

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DO PRINCÍPIO DE TORÇÃO POR ATRITO
PARA ADENSAMENTO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR
EM CORDAS**

HENRIQUE LEANDRO SILVEIRA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DO PRINCÍPIO DE TORÇÃO POR ATRITO
PARA ADENSAMENTO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR
EM CORDAS**

Dissertação de Mestrado submetida à
banca examinadora para obtenção do título
de mestre em Engenharia Agrícola, na área
de concentração em Máquinas Agrícolas.

HENRIQUE LEANDRO SILVEIRA
Orientador: Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

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

Si39u Silveira, Henrique Leandro
Utilização do princípio de torção por atrito para
adensamento da palha de cana-de-açúcar em cordas /
Henrique Leandro Silveira. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

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

1. Resíduos agrícolas. 2. Densidade. 3. Bobinas. 4.
Energia da biomassa. I. Braunbeck, Oscar Antonio. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Use of the principle of torsion by friction for compaction of
the sugarcane straw into ropes

Palavras-chave em Inglês: Agricultural residues, Density, Bobbin, Energy
from biomass

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

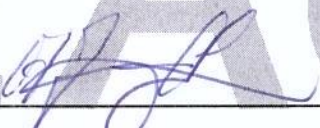
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Oscar Antonio Braunbeck, Franco Giuseppe Dedini,
Paulo Sergio Graziano Magalhães

Data da defesa: 24/02/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Henrique Leandro Silveira**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini – Membro Titular
FEM/Unicamp**



**Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

*A Deus acima de tudo,
Aos meus pais, Lucas e Eliana, pelos valores humanos ensinados, pela educação nos
primeiros passos e pelos esforços frutíferos despendidos ao longo da vida,
Ao meu irmão Rodrigo, pelos incentivos e todas as conquistas,
A toda minha família,*

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por tudo o que tenho recebido ao longo dos anos.

Aos meus pais, pelo amor sem limites e contínuo incentivo nos estudos. Ao meu irmão, pela grande amizade, apoio, companhia e aprendizado conjunto proporcionado. A toda minha família, pelo apoio, motivação e participação em todos os momentos.

Ao professor Oscar Antonio Braunbeck, pela orientação no projeto, pela confiança depositada, pelos ensinamentos e amizade. Ao professor Paulo Sergio Graziano Magalhães, pela orientação na condução dos experimentos, na supervisão do estágio docência e pelo apoio incondicional em todas as etapas do mestrado. Aos professores Inácio Maria Dal Fabbro e Nelson Bryan, pelo aprendizado, conselhos e contínuo apoio.

Aos amigos de laboratório Francelino Rodrigues, Thiago Brasco, Luís Barbosa, Leonardo Queirós e Deborah Silva, pela companhia, apoio e troca de conhecimentos durante toda a caminhada. Agradeço em especial ao Thiago, pelas brilhantes sugestões, disposição, iniciativa e participação ativa na execução dos experimentos. Ao companheiro Douglas Frabetti, pelas valiosas trocas de informações a respeito do projeto.

À equipe do Laboratório de Protótipos, José Maria, Luiz Carlos, Devis e Francisco, pelo auxílio na construção do protótipo e pela amizade proporcionada. Aos funcionários das Secretarias de Graduação, Pós-graduação, e da Seção de Suporte da Feagri, pelo eficiente trabalho despendido.

Ao grande amigo e companheiro Célio Moreira Ricardo, que mesmo afastado pela distância, esteve presente em vários momentos.

A todos os professores da FEAGRI que participaram direta ou indiretamente da nossa formação profissional. Aos professores da UFLA Sergio Martins de Souza e Carlos Eduardo Silva Volpato, que deram início à minha carreira e por acreditarem no meu potencial acadêmico. Aos alunos das disciplinas em que atuei no estágio docência, pelos conhecimentos trocados, amizade e pela grande experiência acadêmica gerada.

À Capes pela concessão da bolsa de estudos, e à Fapesp pelo suporte financeiro destinado à realização do projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. O problema e sua importância	1
1.2. Hipótese	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Gerais.....	2
1.3.2. Específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Sistemas de colheita de cana-de-açúcar.....	4
2.2. Recuperação e adensamento da palha de cana-de-açúcar	5
2.3. Princípios de adensamento de materiais fibrosos	8
2.3.1. Briquetagem	8
2.3.2. Peletização	11
2.3.3. Enfardamento cilíndrico ou prismático	13
2.3.4. Prensa para grandes fardos	15
2.3.5. Picado a granel e colheita integral.....	16
2.4. Comportamento do coeficiente de atrito de forrageiras	18
2.5. Comportamento mecânico do palhicho quando submetido à compressão	19
2.6. Teoria dos fios têxteis.....	26
2.6.1. Hierarquia dos componentes das cordas.....	26
2.6.2. Princípio de formação e resistência mecânica dos fios	26
2.6.3. Compactação das fibras devido à torção	30
2.6.4. Parâmetros práticos utilizados para quantificação dos fios	31
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Considerações iniciais	33
3.2. Protótipo virtual do adensador de palha de cana-de-açúcar	33
3.3. Princípio de operação do protótipo.....	34
3.4. Forças aplicadas pelo cilindro torçor durante o processo de adensamento	35
3.5. Capacidade de processamento do protótipo	37
3.6. Modelo matemático: relação entre pressão radial e torque aplicado na corda	38
3.6.1. Considerações iniciais	38
3.6.2. Hipóteses adotadas	39
3.6.3. Configuração helicoidal teórica da corda	39
3.6.4. Análise das forças radiais atuantes	41
3.6.5. Forças atuantes sobre o elemento da corda	43
3.6.6. Equilíbrio radial.....	44
3.6.7. Cálculo da distribuição de tensão radial na corda	46
3.7. Relação entre velocidade linear da corda e velocidade de rotação do cilindro torçor....	49
3.8. Densidade teórica da bobina formada com corda de palha	51
3.9. Materiais e equipamentos utilizados.....	53
3.10. Métodos para avaliação dos resultados e planejamento da experimentação	54

3.10.1. Considerações iniciais	54
3.10.2. Características e instrumentação da unidade de testes	54
3.10.3. Preparo das amostras	57
3.10.4. Pré-ensaios.....	58
3.10.5. Planejamento experimental	61
3.10.6. Determinação da densidade aparente e linear das amostras de palha.....	61
3.10.7. Determinação dos dados de torque nos ensaios de corda inteira.....	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. Densidade aparente e linear	66
4.2. Torque aplicado nos feixes	69
4.3. Força axial	72
4.4. Relação entre pressão radial e densidade aparente.....	75
4.5. Ensaios de corda inteira.....	78
4.6. Curvas de relaxação.....	81
4.7. Densidade teórica da bobina.....	83
5. PRÉ-REQUISITOS DEMANDADOS PELO PRINCÍPIO PROPOSTO.....	86
6. CONCLUSÕES	88
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
9. ANEXOS	95
9.1. Programa MATLAB para a simulação do modelo da corda torcida	95
9.2. Programa MATLAB para a simulação da densidade teórica da bobina.....	96
9.3. Repetições das curvas de torque para corda inteira.....	97
9.3.1. Curvas de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.....	97
9.3.2. Curvas de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.....	98
9.4. Curvas de relaxação de torque.....	101
9.4.1. Curvas de relaxação de torque para diâmetro de 55 mm.....	101
9.4.2. Curvas de relaxação de torque para diâmetro de 35 mm.....	104
10. APÊNDICES	108
10.1. Teorema sobre os ângulos formados entre retas tangentes e perpendiculares às hélices	108
10.2. Teorema sobre a resultante de forças iguais e opostas fazendo um pequeno ângulo entre si	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Briquetadora de pistão acionada por biela-manivela.	9
Figura 2: Prensa de rosca extrusora cônica.	10
Figura 3: Esquema de adensamento por rolo e matriz.	12
Figura 4: Esquema de adensamento utilizando pistão e biela-manivela.	13
Figura 5: Enfardadora de fardos prismáticos.	14
Figura 6: Enfardadora de fardos cilíndricos.	14
Figura 7: Esquema de adensamento por prensa hidráulica.	16
Figura 8: Prensa de fardos gigantes. (a) prensagem de palhico; (b) prensagem de algodão.	16
Figura 9: Esquema de picagem de recolhadora de forragens.	17
Figura 10: Recolhimento de palhico. (a) Máquina forrageira recolhendo palhico. (b) Descarregamento no pátio da usina.	17
Figura 11: Protótipo baseado no princípio de adensamento por helicóides cônicos.	19
Figura 12: Relação experimental obtida para a densidade e pressão aplicada.	22
Figura 13: Dispersão dos dados obtidos para o coeficiente de atrito.	24
Figura 14: Comportamento da pressão normal com o aumento da pressão aplicada.	25
Figura 15: Hierarquia da corda.	26
Figura 16: Efeito da torção na resistência à tração do fio.	28
Figura 17: Fenômeno de “ <i>snarling</i> ”	29
Figura 18: Fabricação de um fio retorcido utilizando a dupla torção.	29
Figura 19: Migração de fibras da camada externa para a interna.	30
Figura 20: Seção transversal compactada de fio de nylon.	31
Figura 21: Seção transversal de fio produzido com fibras de algodão.	31
Figura 22: Protótipo virtual do adensador.	34
Figura 23: Diagrama de corpo livre do segmento de corda no interior do cilindro torçor.	36
Figura 24: Geometria teórica da corda helicoidal. (a) geometria idealizada; (b) diagrama planificado de um cilindro de raio “ <i>r</i> ”; (c) planificação da camada externa da corda.	40
Figura 25: Forças atuantes na corda. (a) corda torcida helicoidalmente mostrando os elementos definidos por dr , $d\phi$, dz ; (b) vista ampliada do elemento.	42
Figura 26: Torque aplicado nas extremidades de um segmento de corda.	46
Figura 27: Transformação das tensões de cisalhamento em tensões de tração e compressão.	47
Figura 28: Esquema de bobina produzida com corda de palha.	51
Figura 29: Unidade de testes construída.	55
Figura 30: Detalhes do cilindro torçor e do dispositivo redutor de diâmetro.	55
Figura 31: Sistema de aquisição de dados e dispositivo para medição da força axial.	56
Figura 32: Ordenamento das folhas secas.	57
Figura 33: Amostras de palha preparadas com 0,70 m de comprimento.	58
Figura 34: Influência da velocidade de rotação no torque.	59
Figura 35: Pré-ensaios com palhico proveniente dos extratores da colhedora.	60
Figura 36: Medição das massas dos feixes em balança de precisão.	62
Figura 37: Dispositivo instalado no feixe torcido e impermeabilizado.	63
Figura 38: Amostra impermeabilizada com ângulo de inclinação das folhas realçado.	64
Figura 39: Seção transversal dos feixes torcidos de 55 mm. Sequencia de 300 g à esquerda para 150 g à direita, com as repetições na vertical.	67
Figura 40: Seção transversal dos feixes torcidos de 35 mm. Sequencia de 130 g à esquerda para 60 g à direita, com as repetições na vertical.	68

Figura 41: Curva torque-densidade aparente para o diâmetro de 55 mm.....	70
Figura 42: Curva torque-densidade aparente para o diâmetro de 35 mm.....	71
Figura 43: Curva torque-densidade linear para o diâmetro de 55 mm.	71
Figura 44: Curva torque-densidade linear para o diâmetro de 35 mm.	72
Figura 45: Vista superior do cone alimentador. Força axial necessária para tracionar o feixe pelo gargalo do cilindro torçor.	74
Figura 46: Curva força axial-densidade aparente para o diâmetro de 55 mm.	74
Figura 47: Curva força axial-densidade aparente para o diâmetro de 35 mm.	75
Figura 48: Relação entre a pressão radial e densidade aparente para o diâmetro de 55 mm. ...	77
Figura 49: Relação entre a pressão radial e densidade aparente para o diâmetro de 35 mm. ...	78
Figura 50: Registro de dados durante a formação contínua de corda com 55 mm de diâmetro.	80
Figura 51: Variação no torque durante o adensamento da corda com diâmetro de 55 mm.	81
Figura 52: Variação no torque durante o adensamento da corda com diâmetro de 35 mm.	81
Figura 53: Curva de relaxação média de torque para o feixe de 300 g.	82
Figura 54: Curva de relaxação média de torque para o feixe de 130 g.	82
Figura 55: Corda estruturada sendo desenrolada da bobina.	83
Figura 56: Curva de densidade aparente da bobina formada com corda, obtida por simulação.	84
Figura 57: Rompimento da corda devido às zonas de fratura.	87
Figura 58: Repetição 2 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.	97
Figura 59: Repetição 3 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.	97
Figura 60: Repetição 4 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.	98
Figura 61: Repetição 2 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.	99
Figura 62: Repetição 3 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.	99
Figura 63: Repetição 4 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.	100
Figura 64: Curva de relaxação de torque para o feixe de 150 g.	101
Figura 65: Curva de relaxação de torque para o feixe de 175 g.	101
Figura 66: Curva de relaxação de torque para o feixe de 200 g.	102
Figura 67: Curva de relaxação de torque para o feixe de 225 g.	102
Figura 68: Curva de relaxação de torque para o feixe de 250 g.	103
Figura 69: Curva de relaxação de torque para o feixe de 275 g.	103
Figura 70: Curva de relaxação de torque para o feixe de 60 g.	104
Figura 71: Curva de relaxação de torque para o feixe de 70 g.	104
Figura 72: Curva de relaxação de torque para o feixe de 80 g.	105
Figura 73: Curva de relaxação de torque para o feixe de 90 g.	105
Figura 74: Curva de relaxação de torque para o feixe de 100 g.	106
Figura 75: Curva de relaxação de torque para o feixe de 110 g.	106
Figura 76: Curva de relaxação de torque para o feixe de 120 g.	107
Figura 77: Ângulo formado por duas hélices. (a) hélices deslocadas de um ângulo β , (b) projeções das hélices no plano.	108
Figura 78: Duas forças concorrentes a um eixo.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Custo total do palhiço colocado na usina, em dois tratamentos analisados	7
Tabela 2: Requisitos energéticos de briquetadora.	11
Tabela 3: Densidade aparente dos fardos prismáticos e cilíndricos	15
Tabela 4: Valores máximos de coeficiente de atrito.....	19
Tabela 5: Código de identificação dos parâmetros experimentais	20
Tabela 6: Distribuição nos tratamentos, massas e umidades dos parâmetros experimentais	20
Tabela 7: Parâmetros de ajuste para a densidade aparente	22
Tabela 8: Parâmetros de ajuste para o coeficiente de atrito	23
Tabela 9: Parâmetros de ajuste para a pressão normal	25
Tabela 10: Análise descritiva para os dados de densidade aparente	66
Tabela 11: Análise descritiva para os dados de densidade linear.....	68
Tabela 12: Análise descritiva para os dados de torque.....	69
Tabela 13: Análise descritiva para os dados de força axial.....	73
Tabela 14: Análise descritiva para os dados de diâmetro.....	76
Tabela 15: Análise descritiva para os dados do ângulo de inclinação da hélice	76
Tabela 16: Análise descritiva para os dados de demanda de torque	78
Tabela 17: Resultado da simulação para a densidade aparente teórica da bobina	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos:

A_c : área da seção transversal da corda [m^2]
 c : parâmetro indicativo da inclinação vertical das fibras na corda [adimensional]
 d : diâmetro da corda [m]
 D : diâmetro do carretel de enrolamento da corda [m]
 D_e : diâmetro equivalente do segmento de corda [m]
 D_{ext} : diâmetro externo da bobina [m]
 F : força resultante axial exercida na corda [N]
 f_a : força de atrito axial desenvolvida na corda [N]
 f_t : força de atrito tangencial desenvolvida na corda [N]
 G : tensão de compressão aplicada nas faces comprimidas da corda [N.m^{-2}]
 h : altura correspondente ao passo de hélice [m]
 H : altura da bobina [m]
 H_c : altura do segmento de corda [m]
 J : momento de inércia polar da corda [m^4]
 l : comprimento da fibra em um passo de hélice, no raio r [m]
 L : comprimento da fibra em um passo de hélice, no raio R [m]
 m : massa total da corda [kg]
 m_c : massa do segmento de corda [kg]
 N : número de camadas concêntricas de enrolamento da corda [adimensional]
 n : número de voltas da corda ao longo do eixo da bobina [adimensional]
 N_c : força normal aplicada pelo cilindro torçor na corda de palha [N]
 Q_m : vazão mássica de palha [kg.s^{-1}]
 r : raio do cilindro contendo o caminho helicoidal de uma determinada fibra [m]
 R : raio externo da corda de palha [m]
 S : comprimento total da corda enrolada em hélice [m]
 T : torque aplicado na corda [N.m]
 T_w : torção da corda, expressa em voltas por unidade de comprimento [m^{-1}]
 u : parâmetro indicativo da posição radial da corda [adimensional]
 V : volume da bobina [m^3]
 v_c : velocidade linear da corda [m.s^{-1}]
 V_c : volume do segmento de corda [m^3]
 X : tensão de tração aplicada nas faces tracionadas da corda [N.m^{-2}]

Símbolos gregos:

α : ângulo de hélice na camada mais externa da corda, correspondente ao ângulo formado entre o eixo de uma fibra localizada na camada concêntrica externa e a linha paralela ao eixo da corda [rad]
 ϕ : ângulo de afastamento das extremidades da hélice [rad]
 μ : coeficiente de atrito entre o cilindro torçor e a palha [adimensional]
 λ_c : densidade linear da corda de palha [kg.m^{-1}]
 σ : tensão de tração desenvolvida ao longo das fibras na corda [N.m^{-2}]
 ρ_{bobina} : densidade aparente da bobina [kg.m^{-3}]
 ρ_c : densidade aparente da corda de palha [kg.m^{-3}]
 θ : ângulo de hélice da camada concêntrica no raio r [rad]

τ : tensão de cisalhamento devido à torção [N.m^{-2}]
 ω : velocidade de rotação do cilindro torçor [rad.s^{-1}]

RESUMO

A palha da cana-de-açúcar apresenta um grande potencial para ser utilizada na co-geração de energia. Entretanto, essa energia disponível não tem sido totalmente aproveitada nas usinas, em parte devido aos custos elevados relacionados ao seu transporte do campo para a indústria, e em parte associado às deficiências no mercado de máquinas específicas para o seu recolhimento e adensamento. A palha *in natura* apresenta baixas densidades, o que eleva os custos de transporte e armazenamento, dado pela subutilização de carga dos caminhões e espaço físico dos pátios. O que se tem praticado nas usinas é a tentativa do uso de máquinas forrageiras e enfardadoras, que foram projetadas para a cultura do feno, resultando assim em baixos rendimentos operacionais quando utilizadas com palha de cana-de-açúcar, além de incorporar matéria mineral indesejável. Pesquisas revelaram que a corda de amarração utilizada para inibir a relaxação dos fardos prismáticos e cilíndricos provenientes das enfardadoras é responsável por 40% dos custos totais destes processos. Neste trabalho é proposto um novo princípio de adensamento para a palha de cana-de-açúcar, onde as folhas são compactadas mediante aplicação de torção visando à formação de corda contínua, que pode ser enrolada em bobinas dispensando assim os complexos sistemas de amarração das enfardadoras. A densidade teórica alcançada pela bobina formada com a corda de palha foi estimada por modelos matemáticos. Uma abrangente modelagem envolvendo as forças de compactação na corda devidas à torção é apresentada. Foram realizados experimentos em protótipo correlacionando o torque aplicado na corda com a sua densidade aparente, além de ensaios envolvendo a formação de corda contínua, visando avaliar as condições de viabilidade técnica do processo. Os resultados obtidos indicaram que foi viável tecnicamente a formação de corda contínua e estruturada a partir de folhas secas de cana-de-açúcar utilizando o princípio de torção originada por atrito; a densidade aparente da corda de palha ficou próxima das densidades aparentes dos fardos cilíndricos e prismáticos obtidos pelas enfardadoras convencionais; a demanda de torque foi menor para a corda de menor diâmetro; a densidade aparente teórica da bobina foi inferior às densidades aparentes dos fardos cilíndricos; todos os ensaios apresentaram relaxação de torque no decorrer do tempo; o princípio apresenta limitações e demanda pré-requisitos indispensáveis para o perfeito funcionamento.

Palavras-chave: resíduos agrícolas; densidade; bobina; energia da biomassa.

ABSTRACT

Sugar cane straw presents a great potential to be used in energy cogeneration. However, this potential has not been fully explored at the mills, in part due to the high costs associated with transport from field to industry, and partly linked to the market deficiencies of specific equipment for their recovery and compaction. The straw *in nature* presents low density, which increases the cost of transport and storage, due to the sub utilization of load capacity trucks and requirement of space in the courtyards. What has been practiced at mills are some experiments using forages and balers machines, which were designed for hay harvesting, resulting in lower operating income when used for sugar cane straw, as well as incorporating undesirable mineral matter. Research showed that the mooring rope used to inhibit the relaxation of prismatic and cylindrical bales from the balers is responsible for 40% of the total costs of these processes. This dissertation presents a proposes of a new principle for sugar cane straw compaction, where the leaves are compressed by applying torque in order to form a continuous yarn that can be wrapped into coils without complex balers mooring systems. The theoretical density achieved by the coil formed with straw rope was estimated by mathematical models. A comprehensive modeling involving the compression forces on the rope due to torsion is presented. Experiments were carried out using a prototype in order to observe the torque applied to the rope with its density correlation. Experiments involving the formation of continuous rope, to evaluate the technical feasibility of the process were also conducted. The results indicated that it was technically possible to form a continuous and structured rope from dry leaves of sugar cane using the principle of torque originate by friction; the density of straw rope was close to the apparent densities of the cylindrical and prismatic bales obtained by conventional balers; the torque demand was lower for ropes with smaller diameter; the theoretical density of the coil was less than the apparent densities of the bale; all trials showed relaxation of torque over time; the principle is limited and demand pre-established parameters for its perfect operation.

Keywords: agricultural residues; density; bobbin; energy from biomass.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O problema e sua importância

Pesquisas revelam que a palha da cana-de-açúcar é uma fonte abundante e renovável de energia. Entretanto essa energia não tem sido completamente recuperada para ser utilizada de forma econômica, pois em alguns locais a palha ainda é queimada nos canaviais como prática de pré-colheita, ou então é deixada sobre o solo como cobertura morta, servindo de proteção contra erosão hídrica.

Recentemente foi firmado pelo Governo do Estado de São Paulo e entidades ligadas ao setor sucroalcooleiro, o Protocolo Agroambiental, que defende a extinção da queima de palha de cana-de-açúcar. O documento estabelece prazos para o fim das queimadas nos canaviais em São Paulo e estipula ações de sustentabilidade ambiental. Torna-se evidente a necessidade e urgência do desenvolvimento de alternativas que viabilizem de forma técnica e econômica a colheita de cana crua, contemplando o aproveitamento da energia contida na biomassa da palha para geração de energia.

Existem grandes deficiências no mercado quanto às máquinas específicas para o recolhimento e adensamento da palha da cana-de-açúcar, sem que haja contaminação da mesma com solo e/ou matéria estranha. A solução praticada atualmente tem sido o uso de enfardadoras de fardos prismáticos ou cilíndricos convencionais (provenientes da cultura do feno), que são máquinas complexas, pouco versáteis e de baixo rendimento operacional, inadequada para um possível trabalho conjugado com a colhedora de cana-de-açúcar, devido principalmente à sua robustez. Ressalta-se ainda que essas enfardadoras incorporam matéria mineral indesejável na palha, visto que a mesma entra em contato com o solo antes de ser recolhida e adensada. O uso da palha enfardada ainda traz o inconveniente da necessidade de trituração dos fardos antes dos mesmos serem alimentados à caldeira da usina, visando à homogeneização do resíduo agrícola.

Paralelamente às limitações das máquinas hoje disponíveis, existem os problemas associados ao processo de adensamento da palha. As baixas densidades da palha encontrada no campo limitam economicamente o seu transporte até os locais da sua utilização. Há também restrições impostas pela legislação de trânsito brasileira, que estabelece limites relacionados à massa e ao volume que os veículos de transporte de carga podem movimentar com segurança, de acordo com suas capacidades de carga e dimensões. Neste sentido, o

adensamento desse material viabiliza o seu transporte para maiores distâncias e nos próprios caminhões disponíveis nas usinas, reduzindo consideravelmente os custos associados à retirada da palha do campo e ao seu transporte, permitindo recolher e transportar mais material por unidade de tempo e volume.

Diante dos problemas apontados, uma possível solução contemplaria o recolhimento e adensamento da palha sem enfardá-la e durante a própria colheita da cana crua, evitando que a mesma entre em contato com o solo. Dessa forma, surge a necessidade de desenvolver um adensador compacto de palha que opere em regime contínuo, apresentando peso e dimensões reduzidos, além de complexidade construtiva relativamente simples, viabilizando o seu acoplamento diretamente à colhedora de cana crua.

Neste trabalho é proposto e avaliado um novo princípio de adensamento para a palha de cana-de-açúcar, tendo como foco a construção de um adensador simples e compacto.

1.2. Hipótese

É possível formar uma corda estruturada e adensada de palha de cana-de-açúcar aplicando torção originada de atrito, e evitar o seu relaxamento enrolando continuamente a corda em bobinas, dispensando sistemas de amarração.

1.3. Objetivos

1.3.1. Gerais

Projetar e construir um protótipo baseado no princípio proposto, levantar dados experimentais sobre o comportamento da densidade devido ao torque, avaliar seu desempenho operacional e comparar, em termos de densidade e estabilidade, as cordas de palha com os fardos provenientes das enfardadoras convencionais.

1.3.2. Específicos

- Desenvolver e simular um modelo matemático do processo de adensamento da palha, contemplando as tensões de compactação atuantes na corda torcida quando submetida à torção;

- Projetar, construir e instrumentar um protótipo de testes visando à avaliação do processo de adensamento;

- Planejar e realizar experimentos no protótipo para levantamento de dados experimentais que relacionam o torque aplicado com a densidade alcançada, e de demanda de torque durante a formação de corda inteira;

- Comparar os dados experimentais de densidade aparente da corda com os dados de literatura referentes à densidade dos fardos obtidos com as enfardadoras convencionais;

- Simular a densidade teórica da bobina formada com a corda de palha;

- Verificar a viabilidade técnica e as condições de operação do princípio proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de colheita de cana-de-açúcar

A palha da cana-de-açúcar, recurso rico e abundante no Brasil, pode ser aproveitada tanto para fins agrônômicos quanto para fins de geração de energia. Quando picada e lançada à superfície do solo durante a operação de colheita, é utilizada como cobertura vegetal no sistema de plantio direto, influenciando, dentre outros fatores, o microclima, a microfauna, e o controle da erosão e da umidade do solo.

Atualmente outra destinação que tem sido dado à palha é a geração de energia nas usinas sucroalcooleiras. A palha da cana-de-açúcar pode ser diretamente queimada nas fornalhas das caldeiras, visando à obtenção de energia térmica e elétrica necessária para o acionamento dos equipamentos industriais. Estudos recentes indicaram viabilidade técnica de conversão da celulose presente na biomassa da cana-de-açúcar em álcool, através de processos químicos de quebra de moléculas (etanol de segunda e terceira geração).

Como ambos os aproveitamentos são viáveis e benéficos do ponto de vista ambiental, o que se tem praticado é a recuperação de parte da palha do canavial para fins de aproveitamento energético, sendo deixada no campo a parcela restante, visando à conservação do solo.

Quando a rota de destino da palha é a geração de energia, planejamentos logísticos tornam-se necessários, a fim de fornecer métodos adequados de recuperação e transporte do material disponível no campo para a indústria. A atual recuperação da palha no campo tem sido praticada através de dois principais processos: enfardamento e colheita integral.

No sistema de enfardamento, durante a colheita da cana-de-açúcar a palha é separada mecanicamente dos colmos e picada em tamanhos reduzidos, e os extratores das colhedoras lançam o material diretamente ao solo, onde ficam expostos para secagem natural. Após aproximadamente 10 dias de secagem, máquinas enleiradoras são utilizadas para reunir o material espalhado no solo, formando leiras de maior densidade linear. Em seguida, máquinas enfardadoras - concebidas originalmente para a cultura do feno, recolhem e adensam mecanicamente a palha enleirada, formando fardos prismáticos ou cilíndricos de dimensões compatíveis com a necessidade. Geralmente os fardos são deixados no campo à medida que são formados, e posteriormente recolhidos com o auxílio de guas e transportados por caminhões. Outro processo também utilizado consiste no recolhimento das leiras de palha

utilizando máquinas forrageiras, onde o material é picado e lançado em queda livre diretamente ao caminhão, que fará o transporte da matéria-prima até o pátio de armazenamento da usina.

No sistema de colheita integral, palha e cana são colhidos conjuntamente utilizando colhedoras convencionais, sendo transportadas por caminhões (geralmente de duas ou três caçambas) até a indústria. Na usina, a palha é separada dos colmos através de mecanismos de limpeza a seco, utilizando dispositivos pneumáticos e mecânicos, e encaminhada posteriormente para armazenamento a fim de ser aproveitada nos períodos de entressafra.

2.2. Recuperação e adensamento da palha de cana-de-açúcar

Diversos estudos apontam uma estreita relação entre a queima descontrolada de biomassa e o número de internações hospitalares, devido à exposição de material particulado no ar em variadas concentrações e constituições, provocando forte poluição atmosférica nas regiões onde acontecem a queimada (ARBEX et al., 2004).

No interior do Estado de São Paulo, problemas respiratórios em jovens e adultos são diagnosticados com bastante frequência na época de safra, onde a palha é queimada visando principalmente o aumento da produtividade nas operações de colheita manual ou mecânica da cana-de-açúcar (LOPES & RIBEIRO, 2006). Esta prática de pré-colheita também tem efeitos negativos sobre a microfauna do solo e na população de insetos que habitam o canavial, provocando a mortalidade de larvas e insetos adultos, ocasionando assim um desequilíbrio no ecossistema local, conforme relatam os estudos de Macedo & Araújo (2000).

Apesar de ainda ser eliminada do canavial através da queima, a palha da cana-de-açúcar tem potencial para ser largamente aproveitada como recurso energético, dada a sua grande disponibilidade no campo e também pela sua quantidade de energia disponível - cerca de 17 MJ.kg⁻¹ (SEABRA, 2008).

Diante de tais circunstâncias, e considerando o potencial energético da palha e os prejuízos que as queimadas têm causado ao meio ambiente, o Governo do Estado de São Paulo criou a Lei Estadual de Queima (nº 11.241/02), que prevê a redução gradual das queimadas nas áreas mecanizáveis e não-mecanizáveis (acima de 12% de declividade) nos canaviais. O Decreto do Governo Federal nº 2.661, de julho de 1998, traz previsões de eliminar as queimadas em áreas mecanizáveis até 2018.

Um protocolo assinado em 2007 pelas Secretarias do Meio Ambiente e da Agricultura e Abastecimento, conjuntamente com a União da indústria da cana-de-açúcar - o Protocolo Agroambiental, foi estabelecido com o objetivo de antecipar o prazo de extinção das queimadas nos canaviais do Estado de São Paulo, em relação aos prazos estipulados na Lei Estadual de Queima. Apesar de o protocolo não ter a força da Lei nº 11.241/02, grande parte das usinas produtoras de açúcar e álcool já aderiram espontaneamente ao acordo, refletindo a preocupação ambiental e os interesses na co-geração de energia dos empresários ligados ao setor sucroalcooleiro.

Novas propostas de colheita são sugeridas por Braunbeck & Oliveira (2006) visando o aproveitamento dos resíduos agrícolas que até recentemente não faziam parte do processo como um produto a ser preservado. Os autores sugerem que durante a colheita de cana deve-se contemplar a recuperação e o transporte da palha sob condições satisfatórias de densidade e níveis de contaminação com solo. A palha da cana-de-açúcar, ao entrar em contato com o solo durante a secagem natural, incorpora indesejáveis quantidades de matéria mineral - podendo chegar a 10% nos casos mais críticos, elevando os custos de transporte e causando prejuízos associados à corrosão e abrasão das tubulações industriais durante o seu processamento.

Entretanto existem limitações tanto nas etapas de recolhimento quanto na fase de adensamento da palha. Na ausência de máquinas específicas para a sua recuperação, o que se tem praticado atualmente é a utilização de máquinas forrageiras (autopropelidas ou não) para retirar a palha do solo e lançá-la ao transbordo, para então ser transportada até a indústria. Entretanto, essas máquinas não foram projetadas para processar o alto volume de material proveniente dos canaviais, e assim ocasionam perda de desempenho operacional e elevação dos custos de recuperação.

O adensamento da palha tem sido um fator de grande importância na redução de custos de produção. A palha seca apresenta densidade da ordem de 20 a 50 kg.m⁻³ (SOKHANSANJ et al., 2005). Com baixas densidades, os custos de transporte e de armazenamento tornam-se elevados, dada a subutilização da capacidade dos caminhões e do espaço físico no pátio da usina. Dessa forma, o fator adensamento é uma variável com potencial para otimizar o rendimento dos caminhões e dos locais de armazenamento.

Em estudos conduzidos por Michelazzo (2005), foram analisadas características técnicas e econômicas associadas ao processo de recolhimento e adensamento dos resíduos de

colheita da cana-de-açúcar, tais como densidade final alcançada e complexidade das máquinas envolvidas em cada sistema de recolhimento. O autor concluiu que dentre os sistemas analisados, o sistema de colheita integral apresentou o menor custo de recolhimento, tanto para distâncias pequenas como para grandes distâncias, seguido pelos sistemas de picagem a granel, enfardamento cilíndrico, prensagem, peletização e briquetagem.

Um dos fatores que elevam os custos de adensamento está associado ao processo utilizado na inibição de relaxação do material (uso de calor, aglutinantes ou cordões de amarração). Ao investigarem os custos do processo de enfardamento cilíndrico, Michelazzo & Braunbeck (2008) concluíram que o cordão de amarração dos fardos foi o componente de maior expressão, contribuindo com cerca de 40% do custo total. Esta análise sugere que um processo auto-inibitivo seria desejável do ponto de vista econômico, uma vez que reduziria os custos associados ao material de amarração dos fardos.

Em trabalho realizado por Franco (2003), cujo objetivo foi determinar o custo total do palhiço entregue na usina, pode-se observar que os custos associados ao enleiramento e recolhimento chegam a R\$ 10,37.t⁻¹, representando cerca de 48% do custo total do palhiço colocado na usina (R\$ 21,38.t⁻¹). A Tabela 1 fornece os custos em função das operações executadas.

Tabela 1: Custo total do palhiço colocado na usina, em dois tratamentos analisados

Operações	Tratamento 1 (R\$.t ⁻¹)	Tratamento 2 (R\$.t ⁻¹)
Enleiramento	1,20	0,49
Recolhimento	9,17	9,17
Transporte	8,90	8,90
Descarregamento	2,11	2,11
Total	21,38	20,67

Fonte: FRANCO (2003).

Frente ao exposto, esforços de otimização devem ser investidos mais especificamente nas etapas de recolhimento e adensamento dos resíduos de colheita, visando à redução de custos e o aumento do rendimento destas operações agrícolas.

2.3. Princípios de adensamento de materiais fibrosos

O processo de adensamento convencional de biomassa consiste na utilização de algum tipo de prensagem mecânica, visando à redução do volume de material vegetal e sua conversão em forma mais consistente, tornando mais adequados a manipulação e o armazenamento em relação à forma original. Há várias técnicas de adensamento, que podem produzir diferentes produtos finais (ERIKSSON & PRIOR, 1990; GONZÁLEZ & MUÑOZ, 2002). Dentre as técnicas disponíveis, aquelas mais adequadas para o adensamento de materiais fibrosos estão a briquetagem, a peletização, o enfardamento cilíndrico ou prismático e a prensagem de grandes fardos.

O adensamento mecânico pode ser classificado conforme o nível de pressão aplicado e também quanto à utilização de agentes aglutinantes, que tem como principal objetivo manter o produto final no estado compactado, conferindo consistência e coesão à matéria-prima.

Quanto aos níveis de pressão, o adensamento pode ser classificado como:

- baixa pressão: inferior a 5 MPa;
- pressão intermediária: entre 5 a 100 MPa;
- alta pressão: acima de 100 MPa.

Deve ser ressaltado que a elevação da pressão de adensamento está associada a um maior consumo energético do processo de compactação do material vegetal, influenciando diretamente nos custos de produção.

2.3.1. Briquetagem

O processo de briquetagem é caracterizado pela prensagem de alta pressão aplicada ao material fibroso, visando à formação de blocos cilíndricos bastante coesos e compactados. Os briquetes apresentam diâmetros acima de 30 mm - quando inferiores são denominados pellets, e alturas variáveis conforme a necessidade.

As pressões alcançadas na câmara de compressão da briquetadora são geralmente elevadas - cerca de 110 a 140 MPa. A alta pressão, conjugada ao atrito proveniente do deslizamento do resíduo em relação às paredes da câmara, geram calor intenso, elevando a temperatura de operação. Em tais condições, a parede celular do material vegetal chega a romper-se, liberando e fluidificando a lignina presente no tecido vegetal. A lignina, classificada como polímero termo-plástico, atua então como um agente aglutinador das fibras,

mantendo as partículas coesas quando a temperatura dos briquetes diminui, conferindo ao produto durabilidade e resistência. Nos processos de baixa pressão, uma fonte de calor externa pode ser aplicada diretamente na câmara de compressão, a fim de se obter a fluidificação do aglutinante natural.

Segundo Eriksson & Prior (1990), a densidade aparente dos briquetes é também elevada, podendo alcançar as faixas de 1450 a 1500 kg.m⁻³ nos casos extremos, sendo que nas condições usuais é da ordem de 1200 a 1400 kg.m⁻³. Os ganhos de densidade na briquetagem podem chegar a 210 vezes, dependendo da característica do material.

Os briquetes podem ser obtidos através de máquinas com diversas configurações. As mais comuns são as prensas de pistão com processo descontínuo acionadas por biela-manivela (Figura 1) ou mecanismo hidráulico, e as prensas com processo contínuo de rosca extrusora, podendo ser cilíndricas ou cônicas (Figura 2).

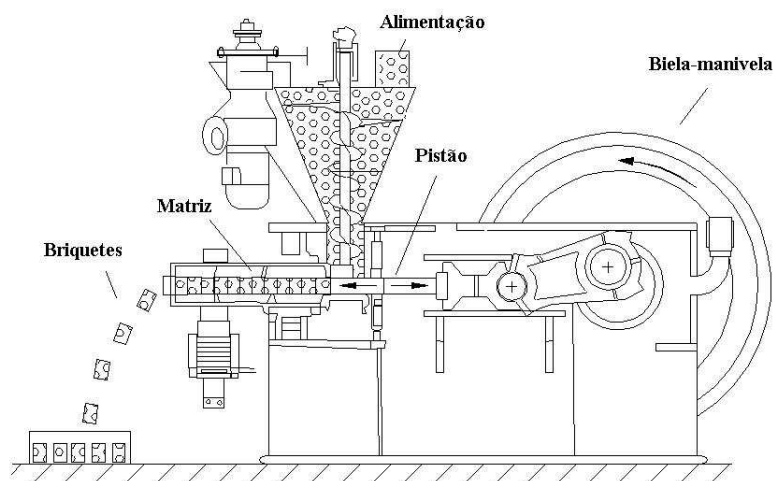


Figura 1: Briquetadora de pistão acionada por biela-manivela.
Adaptado de: ERIKSSON & PRIOR (1990) / MICHELAZZO (2005).

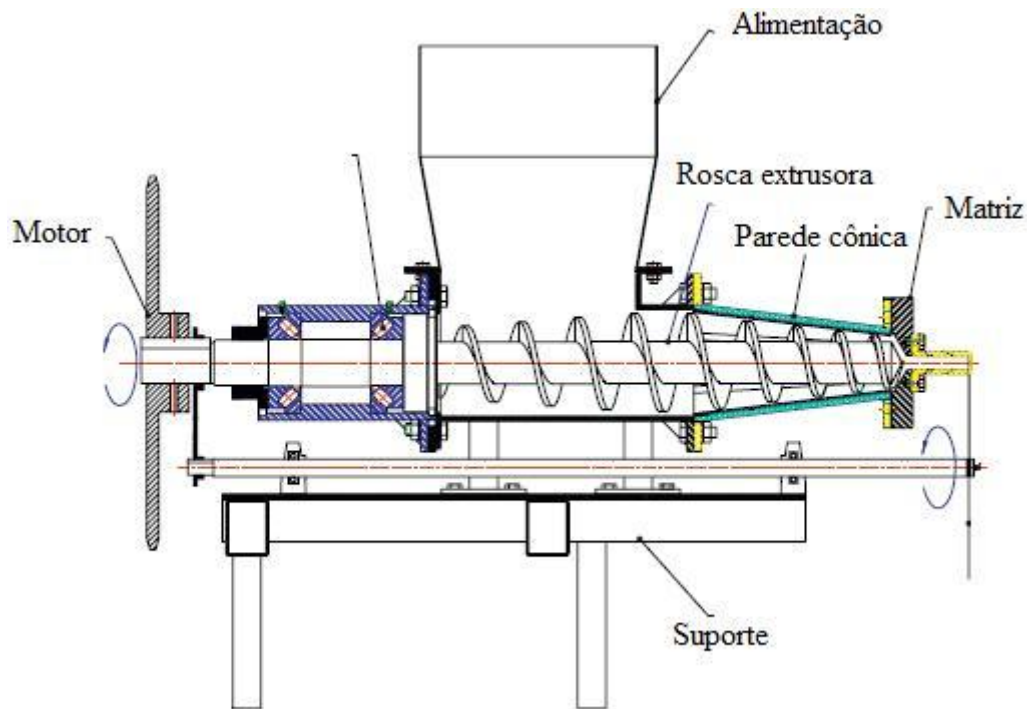


Figura 2: Prensa de rosca extrusora cônica.
Adaptado de: GONZÁLEZ et al. (2008).

Em todas as configurações, a matéria-prima é alimentada ao dispositivo de entrada de forma controlada e homogênea, a fim de evitar sobrecargas ao equipamento. O dispositivo de entrada apresenta seção transversal variável, e tem a função de promover redução parcial de volume do material e conduzi-lo até a câmara de alimentação, onde as fibras serão compactadas por meio de pistão (através de golpes descontínuos) ou então através de rosca extrusora cilíndrica ou cônica (processo contínuo).

A potência de acionamento das briquetadoras depende do produto a ser processado, do diâmetro do briquete e da capacidade de processamento desejada. A Tabela 2 apresenta a demanda energética para diferentes materiais e dois modelos analisados utilizando biela-manivela.

Tabela 2: Requisitos energéticos de briquetadora.

Material	Capacidade (kg.h⁻¹)	Potência (kW)	Densidade final (kg.m⁻³)
Modelo A			
Madeira	600	32	1200
Casca	500	17	1100
Palha	500	25	1000
Modelo B			
Madeira	1500	45	1200
Casca	1500	40	1100

Fonte: ERIKSSON & PRIOR (1990).

González et al. (2008) citam valores próximos aos listados acima, utilizando dados obtidos a partir de prensa extrusora com rosca cônica.

Os briquetes apresentam como vantagens a possibilidade de serem produzidos em tamanhos uniformes, facilitando o transporte, a armazenagem e a alimentação homogênea das fornalhas. Um dos aspectos positivos é a alta densidade alcançada, dispensando aglutinantes externos e sistemas de amarração.

Dentre os fatores limitantes da briquetagem está a umidade do material a ser processado, que deve ser mantida abaixo de 15%. Quando a umidade está acima deste valor, as altas pressões de adensamento e o calor gerado vaporizam a água, podendo causar explosões súbitas e danos mecânicos à máquina. Em contraposição, a baixa umidade leva a um briquete com elevado poder calorífico.

O pré-requisito da matéria-prima com baixa umidade leva à necessidade de secadores incorporados à planta de produção, que contribuem para elevar os custos de implantação e manutenção.

2.3.2. Peletização

De acordo com Erikson & Prior (1990), a peletização é um processo de adensamento mecânico semelhante à briquetagem, onde a compactação da matéria-prima se dá através de calor e alta pressão. O princípio de adensamento consiste na prensagem do material bruto entre um rolo compressor e uma matriz perfurada. O rolo gira sobre a massa, forçando continuamente o material em contato com os orifícios do cilindro perfurado (Figura 3). As

pressões de compactação tornam-se cada vez maiores à medida que o material se aproxima do estrangulamento entre o rolo e a matriz, promovendo o adensamento desejado. O material expelido pelos furos da matriz, conhecidos como pellets, são então cortados em comprimentos da ordem de duas ou três vezes o seu diâmetro através de uma contra-faca, e seguem para serem armazenados.

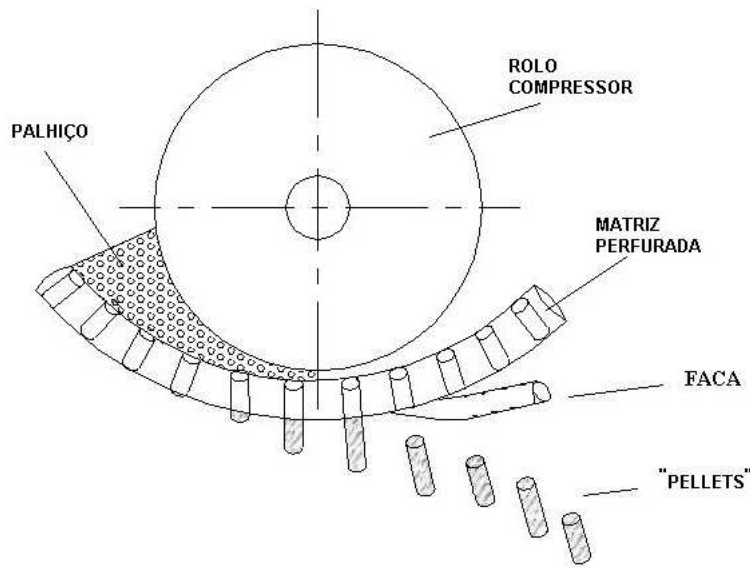


Figura 3: Esquema de adensamento por rolo e matriz.

Adaptado de: ERIKSSON & PRIOR (1990) / MICHELAZZO (2005).

As densidades alcançadas no processo chegam a 1250 kg.m^{-3} , e o nível de adensamento varia conforme o teor de água do material. Segundo SMITH et al. (1977), apud SOKHANSANJ (1977), as pressões desenvolvidas na peletização de palha de trigo com 15% de umidade chegam a 20-60 MPa. Outros fatores que influenciam a peletização são as características do material, a temperatura de processamento, a taxa de alimentação, o tamanho de partículas e a pressão de compactação aplicada entre o rolo e a matriz.

A potência de acionamento requerida para peletização de forragens, conforme dados obtidos em plantas de produção, são da ordem de $7,5 \text{ a } 35 \text{ kW.t}^{-1}$ (HILL & PULKINEN 1985 or 1988, apud SOKHANSANJ, 1977).

No processo de extrusão da massa pela matriz, predominam as forças de atrito e estas são responsáveis pelo consumo de 60% da energia requerida, refletindo a principal desvantagem da peletização.

Como vantagens podem ser citadas o tamanho reduzido dos pellets, que facilitam o transporte e a manipulação por máquinas convencionais, além das altas densidades alcançadas.

2.3.3. Enfardamento cilíndrico ou prismático

O enfardamento cilíndrico ou prismático é caracterizado pela compressão a baixa pressão, com amarração, utilizando mecanismo biela-manivela ou de rolos. Este é o princípio de operação das enfardadoras de feno convencionais. Há tipicamente dois tipos de máquinas enfardadoras: as que produzem fardos prismáticos e as que geram fardos cilíndricos.

As enfardadoras de fardos prismáticos operam de forma descontínua a partir de golpes alternados de pistão. Durante o ponto morto inferior do mecanismo, o material a ser adensado é alimentado na câmara de compactação através de sistemas de dedos retráteis ou roscas sem-fim. O material solto é então golpeado contra a massa já adensada, que é comprimida contra as cordas de amarração do fardo (Figura 4).

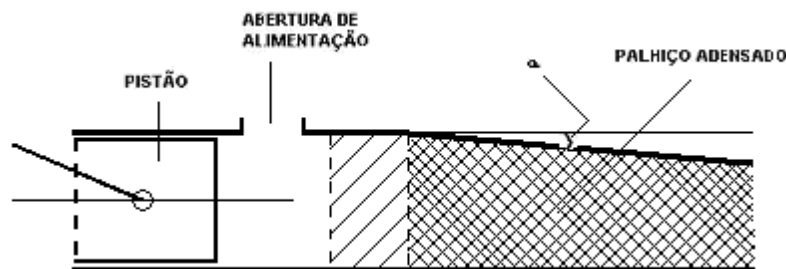


Figura 4: Esquema de adensamento utilizando pistão e biela-manivela.
Fonte: BERNACKI et al. (1972).

Ao atingir as dimensões pré-ajustadas, um complexo mecanismo de amarrio realiza a amarração fardo com corda de sisal, evitando que as forças internas provoquem o seu relaxamento e facilitando a sua manipulação e transporte. Os fardos assim produzidos podem ser diretamente lançados ao solo para serem posteriormente recolhidos, ou então serem encaminhados para plataforma transportadora (Figura 5).



Figura 5: Enfardadora de fardos prismáticos.
Fonte: New Holland.

As enfardadoras de fardos cilíndricos apresentam mecanismos mais simples de formação de fardo, quando comparadas às enfardadoras de prensa. Elas são constituídas basicamente por um sistema de correias planas e paralelas que exercem a função de enrolar o material vegetal sobre o seu próprio eixo, formando o fardo cilíndrico (Figura 6). Depois de formado, o fardo é amarrado com arames de aço ou material sintético. Podem ter a câmara de adensamento fixa ou variável. O mecanismo recolhedor/alimentador é semelhante ao da prensa por pistão.



Figura 6: Enfardadora de fardos cilíndricos.
Fonte: John Deere.

Os dois tipos de enfardadoras levam também a fardos com diferentes densidades finais. Os fardos prismáticos geralmente possuem densidade aparente maior que os fardos cilíndricos.

Torrezan (2003) e Bizuti (2003), respectivamente, realizaram estudos detalhados sobre o enfardamento prismático e cilíndrico do palhiço da cana-de-açúcar sob diferentes enleiramentos. Os resultados apontaram que o enleiramento exerce influência na densidade final dos fardos, e que os fardos prismáticos apresentaram densidade aparente superior aos fardos cilíndricos, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Densidade aparente dos fardos prismáticos e cilíndricos

Enleiramento	Densidade aparente (kg.m ⁻³)	
	Fardos prismáticos	Fardos cilíndricos
Simples	206,7	168,2
Duplo	207,3	191,2
Triplo	221,1	-

Com o objetivo de analisar a viabilidade de recolhimento e adensamento do palhiço, a Copersucar (1999) conduziu experimentos de campo utilizando enfardadoras convencionais de feno. A pesquisa indicou que os fardos retangulares são os mais viáveis, uma vez que apresentaram maior capacidade operacional e facilidade de manipulação, além de melhor taxa de ocupação da carroçaria do caminhão.

Os rendimentos operacionais das enfardadoras trabalhando com palhiço situam-se na faixa de 6 t.h⁻¹ a 22 t.h⁻¹, variando de acordo com o modelo da máquina.

2.3.4. Prensa para grandes fardos

Este princípio baseia-se na aplicação descontínua de pressão nos fardos, utilizando mecanismo acionado por pistão hidráulico (Figura 7 e Figura 8). De acordo com Lima (2002), *apud* Franco (2003), a logística do processo requer basicamente três equipamentos específicos: máquina recolhadora de forragem, caminhão de transbordo, prensa algodoeira, e unidade de transporte dos fardos gigantes, que podem alcançar massa da ordem de 8 toneladas.

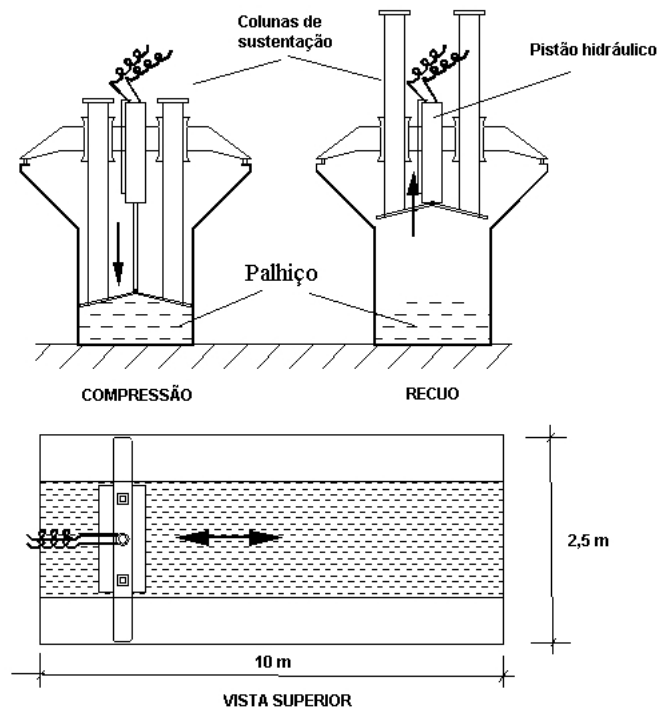


Figura 7: Esquema de adensamento por prensa hidráulica.

Fonte: MICHELAZZO (2005).



Figura 8: Prensa de fardos gigantes. (a) prensagem de palhão; (b) prensagem de algodão.

2.3.5. Picado a granel e colheita integral

Os sistemas baseados em picagem a granel e colheita integral não se caracterizam por um processo de adensamento, sendo limitado tão somente à recuperação e transporte dos resíduos agrícolas do canavial para o pátio das usinas. Dessa forma, a densidade alcançada pelo material é aquela obtida pela sua própria queda livre ao ser lançado para o transbordo.

O processo de picagem a granel requer tipicamente dois equipamentos: colhedora de forragem e caminhão de transbordo (Figura 10). A colhedora de forragem assume a função de

recolher o material sobre o solo e realizar a sua picagem, visando à redução do tamanho (Figura 9). A sua capacidade operacional, obtida por Franco (2003), chegou a $8,7 \text{ t.h}^{-1}$ e $10,2 \text{ t.h}^{-1}$, em dois tratamentos analisados.

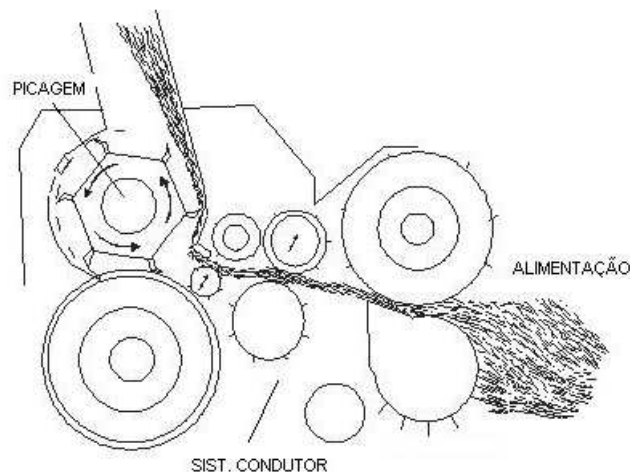


Figura 9: Esquema de picagem de recolhedora de forragens.

Fonte: adaptado de JF Máquinas Agrícolas / MICHELAZZO (2005).



Figura 10: Recolhimento de palhico. (a) Máquina forrageira recolhendo palhico. (b) Descarregamento no pátio da usina.

Foto: Paulo Graziano Magalhães.

O processo de colheita integral é caracterizado pela operação da colhedora de cana picada com os dispositivos de limpeza desligados (extratores primário e secundário). Dessa forma, a colhedora recolhe todo o material disponível no canavial. No pátio da usina, são utilizados dispositivos de limpeza a seco para efetuar a separação entre a cana e os resíduos agrícolas. A capacidade operacional do processo diminui, uma vez que palha e cana são transportadas conjuntamente.

2.4. Comportamento do coeficiente de atrito de forrageiras

Com o objetivo de analisar o comportamento e quantificar a variação dos coeficientes de atrito estático e cinético das forrageiras provenientes do milho, sorgo, cana-de-açúcar e capim elefante, Dalcolmo (1980) realizou ajustes de regressão nos dados que os relacionam com diversas variáveis estudadas (tipo e tratamento da superfície, umidade e comprimento de corte das forrageiras, velocidade de deslizamento e carga normal aplicada). Os seguintes resultados gerais foram obtidos:

- Para umidade da forragem superior a 70%, o aumento na carga normal ocasionou redução do coeficiente de atrito, enquanto para umidade abaixo de 30% não houve alteração do coeficiente de atrito com relação à carga normal;
- Os coeficientes de atrito sofreram redução quando a umidade variou de 60 para 30%, permanecendo constante fora desta faixa;
- A velocidade de deslizamento não alterou significativamente o coeficiente de atrito cinético;
- Houve redução tanto no coeficiente de atrito estático como no cinético com o aumento no comprimento de corte das forragens;
- Superfícies pintadas apresentaram coeficientes de atrito inferiores às outras superfícies analisadas, enquanto a chapa galvanizada apresentou coeficientes de atrito elevados;
- Os maiores coeficientes de atrito foram obtidos para a cana-de-açúcar, em todas as superfícies analisadas, apresentando valor médio de 0,80.

A Tabela 4 apresenta os valores máximos dos coeficientes de atrito obtidos pelo referido autor através dos ensaios.

Tabela 4: Valores máximos de coeficiente de atrito

Superfície	Forrageira			
	Sorgo	Milho	Capim-elefante	Cana-de-açúcar
Madeira	0,65	0,63	0,78	0,87
Madeira pintada	0,59	0,69	0,58	0,79
Chapa não pintada	0,58	0,66	0,69	0,79
Chapa pintada	0,61	0,71	0,57	0,80
Chapa galvanizada	0,62	0,76	0,68	0,83

Fonte: DALCOLMO (1980).

Dalcolmo (1980) concluiu que as equações de regressão propostas foram estatisticamente satisfatórias, reproduzindo dentro do nível de significância adotado, os valores experimentais obtidos.

2.5. Comportamento mecânico do palhiço quando submetido à compressão

Com o objetivo de obter informações sobre o comportamento mecânico do palhiço da cana-de-açúcar quando submetido ao processo de adensamento por helicóides cônicos, Sidou (2007) construiu e instrumentou uma unidade de testes, destinada exclusivamente ao levantamento de dados experimentais. Os dados foram alimentados a um modelo matemático que descreve as pressões atuantes no palhiço utilizando o princípio de adensamento proposto, permitindo a realização de simulações computacionais das pressões de compactação, as quais fornecem subsídios para o dimensionamento de um protótipo operado por helicóides cônicos. A Figura 11 ilustra o protótipo virtual da unidade de testes.

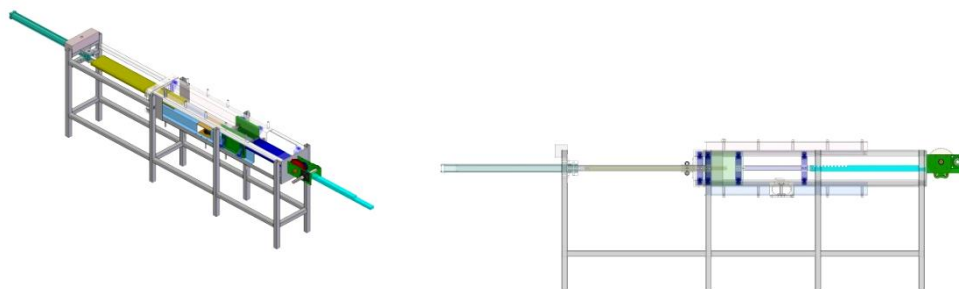


Figura 11: Protótipo baseado no princípio de adensamento por helicóides cônicos.

A unidade de testes, projetada segundo o princípio de adensamento de helicóides cônicos, foi utilizada pelo autor para a realização de dezesseis tratamentos combinando duas distâncias entre helicóides, duas velocidades relativas, dois níveis de pressão de restrição e duas inclinações de taliscas. Dessa forma, a partir dos dados experimentais, foram feitos ajustes de curva para cada tratamento. A Tabela 5 apresenta os códigos utilizados pelo autor para cada parâmetro experimental, enquanto a Tabela 6 mostra a distribuição dos tratamentos, as massas obtidas e as respectivas umidades do palhiço amostrado.

Tabela 5: Código de identificação dos parâmetros experimentais

Parâmetro	Descrição
P1	Pressão máxima de compressão do palhiço de 0,1 N.mm ⁻²
P2	Pressão máxima de compressão do palhiço de 0,2 N.mm ⁻²
V1	Velocidade relativa de 0,07 m.s ⁻¹
V2	Velocidade relativa de 0,14 m.s ⁻¹
E1	Distância entre helicóides de 85 mm
E2	Distância entre helicóides de 245 mm
T1	Inclinação do helicóide de 5°
T2	Inclinação do helicóide de 20°

Fonte: SIDOU (2007).

Tabela 6: Distribuição nos tratamentos, massas e umidades dos parâmetros experimentais

Tratamento	Parâmetros				Massa [g]	Umidade [%]
1	P1	V1	E1	T1	638	27,12
2	P1	V1	E1	T2	564	17,50
3	P1	V1	E2	T1	1082	20,01
4	P1	V1	E2	T2	1035	19,49
5	P1	V2	E1	T1	498	19,86
6	P1	V2	E1	T2	522	19,18
7	P1	V2	E2	T1	980	17,49
8	P1	V2	E2	T2	1166	21,20
9	P2	V1	E1	T1	494	21,06
10	P2	V1	E1	T2	586	23,84
11	P2	V1	E2	T1	1116	19,58
12	P2	V1	E2	T2	1023	13,75
13	P2	V2	E1	T1	548	20,29
14	P2	V2	E1	T2	548	22,33
15	P2	V2	E2	T1	956	13,86
16	P2	V2	E2	T2	1020	15,31

Fonte: SIDOU (2007).

Foram registrados valores experimentais da pressão axial aplicada ao palhiço, do coeficiente de atrito existente entre o helicóide e o palhiço em compressão, além da força normal desenvolvida entre o palhiço e a parede da câmara de compressão.

Bernacki et al. (1972) analisando o comportamento de materiais fibrosos quando submetidos à compressão, concluíram que a pressão aplicada se relaciona com a densidade aparente do material através de uma função potencial. Este mesmo resultado foi obtido experimentalmente por SIDOU (2007). Dessa forma, a densidade e a pressão aplicada foram relacionadas por uma função da forma:

$$\sigma_1 = C\rho^m \quad (1)$$

que pode ser reescrita como:

$$\rho = \left(\frac{\sigma_1}{C}\right)^{\left(\frac{1}{m}\right)} \quad (2)$$

sendo:

ρ = densidade aparente do palhiço [kg.m^{-3}]

σ_1 = pressão axial aplicada sobre o palhiço [N.mm^{-2}]

C e m = parâmetros de ajuste experimentais

A Tabela 7 apresenta os parâmetros ajustados para a densidade aparente, e a Figura 12 apresenta o ajuste de curva relacionando a densidade aparente com a pressão aplicada, exemplificado pelo tratamento P1V1E1T1.

Tabela 7: Parâmetros de ajuste para a densidade aparente

Tratamentos	Parâmetros para densidade		R^2
	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

Fonte: SIDOU (2007).

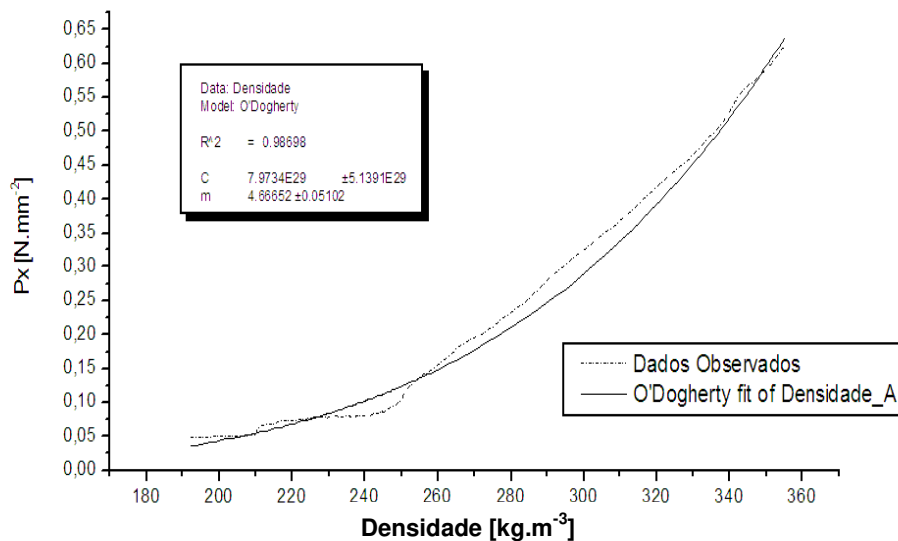


Figura 12: Relação experimental obtida para a densidade e pressão aplicada.

Fonte: SIDOU (2007).

Analisando o coeficiente de atrito existente entre o palhio e os helicóides da unidade de testes, o autor obteve altos valores do mesmo, variando entre 1,16 e 3,70, apesar da grande

dispersão dos dados. No entanto, optou por considerar que existe uma tendência linear de decaimento do coeficiente de atrito com o acréscimo da pressão aplicada.

O coeficiente de atrito cinético e a pressão aplicada foram relacionados por uma função linear da forma:

$$\mu = c_1 + c_2\sigma_1 \quad (3)$$

sendo:

μ = coeficiente de atrito cinético entre helicóide e palhico [adimensional]

σ_1 = pressão axial aplicada sobre o palhico [N.mm⁻²]

Os parâmetros c_1 e c_2 são dados pela Tabela 8, e a Figura 13 apresenta o gráfico do coeficiente de atrito, exemplificado pelo tratamento P1V1E1T1.

Tabela 8: Parâmetros de ajuste para o coeficiente de atrito

Tratamentos	c_1	c_2	R^2
P1V1E1T1	2,1742	-0,2111	0,285
P1V1E1T2	2,2337	-0,7756	0,612
P1V1E2T1	2,6996	-5,1920	0,504
P1V1E2T2	3,0944	-6,4739	0,336
P1V2E1T1	1,5397	0,3359	0,818
P1V2E1T2	2,7491	-2,000	0,925
P1V2E2T1	1,1643	2,7520	0,168
P1V2E2T2	2,9311	-8,1574	0,799
P2V1E1T1	2,1634	-19,7905	0,914
P2V1E1T2	3,5410	-2,9676	0,994
P2V1E2T1	7,1091	-20,9156	0,865
P2V1E2T2	3,7009	-10,1948	0,718
P2V2E1T1	2,0561	-0,9284	0,189
P2V2E1T2	3,2551	-2,4609	0,924
P2V2E2T1	5,6786	-14,6118	0,614
P2V2E2T2	4,0994	-8,9311	0,635

Fonte: SIDOU (2007).

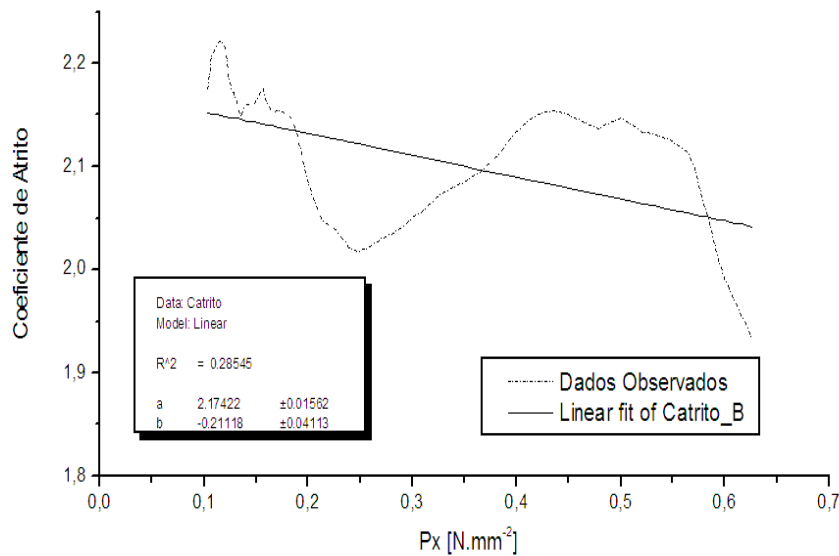


Figura 13: Dispersão dos dados obtidos para o coeficiente de atrito.
Fonte: SIDOU (2007).

Os dados de pressão normal analisados foram representados por um ajuste de curva polinomial, conforme ilustra a Figura 14.

A pressão normal e a pressão axial aplicada foram relacionadas por uma função polinomial de terceiro grau, da forma:

$$\sigma_r = b_1 + b_2\sigma_1 + b_3\sigma_1^2 + b_4\sigma_1^3 \quad (4)$$

onde:

σ_r = pressão normal existente entre as paredes da câmara de adensamento e o palhiço [N.mm⁻²]

σ_1 = pressão axial aplicada sobre o palhiço [N.mm⁻²]

Os parâmetros b_1 , b_2 , b_3 e b_4 são dados pela Tabela 9, e a Figura 14 apresenta o gráfico da pressão normal, exemplificado pelo tratamento P1V1E1T1.

Tabela 9: Parâmetros de ajuste para a pressão normal

Tratamentos	b_1	b_2	b_3	b_4	R^2
P1V1E1T1	0,00014	-0,00554	0,34195	0,07839	0,990
P1V1E1T2	0,00001	-0,08312	0,57685	-0,24471	0,992
P1V1E2T1	0,21192	-4,71909	29,16083	-37,82978	0,989
P1V1E2T2	0,15563	-2,97373	15,9367	-12,48182	0,945
P1V2E1T1	1,23e-6	-0,12075	0,58886	0,12578	0,967
P1V2E1T2	7,858e-6	-0,00939	-0,00579	0,67462	0,989
P1V2E2T1	0,57449	-12,06432	76,08585	-126,25878	0,963
P1V2E2T2	1,84e-6	2,52005	-416968	17467969	0,924
P2V1E1T1	1,5573e-6	0,033183	-2,3319	4,14158	0,991
P2V1E1T2	1,2517e-7	-0,40458	0,40458	0,03935	0,996
P2V1E2T1	1,45649	-16,15899	54,45763	-50,15354	0,958
P2V1E2T2	6,27815	-82,34748	353,4047	-492,89224	0,962
P2V2E1T1	1,414e-8	-0,01816	-0,07434	0,61711	0,989
P2V2E1T2	4,6363e-6	0,12226	-0,69817	1,19623	0,969
P2V2E2T1	1,124	-11,45628	29,91033	-9,7364	0,807
P2V2E2T2	0,158	-14,16327	-47,23303	39,02439	0,750

Fonte: SIDOU (2007).

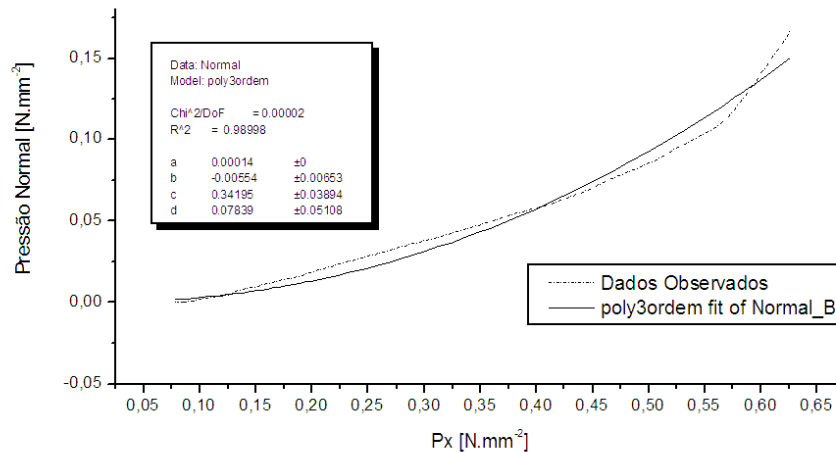


Figura 14: Comportamento da pressão normal com o aumento da pressão aplicada.

Fonte: SIDOU (2007).

Por fim, Sidou (2007) utilizou as curvas ajustadas para alimentar o modelo matemático desenvolvido, com o objetivo de estimar os níveis de densidade aparente alcançadas pelo princípio, além das dimensões do protótipo de helicóides cônicos. O autor concluiu que, com o princípio proposto e a partir de protótipo com dimensões e pesos

reduzidos, é possível atingir densidades aparentes do palhiço próximas a 300 kg.m^{-3} , revelando que, teoricamente, o princípio apresenta viabilidade técnica.

2.6. Teoria dos fios têxteis

2.6.1. Hierarquia dos componentes das cordas

As cordas fabricadas a partir de fibras naturais são constituídas por uma montagem de componentes individuais, como mostrado na Figura 15. A estrutura precursora é a fibra têxtil, que quando submetida ao processo de fiação, origina o fio singelo. Do fio singelo é possível obter o fio retorcido, que consiste na torção de dois fios singelos. O fio multifilamento pode ser obtido pela torção conjunta de vários fios retorcidos, permitindo originar uma das pernas da corda, que por sua vez forma a corda propriamente dita.

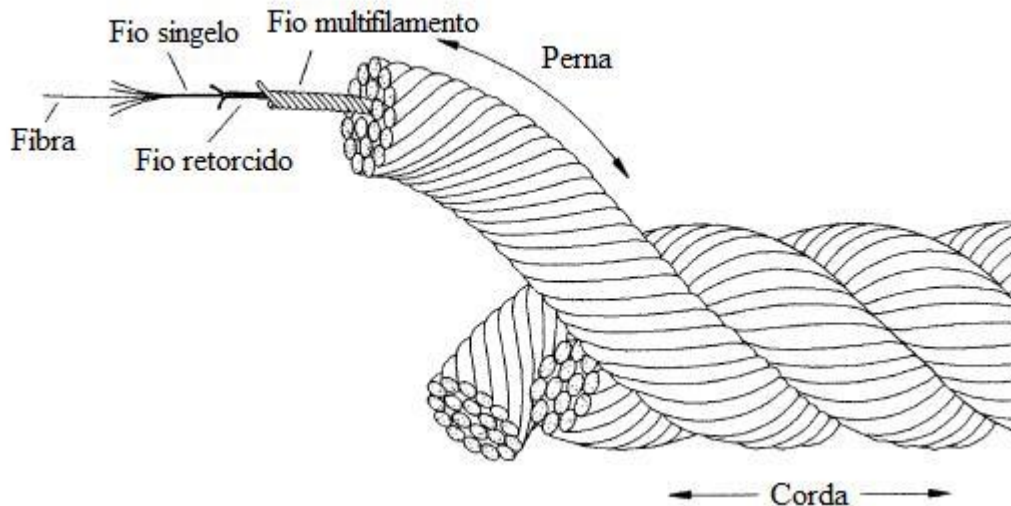


Figura 15: Hierarquia da corda.

Fonte: LEECH (2001).

O sentido de torção aplicado em cada componente é alternado, visando melhorias na acomodação do material e na resistência mecânica da corda final. Com essa montagem é possível obter várias configurações de cordas, de acordo com a finalidade a qual se destina (MCKENNA et al., 2000).

2.6.2. Princípio de formação e resistência mecânica dos fios

Vários interesses práticos motivam os estudos teóricos a respeito dos fios têxteis. Os fios são tratados como uma estrutura de engenharia, e precisam, portanto, ter o comportamento

mecânico bem conhecido. Os principais interesses estão associados à tensão de ruptura das fibras que compõem um membro estrutural maior, tais como as cordas, além das suas deformações máximas e características mecânicas quando solicitadas por diferentes esforços.

O fio têxtil pode ser formado a partir de filamentos contínuos produzidos pelo processo de extrusão de materiais sintéticos, tais como o nylon e o poliéster, ou então a partir de fibras naturais descontínuas, como é o caso do algodão, da lã e do sisal (NEEDLES, 1986, BEYREUTHER & BRÜNIG, 2007). A formação do fio contínuo a partir de fibras descontínuas se dá pelo processo de fiação, cujo princípio se baseia na aplicação de torção a um conjunto de feixes previamente alinhados com parte das extremidades sobrepostas. A fiação é caracterizada pelo conjunto de operações necessárias para transformar as fibras descontínuas em fio contínuo. O principal objetivo da torção é evitar que as fibras deslizem umas sobre as outras. A torção aplicada nos feixes aumenta o contato entre as fibras devido ao aumento na pressão transversal, garantindo a permanência de força de atrito que por sua vez mantém a estruturação e continuidade do fio sem a necessidade de aglutinantes.

A torção aplicada ao fio é quantificada pelo *fator de torção*, que está diretamente associado com a inclinação que as fibras formam em relação ao eixo do fio, exercendo influência direta na sua resistência à tração (RAO & FARRIS, 2000). Groswani et al. (1977) citam que existe um valor limite inferior para o fator de torção, abaixo do qual o processo de fiação utilizando fibras curtas fica impraticável. Esse limite inferior é influenciado pelo comprimento e diâmetro das fibras, além do coeficiente de atrito interno. Em situações onde baixos fatores de torção prevalecem, a resistência à tração do fio é determinada unicamente pela resistência das fibras ao deslizamento. À medida que a inclinação das fibras aumenta, a coesão e a resistência ao deslizamento das mesmas sofrem incrementos maiores, atingindo um valor máximo (Figura 16).

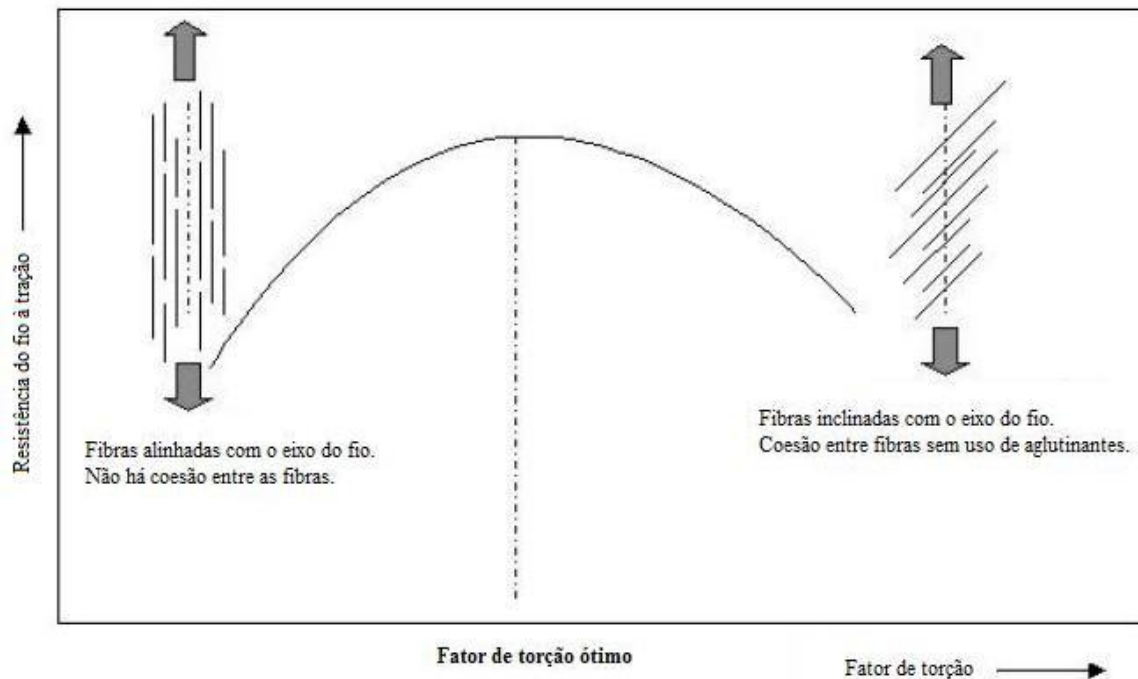


Figura 16: Efeito da torção na resistência à tração do fio.
Fonte: EL MOGAHZY.

A partir desse valor máximo, incrementos maiores na torção provocam a diminuição da resistência à tração do fio, devido ao efeito da obliquidade das fibras. Dessa forma, pode-se encontrar um fator de torção ótimo, que confere a maior resistência ao fio (SULLIVAN, 1942). Para as fibras têxteis comerciais, o fator de torção encontra-se tabelado na literatura (HEARLE et al., 1969; MEDEIROS, 1995).

Abaixo do valor ótimo, as fibras tendem a deslizar umas em relação às outras, embora a resistência máxima à tração das fibras individuais seja alta. Acima do valor ótimo, as fibras permanecem bastante coesas entre si, mas tendem a se romper devido à sua alta obliquidade.

GRACIE (1960), *apud* HEARLE et al. (1969), relata a existência de um ângulo máximo de inclinação das fibras. Os cálculos do autor indicam um valor máximo de 70,5° com o eixo do fio.

Quando submetido ao limite de torção, um fenômeno de instabilidade no fio pode ocorrer. Esse fenômeno é conhecido por “*snarling*”, onde fio tende a se enrolar em torno de si próprio (MCKENNA et al., 2000; FRASER & HEIJDEN, 2008, HEARLE et al., 2008).

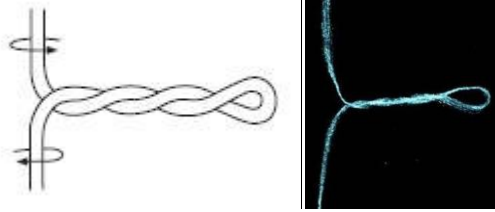


Figura 17: Fenômeno de “snarling”.

Fonte: MCKENNA et al. (2000) / FRASER & HEIJDEN (2008).

Esta dupla torção confere maior resistência à tração dos fios, além de manter estável o fio enrolado. Destarte, o fio permanece indeformável mesmo depois de retiradas todas as tensões atuantes. A Figura 18 ilustra a fabricação de um fio retorcido estável utilizando a dupla torção.

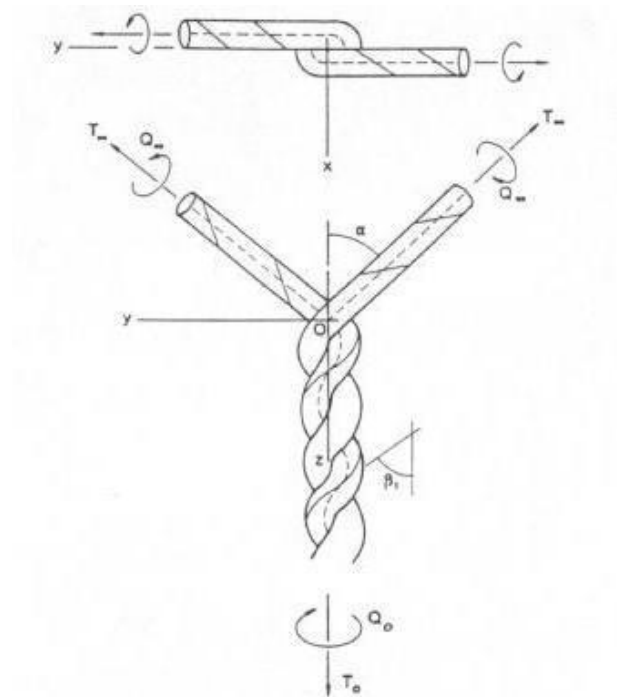


Figura 18: Fabricação de um fio retorcido utilizando a dupla torção.

Fonte: ROSIAK & PRZYBYŁ (2003).

Outro mecanismo que auxilia na estabilidade e resistência do fio é a *migração das fibras*. Durante a deformação de um feixe de fibras submetido a esforços de torção, as fibras mais externas tendem a se acomodar, uma vez que o seu comprimento não pode se alterar (HEARLE, 1969; SREPRATEEP & BOHEZ, 2006; NECKÁRA et al., 2006). Essa acomodação acontece no interior do fio, e as fibras seguem um caminho helicoidal que na prática não permanece numa mesma camada concêntrica (Figura 19). Ocorre desta forma um

entrelaçamento das fibras no interior do fio, contribuindo para inibir o deslizamento entre as fibras, e aumentando assim a interligação das fibras e a resistência à tração do mesmo.

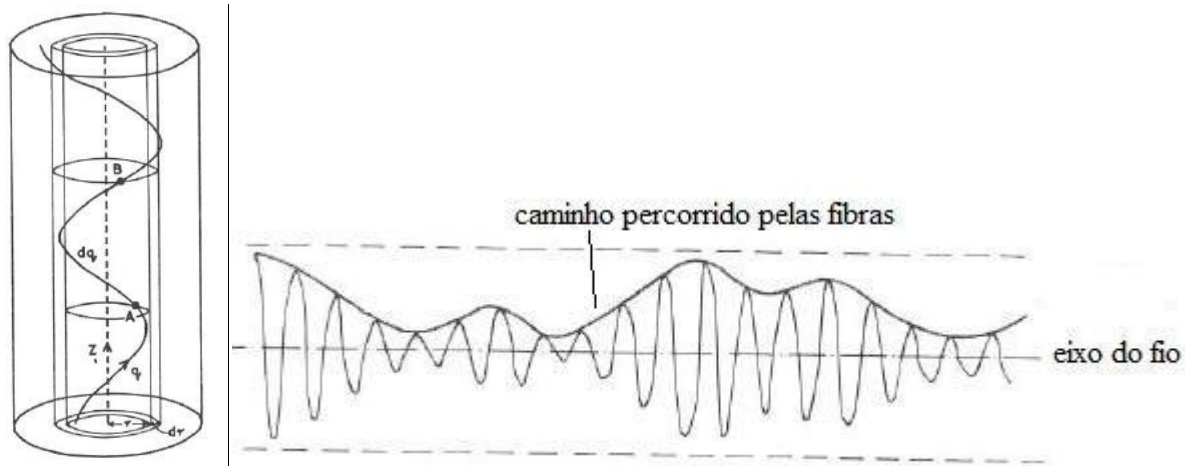


Figura 19: Migração de fibras da camada externa para a interna.

Fonte: HEARLE et al. (1969).

As fibras naturais apresentam grande variabilidade nas suas propriedades físicas, o que dificulta a quantificação por métodos analíticos da relação tensão-deformação de estruturas feitas com esses materiais. Diante desta limitação, vários autores procuram dar uma abordagem estatística na tentativa de prever o comportamento mecânico das cordas sujeitas a esforços de tração (PORWAL et al., 2007; REALFF et al., 2000; PAN et al., 1998).

2.6.3. Compactação das fibras devido à torção

A torção aplicada às fibras do fio resulta em forças transversais na direção radial, que são responsáveis por compactar as camadas interiores, reduzindo assim os espaços vazios existentes entre as fibras (LEECH & HEARLE, 1993; YILMAZ et al., 2007; PAN et al., 2002). Na Figura 20 pode-se observar um fio singelo típico, no qual as camadas mais internas apresentam menos espaços vazios, indicando maior compactação. As maiores deformações ocorrem nas fibras localizadas no núcleo do fio, pois as pressões de adensamento sofrem incremento crescente da camada mais externa para a mais interna. Observa-se também a ocorrência de deformação na seção transversal da fibra, alterando a sua geometria de circular para hexagonal.

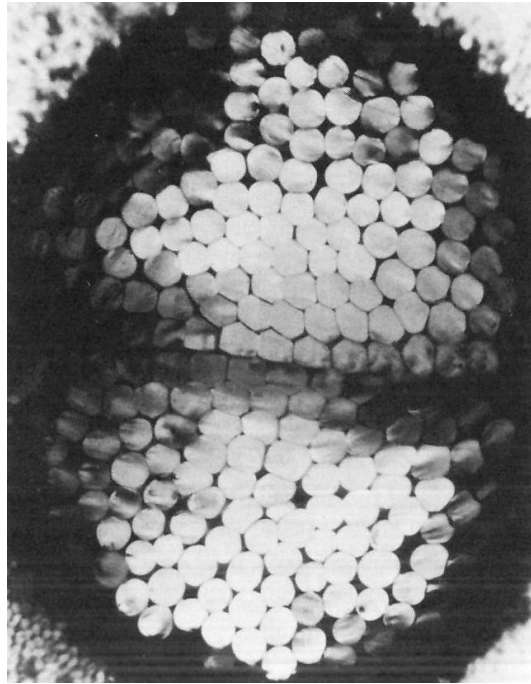


Figura 20: Seção transversal compactada de fio de nylon.
Fonte: HEARLE et al. (1969).

A Figura 21 mostra a seção transversal de um fio constituído por fibras de algodão. É possível perceber que as fibras se deformam na região central, reduzindo os espaços vazios e consequentemente elevando a densidade aparente.

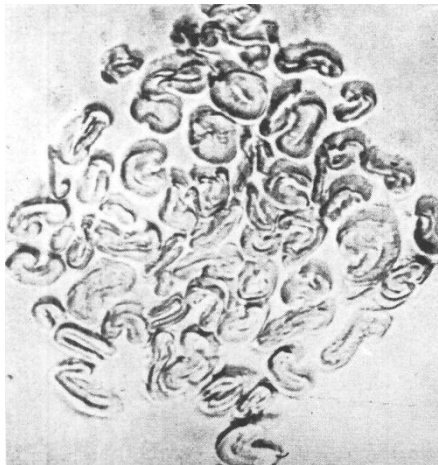


Figura 21: Seção transversal de fio produzido com fibras de algodão.
Fonte: HEARLE et al. (1969).

2.6.4. Parâmetros práticos utilizados para quantificação dos fios

Dada a variabilidade, pilosidade e a irregularidade das fibras na seção transversal dos fios, a medida direta do seu diâmetro torna-se impraticável. Dessa forma o cálculo da

densidade aparente de um fio fica comprometido, dada a sua dependência direta do diâmetro. Um dos parâmetros utilizados para contornar este problema é a densidade linear, expressa em massa por unidade de comprimento. A densidade linear é conhecida por *título do fio*, e pode ser representada pelas unidades Denier, Tex, ou ainda kg.m^{-1} (MORTON & HEARLE, 2008, NEEDLES, 1986).

Quando o fio é torcido, ocorre o fenômeno da *contração* do seu comprimento, devido ao caminho helicoidal das fibras mais externas (HEARLE et al., 2008). O fio sem torção apresenta as fibras paralelas ao seu eixo de simetria, e quando torcido, as fibras mais externas reduzem o comprimento do fio durante a sua acomodação no caminho helicoidal. Dessa forma a contração exerce influência direta na densidade linear do fio. De acordo com Hearle et al. (1969), para ângulos de hélice das fibras variando de 0° a 20° , a contração varia de 0 a 3,1% do comprimento inicial do fio, representando pouca variação na densidade linear. Entretanto, para ângulos grandes de inclinação, o fenômeno da contração deve ser considerado nos cálculos da densidade linear final.

A densidade aparente de um fio é também influenciada pelos espaços vazios existentes entre as fibras, já que não apresentam seção transversal homogênea. Estudos conduzidos com fibra de algodão demonstraram que a sua densidade absoluta está em torno de 1,50 a $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$. Entretanto, fios formados a partir de fibras de algodão apresentam densidade aparente em torno de $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$. Constatou-se que o fio é constituído por 60% de fibras e 40% de espaços vazios. Dessa forma, pode ser ainda utilizado o *fator de empacotamento*, que quantifica a porcentagem de fibras existentes no fio (MEDEIROS, 1995).

3. METODOLOGIA

3.1. Considerações iniciais

O princípio de adensamento por atrito faz parte de uma linha de pesquisa da FEAGRI/UNICAMP, intitulada Unidade Móvel de Auxílio à Colheita de Cana (Unimac-cana), cujo objetivo é conceber, em escala piloto, uma colhedora de cana crua capaz de executar trabalhos em terrenos planos e declivosos, contemplando as funções de corte, alimentação, despalhamento, adensamento da palha e lançamento da cana para transbordo. Pretende-se instalar nesta colhedora uma unidade de adensamento de palha com dimensões reduzidas, incorporando no processo mais uma fase da produção, que tem por finalidade substituir a etapa de enfardamento. Espera-se alcançar com isso uma menor compactação do solo agrícola, dada pela redução do tráfego de máquinas pesadas no campo, tais como enleiradoras e enfardadoras, além de redução nos custos de produção.

3.2. Protótipo virtual do adensador de palha de cana-de-açúcar

O protótipo foi construído com os objetivos de formar corda adensada com palha de cana-de-açúcar aplicando torção, e verificar em quais condições é possível a formação de corda estruturada. Foram levantados dados experimentais para correlacionar o torque aplicado na corda de palha com a sua densidade máxima alcançada, além de dados relacionados à força axial desenvolvida na corda necessária para manter a cadência do processo. Estas informações fornecem subsídios para dimensionamentos futuros em escala industrial.

A Figura 22 ilustra a unidade de testes em perspectiva, mostrando os seus elementos constituintes.

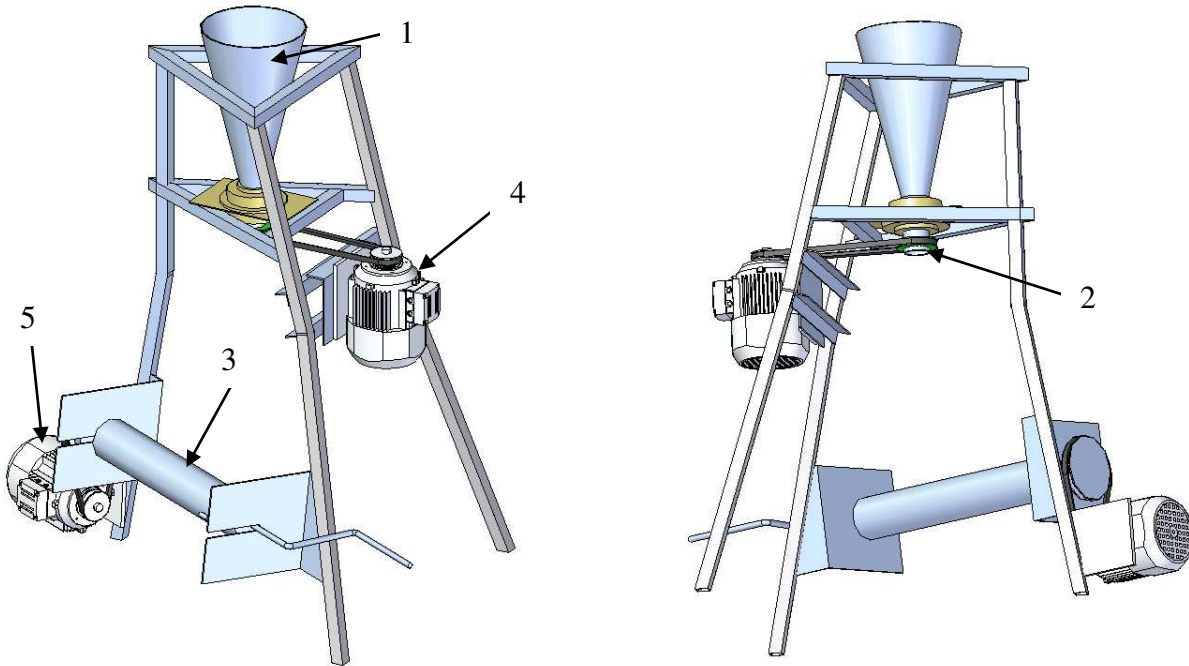


Figura 22: Protótipo virtual do adensador.

Pode-se destacar na Figura 22 os seguintes elementos:

- 1 - Cone rotativo de alimentação
- 2 - Cilindro torçor solidário ao cone rotativo com diâmetro interno variável
- 3 - Bobina para enrolamento da corda
- 4 - Motor de acionamento do cilindro torçor
- 5 - Motor de acionamento da bobina

3.3. Princípio de operação do protótipo

A unidade de testes tem por finalidade específica a formação de corda estruturada e adensada de palha de cana-de-açúcar. O princípio de funcionamento do protótipo baseia-se no atrito existente entre o cilindro torçor e a palha, na torção dos feixes e no enrolamento da corda em uma bobina, visando à inibição do relaxamento de torção devido ao seu comportamento viscoelástico. Pretende-se alcançar com este princípio uma bobina adensada feita com corda de palha, dispensando sistemas de amarração e operando em regime contínuo. Dadas as características viscoelásticas da palha, o tempo em que a corda permanece sob ação do torque é uma variável importante, pois exerce influência na estabilidade da densidade aparente final.

O processo de formação, estruturação e adensamento da corda desenvolve-se em três etapas, sendo a primeira delas a alimentação dos feixes de palha no cone giratório. Nesta fase o afunilamento do cone promove o direcionamento do feixe para o interior do cilindro torçor, além de reunir as folhas de palha, reduzindo os espaços vazios e promovendo maior área de contato entre as fibras. As folhas neste estágio permanecem sob pressão no interior do cilindro torçor.

Na segunda fase, a pressão desenvolvida no interior do cilindro torçor eleva a força de atrito aplicada ao feixe de palha, originando o torque que promoverá a sua torção. Depois de torcido, o feixe é tracionado axialmente para ser encaminhado para a bobina de enrolamento. Simultaneamente ao processo de retirada do feixe torcido do cilindro torçor, o próximo feixe a ser torcido deve ser inserido na abertura do cone, visando a sobreposição das extremidades dos feixes, mantendo assim a continuidade da corda.

Finalmente, na terceira etapa, o feixe torcido é enrolado na bobina. Ao girar, a bobina traciona automaticamente o feixe proveniente do cilindro torçor, mantendo a cadência e o funcionamento do processo, desde que a vazão mássica de alimentação permaneça constante. A bobina é responsável também por exercer o torque de reação na corda, viabilizando a sua torção pelo cilindro torçor ao evitar que os feixes girem sem deslizamento junto ao mesmo.

Espera-se que a estruturação da corda seja possível exclusivamente devido às forças de atrito internas existentes entre as fibras da palha, aumentadas em função da torção final.

3.4. Forças aplicadas pelo cilindro torçor durante o processo de adensamento

A palha localizada no interior do cilindro torçor está sujeita a forças de atrito tangenciais que promovem torque na superfície de contato da corda, além de forças axiais que se opõem ao movimento descendente quando a mesma é tracionada pela bobina (Figura 23). A força peso da palha foi suposta ser desprezível diante das forças aplicadas pelo cilindro torçor.

Esta força de atrito se origina a partir da pressão que as folhas de palha exercem sobre a superfície interna do cilindro, e também do coeficiente de atrito cinético existente entre a palha e o material constituinte do cilindro.

A pressão desenvolvida no interior do cilindro torçor depende da quantidade de palha distribuída dentro do seu diâmetro. Dessa forma, quanto mais palha estiver inserida no

cilindro, maior deverá ser a pressão radial exercida, supondo que o diâmetro permaneça invariável.

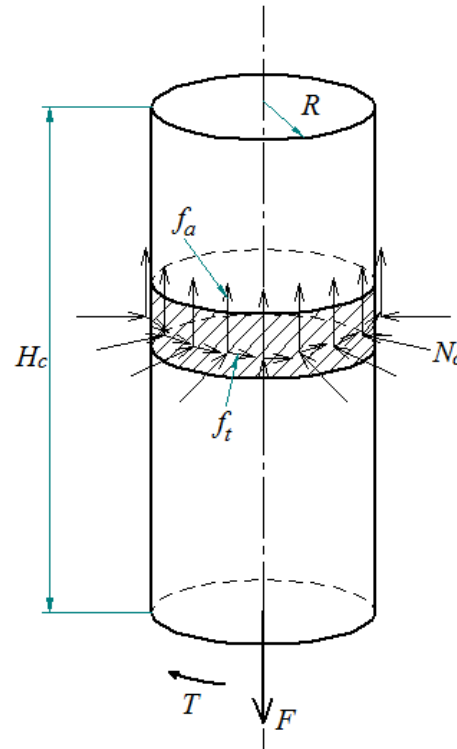


Figura 23: Diagrama de corpo livre do segmento de corda no interior do cilindro torçor.

A força F , exercida pelo carretel bobinador, deve vencer as forças de atrito desenvolvidas axialmente (f_a) ao longo do segmento da corda inserida no cilindro torçor de raio R , originada pela pressão radial referente à força normal N_c e pelo coeficiente de atrito μ . Torna-se necessário aplicar determinado torque no eixo da bobina para originar a força F que tracionará a corda, a fim de que possa ser enrolada. Da mesma forma, a bobina deve aplicar o torque de reação T para equilibrar o torque promovido pelas forças de atrito tangenciais (f_t), enquanto a corda estiver dentro do cilindro giratório.

À medida que a corda é submetida aos esforços solicitantes, o seu diâmetro sofre ligeira redução, diminuindo o contato entre a mesma e o cilindro torçor, e consequentemente a força N_c . No entanto, a pressão radial atuante na corda é mantida pela continuidade de alimentação de palha no cilindro torçor, e deve apresentar comportamento cíclico em função da variação da densidade linear ao longo da corda.

Com a aplicação da força F e do torque T , um feixe de palha previamente alinhado e inserido no cone pode ser torcido para assumir a configuração geométrica de uma corda helicoidalmente estruturada.

3.5. Capacidade de processamento do protótipo

Para quantificar a capacidade de processamento do protótipo, deve-se assumir previamente que a vazão mássica de alimentação de palha no adensador deve ser mantida constante ao longo do tempo. Desta forma, a equação que relaciona a vazão mássica, com a densidade, velocidade de deslocamento da palha e a área de saída do adensador pode ser escrita como:

$$Q_m = \rho_c v_c A_c \quad (5)$$

em que:

Q_m = vazão mássica de palha [kg.s^{-1}]

ρ_c = densidade aparente da corda de palha na saída do cilindro torçor [kg.m^{-3}]

v_c = velocidade linear da corda na saída do cilindro torçor [m.s^{-1}]

A_c = área transversal da corda de palha na saída do cilindro torçor [m^2]

A densidade linear da corda, expressa em kg.m^{-1} , pode ser obtida a partir da seguinte relação:

$$\lambda_c = \rho_c A_c \quad (6)$$

Usando a equação 6, a vazão mássica pode ser reescrita como:

$$Q_m = \lambda_c v_c \quad (7)$$

Destarte, a vazão mássica pode ser alterada variando a densidade linear da corda e/ou a sua velocidade linear de processamento.

3.6. Modelo matemático: relação entre pressão radial e torque aplicado na corda

3.6.1. Considerações iniciais

A corda ao sair do protótipo está sujeita a torques iguais e opostos (torques de ação e reação), aplicados pelo cilindro torçor e pelo eixo da bobina de enrolamento. Estes torques aplicados geram tensões radiais que comprimem radialmente a corda, promovendo a compactação das camadas mais externas para as mais internas. Assim sendo, o núcleo da corda sofrerá tensões de compressão que serão as responsáveis pelo adensamento do feixe de palha, elevando a densidade aparente final. O torque aplicado na corda é responsável também pela sua configuração helicoidal assumida depois de deformada, permitindo interligar as folhas entre si e manter a estruturação e continuidade de formação da corda.

A continuidade da corda é conseguida através de dois mecanismos distintos e complementares. O primeiro deles é a torção da corda, que eleva a pressão de compactação e consequentemente a pressão na qual as folhas da palha estarão submetidas no interior do feixe. Com a elevação da pressão interna, as forças de atrito desenvolvidas entre as folhas de palha aumentam, devido ao atrito interno existente entre as folhas. As folhas comprimidas entre si e entrelaçadas pela torção tornam-se resistentes a esforços axiais, permitindo a formação contínua de corda (PAN et al., 2002). Assim, os feixes de palha podem ser alimentados continuamente na abertura superior dos cones, enquanto ocorre o processo de interligação (sobreposição) da extremidade mediana inferior do novo feixe com a extremidade mediana superior do feixe que será encaminhado para ser torcido no interior do cilindro torçor. Consegue-se através deste princípio um processo contínuo de operação, dada a hipótese de alimentação mássica constante.

Propõe-se nesta seção um modelo matemático para representar a relação entre a pressão de compactação e o torque aplicado nas extremidades da corda pelo adensador.

Há duas abordagens distintas para se modelar as tensões que atuam nas cordas: método das forças e método da energia (princípio dos trabalhos virtuais). O método das forças apresenta uma abordagem mais completa, pois analisa individualmente as tensões atuantes em todas as faces de um elemento da corda, enquanto o método da energia relaciona apenas a deformação total com as tensões aplicadas nas extremidades da corda (HEARLE et al., 1969; LEECH & HEARLE, 1993; LIU et al., 2007). A tensão radial não pode ser obtida pelo método da energia, e portanto, o método das forças foi adotado no presente trabalho.

3.6.2. Hipóteses adotadas

Com o objetivo de desenvolver um modelo matemático que represente as tensões internas de compactação envolvidas na corda torcida após deixar o adensador, as seguintes hipóteses foram adotadas:

- A vazão mássica de alimentação de palha deve ser mantida constante durante todo o processo de adensamento, evitando, portanto, vazios no interior dos feixes e garantindo a continuidade de formação da corda;
- As forças de atrito internas da palha existentes quando a mesma encontra-se torcida, são suficientes para manter a estruturação da corda formada;
- Os feixes que compõem a corda devem estar previamente alinhados numa mesma direção. É suposto que as folhas apresentam propriedades físicas idênticas, são uniformes ao longo do seu comprimento e têm o eixo de simetria coincidente com o eixo da corda;
- As folhas seguem um caminho perfeitamente helicoidal em torno do eixo de simetria da corda;
- As tensões envolvidas no processo de torção são constituídas de cisalhamento puro;
- A transformação das tensões de cisalhamento para um plano orientado na direção das fibras leva a um estado de tensões onde a tração ao longo das fibras prevalece sobre as demais tensões;
- A seção transversal da corda permanece constante ao longo do seu comprimento, não sofrendo variações significativas no diâmetro.

3.6.3. Configuração helicoidal teórica da corda

Os desenvolvimentos teóricos apresentados na modelagem proposta foram obtidos a partir da combinação do modelo apresentado por Hearle et al. (1969) com a teoria clássica de torção e transformação de tensões em estado plano da resistência dos materiais.

Para a análise do feixe torcido, foi utilizada a geometria teórica da corda helicoidal, ilustrada na Figura 24. A corda é assumida ter uma seção transversal circular, e composta de uma série de cilindros concêntricos de diferentes raios. Cada fibra que compõe a corda segue um caminho helicoidal uniforme em torno dos cilindros concêntricos, tal que a sua distância a partir do eixo da corda permanece constante. Dessa forma, uma determinada fibra localizada

no centro seguirá o caminho de uma linha reta, enquanto uma fibra que se distancia do centro terá o seu ângulo de hélice gradualmente incrementado, desde que a torção por unidade de comprimento seja constante em todas as camadas concêntricas.

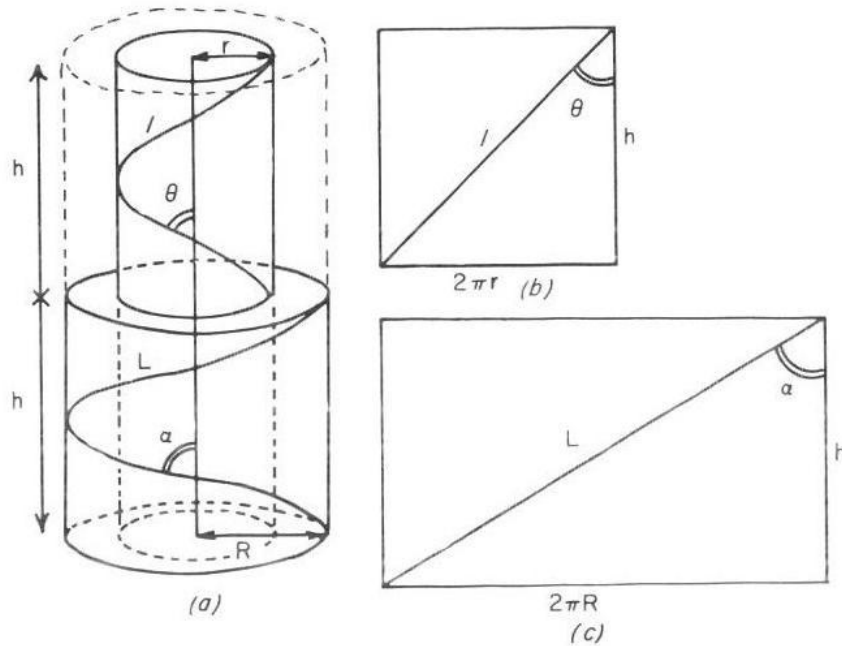


Figura 24: Geometria teórica da corda helicoidal. (a) geometria idealizada; (b) diagrama planificado de um cilindro de raio “ r ”; (c) planificação da camada externa da corda.

Fonte: HEARLE et al. (1969).

É possível obter várias relações geométricas a partir da estrutura helicoidal teórica, que serão úteis no desenvolvimento do modelo proposto.

Considerando:

R = raio da corda [m]

r = raio do cilindro contendo o caminho helicoidal de uma determinada fibra [m]

T_w = torção da corda, expressa em voltas por unidade de comprimento [m^{-1}]

h = altura correspondente ao passo da hélice [m]

α = ângulo de hélice na camada mais externa da corda [rad]

θ = ângulo de hélice da camada concêntrica no raio r [rad]

l = comprimento da fibra em uma volta de torção, no raio r [m]

L = comprimento da fibra em uma volta de torção, no raio R [m]

A partir da Figura 24 pode ser obtida por consequência direta a seguinte relação:

$$h = 1/T_w \quad (8)$$

Extraindo cilindros concêntricos na Figura 24 ao longo de uma linha paralela ao eixo da corda, e então planificando os mesmos, é possível obter a Figura 24(b) e Figura 24(c).

Segue que:

$$l^2 = h^2 + 4\pi^2 r^2 \quad (9)$$

$$L^2 = h^2 + 4\pi^2 R^2 \quad (10)$$

$$\tan \theta = \frac{2\pi r}{h} \quad (11)$$

$$\tan \alpha = \frac{2\pi R}{h} \quad (12)$$

3.6.4. Análise das forças radiais atuantes

Para conveniência no desenvolvimento do modelo, é útil introduzir os parâmetros normalizadores:

$$u = \frac{l}{L} \quad (13)$$

$$c = \cos \alpha = \frac{h}{L} \quad (14)$$

em que u reflete a medida da posição radial e varia de c no centro da corda a 1 (um) na superfície. Segue a partir das equações 9 e 10 que sua relação com r é dada por:

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{l^2 - h^2}{L^2 - h^2} = \frac{u^2 - c^2}{1 - c^2} \quad (15)$$

onde c é um parâmetro que indica a medida de torção da corda.

As seguintes relações serão necessárias na presente análise, e podem ser obtidas diretamente com o auxílio da Figura 24 e das equações 13 e 14.

$$\cos \theta = \frac{h}{l} = \frac{c}{u} \quad (16)$$

$$\sin \theta = \frac{2\pi r}{l} = \left(1 - \frac{c^2}{u^2}\right)^{1/2} \quad (17)$$

Para deduzir as relações entre as forças envolvidas no processo de torção, um elemento na corda é analisado, como mostrado na Figura 25(a) e Figura 25(b).

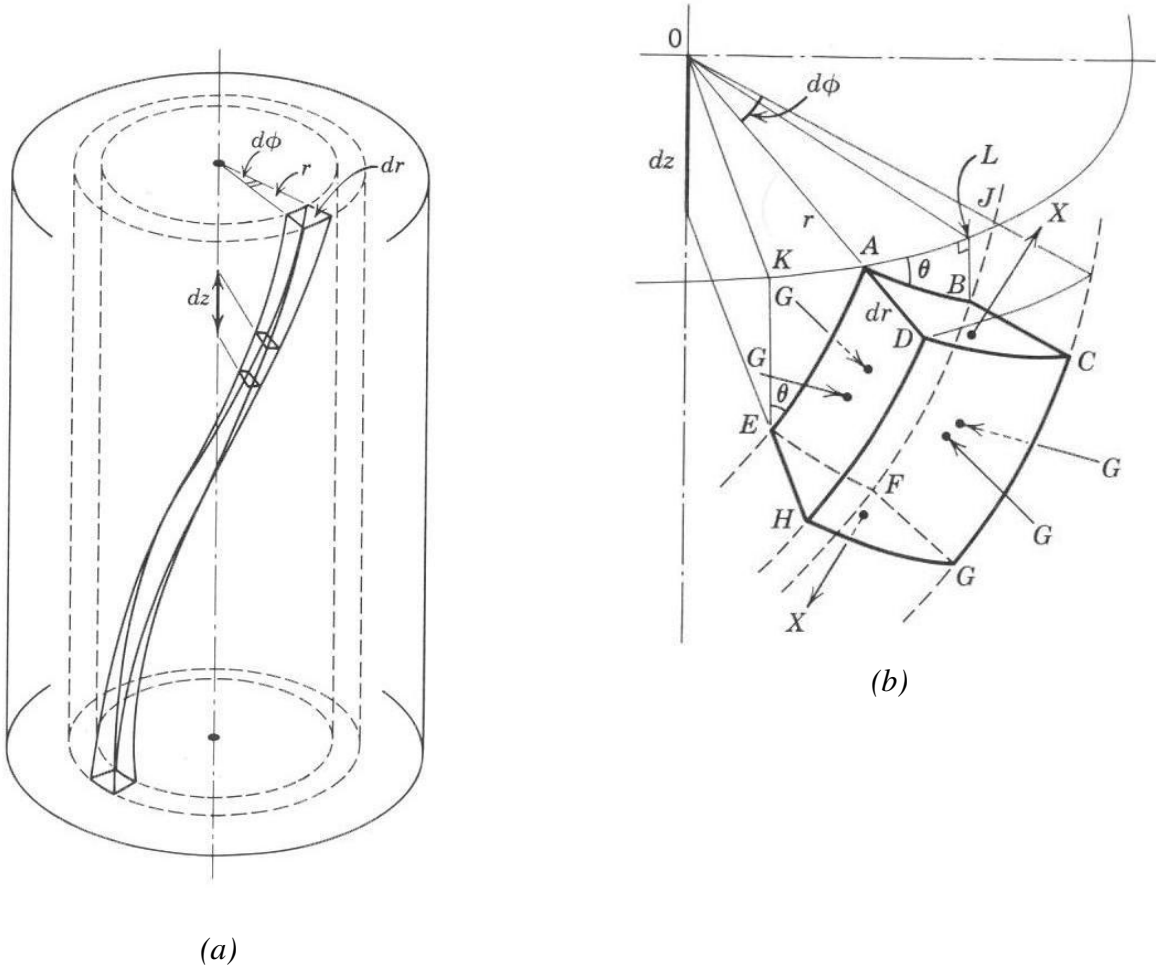


Figura 25: Forças atuantes na corda. (a) corda torcida helicoidalmente mostrando os elementos definidos por dr , $d\phi$, dz ; (b) vista ampliada do elemento.
Fonte: HEARLE et al. (1969).

O referido elemento está limitado por dois cilindros concêntricos de raios r e $(r+dr)$, e por duas hélices deslocadas uma em relação à outra pelo ângulo $d\phi$. As faces do elemento são perpendiculares ao eixo da hélice do elemento, separada pelo comprimento dz paralelo ao eixo da corda.

A partir da geometria do elemento, é possível obter as seguintes relações:

$$AD = dr \quad (18)$$

$$AB = AJ \cos \theta = r d\phi \cos \theta \quad (19)$$

$$AE = EK \sec \theta = dz \sec \theta \quad (20)$$

Atuando sobre o elemento há forças perpendiculares a cada uma das seis faces, que podem ser representadas por suas respectivas pressões e áreas de contato.

Em geral as tensões atuantes perpendicularmente ao eixo das fibras podem ser diferentes na direção radial e tangencial. Entretanto a fim de se fazer qualquer progresso analítico, foi assumido que elas são iguais em todas as direções perpendiculares aos eixos das fibras, considerando condições hidrostáticas.

As tensões de compressão atuantes perpendicularmente ao eixo das fibras são denotadas por G , enquanto X é a tensão de tração desenvolvida na direção do eixo das fibras. Foram adotadas as seguintes convenções de sinais: a tensão X é tomada como positiva quando em tração, e G como positiva quando em compressão.

3.6.5. Forças atuantes sobre o elemento da corda

Dada a simetria da corda, as forças que atuam nas duas extremidades precisam ser iguais, e assim tem-se:

Forças atuantes nas faces $ABCD$ e $EFGH$:

$$\begin{aligned} &= X \cdot \text{área } ABCD \\ &= X \cdot AB \cdot AD \\ &= X \cdot r \cdot \cos\theta \cdot d\phi \cdot dr \end{aligned} \quad (21)$$

Forças atuantes nas faces $ADHE$ e $BCGF$:

$$\begin{aligned} &= G \cdot \text{área } ADHE \\ &= G \cdot AD \cdot AE \\ &= G \cdot \sec\theta \cdot dr \cdot dz \end{aligned} \quad (22)$$

Forças atuantes na face $ABFE$:

$$\begin{aligned} &= G \cdot \text{área } ABFE \\ &= G \cdot AB \cdot AE \\ &= G \cdot r \cdot d\phi \cdot dz \end{aligned} \quad (23)$$

No elemento perpendicular ao raio da corda, ambas as tensões G e a área da face sofrerão variação com r . Fazendo a expansão em série de Taylor, tem-se que:

Força atuante na face $DCGH$:

$$= Grd\phi dz + \frac{\partial}{\partial r}(Gr)drd\phi dz \quad (24)$$

$$= Grd\phi dz + \left(G + r \frac{dG}{dr}\right)drd\phi dz \quad (25)$$

3.6.6. Equilíbrio radial

Para o equilíbrio, a soma algébrica das forças atuantes sobre o elemento na direção radial da corda deve ser nula. Estas forças são listadas a seguir.

i) Uma componente no sentido da periferia para o centro da corda correspondente à tração atuante nas fibras, causada pela diferença de direção das forças que atuam sobre as faces $ABCD$ e $EFGH$, devido ao fato do elemento ser parte de uma hélice de ângulo θ . Para calcular esta componente, torna-se necessário encontrar o ângulo interno $K\hat{O}A$ entre as faces e o eixo da corda:

$$K\hat{O}A = \frac{AK}{r} = \frac{KE \tan \theta}{r} = dz \frac{\tan \theta}{r} \quad (26)$$

Então, a partir da equação 21, usando os teoremas apresentados nos Apêndices 10.1 e 10.2, e com a direção interna tomada como positiva, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Componente radial de tração na fibra} &= Xr \cos \theta d\phi dr dz (dz \tan \theta / r) \sin \theta \\ &= X \sin^2 \theta d\phi dr dz \end{aligned} \quad (27)$$

ii) Uma componente no sentido do centro para a periferia da corda correspondente à compressão atuante nas fibras, causada pela diferença de direção das forças que atuam sobre as faces $ADHE$ e $BCGF$. Estas faces estão separadas ao longo da hélice de um ângulo de $(\pi/2 - \theta)$, por um deslocamento angular em torno do eixo da corda igual a $A\hat{O}L$:

$$A\hat{O}L = \frac{AL}{r} = \frac{AB \cos \theta}{r} = d\phi \cos^2 \theta \quad (28)$$

Usando a equação 22 e os teoremas supracitados, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Componente radial da força transversal tangencial} &= -G \sec \theta dr dz d\phi \cos^2 \theta \sin(\pi/2 - \theta) \\ &= -G \cos^2 \theta d\phi dr dz \end{aligned} \quad (29)$$

iii) A diferença entre as forças sobre as faces $ABFE$ e $DCGH$. A partir das equações 23 e 25, tem-se:

$$\text{Força radial} = \left(G + r \frac{dG}{dr} \right) d\phi dr dz \quad (30)$$

Chega-se ao equilíbrio somando as três componentes das forças listadas nos itens i, ii e iii:

$$X \sin^2 \theta d\phi dr dz - G \cos^2 \theta d\phi dr dz + \left(G + r \frac{dG}{dr} \right) d\phi dr dz = 0 \quad (31)$$

Esta equação pode ser reduzida a:

$$r \frac{dG}{dr} = -(X + G) \sin^2 \theta \quad (32)$$

ou, usando a equação 17:

$$\frac{1}{r} \frac{dG}{dr} = -(X + G) \frac{4\pi^2}{l^2} \quad (33)$$

Diferenciando a equação 9, com h mantido constante, tem-se:

$$2l dl = 8\pi^2 r dr \quad (34)$$

A equação 13 pode ser também diferenciada, obtendo-se:

$$dl = L du \quad (35)$$

e assim, usando as equações 13 e 35, a expressão 34 pode ser reescrita como:

$$r dr = \frac{1}{4\pi^2} L^2 u du \quad (36)$$

Substituindo as equações 36 e 13 na equação 33, tem-se finalmente:

$$\frac{dG}{du} = -\frac{(X+G)}{u} \quad (37)$$

Esta é a equação diferencial que governa o equilíbrio radial da corda torcida, como apresentado em Hearle et al. (1969).

3.6.7. Cálculo da distribuição de tensão radial na corda

A equação 37 é uma equação diferencial de primeira ordem e pode ser resolvida analiticamente através de métodos usuais. Para a sua solução, é necessário determinar previamente uma expressão para a tensão de tração X , que deve variar conforme o nível de torção e também dentro do raio r da corda.

A tensão X pode ser obtida diretamente a partir da transformação do estado plano de tensões, considerando a hipótese de que a corda está sujeita a dois momentos torçores iguais e opostos – um de ação, aplicado pelo cilindro torçor, e outro de reação, aplicado pela bobina de enrolamento. Dessa forma a corda torcida, após sair do adensador, estará submetida apenas a esforços de cisalhamento quando momentos torçores iguais e opostos são aplicados nas suas extremidades.

A Figura 26 apresenta um segmento de corda com momentos torçores iguais e opostos aplicados nas suas extremidades.

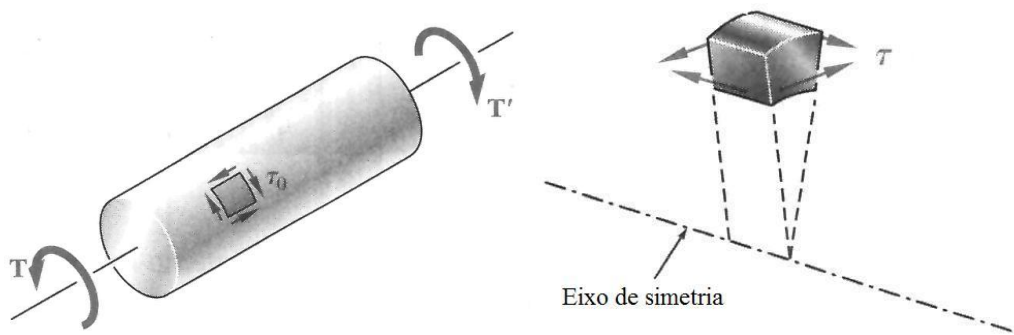


Figura 26: Torque aplicado nas extremidades de um segmento de corda.
Fonte: BEER et al. (2006).

No elemento orientado com as faces perpendiculares ao eixo da corda, há somente esforços de cisalhamento puro. Quando o elemento é girado de um ângulo θ em relação ao eixo da corda (Figura 27), é possível fazer uma transformação de tensões, e as tensões de cisalhamento transformam-se em tensões de tração e compressão, segundo a direção tangencial e perpendicular às fibras respectivamente, além de novas tensões de cisalhamento.

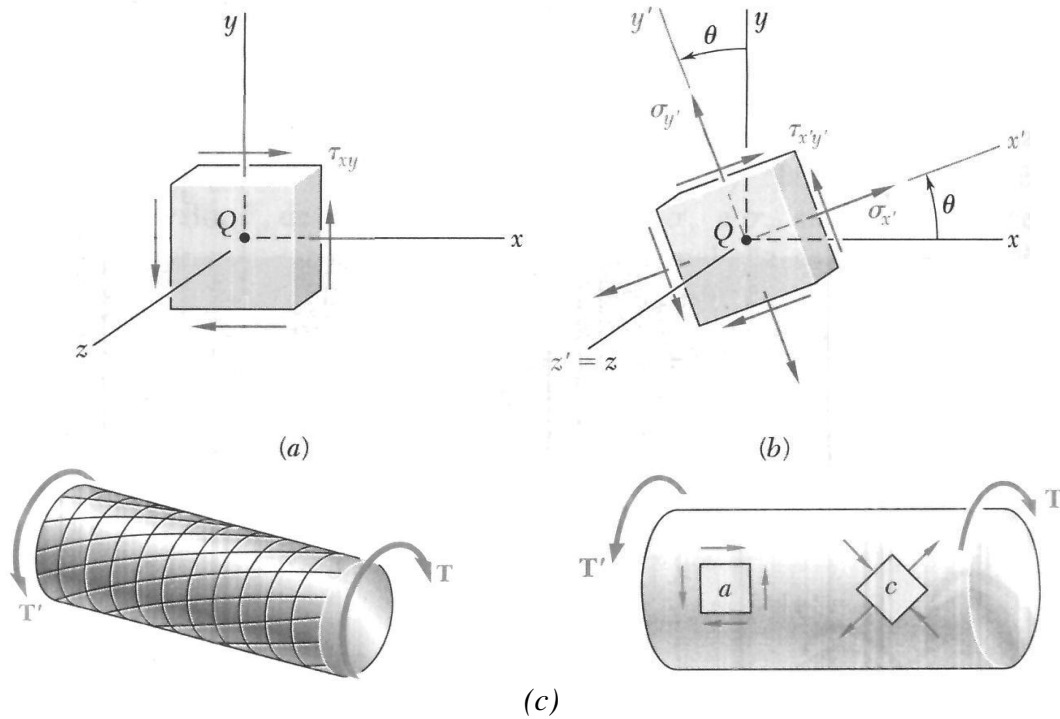


Figura 27: Transformação das tensões de cisalhamento em tensões de tração e compressão. Adaptado de: BEER et al. (2006).

A tensão de tração $\sigma_{x'}$, paralela às fibras que estão orientadas formando um ângulo de hélice θ com o eixo da corda, pode ser obtida a partir da expressão clássica de transformação de tensões da resistência dos materiais (TIMOSHENKO, 1976; BEER et al., 2006):

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (38)$$

Fazendo $\sigma_x = \sigma_y = 0$, dada a hipótese de cisalhamento puro em esforços de torção, resulta em:

$$\sigma_{x'} = \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (39)$$

em que:

$\sigma_{x'}$ = tensão de tração desenvolvida ao longo do eixo das fibras [N.m^{-2}]

τ_{xy} = tensão de cisalhamento originada pela torção do segmento de corda [N.m^{-2}]

A tensão de cisalhamento τ_{xy} está relacionada com o torque através da equação clássica:

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} \quad (40)$$

onde:

T = torque aplicado nas extremidades da corda [N.m]

r = raio da corda, que varia de zero no centro a R na extremidade [m]

J = momento de inércia polar de um eixo cilíndrico [m⁴]

O momento de inércia polar é dado pela seguinte expressão, supondo que a corda apresenta seção transversal circular:

$$J = \frac{\pi R^4}{2} \quad (41)$$

onde R é o raio final da corda torcida.

Substituindo a equação 40 na expressão 39, tem-se

$$\sigma_{x'} = \frac{Tr}{J} \sin 2\theta \quad (42)$$

A expressão 42 pode ser reescrita utilizando as relações normalizadas 13, 14 e 15, considerando também a identidade $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$:

$$\sigma_{x'} = \frac{2T}{J} R \sqrt{\frac{u^2 - c^2}{1 - c^2}} \cdot \sqrt{\frac{u^2 - c^2}{u^2}} \frac{c}{u} \quad (43)$$

Observando que $\sigma_{x'}$ é equivalente a X e substituindo a relação 43 na equação diferencial 37, tem-se:

$$\frac{dG}{du} = - \frac{\left(\frac{2T}{J} R \sqrt{\frac{u^2 - c^2}{1 - c^2}} \cdot \sqrt{\frac{u^2 - c^2}{u^2}} \frac{c}{u} + G \right)}{u} \quad (44)$$

A solução desta equação diferencial fornece uma expressão analítica que relaciona a distribuição da pressão de adensamento G com o torque aplicado (T), em função da posição

radial normalizada u e das deformações ocorridas na corda, tais como o ângulo de hélice das fibras (c) e o raio final da corda (R).

A equação diferencial 44 foi resolvida utilizando o software de matemática simbólica Maple 11[®], considerando a condição de contorno $G(1) = 0$, ou seja, na superfície externa da corda a pressão *relativa* de adensamento radial é nula (pressão atmosférica), crescendo da periferia para o centro, conforme relatado por Hearle et al. (1969). A solução analítica é dada pela expressão:

$$G(u) = \frac{2TR}{J} \left\{ \frac{c}{u\sqrt{1-c^2}} \left[c^2 + 1 - \frac{(c^2+u^2)}{u} \right] \right\} \quad (45)$$

A pressão no núcleo da corda, correspondente à máxima pressão de adensamento, pode ser obtida fazendo $u = c$ na expressão 45:

$$G(c) = \frac{2TR}{J} \left[\frac{(c-1)^2}{\sqrt{1-c^2}} \right] \quad (46)$$

Substituindo na equação 46 as expressões 14 e 41, tem-se finalmente:

$$G = \frac{4T}{\pi R^3} \left[\frac{(\cos \alpha - 1)^2}{\sin \alpha} \right] \quad (47)$$

A pressão de adensamento máxima é dada como função do torque aplicado (T), do raio da corda (R) e do ângulo de hélice α da camada helicoidal mais externa.

Dessa forma, medidas experimentais do diâmetro final da corda, bem como da inclinação das fibras externas devem ser obtidas para a alimentação do modelo proposto, visando estimativas da pressão de adensamento quando a corda estiver submetida ao torque T .

3.7. Relação entre velocidade linear da corda e velocidade de rotação do cilindro torçor

Para haver torção na corda, a velocidade de rotação do cilindro torçor não pode ser inferior a um determinado valor da velocidade de saída da corda. Dessa forma, as velocidades de rotação e linear devem estar sincronizadas.

Considerando o elemento de corda ilustrado na Figura 25(b), pode-se escrever que a velocidade linear de avanço da corda é dada pela relação:

$$v_c = \frac{dz}{dt} \quad (48)$$

em que:

v_c = velocidade linear de avanço da corda [m.s⁻¹]

A velocidade de rotação pode ser expressa por:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (49)$$

sendo:

$d\varphi$ = ângulo infinitesimal $K\hat{O}A$ [rad]

ω = velocidade de rotação [rad.s⁻¹]

Isolando dt em ambas as expressões e igualando membro a membro, tem-se:

$$\frac{\omega}{v_c} = \frac{d\varphi}{dz} \quad (50)$$

O ângulo de inclinação θ pode ser relacionado com dz e o comprimento de arco infinitesimal KA através da relação trigonométrica:

$$\tan \theta = \frac{rd\varphi}{dz} \quad (51)$$

Utilizando a equação 51, a expressão 50 pode ser reescrita como:

$$\frac{\omega}{v_c} = \frac{\tan \theta}{r} \quad (52)$$

Considerando a inclinação α das folhas na superfície da corda, tem-se finalmente:

$$\omega = v_c \frac{\tan \alpha}{R} \quad (53)$$

Esta equação está de acordo com a modelagem proposta por Hearle et al. (2008). Assim sendo, para haver torção, a velocidade mínima de rotação deve igual ou superior à estabelecida pela equação 53. Se for inferior, a força de atrito cinético não será capaz de torcer as folhas até o limite de inclinação, causando o deslizamento axial entre as folhas e comprometendo o entrelaçamento e a estruturação da corda. Se for igual ou superior, o atrito cinético prevalecerá levando ao máximo ângulo de inclinação aceitável. Entretanto, deve ser

ressaltado que a elevação da velocidade de rotação acima do estabelecido causa perda de energia devido ao deslizamento.

3.8. Densidade teórica da bobina formada com corda de palha

A densidade teórica alcançada por uma bobina formada com corda de palha pode ser obtida pela relação entre a massa total de corda enrolada e o volume total da bobina.

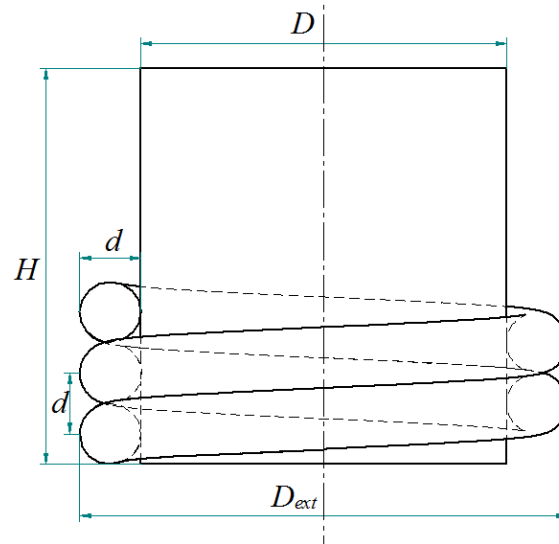


Figura 28: Esquema de bobina produzida com corda de palha.

A massa de corda enrolada na bobina pode ser determinada multiplicando a densidade linear da corda λ_c , expressa em kg.m^{-1} , pelo comprimento correspondente a n voltas verticais da hélice na bobina.

O comprimento correspondente a n voltas de corda enrolada na primeira camada da bobina, como ilustrado na Figura 28, pode ser obtido pela expressão clássica do comprimento de hélice com passo d , sendo dado por:

$$S_1 = n\pi \sqrt{(D + d)^2 + \frac{d^2}{\pi^2}} \quad (54)$$

em que:

S_1 = comprimento total da primeira camada de corda enrolada na bobina [m]

n = número de voltas da corda ao longo do eixo da bobina [voltas]

D = diâmetro da bobina [m]

d = diâmetro da corda [m]

H = altura da bobina [m]

D_{ext} = diâmetro externo da bobina com palha enrolada [m]

Quando a primeira camada é totalmente preenchida, a corda passa a ser enrolada na próxima camada mais externa, e assim o comprimento da hélice aumenta, devido ao incremento no diâmetro. A expressão para o cálculo do comprimento total da segunda camada de corda enrolada passa a ser:

$$S_2 = n\pi \sqrt{(D + 3d)^2 + \frac{d^2}{\pi^2}} \quad (55)$$

A expressão geral do comprimento da hélice S enrolada em N camadas concêntricas é dada por:

$$S = n\pi \sum_{k=1}^N \sqrt{[D + (2k - 1)d]^2 + \frac{d^2}{\pi^2}} \quad (56)$$

O número de voltas da corda ao longo do eixo da bobina pode ser determinado em função do diâmetro da corda d e da altura final da bobina H :

$$n = \frac{H}{d} \quad (57)$$

A massa total da corda, expressa em kg, é dada pela multiplicação da densidade linear da corda λ_c com o comprimento *total* de corda enrolada:

$$m = \frac{\lambda_c H \pi}{d} \sum_{k=1}^N \sqrt{[D + (2k - 1)d]^2 + \frac{d^2}{\pi^2}} \quad (58)$$

O diâmetro externo da bobina pode ser obtido pela equação:

$$D_{ext} = D + 2Nd \quad (59)$$

O volume final da bobina com a corda enrolada é dado pela expressão geral:

$$V = \frac{\pi D_{ext}^2}{4} H \quad (60)$$

Substituindo as equações anteriores e simplificando os termos, a expressão geral para a densidade teórica da bobina pode ser obtida fazendo a relação entre a massa total de corda e o volume final da bobina:

$$\rho_{bobina} = \frac{4\lambda_c \sum_{k=1}^N \sqrt{[D+(2k-1)d]^2 + \frac{d^2}{\pi^2}}}{d(D+2Nd)^2} \quad (61)$$

A densidade teórica pode ser estimada a partir do diâmetro final da bobina D_{ext} e de valores experimentais da densidade linear λ_c e do diâmetro da corda d .

A densidade aparente da corda pode ser obtida pela expressão:

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{\lambda_c h_c}{\frac{\pi d^2}{4} h_c} = \frac{4\lambda_c}{\pi d^2} \quad (62)$$

onde:

m_c = massa de corda com comprimento h_c [kg]

V_c = volume da corda, considerando tarugo cilíndrico [m³]

3.9. Materiais e equipamentos utilizados

Para a execução dos ensaios, os seguintes materiais e equipamentos foram utilizados:

- Unidade de testes construída com chapas metálicas, perfis metalon 30 x 30 mm e tubos de aço, unidos por solda;
- Balança digital marca Bioprecisa[®], modelo BB-3000, com capacidade de 3.000 g e precisão de 10⁻¹ g;
- Balança digital marca Filizola[®], com capacidade de 30.000 g e precisão de 10 g;
- Estufa de laboratório convencional;
- Sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo Spider 8;
- Kit de comunicação serial marca WEG[®], modelo KSD-CFW08;
- Computador desktop Pentium 4 com Windows Vista[®];
- Softwares MATLAB R2008b[®], Maple 11[®], SolidEdgeV20[®], SuperDrive5.8[®], CatmanEasy[®]V2.21 e Pacote Office[®] 2007.
- Filme de PVC para alimentos, marca Magipac[®];
- Fita adesiva e caneta marcadora;
- Dois motores elétricos trifásicos de indução marca WEG[®], IV pólos, modelo W21, com potência de 1,5 cv;

- Dois inversores de frequência marca WEG[®], modelo CFW-08;
- Serra de fita automática;
- Presilhas plásticas;
- Recipiente plástico;
- Célula de carga marca Gefran[®], modelo TU-K1M, com capacidade de 1.000 kg;
- Trena em aço de 5 m;
- Proveta de vidro com escala graduada de 20 mL e capacidade total de 2.000 mL.

3.10. Métodos para avaliação dos resultados e planejamento da experimentação

3.10.1. Considerações iniciais

Com o objetivo de avaliar o desempenho operacional do protótipo, bem como as características da corda de palha formada, os seguintes itens foram determinados experimentalmente:

- Densidade aparente e linear da corda de palha formada;
- Torque aplicado na corda pelo cilindro torçor;
- Força axial necessária para manter a cadência de processamento;
- Ângulo de inclinação das folhas e diâmetro da corda;
- Relação experimental entre torque e densidade.

Foram utilizados dois diâmetros internos diferentes para o cilindro torçor (55 mm e 35 mm de diâmetro), cujas superfícies apresentam rugosidades distintas, dadas em função do método de usinagem do material. Dessa forma, os feixes de corda apresentaram diâmetros próximos a 55 mm e 35 mm.

Com os dados experimentais levantados, foi construída a curva que relaciona a pressão teórica de adensamento com a densidade aparente da corda, além da densidade teórica alcançada pela bobina formada a partir da corda enrolada.

3.10.2. Características e instrumentação da unidade de testes

O protótipo construído (Figura 29) foi pré-dimensionado em função do comprimento das folhas de palha seca e do diâmetro final desejado da corda. Os diâmetros maior e menor do cone alimentador são 250 e 60 mm respectivamente, apresentando altura de 400 mm.



Figura 29: Unidade de testes construída.

O cilindro torção foi construído com diâmetro interno de 55 mm e altura de 130 mm. Para reduzir o diâmetro do cilindro, foi construído um dispositivo redutor (luva) com diâmetro interno de 35 mm e altura de 60 mm, projetado para ser instalado no interior do cilindro de 55 mm (Figura 30). A estrutura de sustentação e o cone foram pintados com fundo nivelador. O cilindro torção e o redutor de diâmetro foram construídos em aço 1020, e não foram pintados.

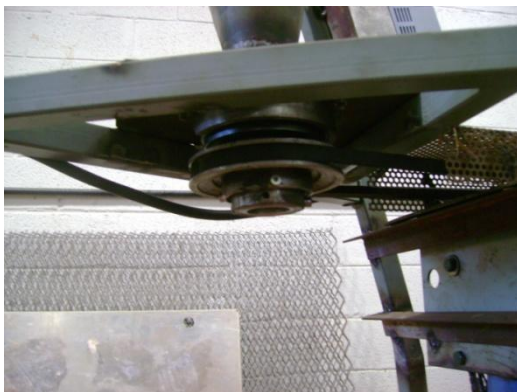


Figura 30: Detalhes do cilindro torção e do dispositivo redutor de diâmetro.

O motor elétrico de 1,5 cv foi acoplado ao cilindro torçor usando transmissão de polia e correia perfil “V” - A. Como o cone alimentador é solidário ao cilindro torçor, ambos giram à mesma rotação. A polia movida acoplada ao cilindro torçor tem diâmetro nominal de 130 mm, e a polia motora 64 mm, resultando em uma redução de 0,49. O controle da rotação foi feito através de inversor de frequência.

Para fazer a aquisição dos dados referentes ao torque do motor, foi utilizado o módulo de comunicação serial do próprio inversor de frequência, que permite comandar e armazenar os dados do inversor diretamente a partir do software SuperDrive5.8[®] instalado no computador.

Os registros das forças axiais para tracionar as amostras de palha do protótipo foram feitas a partir do sistema de aquisição de dados Spider[®], conectado à célula de carga instalada no aparato experimental, conforme ilustrado na Figura 31. A instalação e uso do dispositivo são mostrados na Figura 37.



Figura 31: Sistema de aquisição de dados e dispositivo para medição da força axial.

A bobina utilizada para enrolar a corda apresenta 595 mm de comprimento e diâmetro de 100 mm, possuindo manivela em uma das extremidades para dar início suave ao enrolamento da corda (Figura 29). Na outra extremidade do eixo foi instalada uma roda dentada com 35 dentes, acoplada por correntes à roda dentada de 10 dentes fixada no eixo do motor elétrico. O controle da velocidade do motor também foi realizado com inversor de frequência.

3.10.3. Preparo das amostras

A palha utilizada nos ensaios foi obtida na Fazenda São Raimundo, localizada em Campinas/SP, pertencente à usina sucroalcooleira Ester, originária de 2º corte da variedade RB867515, com plantio instalado na quadra 30916, apresentando espaçamento de 1,4 m. As folhas secas foram extraídas manualmente dos colmos de cana-de-açúcar, sendo removidas a partir da bainha e mantidas no seu comprimento original. O comprimento médio das folhas variou de 1,30 a 1,50 m, e a umidade média determinada em estufa pelo método padronizado foi de 10,62%, expressa em base úmida. As amostras foram preparadas ordenando-se previamente as folhas brutas, formando feixes alinhados (Figura 32).



Figura 32: Ordenamento das folhas secas.

Para viabilizar o controle dos ensaios, bem como garantir a padronização das repetições, as extremidades dos feixes (bainhas e pontas) foram extraídas, após seu ordenamento, utilizando serra de fita automática, resultando em comprimentos de 0,70 m, correspondente à parte central da folha (Figura 33). Com este procedimento, todas as repetições puderam ser controladas metodicamente a partir da massa dos feixes.



Figura 33: Amostras de palha preparadas com 0,70 m de comprimento.

3.10.4. Pré-ensaios

Com o objetivo de determinar as quantidades mínima e máxima de palha que o protótipo comporta, foram realizados pré-ensaios para esta finalidade. A quantidade mínima estabelecida de palha foi aquela na qual não há modificação no torque do motor ao inserir os feixes na unidade de testes, não ocorrendo portanto a torção dos feixes. A quantidade máxima estabelecida foi dada em função da limitação da capacidade de processamento do protótipo, acima da qual ocorre a obstrução do cilindro torçor com a palha.

Para o diâmetro de 55 mm do cilindro torçor, os limites inferior e superior da massa dos feixes de palha foram de 150 g e 300 g, respectivamente. Abaixo de 150 g o torque no motor não se altera, pois há pouco contato entre a superfície do cilindro e o feixe. Acima de 300 g os feixes não passam pela abertura do cilindro. Dessa forma, foram utilizados nos ensaios definitivos feixes com massa de 150, 175, 200, 225, 250, 275 e 300 g. Como o comprimento das amostras é fixo (0,70 m), o número de folhas em cada amostra é aproximadamente proporcional à massa dos feixes.

Os pré-ensaios para o diâmetro de 35 mm do cilindro torçor indicaram os limites inferior e superior da massa dos feixes de 60 g e 130 g respectivamente. As massas dos feixes ensaiadas em definitivo foram de 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 e 130 g.

Foram feitos pré-ensaios com o objetivo de avaliar se há influência da velocidade de rotação do cone e do cilindro torçor no torque aplicado aos feixes de palha. Para tanto, foram ensaiadas duas velocidades de rotação, uma de 112 rpm e outra de 225 rpm. Utilizou-se palha inteira (sem extração das extremidades) nos ensaios preliminares, com feixes de 500, 750, 1000 e 1250 g, além da testemunha (cone sem carga). O diâmetro ensaiado foi de 55 mm, e o comportamento do torque obtido é apresentado na Figura 34.

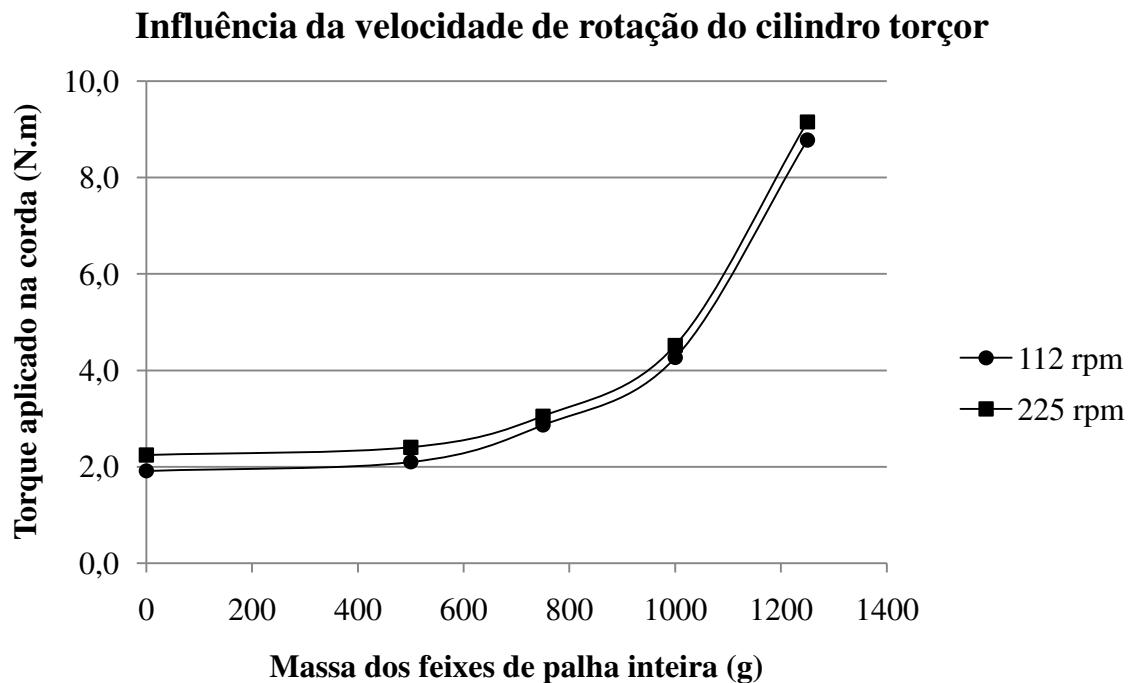


Figura 34: Influência da velocidade de rotação no torque.

Os resultados preliminares indicaram pouca influência da velocidade de rotação do cilindro torçor sobre o torque aplicado à massa de palha. Este fato ocorre por haver deslizamento entre o cilindro torçor e a amostra de palha, não prevalecendo a expressão clássica da mecânica que relaciona o torque com a velocidade angular.

Foram também realizados pré-ensaios para verificar as condições de formação de corda e definir as massas dos feixes de palha a serem utilizadas nos experimentos de corda inteira. Dessa forma, para o diâmetro de 55 mm foram ensaiados feixes de palha inteira com bainha, e massa variando de 100 g a 350 g, com incremento de 50 g, e para o diâmetro de 35 mm, feixes com massa variando de 60 g a 130 g, com incremento de 10 g. Observou-se que

durante a formação de corda com massas elevadas, a mesma se rompia na região da bainha das folhas, principalmente quando utilizado o diâmetro menor (35 mm). Este fato ocorre devido à bainha apresentar propriedade geométrica e mecânica distinta do restante da folha (maior curvatura e rigidez), oferecendo maior dificuldade de passagem pelo cilindro torçor e causando a sua obstrução. No interior do cilindro ocorre aglomeração de material, aumentando a resistência por atrito e causando a ruptura da corda, uma vez que não há espaço para sua acomodação e/ou deformação. Para massas pequenas, observou-se que o cilindro não aplicava torque suficiente para torcer a corda, comprometendo a interligação entre as folhas. Este fato ocorre pelo baixo contato entre a superfície de torção do cilindro e a corda, diminuindo o torque aplicado na mesma. A partir dos pré-ensaios de corda inteira, optou-se por remover as bainhas dos feixes e utilizar duas massas distintas: 300 g para o diâmetro de 55 mm e 100 g para o diâmetro de 35 mm, com quatro repetições em cada ensaio.

Finalmente, os pré-ensaios realizados com material picado (palhiço recuperado do campo imediatamente após a colheita, proveniente do extrator primário e secundário da colhedora de cana-de-açúcar), revelaram que não foi possível a formação de corda com fragmentos a partir do princípio proposto. Observou-se a ocorrência constante de rápida desestruturação do material recém-formado, dificultando a sua estruturação e consequentemente a formação de corda contínua (Figura 35).



Figura 35: Pré-ensaios com palhiço proveniente dos extratores da colhedora.

Este fato pode ser explicado pelo efeito do desalinhamento e emaranhamento das folhas, que associado ao seu tamanho reduzido, compromete tanto o entrelaçamento quanto o atrito interno, responsável por manter a estrutura da corda.

3.10.5. Planejamento experimental

A partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares, foi montado um plano de experimento para os dois diâmetros ensaiados, onde cada tratamento teve quatro repetições:

- Diâmetro de 55 mm: massa inicial de 150 g, variando a cada 25 g até o limite superior de 300 g.
- Diâmetro de 35 mm: massa inicial de 60 g, variando a cada 10 g até o limite superior de 130 g.

A velocidade de rotação do cilindro torçor foi mantida constante em 160 rpm para todos os ensaios.

Nos experimentos de corda inteira, foram ensaiadas duas densidades lineares distintas, compatíveis com os diâmetros de 55 mm e 35 mm. Cada ensaio teve também quatro repetições.

3.10.6. Determinação da densidade aparente e linear das amostras de palha

Para a determinação da densidade aparente dos feixes torcidos, os mesmos foram separados de acordo com as massas pré-determinadas listadas no item 3.10.5, utilizando recipiente e balança de precisão (Figura 36).



Figura 36: Medição das massas dos feixes em balança de precisão.

Em cada ensaio, os feixes foram inseridos manualmente no interior do cone alimentador em rotação, e encaminhados para o cilindro torçor, responsável por aplicar o torque na amostra de palha. O torque de reação foi aplicado ao feixe com as mãos, mantendo-o imobilizado a jusante do cilindro torçor. Neste momento o sistema de aquisição de dados de torque foi acionado, registrando dados a uma taxa de 1 Hz durante 60 s. Após esse período e com o motor ainda ligado, o filme de PVC foi utilizado para impermeabilizar a superfície do segmento de corda já torcida (a jusante do cilindro torçor), visando evitar a desestruturação da torção e viabilizando a medição do volume da amostra por imersão em água. Com o motor desligado, o dispositivo para medir a força axial foi instalado na extremidade do feixe torcido com o auxílio de presilhas plásticas, sendo os dados de força registrados no Spider® durante a aplicação de força manual até a remoção completa do feixe do protótipo (Figura 37).

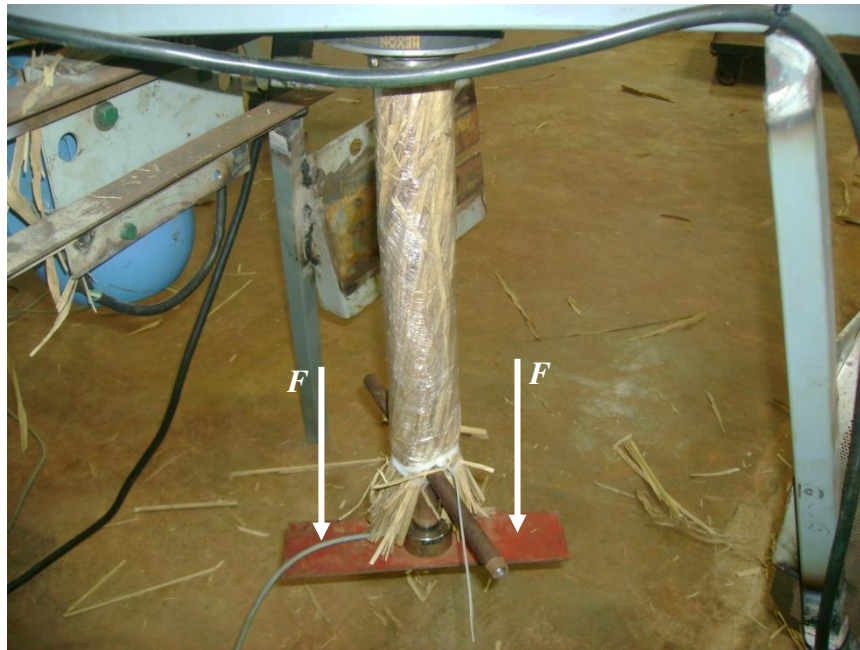


Figura 37: Dispositivo instalado no feixe torcido e impermeabilizado.

Após a retirada do feixe torcido do protótipo, a amostra foi cortada no comprimento padrão de 0,25 m utilizando serra de fita. As extremidades cortadas foram também impermeabilizadas com filme de PVC e fita adesiva.

Para a determinação do ângulo de inclinação das folhas com o eixo da amostra, a orientação da palha foi realçada com caneta marcadora, permitindo obter os catetos adjacente e oposto, cujo ângulo foi calculado por trigonometria (Figura 38).



Figura 38: Amostra impermeabilizada com ângulo de inclinação das folhas realçado.

A massa de cada amostra foi obtida usando balança de precisão, e o volume determinado por imersão direta em água com auxílio de proveta graduada. A densidade aparente do feixe torcido foi calculada com o uso da expressão:

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} \quad (63)$$

sendo

ρ_c = densidade aparente do feixe de palha torcido [kg.m^{-3}]

m_c = massa da amostra [kg]

V_c = volume da amostra [m^3]

A densidade linear, expressa em kg.m^{-1} , foi obtida pela relação entre a massa de cada amostra pelo seu comprimento padrão de 0,25 m.

Dada a variabilidade do diâmetro dentro de uma mesma amostra, optou-se por calcular o diâmetro equivalente, que foi obtido de forma indireta a partir do volume e comprimento da amostra. O diâmetro equivalente é dado pela expressão:

$$D_e = \sqrt{\frac{4V_c}{\pi H_c}} \quad (64)$$

sendo

D_e = diâmetro equivalente da amostra [m]

H_c = 0,25 (comprimento em que as amostras foram cortadas) [m]

V_c = volume da amostra obtido experimentalmente [m³]

3.10.7. Determinação dos dados de torque nos ensaios de corda inteira

Nos ensaios de corda inteira, as amostras de palha foram preparadas ordenando-se as folhas no mesmo sentido, extraindo apenas a bainha e mantendo intacta a outra extremidade da palha (ponta). As massas dos feixes foram obtidas por balança de precisão.

O primeiro feixe foi inserido no cone alimentador em rotação, registrando-se os dados de torque continuamente através do sistema de aquisição de dados do inversor de frequência. Na sequência, a corda foi tracionada manualmente e conectada ao gancho da bobina. Simultaneamente ao enrolamento da corda na bobina, o segundo feixe foi alimentado ao cone, permitindo a interligação das folhas e mantendo a cadência no processo de formação. O terceiro feixe de palha foi então inserido ao cone e incorporado ao segundo feixe da corda, finalizando o ensaio.

A corda assim formada foi composta por três feixes de palha alinhados, apresentando comprimentos finais da ordem de 2,90 m. A Figura 55 ilustra a corda de palha enrolada na bobina.

Nos capítulos seguintes são apresentados os resultados dos experimentos, bem como a discussão e as conclusões pertinentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade aparente e linear

Os resultados para a estatística descritiva dos dados de densidade aparente e linear dos feixes de palha são apresentados na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10: Análise descritiva para os dados de densidade aparente

Estatística descritiva - dados de densidade aparente [kg.m ⁻³]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV* (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	97,3	1,6	1,69	95,2	98,8
	Feixe 175 g	114,1	1,9	1,69	111,7	116,4
	Feixe 200 g	119,2	4,5	3,80	113,8	123,4
	Feixe 225 g	132,7	2,7	2,00	129,6	135,2
	Feixe 250 g	140,7	4,9	3,45	134,6	146,3
	Feixe 275 g	158,6	8,7	5,48	149,5	170,3
	Feixe 300 g	171,0	5,9	3,43	166,7	179,5
D2-35 mm	Feixe 60 g	107,3	8,0	7,49	100,4	118,1
	Feixe 70 g	112,6	8,7	7,74	101,9	123,2
	Feixe 80 g	124,1	5,7	4,63	118,0	131,2
	Feixe 90 g	134,9	7,9	5,83	123,2	140,4
	Feixe 100 g	144,4	13,5	9,37	136,6	164,6
	Feixe 110 g	152,9	10,9	7,13	142,3	168,1
	Feixe 120 g	166,6	3,5	2,08	163,6	171,5
	Feixe 130 g	189,4	12,3	6,52	172,8	200,0

*Coeficiente de variação

Pode-se observar pela Tabela 10 que a partir do princípio utilizando torção foi possível obter densidades aparentes semelhantes às alcançadas pelo processo convencional de enfardamento prismático ou cilíndrico (cerca de 180 a 200 kg.m⁻³). Os dados apresentaram baixo desvio padrão e coeficiente de variação, refletindo maior homogeneidade dos dados dentro das repetições.

Na Figura 39 e Figura 40 são mostradas as seções transversais dos feixes impermeabilizados. Pode-se verificar claramente que as seções transversais dos feixes de maior massa (maior densidade aparente e linear) apresentam menos espaços vazios entre as folhas, estando de acordo com o relatado por Hearle et al. (1969) (Figura 20 e Figura 21). Na

Figura 39 é possível visualizar uma amostra contendo fragmento de bainha. Dada a sua rigidez e formato geométrico distintos das folhas, percebe-se que a mesma contribui negativamente reduzindo a densidade aparente da corda, uma vez que aumenta o espaço vazio entre as folhas.



Figura 39: Seção transversal dos feixes torcidos de 55 mm. Sequencia de 300 g à esquerda para 150 g à direita, com as repetições na vertical.



Figura 40: Seção transversal dos feixes torcidos de 35 mm. Sequencia de 130 g à esquerda para 60 g à direita, com as repetições na vertical.

Tabela 11: Análise descritiva para os dados de densidade linear

Estatística descritiva - dados de densidade linear [kg.m^{-1}]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	0,2441	0,0084	3,46	0,2364	0,2516
	Feixe 175 g	0,2877	0,0178	6,19	0,2692	0,3120
	Feixe 200 g	0,3140	0,0113	3,59	0,3036	0,3276
	Feixe 225 g	0,3569	0,0035	0,97	0,3524	0,3608
	Feixe 250 g	0,3939	0,0114	2,89	0,3824	0,4096
	Feixe 275 g	0,4368	0,0051	1,17	0,4304	0,4428
	Feixe 300 g	0,4628	0,0107	2,32	0,4524	0,4760
D2-35 mm	Feixe 60 g	0,1024	0,0067	6,56	0,0980	0,1124
	Feixe 70 g	0,1160	0,0103	8,86	0,1084	0,1304
	Feixe 80 g	0,1373	0,0109	7,92	0,1260	0,1504
	Feixe 90 g	0,1492	0,0052	3,50	0,1436	0,1544
	Feixe 100 g	0,1620	0,0093	5,72	0,1532	0,1748
	Feixe 110 g	0,1797	0,0090	4,99	0,1708	0,1912
	Feixe 120 g	0,1882	0,0048	2,53	0,1832	0,1932
	Feixe 130 g	0,2060	0,0058	2,80	0,2004	0,2132

Observa-se pela Tabela 11 que a densidade linear máxima alcançada pela corda é limitada pelo diâmetro do cilindro torçor. Diâmetros maiores do cilindro permitem maiores densidades lineares, e consequentemente maior vazão mássica de processamento, conforme equação 7. Esta informação é de interesse no dimensionamento de protótipos em escala industrial, visando atender a demanda de palha proveniente do canavial para ser adensada.

4.2. Torque aplicado nos feixes

A Tabela 12 apresenta a estatística descritiva dos dados referentes ao torque aplicado nos feixes ensaiados.

Tabela 12: Análise descritiva para os dados de torque

Estatística descritiva - dados de torque [N.m]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	0,98	0,14	13,84	0,76	1,30
	Feixe 175 g	1,49	0,17	11,67	1,13	2,01
	Feixe 200 g	2,00	0,19	9,66	1,56	2,44
	Feixe 225 g	3,17	0,37	11,65	2,61	4,79
	Feixe 250 g	4,34	0,43	9,87	3,72	5,84
	Feixe 275 g	4,65	0,54	11,63	3,95	6,07
	Feixe 300 g	6,61	0,96	14,53	5,43	9,28
D2-35 mm	Feixe 60 g	0,27	0,12	46,35	0,02	0,53
	Feixe 70 g	0,48	0,11	23,39	0,25	0,72
	Feixe 80 g	0,72	0,15	20,39	0,39	1,07
	Feixe 90 g	0,98	0,14	14,32	0,66	1,38
	Feixe 100 g	1,37	0,19	13,80	0,99	1,89
	Feixe 110 g	1,96	0,16	8,36	1,60	2,55
	Feixe 120 g	2,45	0,22	8,94	2,05	3,08
	Feixe 130 g	3,34	0,32	9,56	2,80	4,13

Para o diâmetro maior (55 mm) do cilindro torçor, houve maior demanda de torque necessária à torção. Este fato ocorre devido à maior massa de palha a ser torcida, e o resultado está de acordo com a teoria de torção clássica da resistência dos materiais, em que o torque é

proporcional ao momento de inércia polar da seção transversal, mantidos constantes o ângulo de torção e a propriedade mecânica da palha, refletido pelo módulo de elasticidade transversal.

Na Figura 41 e Figura 42 foram plotados os dados de densidade aparente dos feixes com os dados da média de torque, extraídos respectivamente da Tabela 10 e Tabela 12. Os dados apresentaram comportamento do tipo potencial, e os ajustes de curva indicaram correlação maior que 96%. Deve ser ressaltado que este comportamento da curva é semelhante à relação existente entre a densidade aparente e pressão de adensamento, desenvolvida no processo de prensa por pistão (BERNACKI et al., 1972).

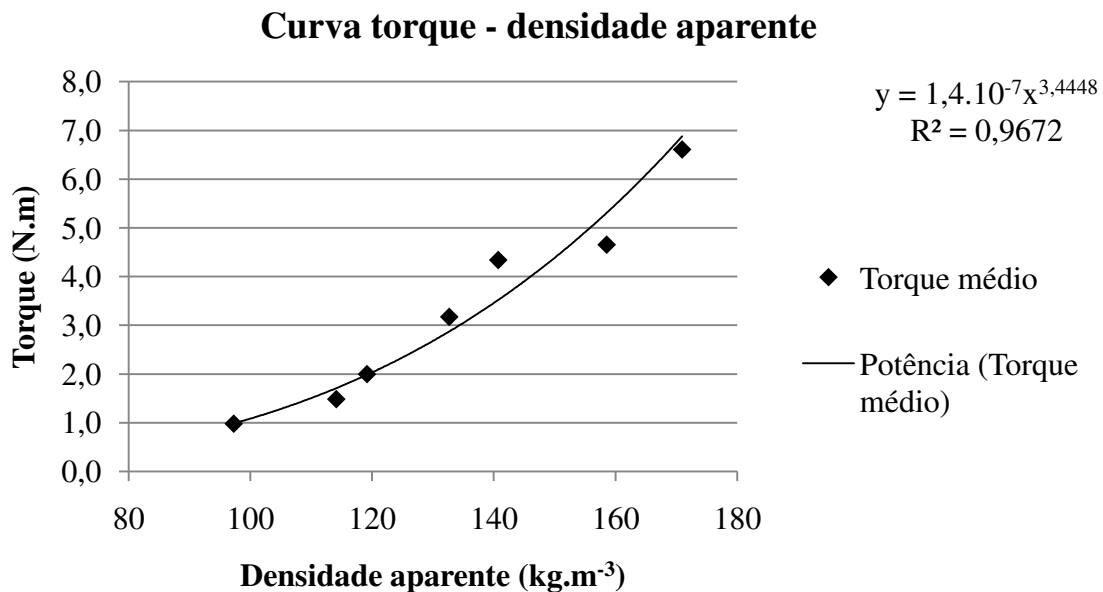


Figura 41: Curva torque-densidade aparente para o diâmetro de 55 mm.

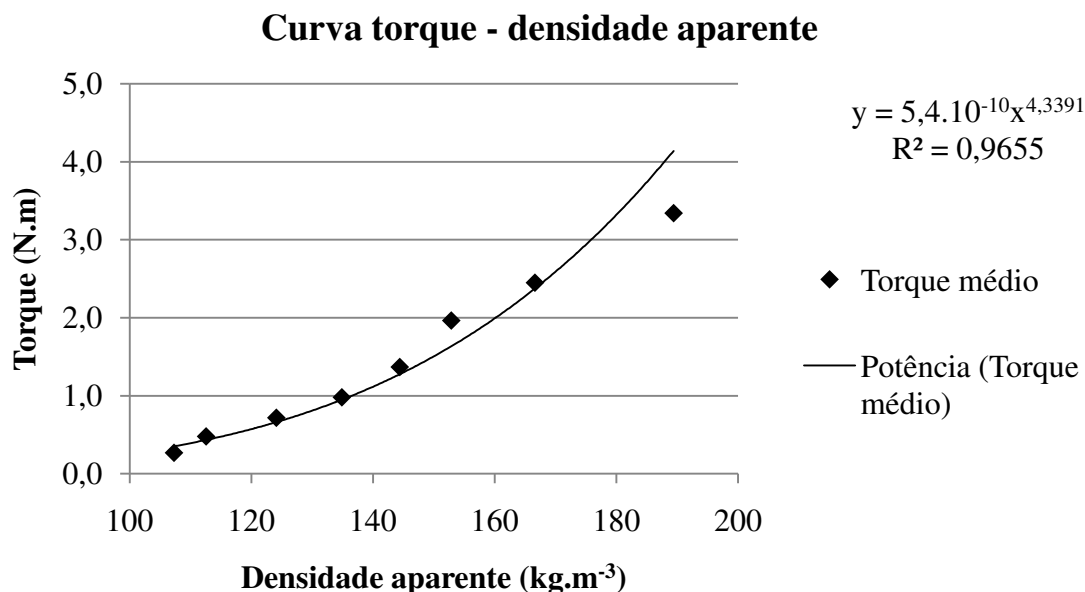


Figura 42: Curva torque-densidade aparente para o diâmetro de 35 mm.

As curvas que relacionam o torque e a densidade linear (Figura 43 e Figura 44) são semelhantes às duas curvas precedentes, diferindo por fator de escala.

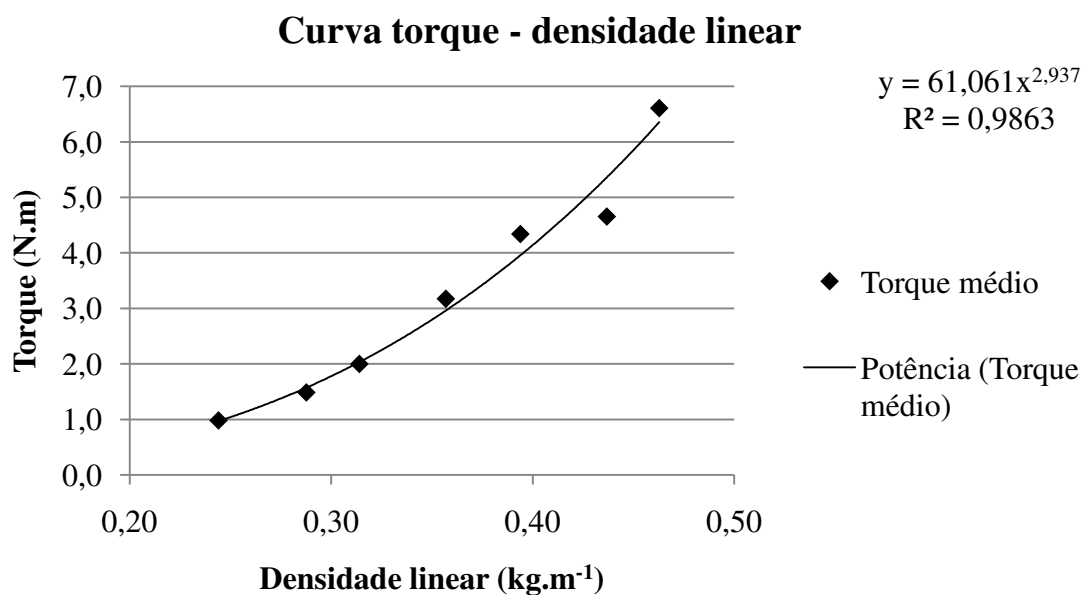


Figura 43: Curva torque-densidade linear para o diâmetro de 55 mm.

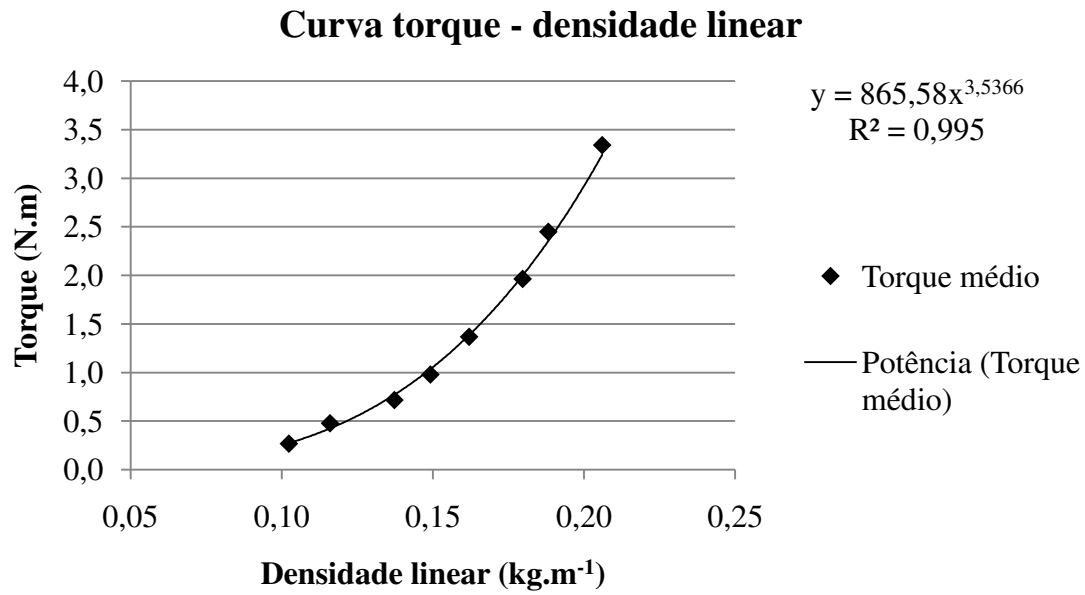


Figura 44: Curva torque-densidade linear para o diâmetro de 35 mm.

4.3. Força axial

Na Tabela 13 é apresentada a estatística descritiva para os dados de força axial obtidos nos ensaios.

Tabela 13: Análise descritiva para os dados de força axial

Estatística descritiva - dados de força axial [N]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	30,9	23,1	74,95	13,7	64,7
	Feixe 175 g	132,1	74,1	56,12	73,9	240,3
	Feixe 200 g	178,8	42,6	23,84	130,5	231,5
	Feixe 225 g	267,2	144,1	53,93	83,7	429,7
	Feixe 250 g	328,1	61,5	18,75	260,9	406,1
	Feixe 275 g	354,4	39,9	11,27	319,8	412,0
	Feixe 300 g	432,9	202,8	46,86	211,9	684,7
D2-35 mm	Feixe 60 g	16,4	6,3	38,19	9,8	23,5
	Feixe 70 g	45,6	21,0	46,14	27,5	69,7
	Feixe 80 g	61,3	28,7	46,77	22,6	91,2
	Feixe 90 g	127,0	63,7	50,18	69,7	217,8
	Feixe 100 g	174,4	27,9	15,97	140,3	202,1
	Feixe 110 g	259,4	185,3	71,44	138,0	535,6
	Feixe 120 g	367,9	119,6	32,52	243,3	515,0
	Feixe 130 g	599,1	83,1	13,87	490,5	691,6

Os picos registrados de forças nos ensaios foram elevados nas maiores densidades, alcançando 690 N. Entretanto, os dados de força axial apresentaram em geral grande dispersão, refletido pelo coeficiente de variação e desvio-padrão elevados. Observou-se que a ordem em que os feixes são inseridos no cone alimentador influencia no pico de força. A folha da palha apresenta o pecíolo no lado da bainha mais espesso do que em relação à extremidade livre, e portanto o lado do feixe contendo o pecíolo demandará maior força ao passar pelo cilindro torçor (Figura 45).

As informações de força axial são de interesse na especificação do motor de acionamento da bobina, que constitui no elemento responsável por tracionar e enrolar a corda.



Figura 45: Vista superior do cone alimentador. Força axial necessária para tracionar o feixe pelo gargalo do cilindro torçor.

Na Figura 46 e Figura 47 foram plotados os dados de densidade aparente e média de força axial, obtidos da Tabela 10 e Tabela 13, respectivamente. Os dados seguiram comportamento linear, apresentando correlação maior que 95%.

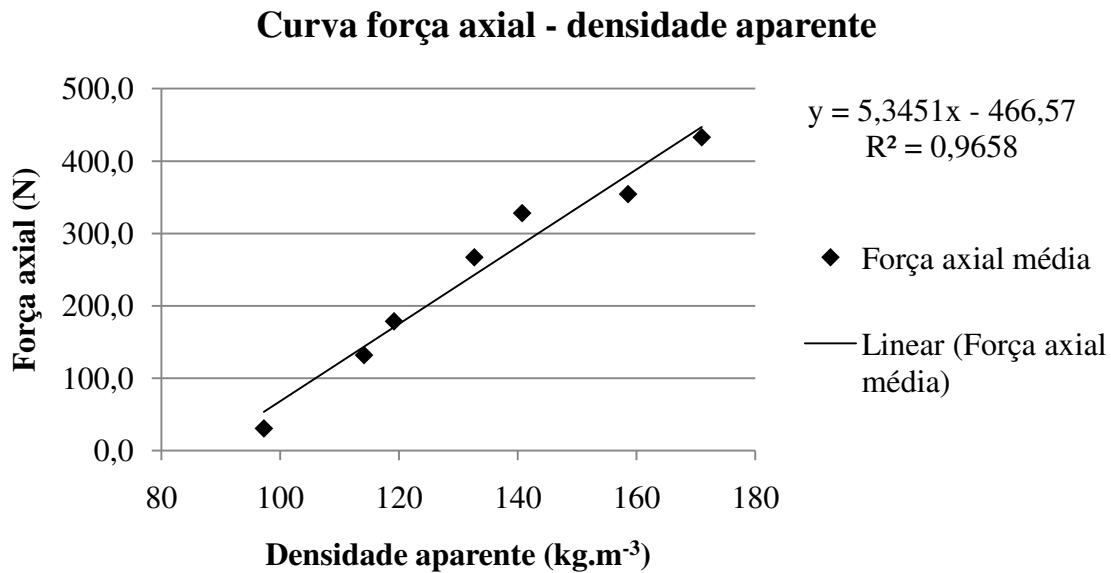


Figura 46: Curva força axial-densidade aparente para o diâmetro de 55 mm.

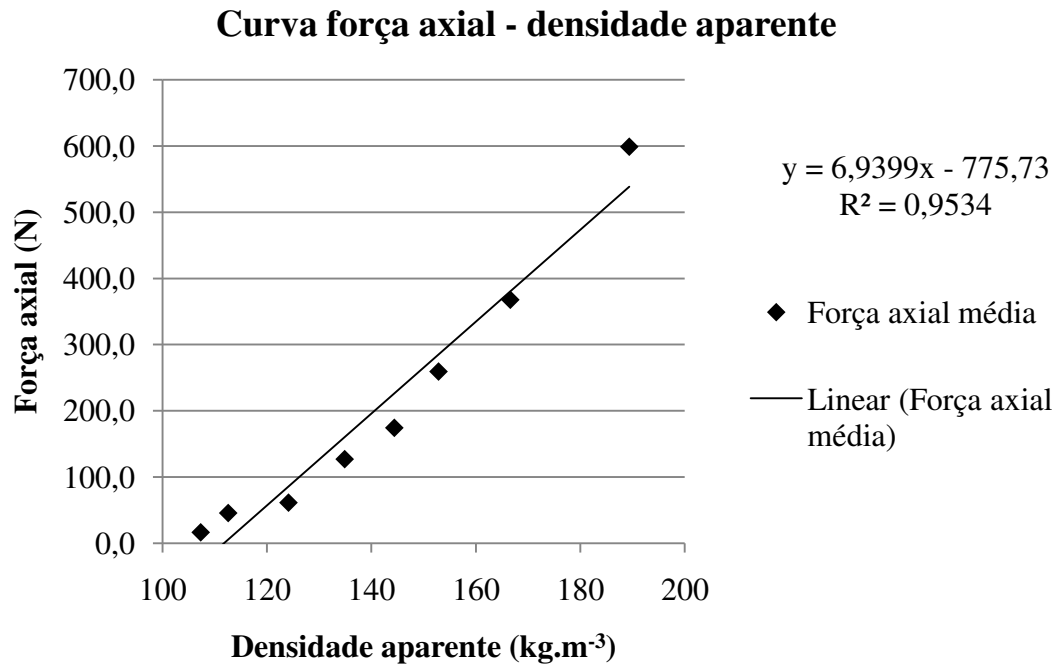


Figura 47: Curva força axial-densidade aparente para o diâmetro de 35 mm.

4.4. Relação entre pressão radial e densidade aparente

Para a obtenção da pressão radial de compactação atuante na corda, o modelo teórico proposto (equação 47) foi implementado em ambiente MATLAB[®], e alimentado com os dados experimentais de torque, ângulo de inclinação e diâmetro da corda (Tabela 12, Tabela 14 e Tabela 15). O programa é apresentado no Anexo 9.1.

A Tabela 14 e Tabela 15 apresentam a estatística descritiva para os dados de diâmetro dos feixes e ângulo de inclinação das folhas.

Tabela 14: Análise descritiva para os dados de diâmetro

Estatística descritiva - dados de diâmetro [m]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	0,0565	0,0012	2,19	0,0553	0,0580
	Feixe 175 g	0,0566	0,0015	2,67	0,0548	0,0584
	Feixe 200 g	0,0579	0,0021	3,70	0,0562	0,0606
	Feixe 225 g	0,0585	0,0004	0,71	0,0580	0,0588
	Feixe 250 g	0,0597	0,0009	1,55	0,0584	0,0606
	Feixe 275 g	0,0593	0,0014	2,44	0,0575	0,0610
	Feixe 300 g	0,0587	0,0014	2,46	0,0566	0,0597
D2-35 mm	Feixe 60 g	0,0349	0,0021	6,07	0,0327	0,0378
	Feixe 70 g	0,0363	0,0030	8,17	0,0335	0,0404
	Feixe 80 g	0,0375	0,0022	5,78	0,0357	0,0397
	Feixe 90 g	0,0376	0,0016	4,21	0,0364	0,0397
	Feixe 100 g	0,0379	0,0022	5,91	0,0350	0,0404
	Feixe 110 g	0,0387	0,0017	4,33	0,0364	0,0404
	Feixe 120 g	0,0387	0,0016	4,22	0,0371	0,0410
	Feixe 130 g	0,0372	0,0009	2,30	0,0364	0,0384

Tabela 15: Análise descritiva para os dados do ângulo de inclinação da hélice

Estatística descritiva - dados de ângulo de inclinação [°]						
Diâmetro	Feixe	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
D1-55 mm	Feixe 150 g	7,8	1,3	16,24	6,0	9,0
	Feixe 175 g	8,3	1,0	11,61	7,0	9,0
	Feixe 200 g	8,5	1,0	11,76	7,0	9,0
	Feixe 225 g	8,8	1,0	10,94	8,0	10,0
	Feixe 250 g	11,0	0,8	7,42	10,0	12,0
	Feixe 275 g	12,3	1,7	13,94	10,0	14,0
	Feixe 300 g	16,3	2,2	13,65	14,0	19,0
D2-35 mm	Feixe 60 g	7,0	1,8	26,08	5,0	9,0
	Feixe 70 g	6,0	1,4	23,57	5,0	8,0
	Feixe 80 g	6,0	0,8	13,61	5,0	7,0
	Feixe 90 g	7,3	1,9	26,11	6,0	10,0
	Feixe 100 g	9,5	1,3	13,59	8,0	11,0
	Feixe 110 g	9,0	2,2	24,00	7,0	12,0
	Feixe 120 g	11,5	2,5	21,88	9,0	15,0
	Feixe 130 g	14,8	3,0	20,24	11,0	18,0

Os valores de média do diâmetro dos feixes são sempre maiores que os diâmetros do cilindro torçor, indicando a ocorrência de expansão dos mesmos ao deixar o cilindro. Este comportamento é explicado pela característica viscoelástica do material vegetal, onde há a tendência de alívio das tensões atuantes.

Os dados dos ângulos de inclinação das folhas no feixe tiveram variações expressivas. Houve grande dificuldade na medição precisa destes ângulos, uma vez que a variabilidade de inclinação dentro de um mesmo feixe é alta. Para uma medição precisa, tornar-se-ia necessário recorrer à máquina de ensaios de torção, onde os registros de torque e ângulo de torção permitiriam obter o ângulo de inclinação das folhas com um nível maior de confiança. Com estas informações é também possível determinar o módulo de elasticidade transversal da palha, que se mostra de interesse em estudos de engenharia envolvendo torção.

A Figura 48 e Figura 49 ilustram o comportamento obtido pela pressão radial de compactação e a densidade aparente. O ajuste de curva exponencial indicou correlação acima de 96%.

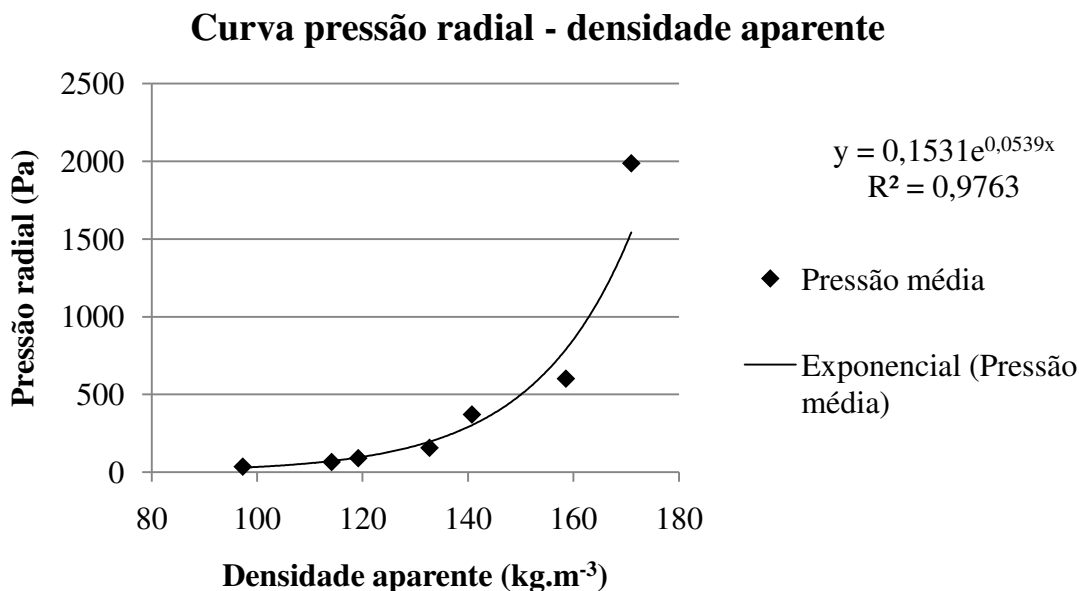


Figura 48: Relação entre a pressão radial e densidade aparente para o diâmetro de 55 mm.

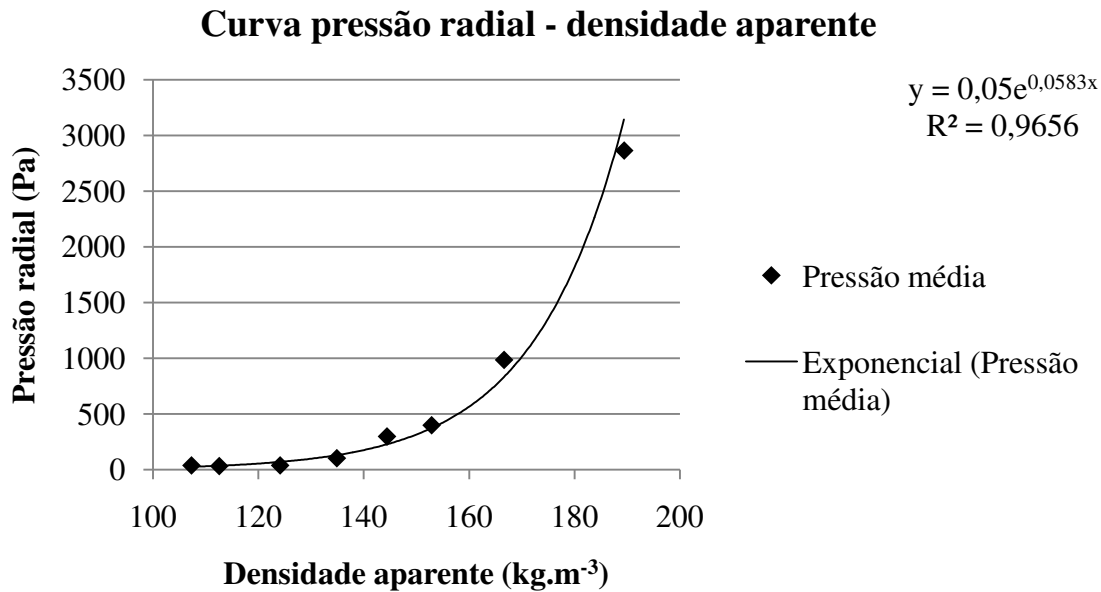


Figura 49: Relação entre a pressão radial e densidade aparente para o diâmetro de 35 mm.

4.5. Ensaio de corda inteira

A estatística descritiva para os dados de torque obtidos nos ensaios de corda inteira é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16: Análise descritiva para os dados de demanda de torque

Estatística descritiva - dados de demanda de torque [N.m]							
Diâmetro	Repetição	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo	Densidade linear [kg.m ⁻¹]
D1-55 mm	Rep. 1	3,39	2,66	78,55	0,00	10,20	0,3214
	Rep. 2	2,70	1,80	66,48	0,00	7,49	0,3103
	Rep. 3	2,05	1,75	85,34	0,00	7,32	0,3273
	Rep. 4	2,34	1,34	57,13	0,00	5,27	0,3103
D2-35 mm	Rep. 1	1,13	1,20	106,32	0,00	3,95	0,1429
	Rep. 2	0,75	0,88	117,21	0,00	3,62	0,1429
	Rep. 3	1,07	0,77	71,82	0,00	3,28	0,1429
	Rep. 4	0,91	1,16	127,05	0,00	4,60	0,1364

Os registros de torque da primeira repetição são mostrados na Figura 51 e Figura 52. As demais repetições são listadas nos Anexos 9.3.1 e 9.3.2. O primeiro patamar mostrado no gráfico indica o momento em que o sistema de aquisição de dados é acionado, e indica torque

nulo, uma vez que o feixe de palha ainda não havia sido inserido no cone alimentador. Depois de inserido o primeiro feixe, o torque aplicado aumenta, devido ao atrito entre a superfície interna do cilindro torçor e o feixe. Quando o segundo feixe é inserido no cone alimentador, ocorre o entrelaçamento entre as folhas do primeiro feixe com as folhas do segundo feixe, aumentando a densidade linear da corda nesta região. Com o aumento da densidade linear da corda, ocorre maior restrição da sua passagem pelo cilindro torçor (aumento da pressão radial), elevando conseqüentemente o torque. Após a passagem dessa região de entrelaçamento da corda, o torque cai, pois a há a necessidade de torcer apenas a parte central do segundo feixe, de menor densidade linear. Quando a região de entrelaçamento do segundo feixe com o terceiro passa pelo cilindro torçor, a restrição à passagem eleva novamente e o torque volta a aumentar. Dessa forma, a curva de demanda de torque é caracterizada pelos picos de torque necessários para superar as sobrecargas de material no interior do cilindro torçor. A Figura 50 mostra o ensaio de corda inteira, para o diâmetro de 55 mm.

A densidade linear da corda foi obtida pela relação entre a massa total da corda, determinada em balança, e o seu comprimento total, medido com o auxílio de trena. Os dados de densidade linear são apresentados na Tabela 16.

Pode-se observar que para o diâmetro de corda de 55 mm, a densidade linear média foi de $0,32 \text{ kg.m}^{-1}$ e o torque médio requerido de $2,62 \text{ N.m}$. Estes valores estão próximos dos valores representados na curva torque - densidade linear (Figura 43). Da mesma forma, para o diâmetro de corda de 35 mm, a densidade linear média situou-se em torno de $0,14 \text{ kg.m}^{-1}$ e o torque médio em cerca de $0,97 \text{ N.m}$, também estando de acordo com o apresentado pela curva torque - densidade linear (Figura 44).



Figura 50: Registro de dados durante a formação contínua de corda com 55 mm de diâmetro.

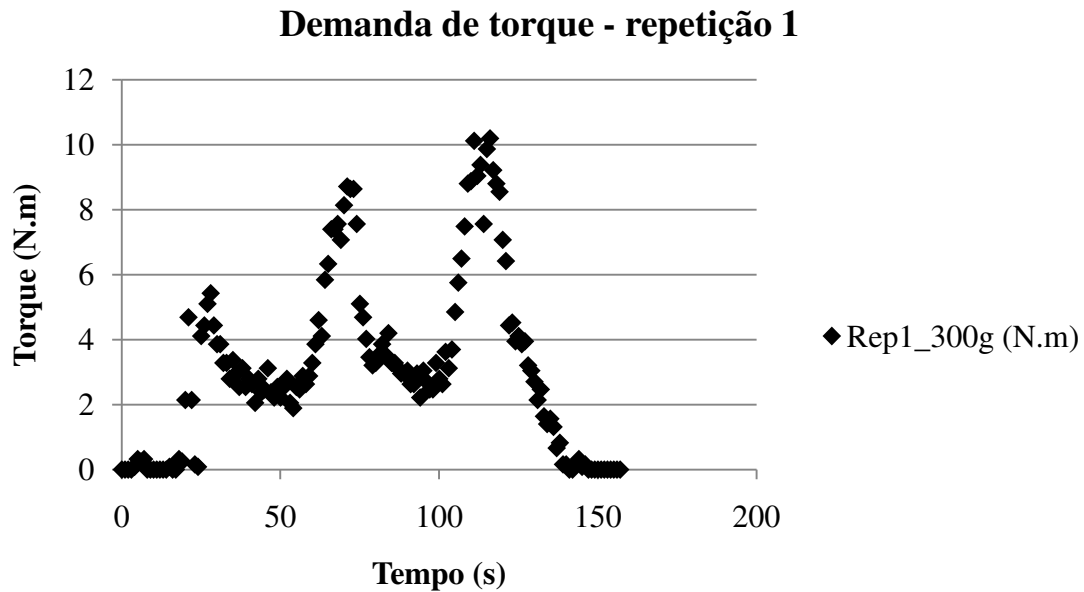


Figura 51: Variação no torque durante o adensamento da corda com diâmetro de 55 mm.

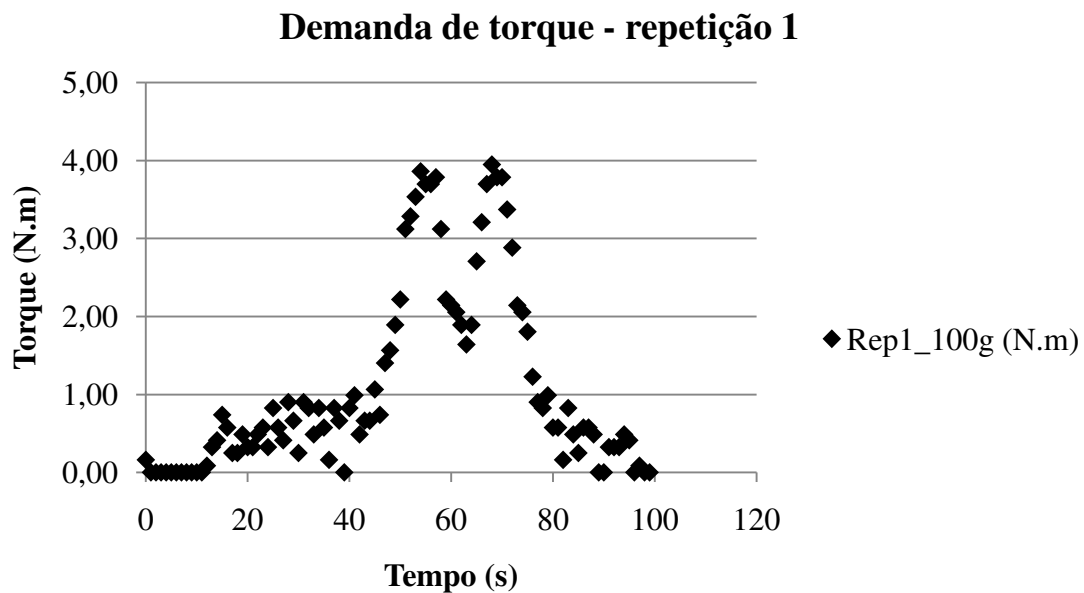


Figura 52: Variação no torque durante o adensamento da corda com diâmetro de 35 mm.

4.6. Curvas de relaxação

As curvas de relaxação de torque foram obtidas diretamente a partir da média dos registros de torque, fornecidos pelo sistema de aquisição de dados. A primeira repetição para os diâmetros de 55 mm e 35 mm é mostrada na Figura 53 e Figura 54, respectivamente. As demais repetições são apresentadas nos Anexos 9.4.1 e 9.4.2.

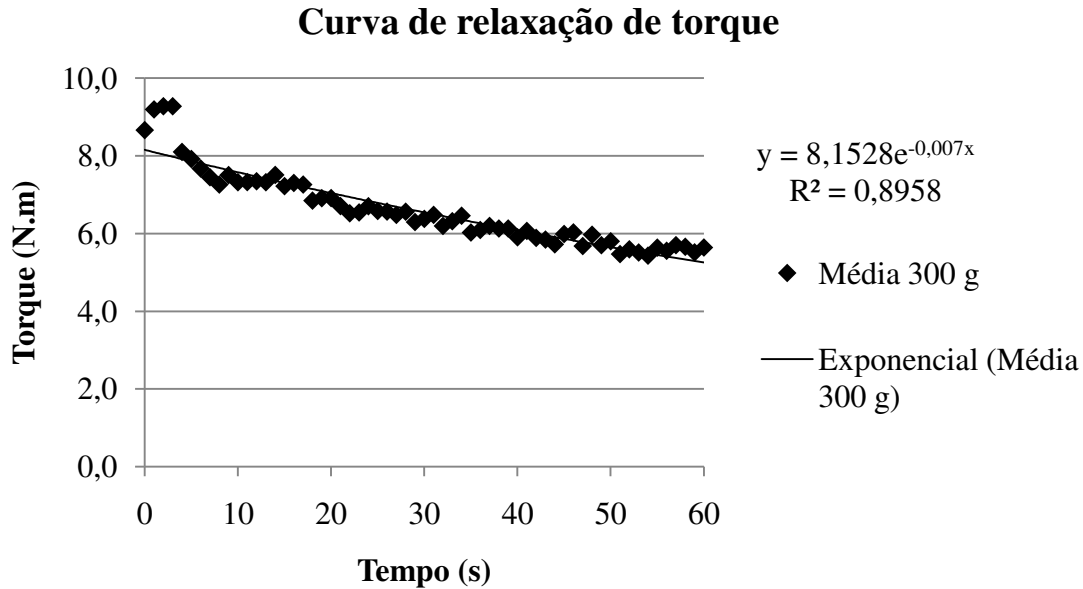


Figura 53: Curva de relaxação média de torque para o feixe de 300 g.

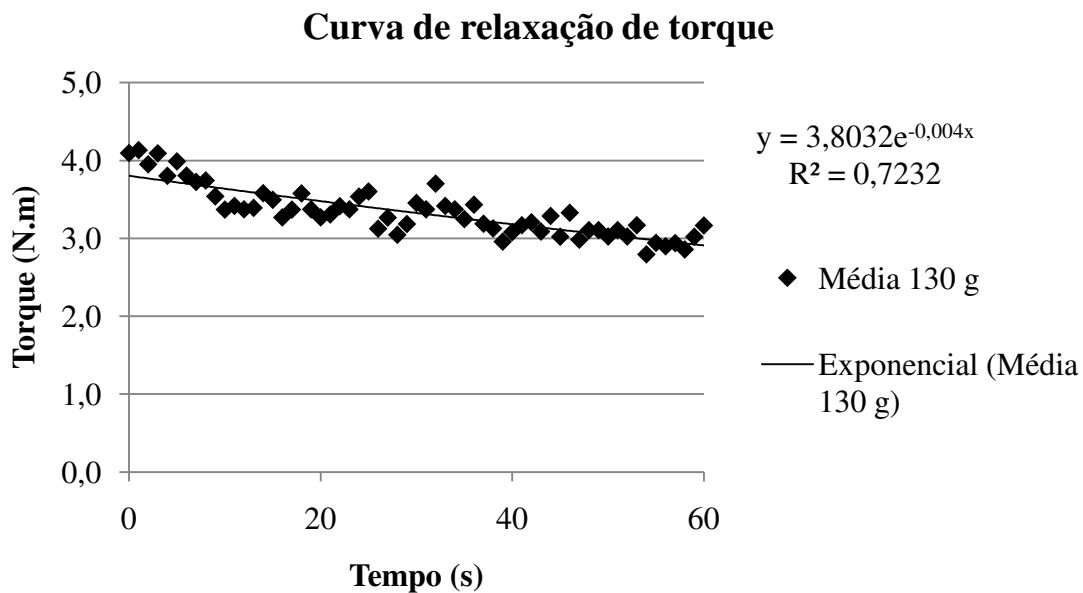


Figura 54: Curva de relaxação média de torque para o feixe de 130 g.

Durante a aquisição dos dados, observou-se que o torque aplicado ao feixe de palha diminuía com o passar do tempo. Esta observação foi constatada em todos os ensaios. Entretanto, nos ensaios com feixes de maior massa, a queda de torque foi mais acentuada do que em relação aos feixes de menor massa. O fato experimental pode ser explicado por duas razões. Uma delas é a acomodação das folhas no interior da corda, reduzindo os espaços

vazios e aumentando a densidade aparente ao longo do tempo. Observou-se durante a aplicação do torque nos feixes, que as folhas tinham o ângulo de inclinação incrementados com o passar do tempo, indicando maior compactação. A outra razão é pelo desgaste do feixe de palha na região onde o cilindro torçor desliza, contribuindo para reduzir o torque aplicado no decorrer do tempo.

4.7. Densidade teórica da bobina

Para estimar a densidade teórica alcançada pela bobina formada com corda de palha, o modelo teórico proposto (equação 61) foi implementado em ambiente MATLAB[®]. A simulação contempla a densidade da corda calculada pela equação 62, o diâmetro externo da bobina, o comprimento total da corda enrolada e a massa total da bobina. O programa é apresentado no Anexo 9.2.

Na Figura 55 é mostrado um segmento de corda com diâmetro de 35 mm enrolado na bobina. Pode-se observar que a corda permanece estruturada, apesar das pilosidades das folhas salientes.



Figura 55: Corda estruturada sendo desenrolada da bobina.

Os dados de entrada utilizados na simulação foram extraídos da Tabela 11 e Tabela 14. Os dados para o diâmetro de 55 mm foram: densidade linear da corda $\lambda_c = 0,46 \text{ kg.m}^{-1}$ e diâmetro da corda $d_c = 0,058 \text{ m}$. Para o diâmetro de corda de 35 mm, os dados de entrada

utilizados foram: densidade linear da corda $\lambda_c = 0,21 \text{ kg.m}^{-1}$ e diâmetro da corda $d_c = 0,037 \text{ m}$. Nas duas simulações, a altura utilizada para a bobina foi de 1,20 m, a mesma praticada nos fardos cilíndricos. O diâmetro utilizado para o carretel foi de 100 mm.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da simulação, e na Figura 56 é mostrada a curva relacionando o diâmetro externo da bobina com a sua densidade aparente teórica.

Tabela 17: Resultado da simulação para a densidade aparente teórica da bobina

Simulação da densidade teórica da bobina		
Parâmetros	D1 - 55 mm	D2 - 35 mm
Densidade da corda	174 kg.m^{-3}	195 kg.m^{-3}
Densidade teórica da bobina	136 kg.m^{-3}	153 kg.m^{-3}
Diâmetro externo da bobina	1,84 m	1,80 m
Comprimento total da corda enrolada	946 m	2229 m
Massa da bobina	435 kg	468 kg

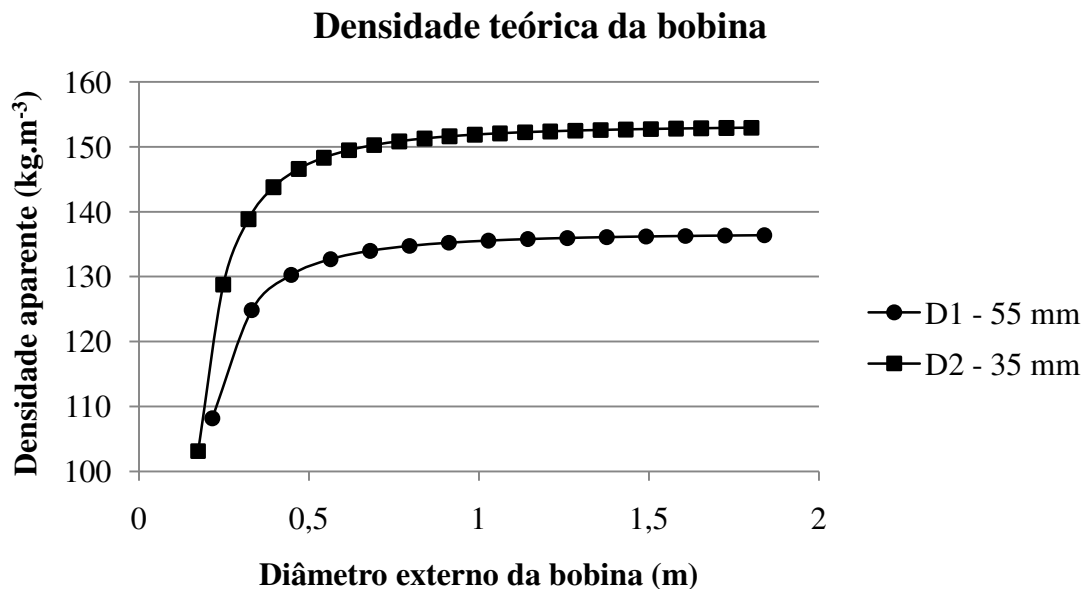


Figura 56: Curva de densidade aparente da bobina formada com corda, obtida por simulação.

Observa-se que a densidade da bobina é diretamente influenciada pela densidade linear e pelo diâmetro da corda. Quanto maior a densidade linear e menor o diâmetro, maior será a densidade aparente final da bobina. No entanto o diâmetro da corda deve ser compatível com os limites da sua densidade linear, conforme apresentado na Tabela 11 e Tabela 14.

A densidade da bobina atinge um patamar limite com o acréscimo do seu diâmetro, acima do qual a densidade não se altera. Este fato pode ser justificado pela dissolução dos espaços vazios do interior da bobina com o incremento do diâmetro.

Os resultados dos diâmetros da bobina, bem como sua massa final, foram compatíveis com os valores praticados no enfardamento cilíndrico. Entretanto, a densidade simulada foi inferior às densidades dos fardos cilíndricos convencionais, que situa em torno de 170 kg.m^{-3} .

5. PRÉ-REQUISITOS DEMANDADOS PELO PRINCÍPIO PROPOSTO

O princípio de adensamento proposto apresenta limitações, exigindo alguns pré-requisitos fundamentais para o seu funcionamento. São eles:

- O princípio exige um pré-ordenamento (alinhamento) das folhas. Folhas desalinhadas tornam-se emaranhadas e não passam pela redução do diâmetro do cone, desestruturando a corda e levando ao seu rompimento.
- O tamanho das folhas influencia na formação da corda. Não foi possível formar corda a partir de folhas pequenas ou fragmentos de palha. Observou-se que em geral a corda produzida com folhas maiores alcança maior estruturação.
- A vazão mássica deve permanecer constante e ter um valor limite compatível com a capacidade de operação do adensador. Se faltar palha na alimentação, a continuidade de formação de corda fica comprometida. Vazão de palha maior que o limite do adensador não passa pela abertura inferior do cone. A utilização de algum tipo de sensor pode contornar este problema, onde a taxa de alimentação é monitorada, exercendo controle sobre a velocidade de enrolamento da corda no carretel.
- Para ganhar estruturação, as folhas alinhadas devem estar distribuídas ao longo do seu comprimento na corda. Feixes de comprimentos iguais e sobrepostos criam zonas de fratura e não formam corda estruturada, comprometendo a continuidade de formação (Figura 57).
- A bainha da folha é um ponto de fratura da corda, sendo mais expressivo em diâmetros menores, por não haver espaço para ocorrer deformação e acomodação.



Figura 57: Rompimento da corda devido às zonas de fratura.

- O diâmetro do carretel destinado a enrolar a corda não pode ser muito pequeno, pois o pequeno raio de curvatura causa a desestruturação da corda devido aos momentos fletores impostos.
- Existe um valor limite para a densidade máxima alcançada pela corda, que é dado pela tensão máxima de tração suportada pelas folhas de palha. Quando a torção se torna muito elevada, as folhas se rompem e a densidade aparente atinge o seu valor máximo. Este processo não ocorre com o enfardamento, pois a palha pode ser compactada em altas pressões sem problemas de rompimento.

6. CONCLUSÕES

- Foi viável tecnicamente a formação de corda contínua e estruturada a partir de folhas secas de cana-de-açúcar, utilizando o princípio de torção originada de atrito;
- A densidade aparente da corda ficou próxima das densidades aparentes dos fardos cilíndricos e prismáticos, obtidos pelas enfardadoras convencionais;
- A demanda de torque foi menor para cordas de menores diâmetros;
- O aumento da alimentação de palha ocasiona a elevação de torque e de densidade;
- A densidade aparente obtida por simulação das bobinas formadas com as cordas foi inferior às densidades aparentes dos fardos cilíndricos;
- Todos os ensaios apresentaram relaxação de torque no decorrer do tempo;
- O princípio apresenta limitações e demanda pré-requisitos indispensáveis para o perfeito funcionamento.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização do projeto, surgiu a necessidade de conhecer vários parâmetros de engenharia associados ao comportamento mecânico da palha de cana-de-açúcar, muitos deles indisponíveis na literatura. Dentre eles, podem ser citados:

- Resistência máxima à tração da palha:

A máxima resistência à tração da palha é um parâmetro de interesse no adensamento, pois indica o limite de densidade que pode ser alcançado com o princípio proposto. Com o incremento de torque as folhas se rompem, limitando o nível de adensamento da corda e comprometendo a sua estruturação.

- Módulo de elasticidade transversal da palha:

O módulo de elasticidade transversal pode ser utilizado para correlacionar o torque aplicado na corda com a sua deformação angular, expressa pelo fator de torção.

- Coeficiente de atrito entre palha seca e superfícies de materiais típicos de engenharia:

O princípio proposto baseia-se na aplicação de torque por meio de atrito, e o conhecimento do coeficiente de atrito entre a palha seca e os materiais de engenharia viabiliza dimensionamentos confiáveis e realistas.

- Densidade absoluta da palha:

A densidade absoluta da palha é teoricamente a máxima densidade que pode ser alcançada em qualquer tipo de adensamento, considerando que todos os espaços vazios são eliminados.

- Tração máxima suportada pela corda formada sob diferentes fatores de torção:

O fator de torção influencia na resistência axial da corda, conforme relatado na revisão bibliográfica. Não há informação disponível sobre o fator de torção ótimo para o caso especial de corda formada com palha.

- Demanda de energia no processo de adensamento:

A energia demandada no adensamento é de importância fundamental na quantificação dos custos e levantamento da viabilidade econômica do princípio proposto, fornecendo subsídios para futuras otimizações.

No presente trabalho, a corda de palha foi construída a partir de apenas uma unidade de adensamento, formando uma “corda singela”. Como apresentado na revisão bibliográfica, duas cordas singelas podem ser entrelaçadas para formar uma terceira corda retorcida, apresentando características de resistência mecânica superiores às cordas singelas. Acredita-se que a corda retorcida deve apresentar maior estruturação, podendo alcançar maiores densidades ao ser enrolada por tração na bobina, expulsando os espaços vazios restantes. A corda singela ainda tem a vantagem superior de manter a torção mesmo na ausência de torques aplicados, evitando que a corda se desestruture quando não há torque. Dessa forma, se forem utilizadas duas unidades de adensamento trabalhando conjuntamente em paralelo, as duas cordas singelas podem ser unidas para formar a corda retorcida. Alcança-se ainda com este processo uma maior vazão mássica de adensamento, uma vez que a densidade linear da corda é incrementada. Em HE (2005) é apresentado o processo de formação de corda retorcida a partir de duas cordas singelas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARBEX, M. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 158-175, abr. 2004.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros**. 5. ed. rev. São Paulo: Makron Books, v.1, 2006.
- BERNACKI, H., HAMAN, J., KANAFOJSKI, C. Z. **Agricultural Machines: Theory and Construction**. Washington, D.C.: Department of Agriculture and the National Science Foundation, v.2, 1972.
- BEYREUTHER, R.; BRÜNIG, H. **Dynamics of Fibre Formation and Processing**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- BIZUTI, S. F. G. **Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros e desempenho operacional e eficiência energética**. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.
- BRASIL. Decreto-lei nº 2.661, de 8 de julho de 2001. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (código florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 julho 2001.
- BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 300-308, jan/abr. 2006.
- COPERSUCAR. Projeto BRA/96G31: Geração de energia por biomassa bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB**, Piracicaba, v.17, n.3, p.66-68, jan./fev. 1999.
- DALCOLMO, E. L. **Coefficientes de atrito de forragens picadas em várias superfícies**. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1980.
- EL MOGAHZY, Y. E. **Understanding the fiber-to-yarn conversion system. Part II: Yarn characteristics**. <<http://www.scribd.com/doc/15627537/Yarn-Characteristics>>. Acesso em: 25 jul. 2009.
- ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The Briquetting of Agricultural Wastes for Fuel**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990. 208p.
- FRANCO, F. N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhço de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a granel**. 113p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

- FRASER, W. B.; HEIJDEN, G. H. M. van der. On the theory of localised snarling instabilities in false-twist yarn processes. **Journal of Engineering Mathematics**. Springer Netherlands, v. 61, n. 1, p. 81-95, may. 2008.
- GONZÁLEZ, M.; MUÑOZ, G. Experimental determination of the optimal parameters of the mechanical densification process of fibrous materials for animal feed. In: ASAE Annual International Meeting / CIGR, 15, **ASAE Paper Number**: 021072, 2002.
- GONZÁLEZ, M. V.; MUÑOZ, G. H.; LOPEZ, R. S. Design and evaluation of an extruder to convert crop residues to animal feed. **Biosystems Engineering**, v. 100, n. 1, p. 66-78, may. 2008.
- GOSWANI, B.; MARTINDALE, J. G.; SCARDINO, F. L. **Textile Yarns, Technology, Structure, and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- HE, J. H.; YU, Y. P.; YU, J. Y.; LI, W. R.; WANG, S. Y.; PAN, N. A linear dynamic model for two-strand yarn spinning. **Textile Research Journal**, v.75, p. 87-90, 2005.
- HEARLE, J. W. S.; GROSBERG, P.; BACKER, S. **Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics**. United States of America: John Wiley & Sons, 1969.
- HEARLE, J. W. S.; HOLLICK, L.; WILSON, D. K. **Yarn Texturing Technology**. North and South America: CRC Press, 2008.
- LEECH, M. C. The modelling of friction in polymer fibre ropes. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 44, p. 621-643, 2002.
- LEECH, M. C.; HEARLE, J. W. S. Modelling tension and torque properties of fibre ropes and splices. In: International offshore and polar engineering conference. **Proceedings...** Singapore: jun, 1993.
- LIU, T.; CHOI, K. F.; LI, Y. Mechanical modeling of singles yarn. **Textile Research Journal**, v. 77, p. 123-130, 2007.
- LOPES, F. S.; RIBEIRO, H. Mapeamento de internações hospitalares por problemas respiratórios e possíveis associações à exposição humana aos produtos da queima da palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 215-225, jun. 2006.
- MACEDO, N.; ARAÚJO, J. R. Efeitos da queima do canavial sobre insetos predadores. In: Sociedade Entomológica do Brasil, v. 29, n. 1, Londrina. **Anais...** Londrina: Sociedade Entomológica do Brasil, 2000. p.79-84.
- MCKENNA, H. A.; HEARLE, J. W. S.; O'HEAR, N. **Handbook of Fibre Rope Technology**. The Textile Institute. North America: CRC Press, 2000.
- MEDEIROS, A. **Cálculo Estrutural de Tecidos Planos**. São Paulo: Contêxtil, 1995.

- MICHELAZZO, M. B. **Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)** 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 546-552, jan. 2008.
- MORTON, W. E.; HEARLE, J. W. S. **Physical Properties of Textile Fibres**. North America: CRC Press LLC, Fourth edition, 2008.
- NECKÁRA, B.; SONI, M. K.; DAS, D. Modelling of radial fiber migration in yarns. **Textile Research Journal**, v. 76, p. 486-491, 2006.
- NEEDLES, H. L. **Textile Fibers, Dyes, Finishes, and Processes**. United States: Noyes Publications, 1986.
- PAN, N.; BROOKSTEIN, D. Physical properties of twisted structures. Part ii: industrial yarns, cords, and ropes. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 83, p. 610–630, 2002.
- PAN, N.; CHEN, H. C.; THOMPSON, J.; INGLESBY, M. K.; ZERONIAN, S. H. Investigation on the strength-size relationship in fibrous structures including composites. **Journal of Materials Science**, v. 33, p. 2667-2672, 1998.
- PORWAL, P. K., BEYERLEIN, I. J.; PHOENIX, S. L. Statistical strength of twisted fiber bundles with load sharing controlled by frictional length scales. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 2, n. 4, 2007.
- RAO, Y; FARRIS, R. J. A modeling and experimental study of the influence of twist on the mechanical properties of high-performance fiber yarns. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 77, p.1938–1949, 2000.
- REALFF, M. L., PAN, N.; SEO; M.; BOYCE, M. C.; BACKER; S. A stochastic simulation of the failure process and ultimate strength of blended continuous yarns. **Textile Research Journal**, v. 70, p. 415-430, 2000.
- ROSIAK, D.; PRZYBYŁ; K. Analysis of yarn twist from the point of view of current knowledge. **Autex Research Journal**, v. 3, n.1, mar. 2003.
- SÃO PAULO (ESTADO). Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 19 set. 2002.
- SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 274p. Tese (Doutoramento em Engenharia

Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

- SIDOU, N. B. A. **Adensamento do palhiço de cana-de-açúcar utilizando helicóides cônicos**. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

- SOKHANSANJ, S. et al. Binderless pelletization of biomass. In: ASAE Annual International Meeting, **ASAE Paper Number**: 056061, 2005.

- SREPRATEEP, K.; BOHEZ, E. L. J. Computer aided modeling of fiber assemblies. **Computer-Aided Design & Applications**, v. 3, n. 1-4, , p. 367-376, 2006.

- SULLIVAN, R. R. A theoretical approach to the problem of yarn strength. **Journal Applied Physics**, v. 13, p. 157-167, mar. 1942.

- TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. I e II, 1976.

- TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros e desempenho operacional e eficiência energética**. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

- YILMAZ, D.; GÖKTEPE, F.; GÖKTEPE, Ö.; KREMENAKOVA, D. Packing density of compact yarns. **Textile Research Journal**, v. 77, p. 661-667, 2007.

9. ANEXOS

9.1. Programa MATLAB para a simulação do modelo da corda torcida

%% Programa MATLAB para simulação do modelo matemático que relaciona a pressão radial exercida em um feixe de palha com o torque aplicado nas extremidades.

```
clear all; clc; close all; format long g;

%% Dados de entrada
torque=6.61;           % torque aplicado na corda [N.m]
alpha=16*pi/180;      % ângulo de inclinação das folhas na corda [rad]
D=0.058;              % diâmetro da corda [m]
lambda=0.46;          % densidade linear (experimental) da corda [kg.m-1]

%% Parâmetros geométricos
R=D/2;                % raio da corda [m]
J=pi*R^4/2;           % momento de inércia polar da corda [m4]
twist=tan(alpha)/(pi*D); % fator de torção [rad.m-1]
h=1/twist;            % passo da hélice [m]
L=sqrt(h^2+4*pi^2*R^2); % comprimento da fibra na hélice mais externa [m]
dt=10^-6;             % incremento de tempo [s]
l=[h:dt:L]';          % comprimento da fibra no interior da corda [m]
r=sqrt((l.^2-h^2)/(4*pi^2)); % raio da fibra no interior da corda [m]

%% Mudança de variáveis
u=l/L;
c=h/L;

%% Densidade do feixe torcido
fprintf('Densidade da corda: %0.1f kg/m³.\n',lambda/(pi*R^2));

%% Distribuição de pressões
G=2*torque*R/J*(c./(u*sqrt(1-c^2)).*(c^2+1-(c^2+u.^2)./u));
G_nucleo=2*torque*R/J*(cos(alpha)-1)^2/sin(alpha);
fprintf('Pressão no núcleo: %0.1f Pa.\n',G_nucleo);

%% Gráfico do vetor posição
eixo_x=sqrt((u.^2-c.^2)/(1-c.^2));
phi=[0:0.01:2*pi*0.4/h]';
figure;
for n=1:1:8
    r_i=[R*cos(phi+(n-1)*pi/4) R*sin(phi+(n-1)*pi/4) R*phi*cot(alpha)];
    hold on;
    plot3(r_i(:,1),r_i(:,2),r_i(:,3),'LineWidth',2);
end
grid on; axis equal; view(3);

%% Gráfico da distribuição de pressão radial
figure
plot(eixo_x,G,'k-'); grid on;
legend('pressão radial')
xlabel('Posição radial r/R')
ylabel('Pressão no núcleo')
```

9.2. Programa MATLAB para a simulação da densidade teórica da bobina

```
% Programa MATLAB para simulação da densidade teórica da bobina.

clear all; clc; close all;

%% Dados de entrada
lambda=0.46;      % densidade linear da corda (valor experimental) [kg.m-1]
N=15;             % número de camadas concêntricas da bobina
D=0.10;           % diâmetro do carretel [m]
d=0.059;          % diâmetro da corda (valor experimental) [m]
H=1.20;           % altura da bobina [m]

%% Densidade teórica da bobina
for k=1:1:N
    s(k,1)=sqrt((D+(2*k-1)*d)^2+d^2/pi^2);
    massa_bobina(k,1)=lambda*H/d*pi*sum(s);
    rho_bobina(k,1)=4*lambda*sum(s)/(d*(D+2*k*d)^2);
    D_externo(k,1)=D+2*k*d;
    k=k+1;
end

fprintf('RESULTADO DE SIMULAÇÃO DA DENSIDADE TEÓRICA DA BOBINA:\n')
fprintf('Densidade da corda: %0.1f kg/m³.\n',4*lambda/(pi*d^2));

fprintf('Densidade teórica da bobina: %0.1f kg/m³.\n',rho_bobina(end));

fprintf('Diâmetro externo da bobina: %0.2f m.\n',D_externo(end));

fprintf('Comprimento total da corda enrolada: %0.1f m.\n',H/d*pi*sum(s));

fprintf('Massa da bobina: %0.1f kg.\n',massa_bobina(end));

plot(D_externo,rho_bobina)
xlabel('Diâmetro externo da bobina [m]')
ylabel('Densidade teórica da bobina [kg/m³]')
```

9.3. Repetições das curvas de torque para corda inteira

9.3.1. Curvas de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm

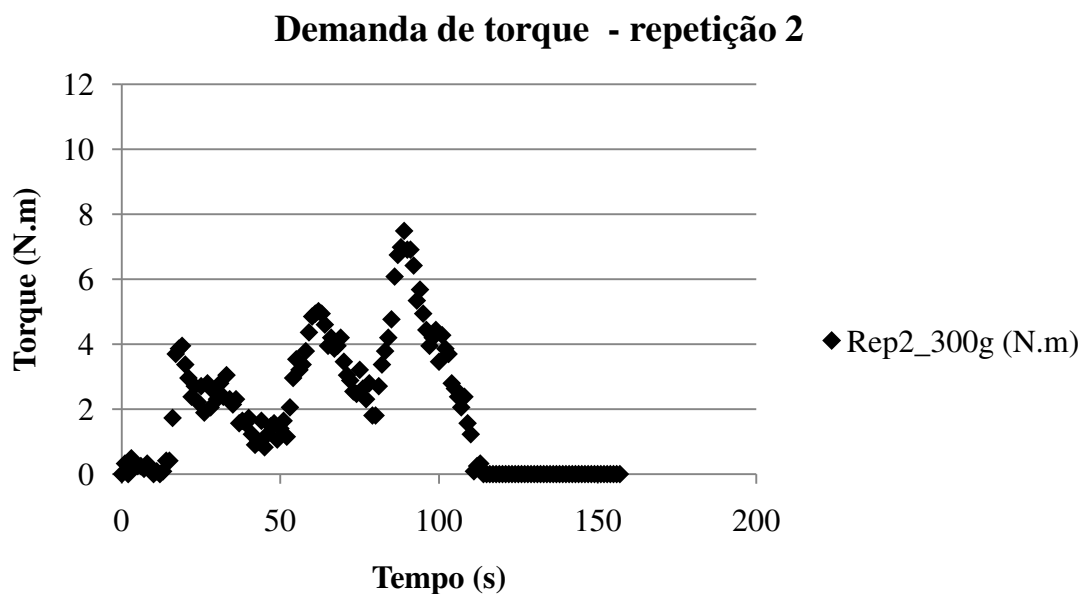


Figura 58: Repetição 2 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.

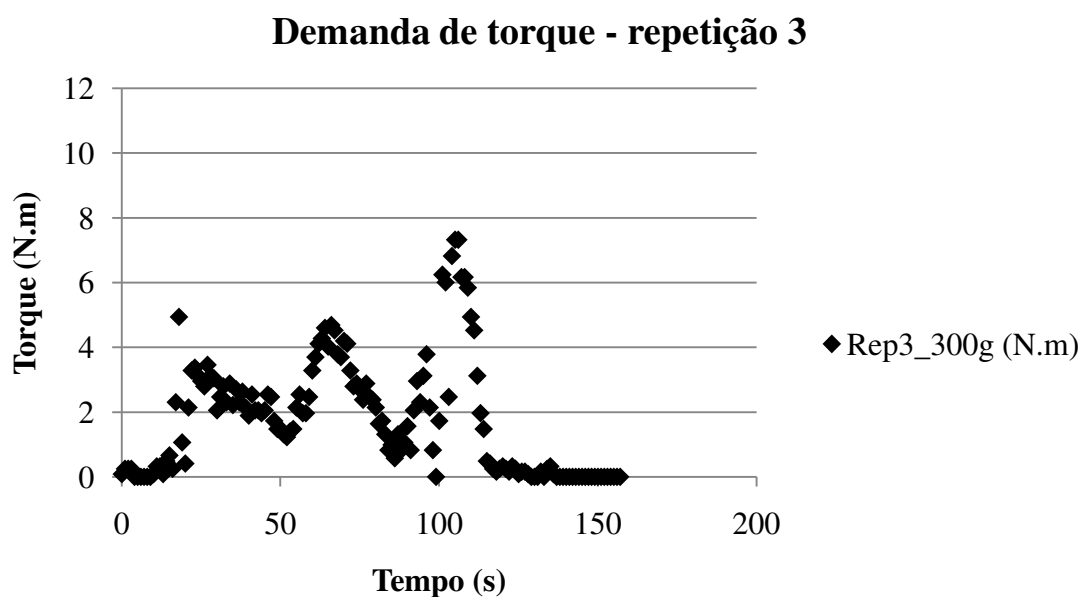


Figura 59: Repetição 3 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.

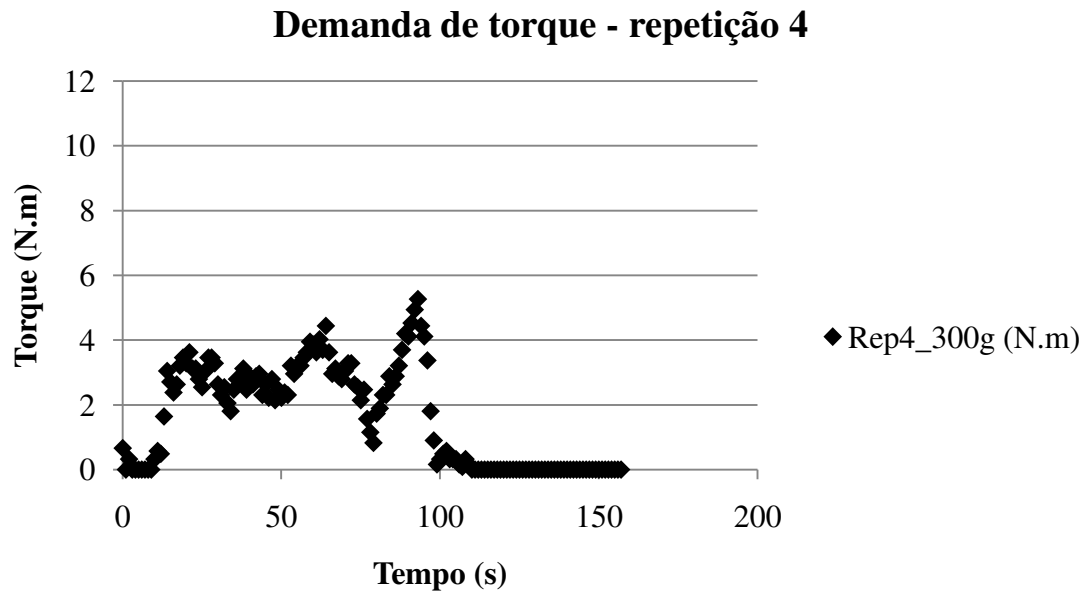


Figura 60: Repetição 4 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 55 mm.

9.3.2. Curvas de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm

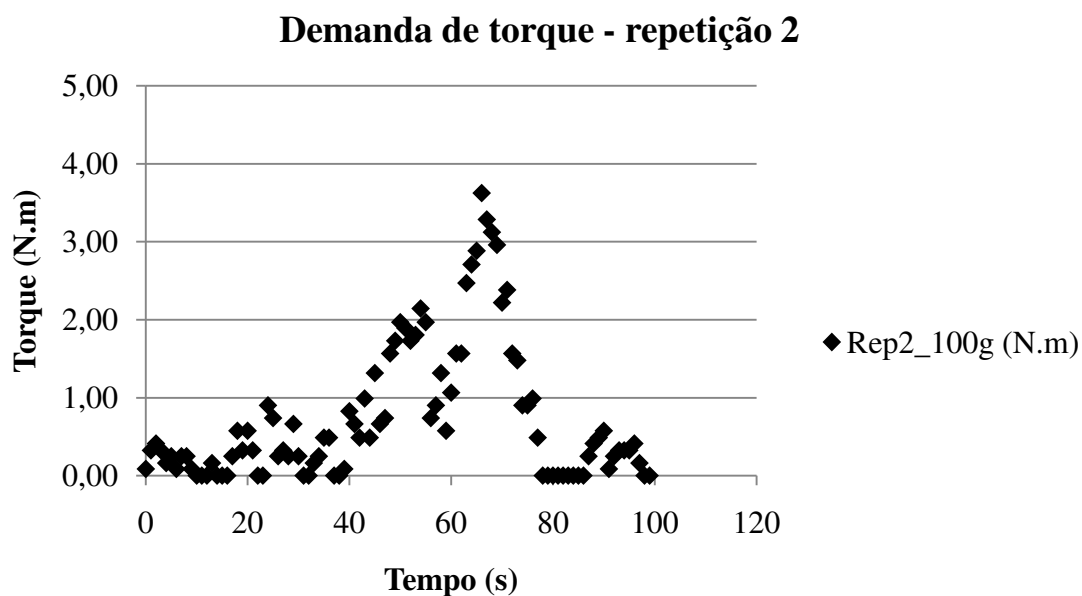


Figura 61: Repetição 2 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.

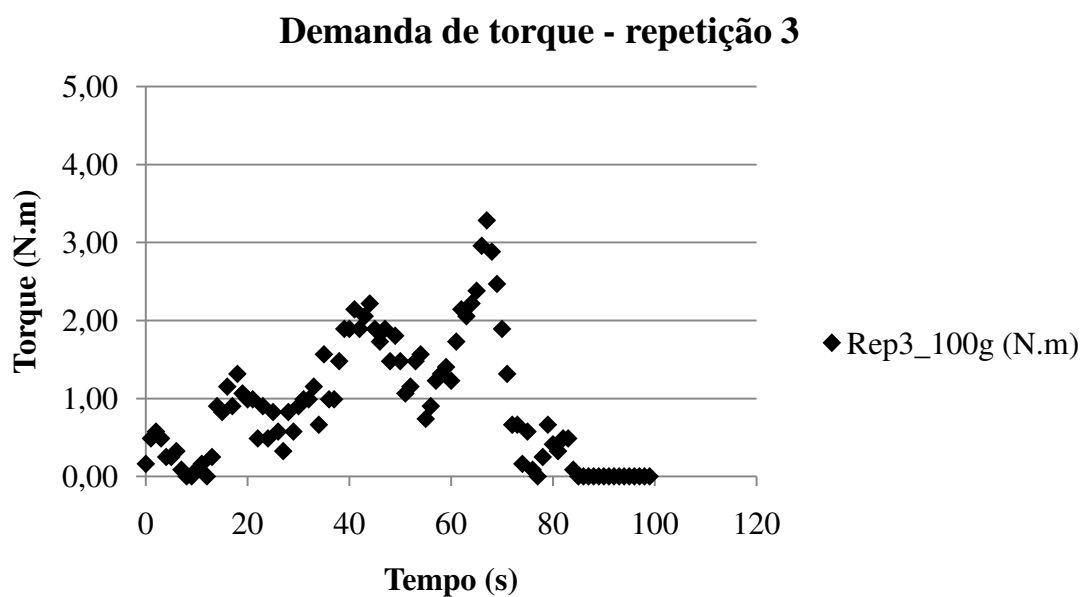


Figura 62: Repetição 3 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.

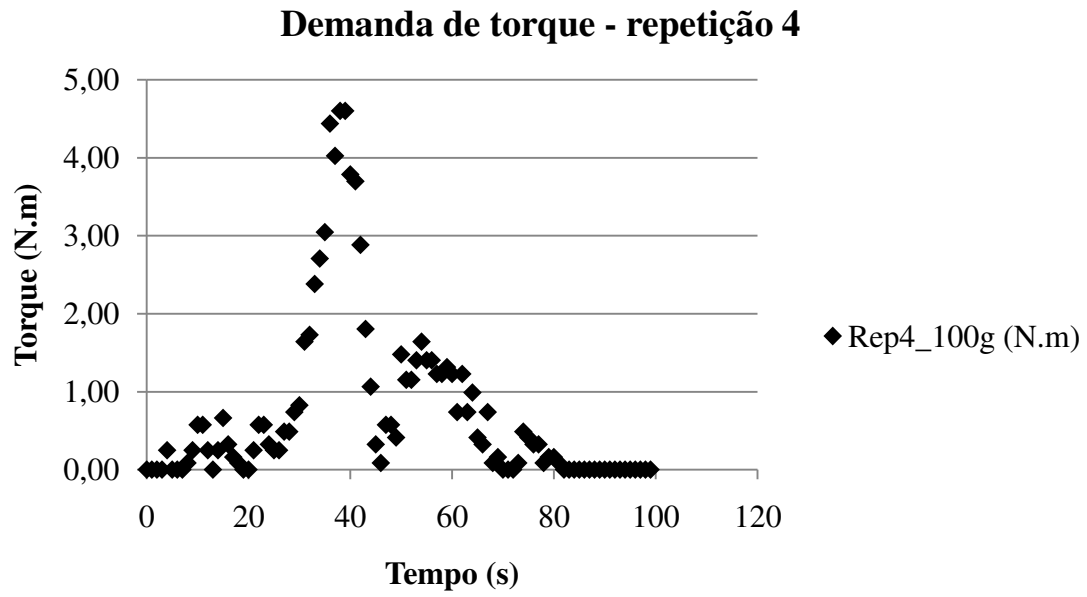


Figura 63: Repetição 4 da curva de torque para corda inteira com diâmetro de 35 mm.

9.4. Curvas de relaxação de torque

9.4.1. Curvas de relaxação de torque para diâmetro de 55 mm

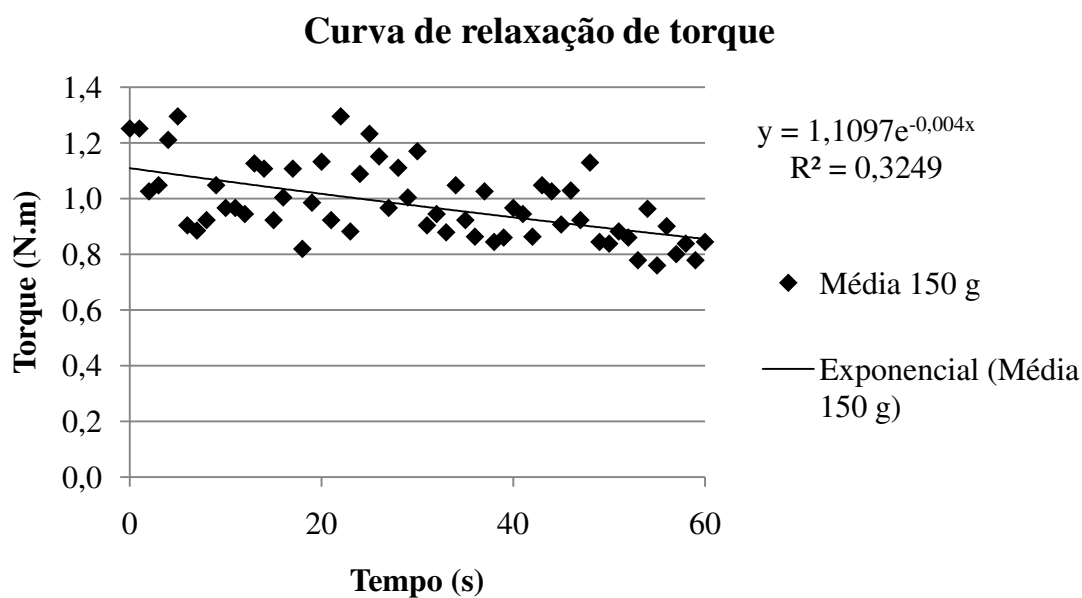


Figura 64: Curva de relaxação de torque para o feixe de 150 g.

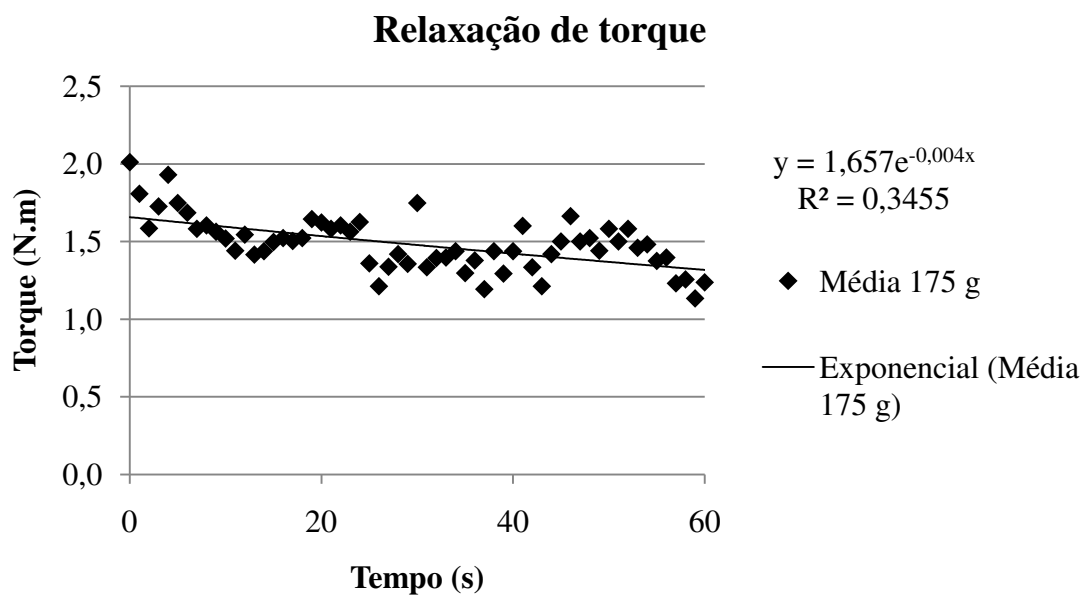


Figura 65: Curva de relaxação de torque para o feixe de 175 g.

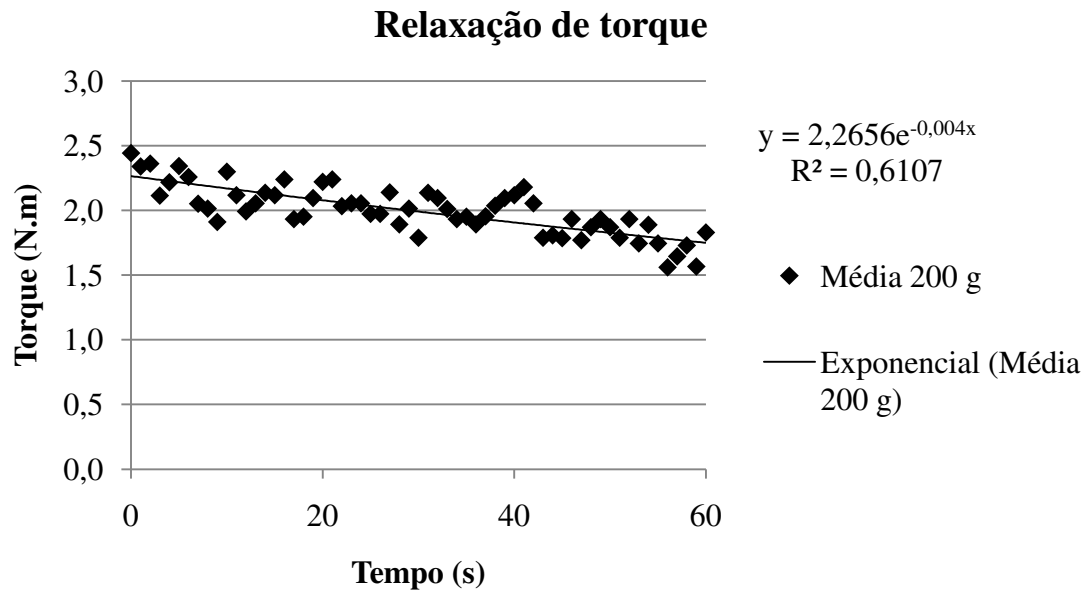


Figura 66: Curva de relaxação de torque para o feixe de 200 g.

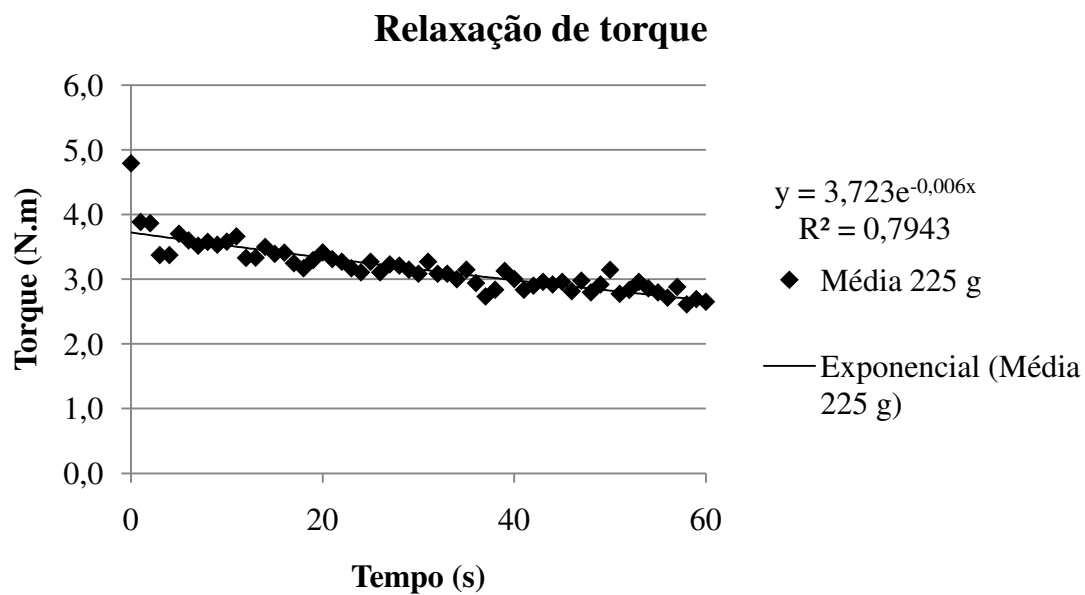


Figura 67: Curva de relaxação de torque para o feixe de 225 g.

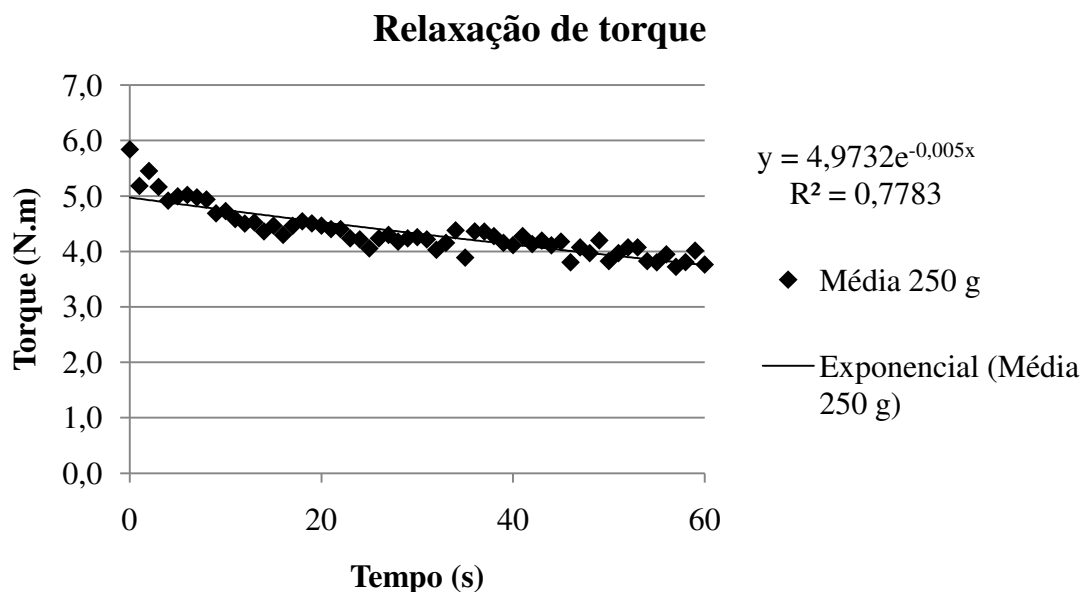


Figura 68: Curva de relaxação de torque para o feixe de 250 g.

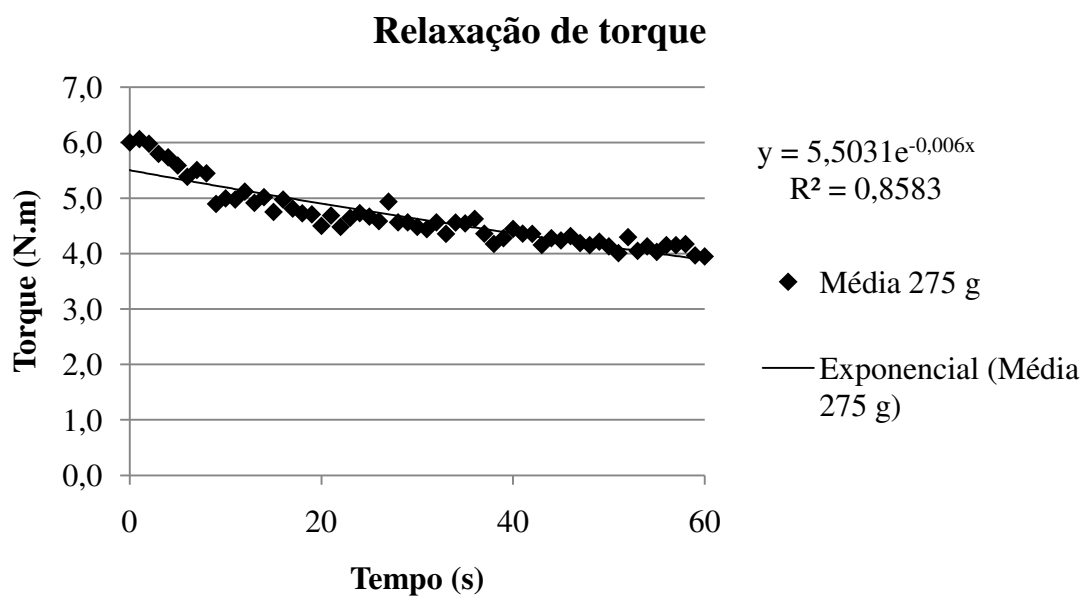


Figura 69: Curva de relaxação de torque para o feixe de 275 g.

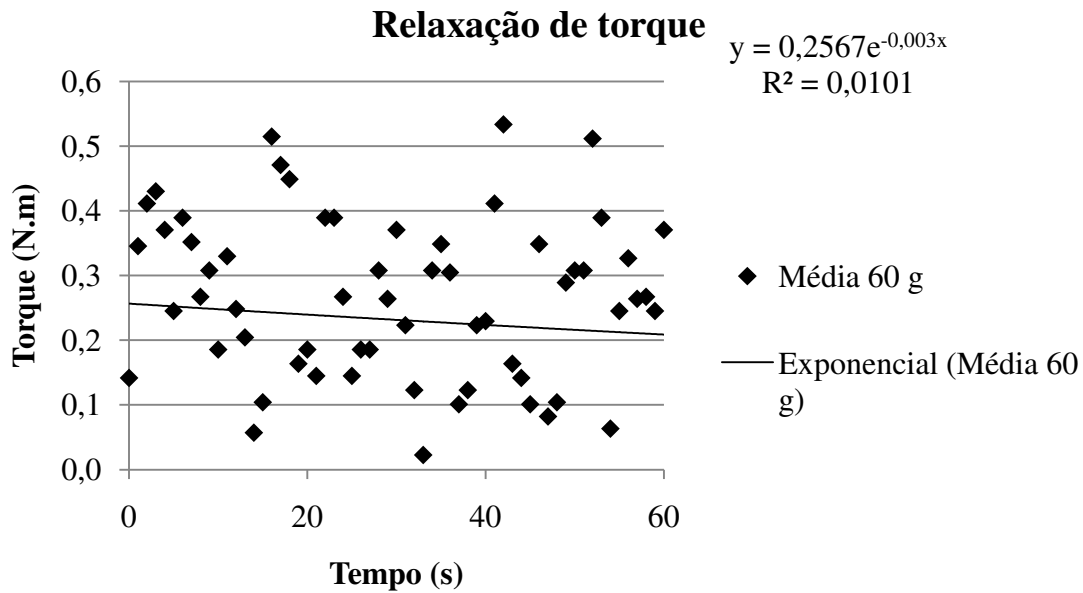
9.4.2. Curvas de relaxação de torque para diâmetro de 35 mm

Figura 70: Curva de relaxação de torque para o feixe de 60 g.

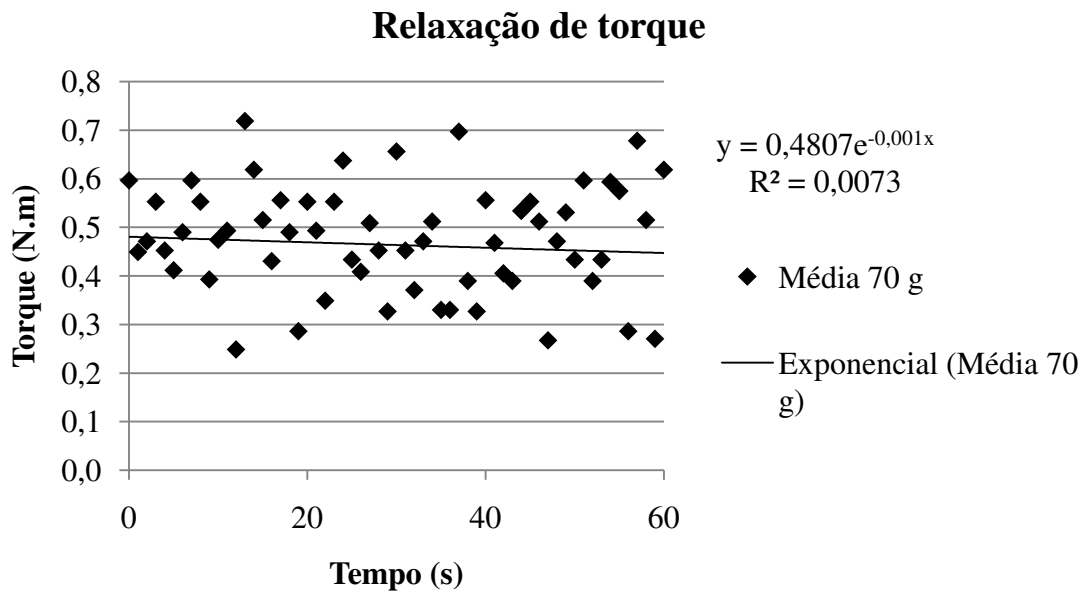


Figura 71: Curva de relaxação de torque para o feixe de 70 g.

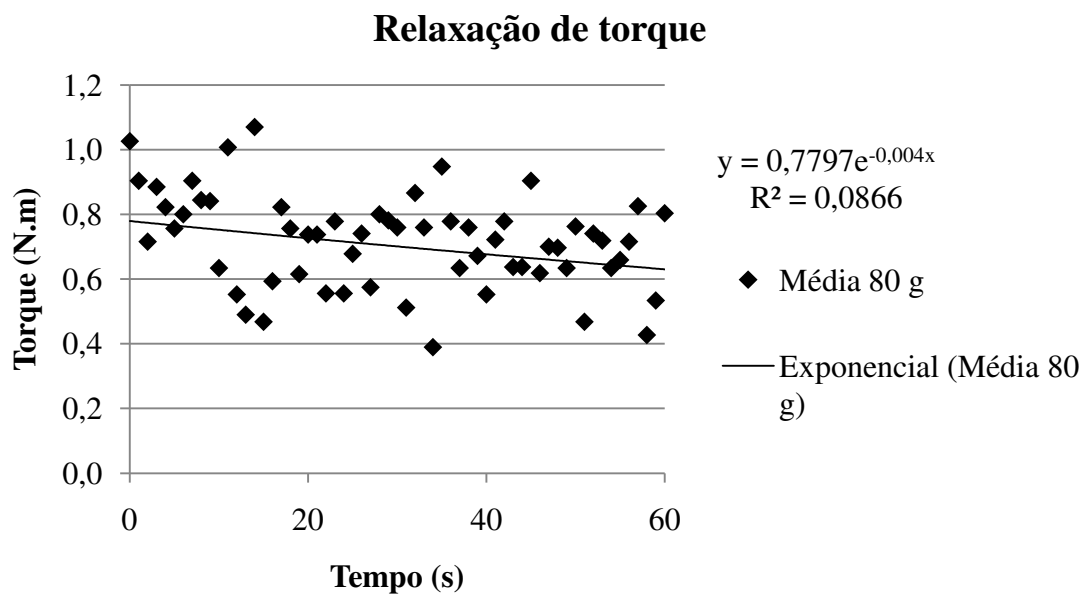


Figura 72: Curva de relaxação de torque para o feixe de 80 g.

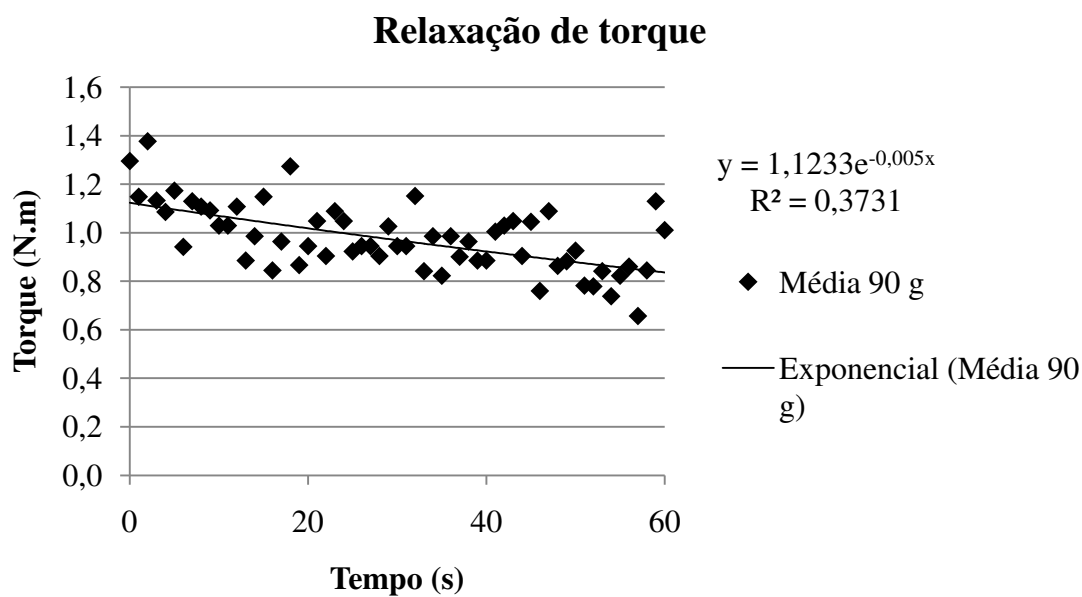


Figura 73: Curva de relaxação de torque para o feixe de 90 g.

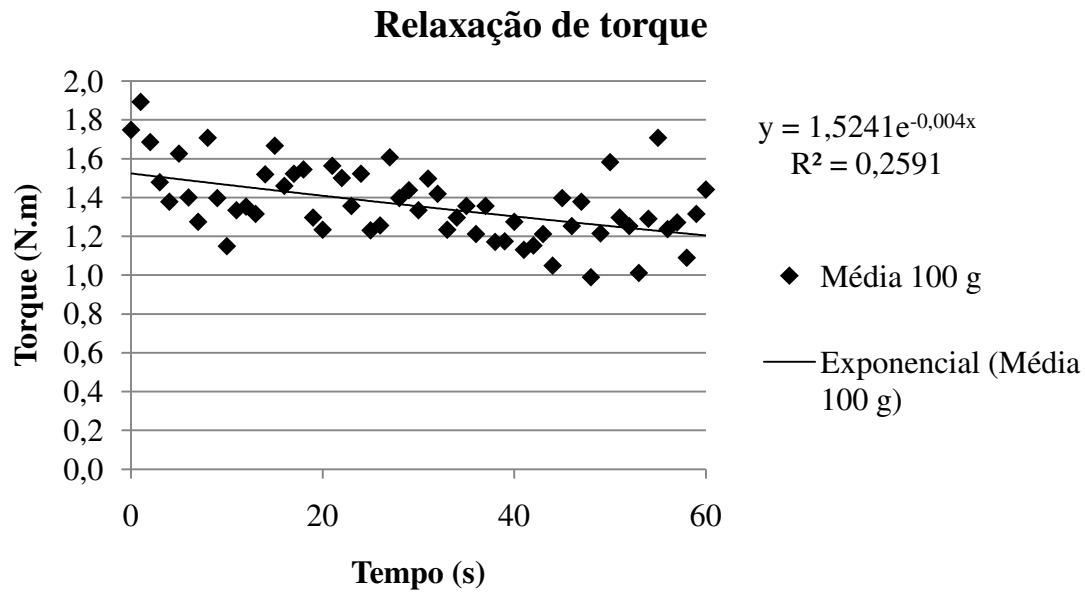


Figura 74: Curva de relaxação de torque para o feixe de 100 g.

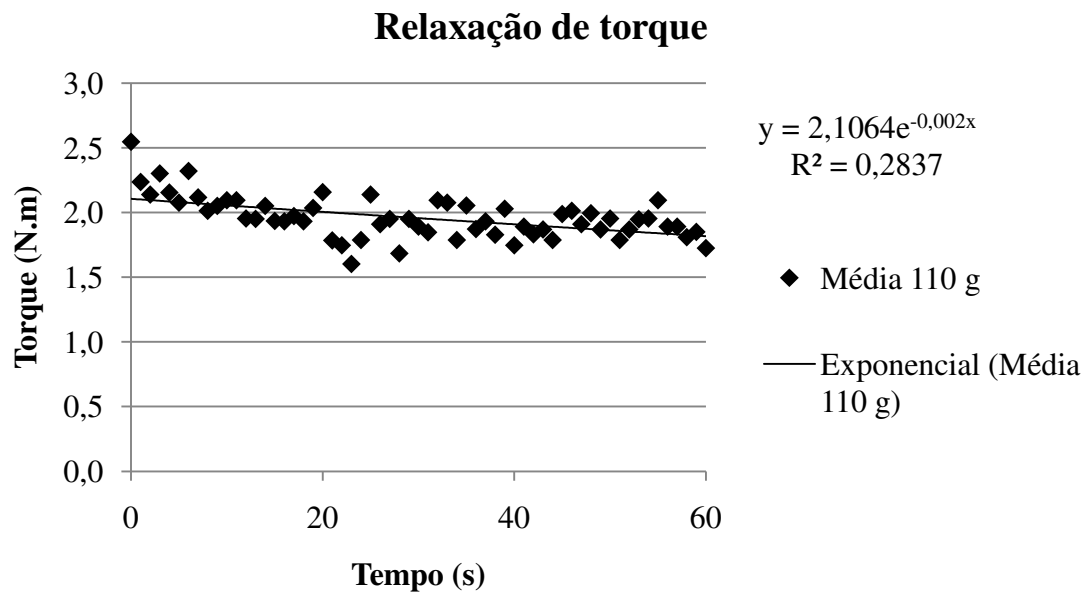


Figura 75: Curva de relaxação de torque para o feixe de 110 g.

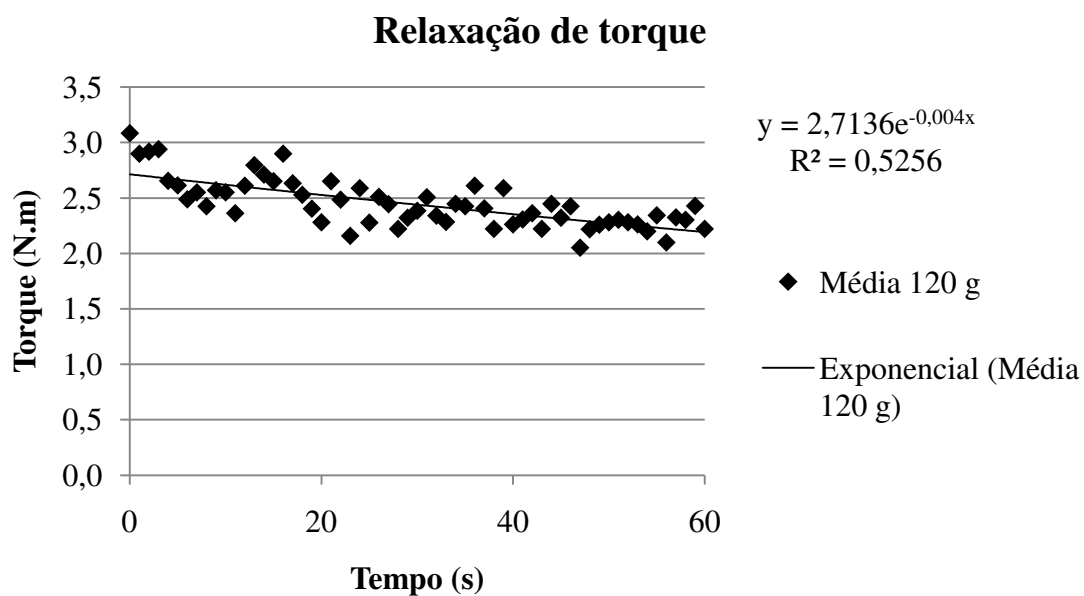


Figura 76: Curva de relaxação de torque para o feixe de 120 g.

10. APÊNDICES

10.1. Teorema sobre os ângulos formados entre retas tangentes e perpendiculares às hélices

Os teoremas a seguir foram extraídos de Hearle et al. (1969). Na Figura 77(a), AX e $A'X'$ são segmentos de retas tangentes à hélice da corda, com a única diferença de que elas estão deslocadas por um ângulo β em torno do eixo comum. Dessa forma, $\angle AOA' = \beta$. Os segmentos de retas AB e AB' são paralelos ao eixo, com os quais AX e $A'X'$ fazem um ângulo θ . AZ e $A'Z'$ são segmentos iguais e perpendiculares a AX e AO , e $A'X'$ e $A'O$, respectivamente.

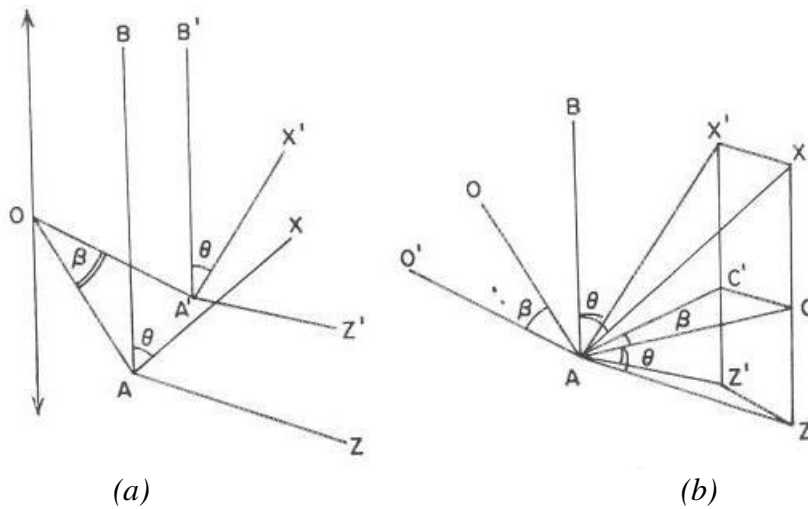


Figura 77: Ângulo formado por duas hélices. (a) hélices deslocadas de um ângulo β , (b) projeções das hélices no plano.

A fim de encontrar o ângulo formado entre AX e $A'X'$, é conveniente utilizar o diagrama da Figura 77 (b), onde A' foi deslocado para se tornar coincidente com A , e todos os outros pontos deslocados da mesma quantidade na mesma direção. Dessa forma, $A'O$ se torna AO' e $\angle OAO' = \beta$.

As linhas AC e AC' podem ser obtidas a partir da projeção de AX e $A'X'$ sobre um plano perpendicular ao eixo da corda. Assim, CA será perpendicular a AO e $C'A$ perpendicular a AO' , e assim $\angle CAC' = \beta$.

Mas $XX' = CC'$, e supondo β pequeno

$$AX \cdot \angle XAX' = AC \cdot \angle CAC' = (AX \sin \theta) \beta \quad (65)$$

$$\angle X\hat{A}X' = \beta \sin \theta \quad (66)$$

Este resultado significa que o ângulo entre duas faces paralelas de uma hélice separadas pelo ângulo β em torno do eixo da corda é dado por $\beta \sin \theta$. Similarmente, o ângulo entre as linhas AZ e $A'Z'$ perpendiculares à hélice e ao raio da corda é dado por $\beta \cos \theta$

10.2. Teorema sobre a resultante de forças iguais e opostas fazendo um pequeno ângulo entre si

Quando duas forças F iguais e opostas que formam entre si um pequeno ângulo χ convergem na direção de um determinado ponto, a força resultante F' pode ser obtida completando-se o triângulo de forças, como mostrado na Figura 78.

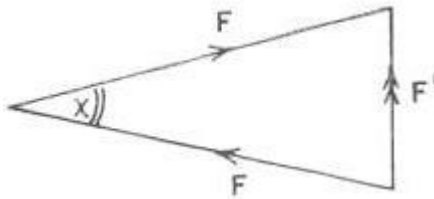


Figura 78: Duas forças concorrentes a um eixo.

Dessa forma tem-se:

$$F' = F\chi \quad (67)$$