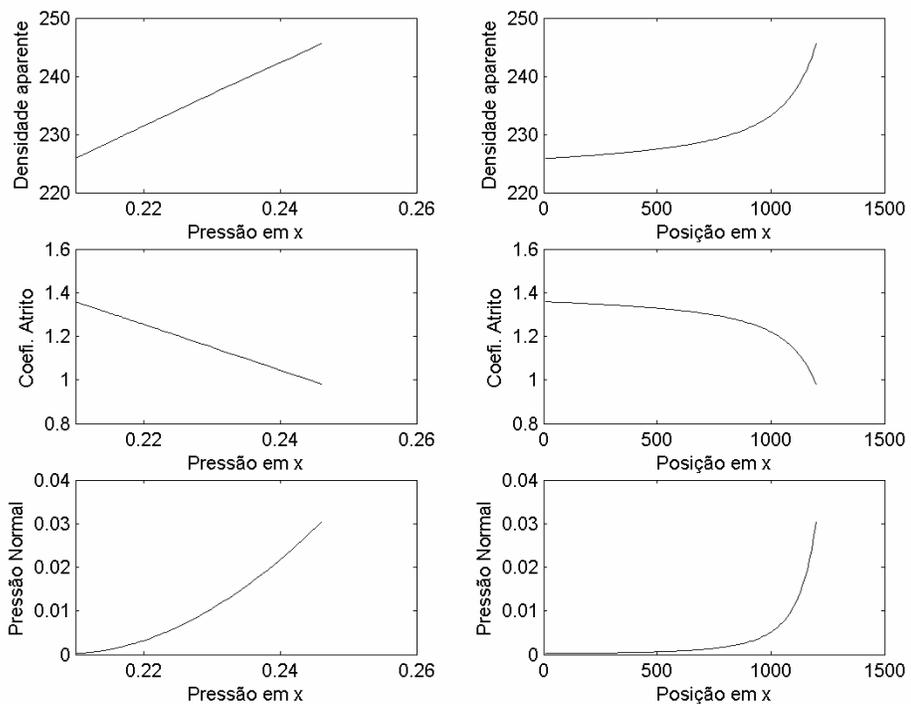
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



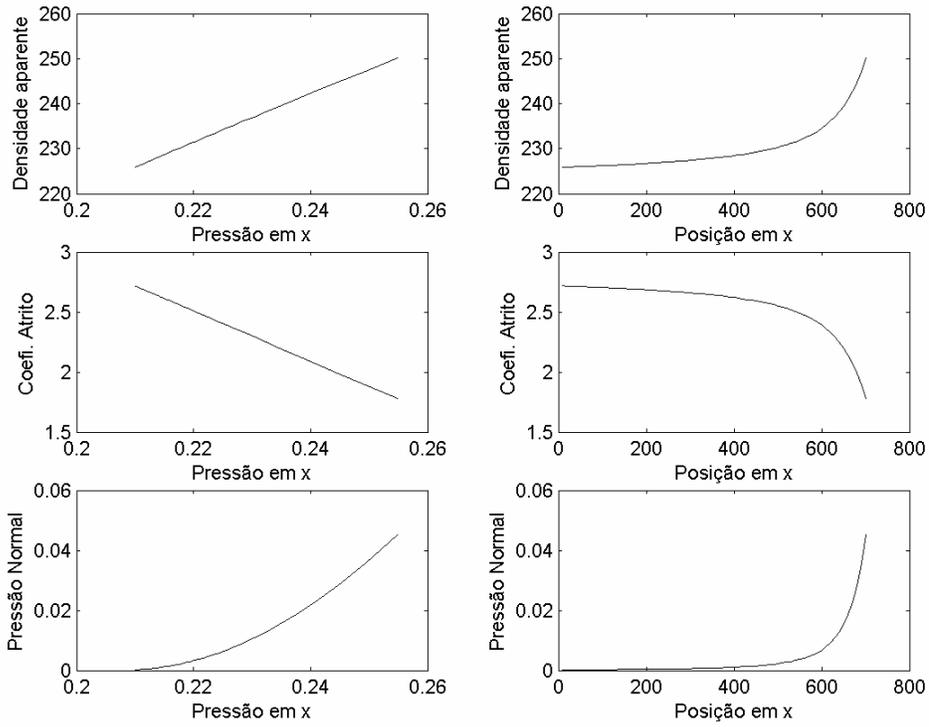
# P2V1E2T1



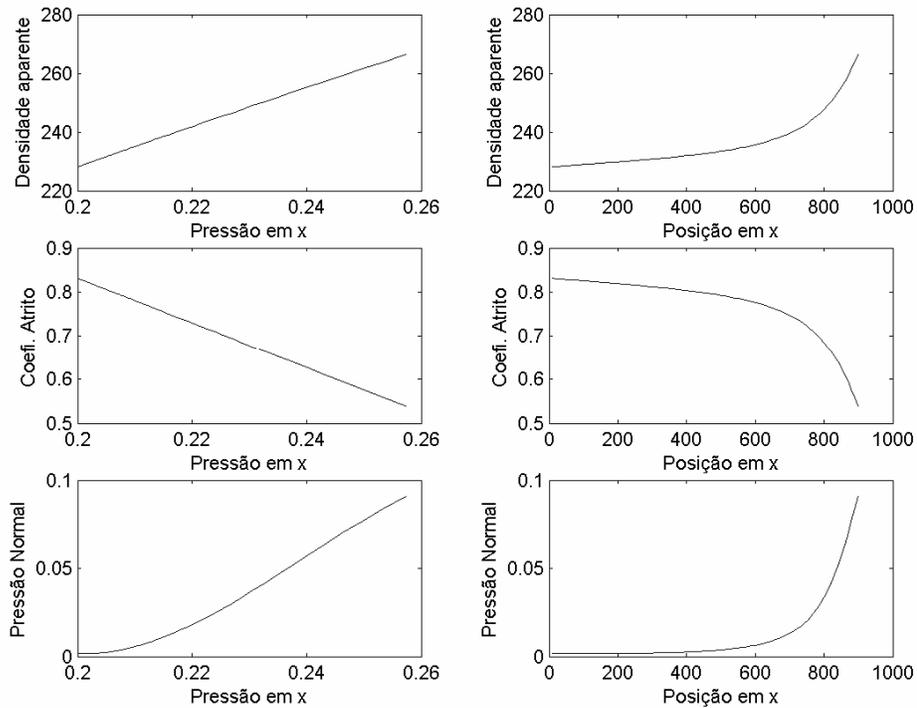
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



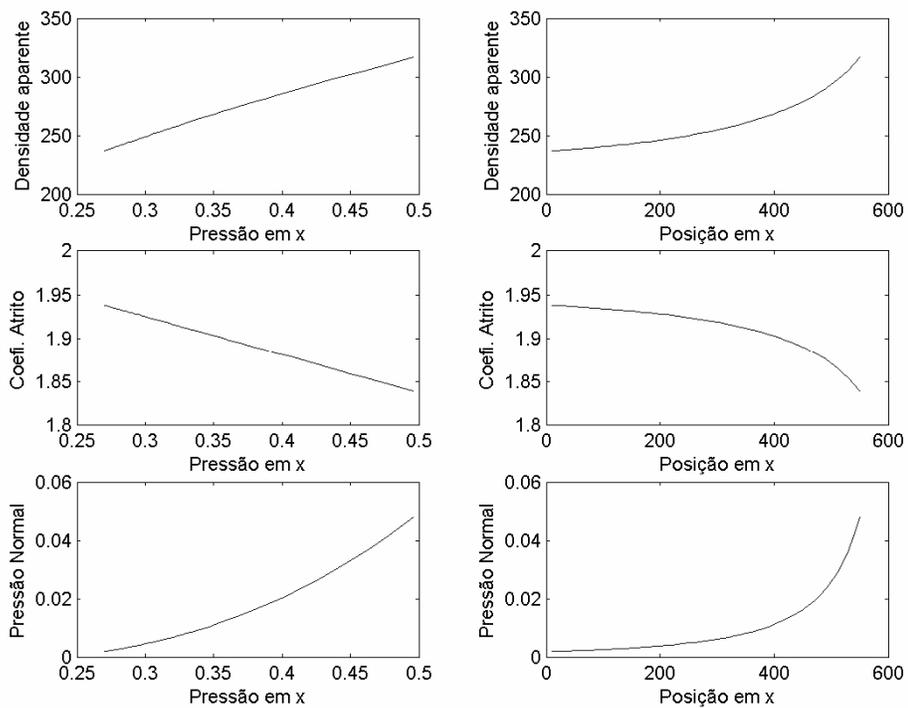
P2V1E2T2



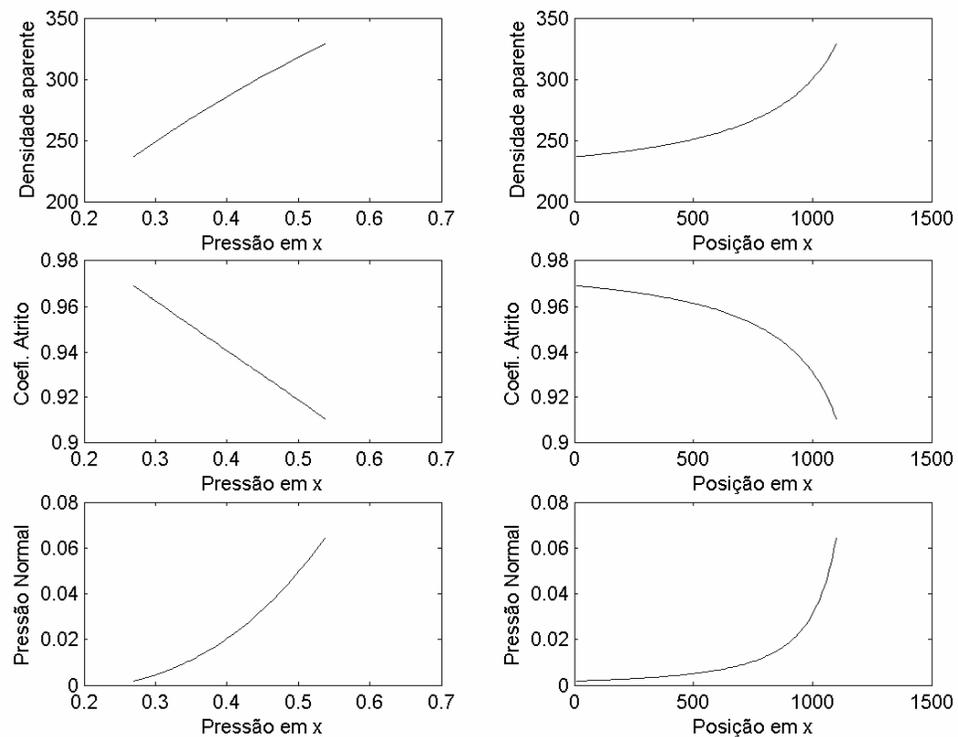
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



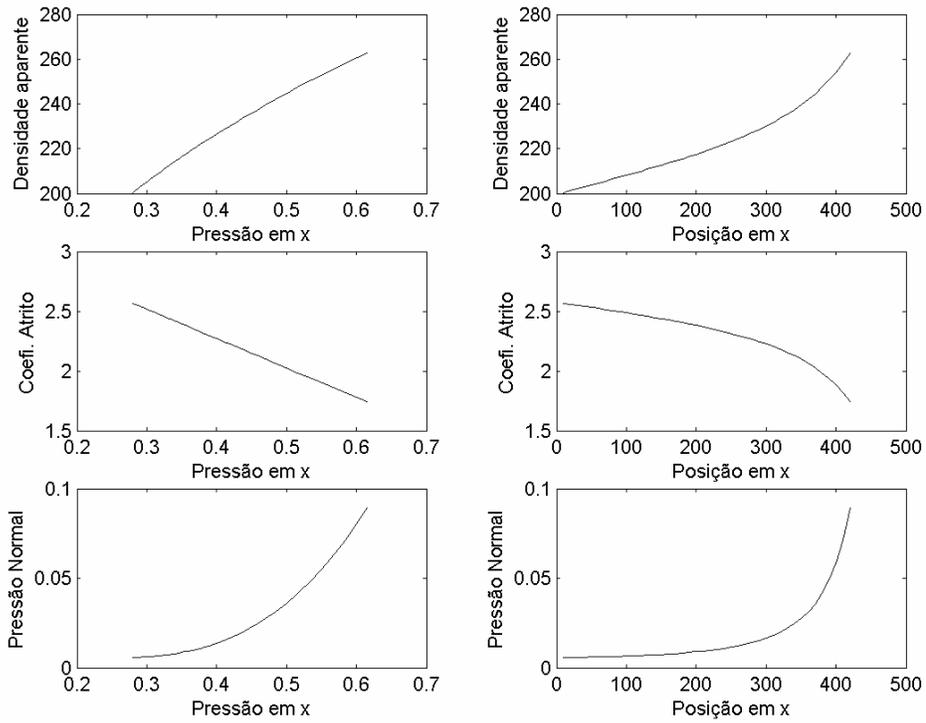
# P2V2E1T1



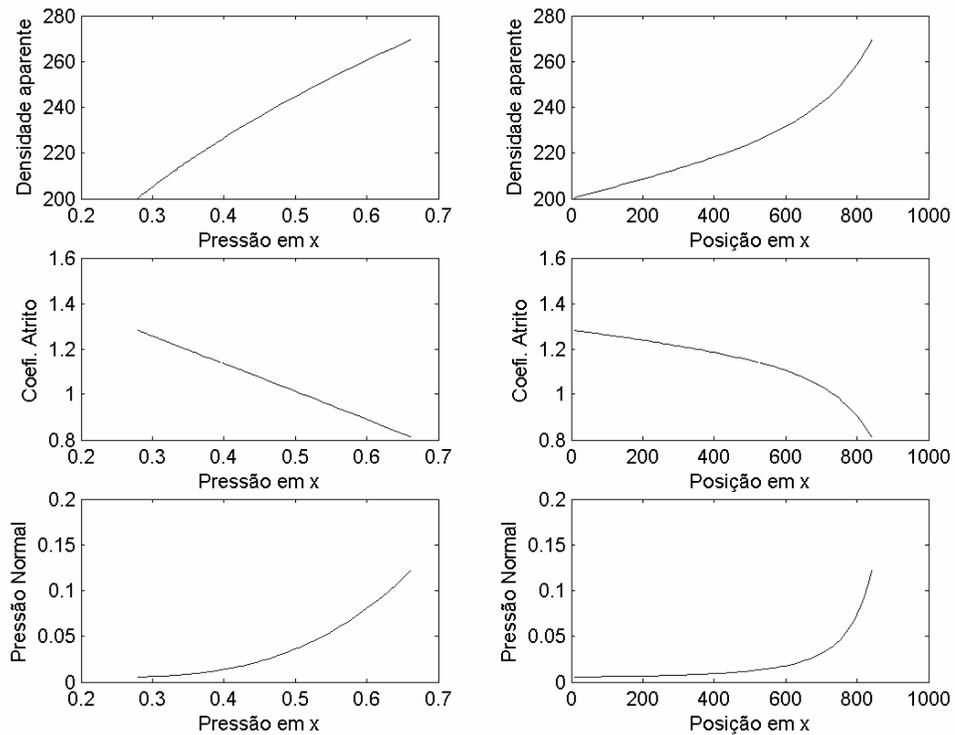
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



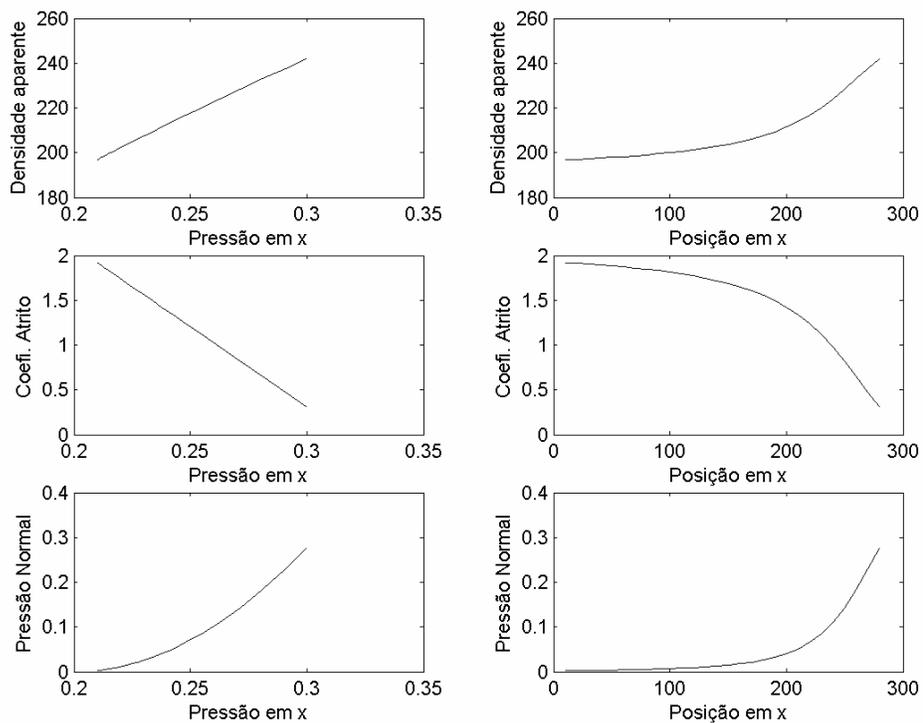
P2V2E1T2



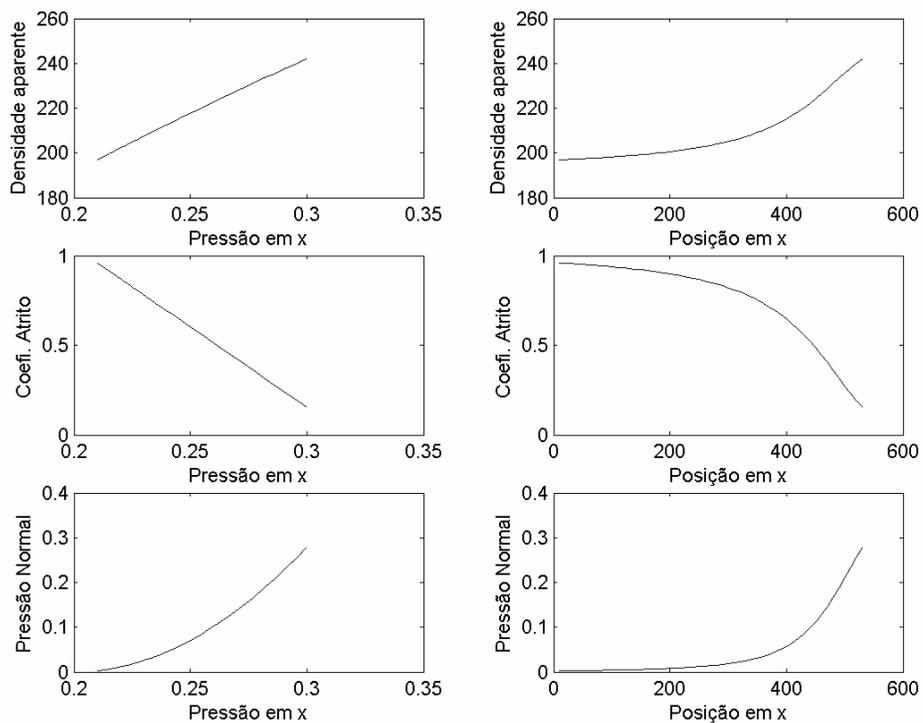
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



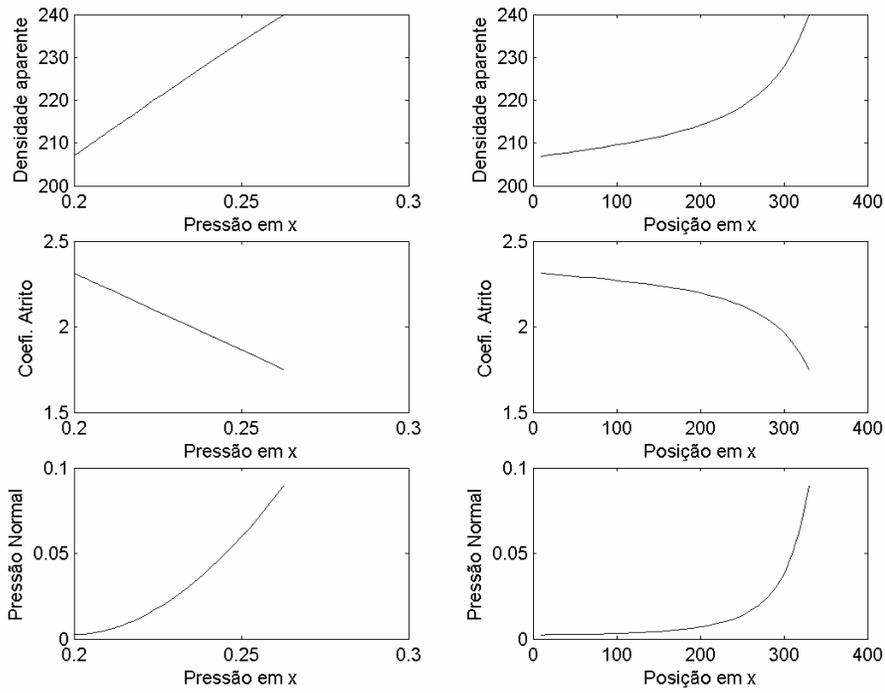
# P2V2E2T1



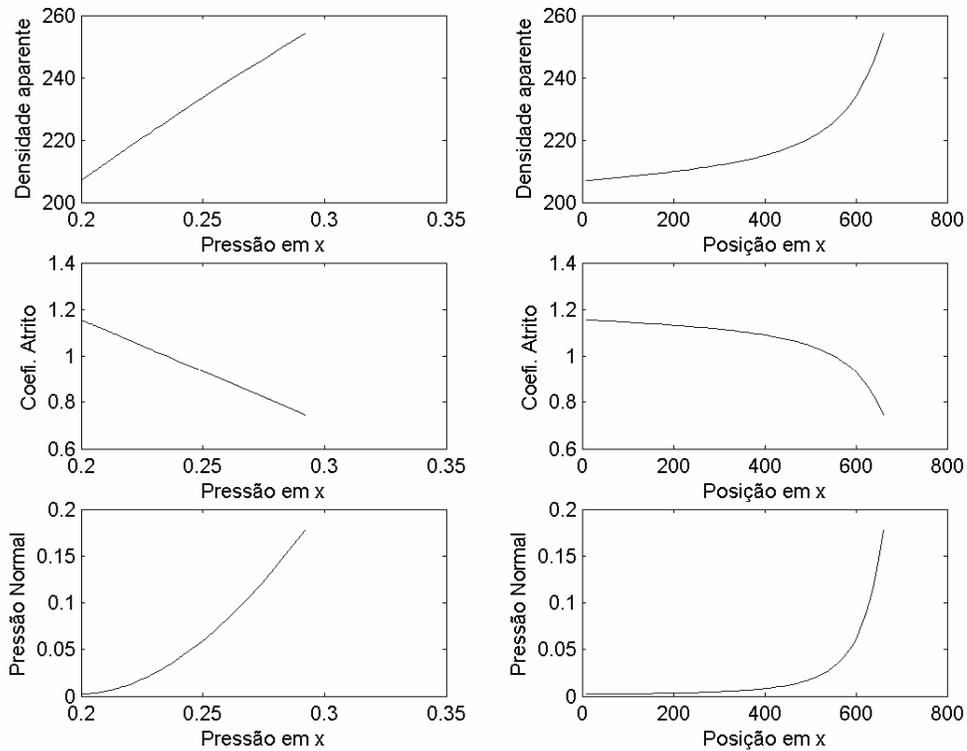
Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



## P2V2E2T2



Gráficos com coeficiente de atrito reduzido:



## 10 Anexo 3

Programa em linguagem MatLab para simulação do princípio de adensamento de palhiço por helicóides cônicos.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%%%%%%%%%Caixa de dialogo para entrada de dados iniciais.%%%%%%%%%
```

```
prompt = { 'Pressão de entrada inicial [N/mm²]',...  
           'Largura em Y do elemento de palhiço [mm]' ,...  
           'Comprimento em X do elemento de palhiço [mm]',...  
           'Altura em X do adensador [mm]',...  
           'Alfa em Graus'};
```

```
Titulo = ' ADENSAMENTO DE PALHICO DE CANA-DE-ACUCAR';
```

```
lines= 1 ;
```

```
def = { '0.08' , '85' , '10' , '340' , '30' };
```

```
entrada = inputdlg(prompt,Titulo,lines,def);
```

```
Pxe = str2num(char(entrada(1))); % Pressão de entrada inicial em N/mm²%  
E = str2num(char(entrada(2)));%largura em Y do elemento de palhiço em metros%  
dx = str2num(char(entrada(3)));%Comprimento em X do bloco (elemento) de palhico%  
Hc = str2num(char(entrada(4))) ;% Altura em X do adensador%  
alfa = str2num(char(entrada(5))) * pi / 180;
```

```
%%%%%%%%%Parametros para as equações do modelo de adensamento.%%%%%%%%%
```

```
C = 7.1953e20
```

```
m = 1/3.3108
```

```
b1=0.00127
```

```
b2=-0.16193
```

```
b3=2.05621
```

```
b4=-0.56635
```

```
c1=2.19169
```

```
c2=-0.4606
```

```
%%%%%%%%%Atribuição do valor inicial de x.%%%%%%%%%
```

```
x = 0 ;
```

```
%%%%%%%%%Atribuição da constante gravitacional.%%%%%%%%%
```

```
g = 9.81 ;
```

```
%%%%%%%%%Rotina de cálculo do modelo de adensamento%%%%%%%%%
```

```
for n = 1:(Hc/dx)
```

```

x = x + dx;

xm(n,:) = x;

ro=(Pxe/C)^m

roa=ro*1000000000;
rom(n,:) =roa;

Nn = b1+(b2*Pxe)+(b3*(Pxe^2))+b4*(Pxe^3);%pressao normal

N = abs(Nn);
Nm(n,:) = N;

mi =(c1+(c2*Pxe));%coeficiente de atrito

mim(n,:) = (mi);

%%%%Cálculo da pressao Pxs.%%
%Pxs=Pxe+((2*mi*N*dx)/E)+(ro*(g*cos(alfa))*dx)

ter1 = (2*mi*N*dx)/ E;
si = cos(alfa);
ter2 = g*si;
ter3 = ro*(ter2)*dx;
ps = ter3*1000000000;

Pxs=Pxe+(ter1)+(ter3);

Pxem(n,:) = Pxe;
Pxe = Pxs
end

%%%%Geração da matriz de resultados%%
matrixall(:,1) = xm
matrixall(:,2) = mim
matrixall(:,3) = rom
matrixall(:,4) = Nm
matrixall(:,5) = Pxem

save matrix_all -ascii matrixall

%%%%Geração dos gráficos de resposta%%

```

```

figure(1)
subplot(3,2,2)
plot (xm,rom);
xlabel('Posição em x','fontsize', 10);
ylabel('Densidade aparente','fontsize', 10);

subplot(3,2,1)
plot (Pxem,rom);
xlabel('Pressão em x','fontsize', 10);
ylabel('Densidade aparente','fontsize', 10);

subplot(3,2,3)
plot (Pxem,mim);
xlabel('Pressão em x','fontsize', 10);
ylabel('Coefi. Atrito','fontsize', 10);

subplot(3,2,5)
plot (Pxem, Nm);
xlabel('Pressão em x','fontsize', 10);
ylabel('Pressão Normal','fontsize', 10);

subplot(3,2,6)
plot (xm,Nm);
xlabel('Posição em x','fontsize', 10);
ylabel('Pressão Normal','fontsize', 10);

subplot(3,2,4)
plot (xm,mim);
xlabel('Posição em x','fontsize', 10);
ylabel('Coefi. Atrito','fontsize', 10);

```

# 11 Anexo 4

Características e especificações dos transdutores utilizados para a coleta de dados.



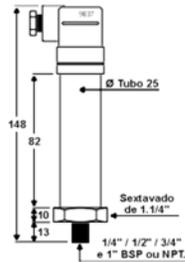
## MODELO PSI-420 TRANSMISSOR INDUSTRIAL



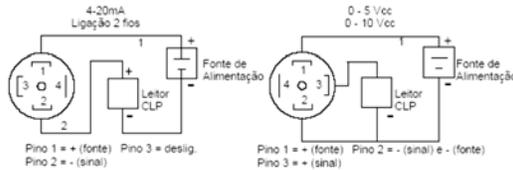
### CARACTERÍSTICAS:

- Grau de Proteção do Invólucro:..... IP-65 (opcional IP-68 prensa cabo).
- Material do Invólucro:..... Aço inoxidável AISI 304 (316 opcional).
- Vedações:..... Anéis o ring, borracha nitrílica.
- Conector:..... DIN 43650.
- Tipo de Sensor:..... Piezorresistivo.
- Sobrepressão (em pico):..... 1 X Fundo de escala.
- Sinal de Saída:..... 4 - 20 mA (opcional: 0 - 5 Vcc / 0 - 10 Vcc) Outros especificar.
- Precisão do Sinal:..... < 0,1%.
- Resolução da Saída Analógica:..... Infinita.
- Temperatura do Fluido:..... -10 +80°C (opcional até 400°C).
- Temperatura do Invólucro:..... 55°C.
- Zero e Span:..... Ajustáveis 20% F.E.
- Vida Útil:..... 70 X 10<sup>6</sup>.
- Precisão, Histerese, Repetibilidade, Linearidade:..... 0,5% F.E. (Opcional: 0,25% F.E ou 0,1% F.E).
- Alimentação:..... 15 à 30 Vcc.
- Proteção total contra a rádio frequência (RF) e inversão de polaridade.
- Proteção contra surtos incorporada ao transmissor (opcional).
- Para grau de proteção IP-68 informar comprimento do cabo.

### DIMENSÕES:



### ESQUEMA DE LIGAÇÃO:



## PS15-30GM50-A



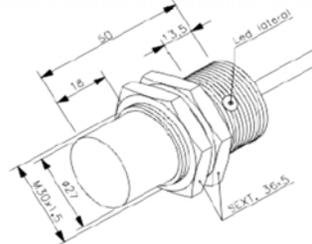
### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Substituído por	PS15-30GI50-A
Part Number Substituto	50403933
Dilâmetro	30 mm
Tipo de rosca	M30 x 1,5mm
Distancia sensora Sn	15 mm
Distancia operacional Sa	12,15 mm
Alvo padrão	45x45 mm
Histerese	±5 %
Repetibilidade	<0,01 mm
Frequência de comutação máxima	100 Hz
Montagem	não embutida
Configuração elétrica	CC - NPN
Tipo de contato	NA + NF
Número de fios	4 Fios
Tensão de alimentação	10 a 30Vcc
Ripple	±10 %
Corrente de consumo	<15 mA
Proteção de saída	curto-circuito e inversão
Corrente máxima de chaveamento	200 mA
Queda de tensão no sensor (carga energizada)	<2 V
Sinalização	led lateral
Grau de proteção	IP 67
Temperatura de operação	- 25 °C a + 70 °C
Peso	205 g
Invólucro	metálico roscaado
Opções de invólucro	GX (inox),GT (PTFE), GP (plástico)
Opções de comprimento do tubo	50,70 mm
Conexão	cabo
Opções de cabo	PUR
Opções de comprimento do cabo	PVC 6 m

### Modelo PS15-30GM50-A



### Dimensões Mecânicas



### Configuração Elétrica

