



ALEXANDRE ASSIS REZENDE SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA AO CORTE BASAL
DOS COLMOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

LAVRAS – MG

2020

ALEXANDRE ASSIS REZENDE SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA AO CORTE BASAL DOS COLMOS DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. DSc. Fábio Lúcio Santos

Coorientador

Prof. DSc. Ednilton Tavares de Andrade

Coorientadora

LAVRAS – MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Alexandre Assis Rezende.

Simulação Numérica Aplicada ao Corte basal dos Colmos
de Cana-de-Açúcar / Alexandre Assis Rezende Santos. –
Lavras : UFLA, 2020.

88 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal
de Lavras, 2020.

Orientador: Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães.
Bibliografia.

1. Análise Numérica. 2. Cana-de-açúcar. 3. Método dos
Elementos Finitos. 4. Modelagem. I. Magalhães, Ricardo
Rodrigues.

ALEXANDRE ASSIS REZENDE SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA AO CORTE BASAL DOS COLMOS DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de Fevereiro de 2020.

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães UFLA
Prof. DSc. Ednilton Tavares de Andrades UFLA
Prof. DSc. Fábio Lúcio Santos UFLA
Prof. DSc. André Luís Gonçalves Costa UNILAVRAS

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. DSc. Fábio Lúcio Santos
Co-Orientador

Prof. DSc. Ednilton Tavares de Andrade
Co-Orientadora

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo que tem feito a minha vida, que eu embora não merecendo o seu sacrifício, tem me guiado e me orientado e me dado a tua salvação. Sem Ele nada eu teria alcançado e também por ter estado comigo nas lutas e provas.

A minha vó Guaraciaba, a minha mãe Cláudia, ao meu padrasto David e a minha irmã Carol por todo suporte e auxílio que têm me dado ao longo desses anos. Nada poderia ser feito sem o carinho de vocês.

Aos professores DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães, DSc. Ednilton Tavares de Andrade e principalmente ao DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães, pela orientação, paciência, pela amizade e incentivo na execução desta dissertação.

Ao André por ter me ajudado na realização desse trabalho e pela sua amizade

Aos amigos da Pós-graduação, especialmente ao Leomar, Isaque, Luiz, Henrique, Andrews, Paulo, Sr. Marcus, Maria enfim a galera, pela troca de conhecimento durante esses anos, aprendi muito com todos vocês e também pelas conversas na hora do café sobre política e outras leviandades (Haha!!!).

À Universidade Federal de Lavras – UFLA e ao Departamento de Engenharia pela oportunidade de realizar meus estudos nesta instituição.

Aos docentes pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo desses anos.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, da Universidade Federal de Lavras-UFLA, pela colaboração e atenção.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado

*O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.
(Winston Churchill)*

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Em 2019, foram produzidas 34,1 milhões de toneladas de açúcar e 31,7 bilhões de litros de etanol. Devido à crescente demanda por produtos derivados da cana-de-açúcar e às restrições ambientais, a mecanização do processo de colheita foi a solução para aumentar a produção. No entanto, existem poucos estudos com o objetivo de entender o processo de colheita mecanizada realizada por colhedoras e as falhas no processo de corte. O método dos elementos finitos é uma ferramenta útil para entender eventos que ocorrem em pouco tempo. Com base nisso, foi simulado um corte basal do colmo da cana, considerando a cana como material anisotrópico e heterogêneo (casca e polpa). No estudo foram utilizadas as propriedades mecânicas da cana RB966928, por ser a variedade mais comum no sudeste do Brasil. As condições de contorno adotadas na simulação do corte basal do colmo da cana foram velocidade de rotação de 640 rpm e ângulo de corte de 0 graus. Como resultado, a tensão máxima obtida no corte da cana foi de 24,11 MPa na casca e 10,29 MPa na polpa. Comparados aos estudos encontrados na literatura com diferentes condições, os resultados das tensões apresentaram diferença em torno de 30 % e o ângulo de corte foi o fator que mais influenciou nos valores das tensões.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Análise Explícita. Cana-de-açúcar. Modelagem. Ansys WorkBench. Corte da Cana-de-açúcar

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugarcane in the world. In 2019, it was produced 34.1 million tons of sugar and 31.7 billion liters of ethanol. Due to inscreasing demand for products from sugarcane and environmental restrictions, the mechanization of the harvesting process was the solution to the problem. However, there are few studies aimed to understand the process of mechanized harvesting performed by harvesters and the failures in the cutting process. The finite element method is a useful tool for understanding events that occur in a short time. Based on that, a basal cutting of the sugarcane culm was simulated considering the sugarcane as a anisotropic and heterogeneous (rind and pulp) material. In the study was used the mechanical properties of RB966928 sugarcane, because is the most common variety in southeastern brazil. The boundary conditions adopted in the simulation of the basal cutting of sugarcane culm were rotation speed of 640 rpm and cutting angle of 0 degree. Maximum stress reached for sugarcane cutting were 24.11 MPa at the rind and 10.29 MPa at the pulp. Compared to studies found in the literature with different conditions, stresses results presented difference around 30%, and the cutting angle was the factor that most influenced in the stress values.

Keywords: Finite Element Method. Explicit Analysis. Sugarcane. Modeling. Ansys Workbench. Sugarcane Cutting

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processos internos de uma máquina colhedora de cana-de-açúcar	18
Figura 2.2 – Sistema de corte basal de uma colhedora de cana-de-açúcar	19
Figura 2.3 – Disco de corte padrão utilizado no corte basal	20
Figura 2.4 – Peça ordinária sem simplificação	23
Figura 2.5 – Peça ordinária com simplificação	24
Figura 2.6 – Modelos de elementos usuais	25
Figura 2.7 – Elemento Triangular Padrão	26
Figura 2.8 – Elemento Triangular como Interpolação quadrática	27
Figura 2.9 – Superfície de Falha Fechada e Aberta	37
Figura 2.10 – Variação de F_{12} em vários graus de anisotropia	42
Figura 2.11 – Relação de F_{12} entre os ângulos de rotação e em vários graus de anisotropia	42
Figura 2.12 – Exemplo de uma distribuição normal	44
Figura 3.1 – Fluxograma da etapas executadas no trabalho	46
Figura 3.2 – Fazenda Bocaina - Região de colheita	47
Figura 3.3 – Broca presente na cana-de-açúcar em um das amostras colhidas	48
Figura 3.4 – Corpo de Prova para ensaio de tração no sentido da fibra	50
Figura 3.5 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento transversal a fibra	50
Figura 3.6 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento no sentido da fibra	51
Figura 3.7 – Corpo de Prova para ensaio de compressão no sentido da fibra e transversal a fibra	51
Figura 3.8 – Corpo de Prova para o ensaio de tração da casca da cana-de-açúcar	52
Figura 3.9 – Ensaios realizados na Máquina de Universal: a) Ensaio de tração ; b) Ensaio de cisalhamento perpendicular a fibra ; c) Ensaio de Compressão	53
Figura 3.10 – Eixos considerados no estudo das propriedades da cana-de-açúcar	54
Figura 3.11 – Gabarito utilizado para controle das dimensões dos corpos de prova	54
Figura 3.12 – Uso da resina epóxi para melhorar sustentação nos ensaios	55
Figura 3.13 – Modelo simplificado do picador	57
Figura 3.14 – Modelo em CAD no SolidWorks	59
Figura 3.15 – Convergência de malha para a reprodução: a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar	60
Figura 3.16 – Comparação entre o modelo com cana de 30 mm (a) e 25 mm (b)	61

Figura 3.17 – Refinamento localizado de malha usado no modelo	62
Figura 3.18 – Convergência de malha para o estudo de caso: a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar	63
Figura 3.19 – O modelo final para o corte basal	65
Figura 3.20 – Aplicando a condição de contorno Deslocamento Remoto	66
Figura 3.21 – Condição de fixação a cana-de-açúcar	66
Figura 3.22 – Regiões de refinamento local de malha: 1 - região de corte ; 2 - região de suporte da cana-de-açúcar ; 3 - Porção superior da cana-de-açúcar	68
Figura 3.23 – Pontos estudados para a convergência de malha do corte basal	69
Figura 3.24 – Análise de convergência de malha para o corte basal do colmo da cana-de- açúcar	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas da cana para espécie Xintai	17
Tabela 2.2 – Resultados das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar	45
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio da polpa da cana-de-açúcar	56
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio da casca da cana-de-açúcar	56
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas da cana-de-açúcar no estudo de Xie et al. (2018) .	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Propriedades biomecânicas da cana-de-açúcar	16
2.2	Processo do corte mecanizado da cana-de-açúcar	17
2.3	Método dos Elementos Finitos	21
2.3.1	Pré-processamento	22
2.3.2	Solução	28
2.3.3	Pós processamento	29
2.4	Teoria de falhas usando o MEF	29
2.5	Teoria de falha para materiais ortotrópicos	30
2.5.1	CrITÉrio de Hill	30
2.5.2	CrITÉrio de Tsai-Hill	32
2.5.3	CrITÉrio de Norris	33
2.5.4	CrITÉrio de Gol'denblat e Kopnov	34
2.6	Teoria de falha geral para materiais anisotrópicos - CrITÉrio de Tsai-Wu	35
2.6.1	Determinação dos coeficientes de resistência para o critério Tsai-Wu	39
2.7	Inferência Estatística	43
3	MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1	Propriedades Físicas da Cana-de-Açúcar	47
3.2	Corpos de Prova	49
3.3	Propriedades Mecânicas da Cana-de-Açúcar	52
3.4	Reprodução dos dados de literatura	57
3.5	Estudo de Caso	60
3.6	Simulação do corte basal dos colmos da cana-de-açúcar	63
3.6.1	Condições de contorno e contatos	65
3.6.2	Geração de malha	67
4	CONCLUSÃO	70

REFERÊNCIAS 71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia, China e Tailândia, na respectiva ordem decrescente de produção. Em 2019, o Brasil produziu 34,1 milhões de toneladas de açúcar e 31,7 bilhões de litros de etanol. Os principais motivos que impulsionam a grande produtividade brasileira são o clima e o solo favoráveis para a produção de diversas lavouras e a utilização do etanol na frota de veículos do país, principalmente com o advento dos carros flex, onde se pode usar a gasolina ou etanol ou a mistura de ambos. Majoritariamente, o etanol Brasileiro vem proveniente da exploração da cana-de-açúcar.

O estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil e produziu cerca de 51% de toda produção nacional e 1/5 da produção mundial. Os métodos de colheita da cana-de-açúcar podem ser divididos em dois grandes grupos: colheita manual ou mecanizada.

A colheita manual é caracterizada pela queima do canavial, antes do corte da cana-de-açúcar, para eliminar as palhas, tornando assim mais fácil o corte, pois sem a queima é possível que ocorra lesões aos trabalhadores, como urticárias e arranhões, e também o aparecimento de animais peçonhentos como cobras e aranhas podendo trazer risco a vida dos profissionais.

Já na colheita mecanizada não é necessário a queima do canavial, assim reduzindo a perdas de sacarose dos colmos, no entanto pode haver um custo inicial elevado para aquisição de equipamentos e da adequação da lavoura para a utilização das colhedoras. Ainda sim, a colheita mecanizada tem um custo total menor dependendo da região.

Em 2002 foi aprovada uma lei no estado de São Paulo, a lei 11.241, que requisitava dos produtores mudanças nos métodos de colheita da cana-de-açúcar. Passando da colheita manual, que utiliza a queima prévia da cana-de-açúcar antes da colheita, para colheita mecanizada, onde não há a necessidade da queima do canavial. Para áreas produtoras com a declividade do terreno menor do 12%, a medida deveria ser cumprida até 2021, para declividades superiores a 12% até 2031. No entanto, devido a rápida adaptação da lei, os limites foram encurtados passando para 2014 e 2017, respectivamente.

Em 2015/2016, no estado de São Paulo, dos 3,79 milhões de hectares da lavoura de cana-de-açúcar plantadas, 3,46 milhões de hectares ou cerca de 91,3% utilizam a colheita mecanizada sem a utilização de fogo na pré-colheita. Fora do estado de São Paulo a mecanização é somente

empregada em 45,5% dos casos e ainda é utilizando majoritariamente o sistema de queima controlada na pre-colheita.

O método mais viável para contornar esse problema é a mesma política adotada pelo estado de São Paulo, que é a utilização da colheita completamente mecanizada para a extração da cana-de-açúcar, sem queima ou pré-processamento de colheita, no entanto isso levanta outros questionamentos.

O questionamento principal é entender de que forma o corte da cana é realizado e consequentemente como o processo pode ser otimizado. Para isso é necessário construir modelos e simulá-los para entender o processo de corte mecanizado da cana-de-açúcar. A construção de modelos e a simulação em escala reais para o corte da cana-de-açúcar demanda recursos, tempo e ainda pode sofrer influência de fenômenos externos, como mudança de condições climáticas, logísticas e de orçamento que podem impossibilitar e atrasar a implementação e o teste dos modelos. Assim, a adoção de modelos virtuais em ambiente computacional na simulação do corte da cana-de-açúcar resolve a maioria dos problemas dos testes de modelos em escala real. Vale ressaltar que a utilização de modelos virtuais não exclui a necessidade dos testes em modelos em escala real, eles são necessários para validação dos modelos virtuais.

Assim o problema que esse trabalho propõe resolver é obter uma simulação numérica que represente o corte dos colmos da cana-de-açúcar na colheita mecanizada, a partir de um modelo virtual da parte basal da planta em ambiente computacional, considerando as propriedades mecânicas da variedade RB966928 de cana-de-açúcar, que é a variedade mais comum na região sudeste. Sob a justificativa de melhor compreender a interação entre lâmina de corte e a planta no corte mecanizado, analisando as tensões e esforços envolvidos no processo, servindo assim como um estudo de base para o aperfeiçoamento desse método de colheita.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi modelar a planta de cana-de-açúcar, considerando-a como um material anisotrópico e heterogêneo, e simular numericamente o corte basal dos colmos da cana-de-açúcar usando esse modelo para compreender as tensões geradas no corte mecanizado da planta.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coleta de amostras de cana-de-açúcar e seleção das plantas mais apropriadas para os testes experimentais
- Determinação das propriedades físicas da cana-de-açúcar: Grau brix, Densidade, FDN (fibra detergente neutra), FDA (fibra detergente ácida), %lignina, Proteína bruta e Matéria seca.
- Construção de corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar.
- Determinação das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar através dos ensaios de tração, compressão e cisalhamento para polpa e casca da cana-de-açúcar
- Tratamento estatístico das propriedades mecânicas e físicas da cana-de-açúcar
- Modelar a cana-de-açúcar como um material anisotrópico e heterogêneo considerando a diferença de resistência mecânica entre a casca e a polpa da planta, através da coleta de dados obtidos de testes experimentais da cana-de-açúcar
- Reprodução do trabalho de Xie et al. (2018), com o objetivo de reconstruir o seu ambiente de simulação, levando em consideração as suas condições de contorno
- Calibração do modelo numérico da reprodução
- Avaliar os resultados através da comparação das tensões da reprodução e do trabalho de Xie et al. (2018) para validação do ambiente de simulação
- Realização de um estudo de caso utilizando a modelagem proposta da cana-de-açúcar por esse trabalho e o ambiente de simulação obtido na reprodução do trabalho,
- Avaliar os resultados através da comparação das tensões encontradas no estudo de caso e no trabalho de Xie et al. (2018) .
- Simular o corte basal dos colmos da cana-de-açúcar executada pelas colhedoras de cana-de-açúcar usando a modelagem proposta da cana-de-açúcar

- Avaliar as tensões geradas no processo de corte basal dos colmos da cana-de-açúcar e comparar as tensões de corte obtidas com outros estudos encontrados na literatura que também simulem o processo de corte basal

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades biomecânicas da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma monocotiledônea, membro da família *Poaceae* e do gênero *Saccharum* (SIBIYA et al., 2018). As espécies de cana presentes no Brasil são em grande maioria híbridas. Onde procura-se unir características favoráveis de cada espécie para atender as especificações exigidas pela lavoura no Brasil.

As plantas se desenvolvem no formato de touceiras e apresenta um caule na forma de colmos, ou seja, o caule apresenta um segmento limitado entre nós. Outra parte importante da morfologia são os rizomas que ficam paralelos ao solo e são responsáveis pela constituição da fixação da planta ao solo e na produção da touceira gerando novos segmentos da planta.

O colmo é a região da planta responsável pelo o acúmulo da sacarose e também é a região prevista para ocorrer o corte, pois os colmos ocupam a maior extensão do corpo da planta (MALAVALTA et al., 1964). A composição da cana é constituída em torno de 50% de fibras que ajudam atribuir resistência mecânica à planta e geralmente, parte dessa fibra é utilizada como fonte energética para fornos e caldeiras, muito embora o seu valor energético seja baixo (LIMA; CASTRO; TONANI, 2019). Outra aplicação prática para a fibra da cana-de-açúcar é a utilização para reforços de materiais, devido a seu baixo custo e baixa densidade (MONTEIRO et al., 2016).

Segundo Huang et al. (2011a), a planta de cana-de-açúcar em si pode ser considerado um material compósito uma vez que o restante do conteúdo mantém alinhadas e coesas as fibras presentes no corpo, semelhantemente a fase de matriz presente em materiais compósitos. A cana-de-açúcar é composta, principalmente, pela casca e polpa, onde está presente as fibras e a maior parte da sacarose presente na planta. O modelo unidirecional de material compósito é usado para modelar as propriedades e os esforços gerados na planta. No modelo adotado por Huang et al. (2011a) possui 4 constantes necessárias para se modelar o material, são eles: coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento e módulo de elasticidade axial e radial. No estudo de Huang et al. (2011a) a casca da cana-de-açúcar não foi considerada, pois embora a resistência mecânica da casca seja elevada em relação ao núcleo da cana-de-açúcar o seu efeito é limitado em relação ao todo.

Huang et al. (2011a) e Qingting et al. (2006) obtiveram as propriedades mecânicas da casca e do núcleo da cana-de-açúcar da espécie "Xintai sugar". No trabalho em questão, foram analisados 9 parâmetros mecânicos, os quais estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas da cana para espécie Xintai

Parâmetros	Núcleo da Cana (MPa)	Casca da cana-de-açúcar (MPa)
Resistência à tração axial	6,71	47,02
Resistência à tração radial	1,34	2,57
Resistência à compressão axial	14,47	101,40
Resistência à compressão radial	2,32	4,45
Força de cisalhamento no plano	0,45	2,25
Módulo elástico axial	1 514,8	10 614,89
Módulo de elasticidade radial	612,5	1 174,72
Módulo elástico de cisalhamento	10,82	54,1
Coefficiente de Poisson	0,467	0,344

Fonte: Huang et al. (2011a) e Qingting et al. (2006)

2.2 Processo do corte mecanizado da cana-de-açúcar

O processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar é realizado por máquinas que são responsáveis não só pelo processo de colheita, mas por todo beneficiamento intermediário da planta. No interior dessas máquinas são realizados diversos processos de cortes e de separação de impurezas como palha, areia e pedras, que não podem entrar no produto final levados às usinas de açúcar e álcool.

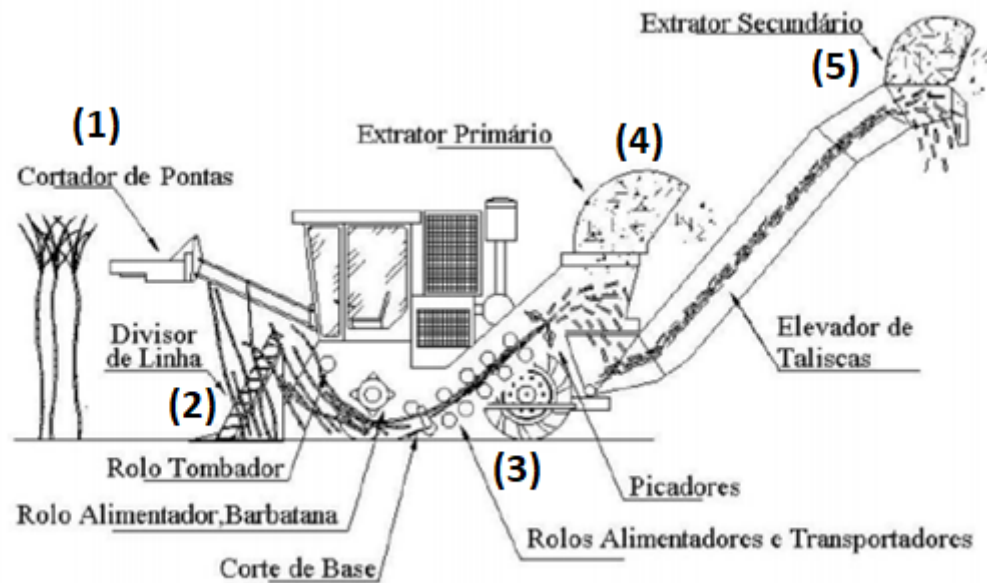
Embora haja diferenças nas características, no valor e na complexidade das máquinas todas apresentam processamentos internos semelhantes. Na figura 2.1 é detalhado todo o processo do corte da cana-de-açúcar, desde da colheita até a produção dos toletes, que são segmentos do corpo da cana-de-açúcar já picados e preparados para o processamento nas usinas.

Segundo Toledo (2012) as colhedoras apresentam de maneira geral as seguintes etapas funcionamento:

Etapa 1 - Inicialmente é realizado o corte das ponteiros da cana-de-açúcar pelos despontadores;

Etapa 2 - As plantas de cana são direcionadas pelos divisores de linha e apoiadas pelo rolo tombador para realizar o corte basal;

Figura 2.1 – Processos internos de uma máquina colhedora de cana-de-açúcar



Fonte: Santos (2012)

Etapa 3 - Depois do corte basal, a planta é levada pelos rolos alimentadores até chegar aos picadores, onde são cortados em rebolos de, aproximadamente, 30 centímetros;

Etapa 4 - No extrator primário, a maior parte das impurezas são removidas por sucção;

Etapa 5 - Os colmos são conduzidos pelo elevador de taliscas, passando pelo extrator secundário para a remoção das impurezas ainda restantes e são descarregados em carretas de transbordos;

A etapa 1 é realizado o corte da ponteiros da cana-de-açúcar, o motivo dessa etapa é redução de impureza vegetal, que uma vez levada para o processamento na usina reduz a qualidade do produto final.

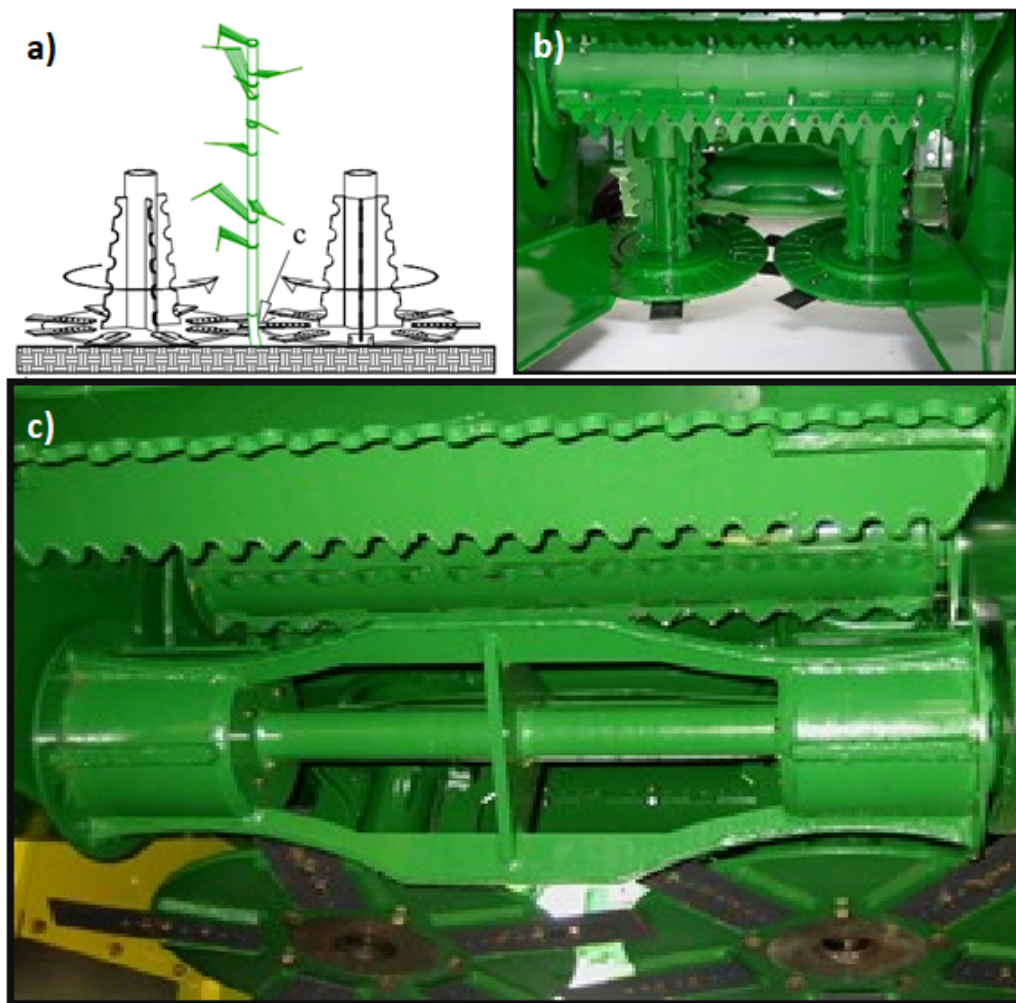
A etapa 2 é um dos pontos mais críticos do processo como o todo, sendo ele responsável por determinar a qualidade do corte, a saúde da raiz deixada para rebrota e a entrada de material mineral no processo como sílica, pedras, terra e cinzas. Segundo Santos (2012), diversos parâmetros influenciam na qualidade do corte, a determinação da altura e velocidade de corte são os principais.

As etapas 3 e 4 se dão em regiões próximas e são as mais importantes para a qualidade da matéria prima na saída do processo. Silva et al. (2019) destaca que nessa fase pode haver

o surgimento de rebolos de tamanhos distintos e/ou macerados e ainda a presença de impurezas mineral e vegetal, por isso a necessidade da etapa 5 para tentar eliminar ao máximo as impurezas.

O dispositivo de corte basal na colhedora é um par de discos rotativos que apresenta fixo a ele lâminas que produzem o corte da cana-de-açúcar e ainda realiza a função de alimentação. O sistema de corte basal de uma colhedora de cana-de-açúcar está apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Sistema de corte basal de uma colhedora de cana-de-açúcar



Fonte: Deere (2018)

Segundo Toledo (2012), o mecanismo de corte basal está relacionado com a qualidade da matéria prima e perdas que ocorrem no processo como todo. No passado, as máquinas apresentavam dificuldades em relação as irregularidades do solo, onde a altura de corte elevada evitava desgastes acentuados e quebras, mas a produtividade era reduzida, pois matéria prima era desperdiçada.

Por outro lado, se a altura fosse reduzida, teria se um aumento na produtividade, mas existia a quebra e desgaste prematuro dos equipamentos, devido ao contato abrupto com o solo, elevando os esforços sobre o implemento. Atualmente as máquinas apresentam mecanismos de controle de altura do cortador basal, onde se ajusta a altura do cortador basal para alcançar uma altura predeterminada (DEERE, 2018).

No mecanismo de corte, a parte do implemento de maior importância são os discos de corte e lâminas, pois são os pilares para alcançar uma maior qualidade no processo de corte e menos danos as soqueiras da cana-de-açúcar. Os discos são responsáveis por dar suporte as lâminas e conferir equilíbrio inercial ao sistema de corte. Um disco de corte padrão com o suporte para 5 lâminas de corte está detalhado na figura 2.3. A forma do dispositivo pode variar de fabricante para fabricante até mesmo quando ao número de lâminas suportadas e o diâmetro, mas todas apresentam a mesma função. Com relação as lâminas de corte a mesma regra não se aplica, pois a mudança da geometria pode conferir mudanças na qualidade do corte e na qualidade do produto final.

Figura 2.3 – Disco de corte padrão utilizado no corte basal



Fonte: Unimil (2018)

Mello e Harris (2003) analisou a influência da geometria da lâmina no corte da cana, em seu trabalho foram estudados 3 tipos de lâminas; a comum, que apresenta um geometria reta, e 2 inclinadas serrilhadas, onde uma apresenta a inclinação para frente e a outra para trás. O melhor resultado alcançado foi com a lâmina serrilhada de 3 mm e com a inclinação para frente. Em alguns casos, para esse tipo de lâmina, não foi observado nenhum tipo de dano, no entanto essas lâminas sofrem mais desgastes em comparação com as lâminas retas sendo necessário aumentar a altura de corte de trabalho.

2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos Finitos (MEF) é considerado uma ferramenta de cálculo numérico que foca na discretização de uma geometria em pequenos elementos. Essa discretização é adotada, pois diferentemente das geometrias regulares, presentes na mecânica dos sólidos clássica, é difícil estabelecer uma equação diferencial que modele os corpos dos mais diversos tipos de maneira satisfatória. Tal método consiste em atribuir a esses elementos uma função que consiga descrever o comportamento interno do elemento baseando-se em pontos discretos da estrutura e assim utilizar métodos numéricos para resolver os sistemas de equações geradas por cada elemento presente no corpo estudado (ZULKIFLI et al., 2020).

Cada elemento apresenta uma formulação específica dependendo do fenômeno que se deseja estudar. Se o objetivo for analisar deslocamentos, deformações ou tensões em corpos sólidos as relações de mecânica dos sólidos para os deslocamentos serão utilizadas, para fluidos utiliza se as relações de Navier-Stokes para obter as relações de campo de velocidade, pressão e continuidade.

Os elementos utilizados para discretizar uma geometria são constituídos de nós, que são pontos discretos onde são atribuídos valores locais de carregamentos e valores de contorno, seja um deslocamento, uma temperatura, uma restrição ou uma velocidade. Os nós são responsáveis por manter a união entre os elementos. É importante saber que para obter valores mais precisos dos deslocamentos é necessário atribuir um nó no local de estudo, não sendo necessário utilizar as equações de interpolação presentes no elemento utilizado (SEGERLIND, 1984).

Esse procedimento de cálculo é de certa forma recente, embora haja relatos de mais de 150 anos de seu uso. Mas foi devido a exploração aeroespacial que o método numérico usado atualmente surgiu para auxiliar no desenvolvimento de foguetes, mísseis, aviões, capsulas de foguetes e seus componentes.

O primeiro software produzido para se estudar os campos de tensão e deslocamento em corpos sólidos foi o Software NASTRAN. O significado de NASTRAN é "NASA Structural Analysis" e o software foi concebido na década de 60 (NASA, 2015). Hoje o método desenvolvido pela NASA é de certa forma público, onde companhias modificam o método criando versões próprias.

Segundo Andrade e Leonel (2017), o maior problema em MEF (Método dos Elementos Finitos) reside se na discretização do corpo, onde consiste na formação de uma malha de elementos interligados. Segundo Segerlind (1984), existe uma ordem específica desses elementos para otimizar o processo de cálculo, tal propriedade é definida como Largura de Banda, que está relacionado com a numeração dos nós na constituição do modelo. No entanto, os programas atuais do MEF realizam essas operações de forma otimizada, não sendo mais necessário a interferência por parte do operador do programa, devido a criação de softwares especializados na geração das malhas.

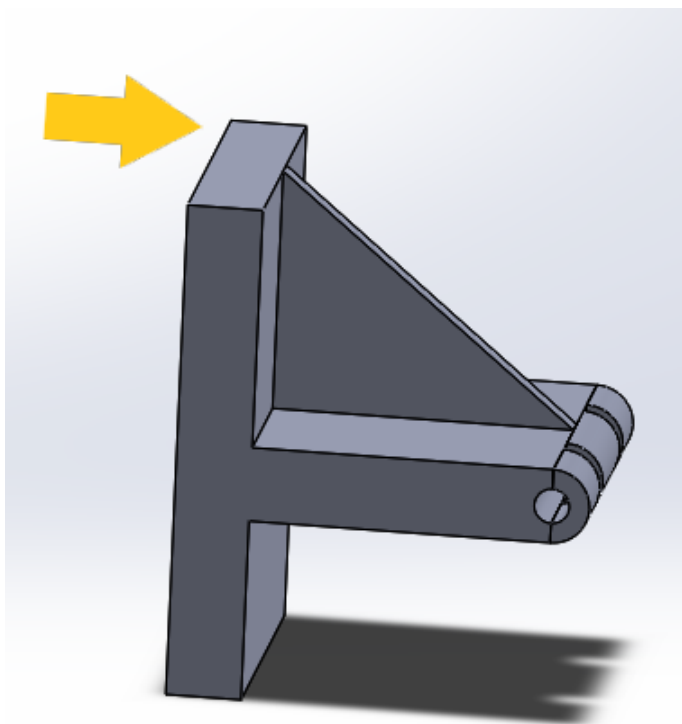
Devido ao fato da discretização de geometrias complexas, o método de elementos finitos pode ser aplicado em diversos ramos da engenharia, isso incluído as áreas de biomateriais e biomecânica. Essas aplicações podem ajudar a detalhar e entender qual parcela dos fenômenos regem o comportamento de uma estrutura biológica e trazer um avanço no entendimento dessas estruturas.

Segundo Silva (2013), o método de elementos finitos tem uma ordem pré-estabelecida e é padrão para todo e qualquer tipo de análise. Existem etapas que independentemente da física por de trás dos problemas que devem ser seguidas. As etapas podem ser divididas em 3 grandes grupos, são eles: Pré-processamento, Solução e Pós-processamento.

2.3.1 Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa onde são tomadas todas as decisões que irão guiar a modelagem. É definido o fenômeno que será abordado, o tipo de elemento utilizando para discretizar a geometria e são introduzidas as condições iniciais de contorno e os carregamentos. No pré-processamento a geometria de estudo tem as primeiras idealizações, sobre o que pode influenciar ou não na simulação, simplificando a geometria estudada e tirando arranjos que podem ser desnecessários para o cenário estudado. Por exemplo, deseja-se analisar os esforços de um determinado carregamento de uma peça ordinária apresentada na figura 2.4.

Figura 2.4 – Peça ordinária sem simplificação



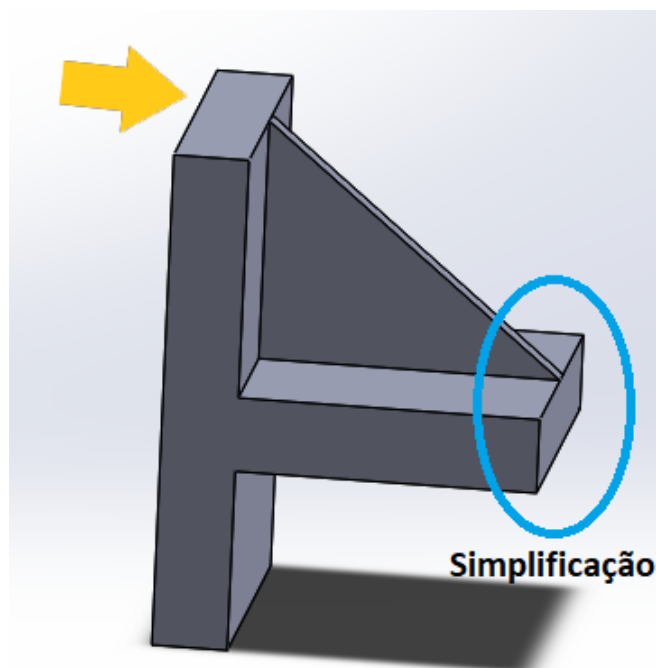
Fonte: Autor

Pode ser observado que na extremidade à direita da peça há presença de uma curvatura juntamente com uma perfuração central passante e com dois cortes transversais separando a curvatura em 3 segmentos. Como o objetivo é obter os esforços resultantes sobre a peça, a parte onde apresenta as perfurações e corte não influencia de maneira significativa a simulações totais, assim a utilização dessa forma se torna um acréscimo ao processamento dos cálculos sem nenhuma necessidade.

Nesse caso há duas soluções possíveis, sendo a primeira gerar uma malha mais simples sem qualquer refinamento local fora da área de interesse. A segunda opção seria simplificar a geometria removendo detalhes da peça sem comprometer o estudo. Uma geometria simplificada da peça está apresentada na Figura 2.5. A primeira solução só é viável quando não há meios de modelar outra geometria, porque embora haja uma redução na malha fora do local de interesse, ainda pode haver um número significativo de elementos, o que torna oneroso em relação ao tempo de máquina.

Outro ponto importante nesse tipo de análise, consiste na discretização do modelo, onde a geometria em 3D, importada de um modelo CAD, é transformada em uma malha constituída por elementos. O tipo de elemento pode variar quanto a sua forma e sua dimensão. Os elementos mais usuais utilizados na constituição de uma malha estão apresentados na Figura 2.6.

Figura 2.5 – Peça ordinária com simplificação



Fonte: Autor

Uma vez definido os elementos, torna se pertinente detalhar as funções de interpolação dentro do elemento. No pré-processamento a escolha da função de interpolação pode ajudar no próximo passo, a solução do modelo, onde pode-se melhorar os resultados das simulações usando o mesmo número de elementos (SILVA et al., 2016).

Como os elementos são constituídos de nós para determinar os deslocamentos internos de cada elemento é necessário conhecer as equações de interpolação interna dos elementos. Geralmente essas equações são dadas na forma de polinômios de acordo com os graus de liberdade de um determinado elemento. Comumente essas funções são dadas em dois graus, linear ou quadrática, onde as componentes da equação relacionam o valor dos nós com a posição relativa ao sistema local de eixos adotados como referência pelo elemento (FILHO, 2000). Um elemento triangular padrão, em função dos valores dos nós, está representado na Figura 2.7.

Para o elemento representado na Figura 2.7, a formulação da interpolação é dada pela Equação 2.1.

$$\phi = N_i\phi_i + N_j\phi_j + N_k\phi_k \quad (2.1)$$

sendo:

$$N_i = 1/2A[a_i + b_ix + c_iy] \quad (2.2)$$

Figura 2.6 – Modelos de elementos usuais

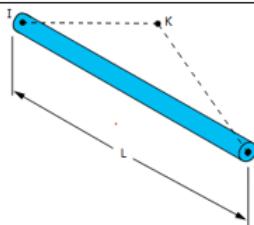
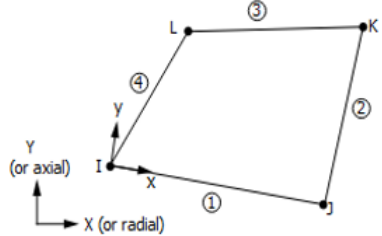
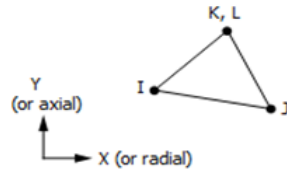
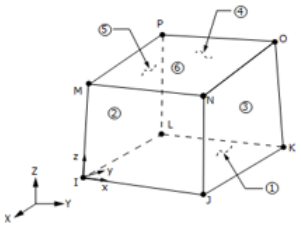
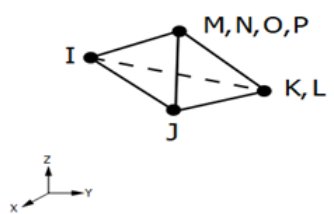
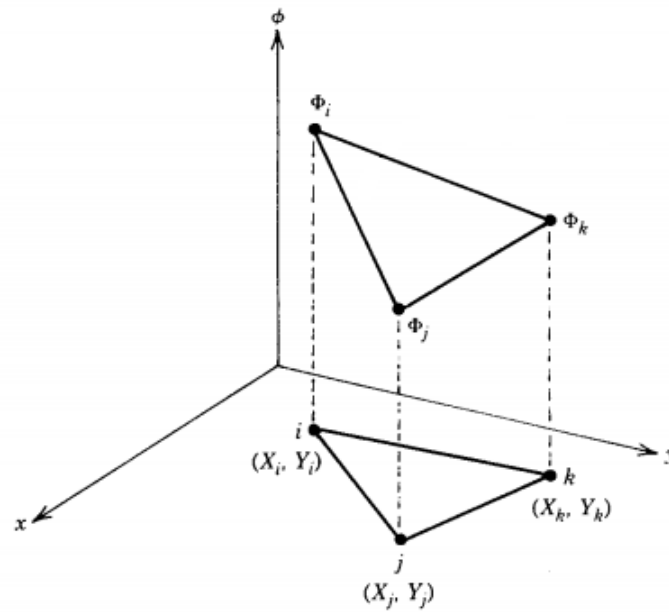
Elementos usuais	
<p>Elemento de Viga</p> 	<p>Elemento 1D – Dimensão única</p> <ul style="list-style-type: none"> • É usado para modelar deformações unidirecionais exclusivamente • É usado para modelar os elementos de uma treliça, links, molas e cabos.
<p>Elemento Quadrilátero</p> 	<p>Elemento 2D – Duas Dimensões</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementos que ideais para condições constantes no sentido transversal ao plano xy • É usado para modelar deformações no sentido dos eixos x e y • Pode ser utilizado para para modelagem de casca de compósitos
<p>Elemento Triangular</p> 	<p>Elemento 2D – Duas Dimensões</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementos que ideais para condições constantes no sentido transversal ao plano xy • É usado para modelar deformações no sentido dos eixos x e y • Pode ser utilizado para modelagem de casca de compósitos • É utilizado em geometrias mais complexas e irregulares
<p>Elemento Hexaédrico</p> 	<p>Elemento 3D – 3 Dimensões</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usado para modelagem 3D de estruturas sólidas, ou seja, onde as dimensões da peça não são muito maiores que a espessura. • Suporta deformações em 3 eixos
<p>Elemento Tetraédrico</p> 	<p>Elemento 3D – 3 Dimensões</p> <ul style="list-style-type: none"> • As mesmas propriedades do elemento Hexaédrico, no entanto quando a geometria não é regular ou apresenta uma maior complexidade, esse elemento é o mais indicado.

Figura 2.7 – Elemento Triangular Padrão



Fonte: Segerlind (1984)

$$N_j = 1/2A[a_i + b_jx + c_jy] \quad (2.3)$$

$$N_k = 1/2A[a_k + b_kx + c_ky] \quad (2.4)$$

$$a_i = X_jY_k - X_kY_j \quad (2.5)$$

$$a_j = X_kY_i - X_iY_k \quad (2.6)$$

$$a_k = X_iY_j - X_jY_i \quad (2.7)$$

$$b_i = Y_j - Y_k \quad (2.8)$$

$$b_j = Y_k - Y_i \quad (2.9)$$

$$b_k = Y_i - Y_j \quad (2.10)$$

$$c_i = X_k - X_j \quad (2.11)$$

$$c_j = X_i - X_k \quad (2.12)$$

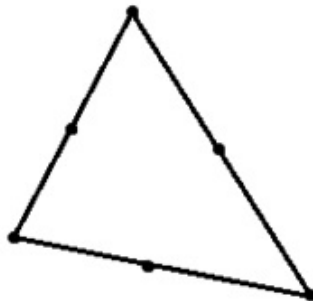
$$c_k = X_j - X_i \quad (2.13)$$

Onde A , X_i , X_j , X_k , Y_i , Y_j e Y_k representam, respectivamente, a área do elemento, a coordenada x do nó i , j , k e a coordenada y do nó i , j , k .

A Equação 2.1 é linear nos sentidos x e y , a derivada da função exibe uma taxa de variação constante em ambos os eixos. Esse tipo de função de interpolação não torna o uso desse elemento ideal se estiver em uma menor quantidade, assim sendo necessário um maior refinamento da malha para esses elementos. Para variações abruptas de descolamentos dentro do elemento o uso desse elemento torna se preocupante, visto que pode acrescentar erros nos resultados calculados (SEGERLIND, 1984).

A função de interpolação de um elemento triangular com a equação de interpolação quadrática da Figura 2.8 é dada pelas equações 2.14 e 2.15.

Figura 2.8 – Elemento Triangular como Interpolação quadrática



Fonte: Autor

$$u(x,y) = C_1 + C_2x + C_3y + C_4xy + C_5x^2 + C_6y^2 \quad (2.14)$$

$$v(x,y) = C_7 + C_8x + C_9y + C_{10}xy + C_{11}x^2 + C_{12}y^6 \quad (2.15)$$

Em que as variáveis C_1 a C_{12} representam as constantes a serem determinadas pelas condições de entrada.

2.3.2 Solução

Essa etapa ocorre sem muita influência do usuário, uma vez que o código do software é responsável por processar as definições, que são as condições de contorno e os esforços, estabelecidas na fase de pré-processamento (SILVA et al., 2016). Nessa etapa, ocorre a formulação das matrizes de rigidez, de massa, de amortecimento e atribuição do vetor de força. A formulação padrão para o método de elementos finitos consiste na Equação 2.16.

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = [F] \quad (2.16)$$

Em que $[M]$ representa a matriz de massa que é responsável pela atribuição inercial dos elementos na modelagem de uma estrutura. A parcela $[C]$ representa os efeitos de amortecimento entre os elementos e está relacionada diretamente com a velocidade relativa entre os elementos. Para simulações estáticas não são utilizadas tais parcelas, pois os efeitos inerciais não são considerados nesse tipo de simulação (ANSYS COMPANY, 2014).

A parcela $[K]$ representa a rigidez mecânica da estrutura analisada e é responsável por determinar a resistência ao deslocamento dos nós dentro de um elemento e por último a parcela $[F]$ representa o esforço externo que é aplicado aos nós. Cada parcela $[M]$, $[C]$ e $[K]$ tem que estar em equilíbrio com o vetor de força aplicado, ou seja, as aplicações de esforços a um determinado nó geram deslocamentos na malha e esses deslocamentos tem que ser o mesmo para os nós adjacentes. Isso ocorre devido as interconexões nodais dentro dos elementos e aos adjacentes (ANSYS COMPANY, 2014).

Uma vez estabelecidas todas as equações de deslocamento do modelo o próximo passo é a resolução das equações para deslocamento desconhecidos e a obtenção das deformações e tensões através das equações constitutivas (BATHE, 1996).

2.3.3 Pós processamento

O pós-processamento é representado pela etapa onde se observa os resultados das simulações realizadas, onde é possível visualizar cada dado de saída separadamente. Se a simulação for realizada para fins de análise de mecânica dos sólidos, os dados de saída são, geralmente, deslocamentos e tensões. Neste caso, obtêm-se os deslocamentos nodais, as deformações da geometria, as tensões resultantes, as forças de reação, as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura, entre outros dados de saída.

Geralmente é na etapa de pós-processamento que os conhecimentos técnicos do usuário se faz necessários, onde deve-se analisar se os resultados encontrados têm coerência. São analisados, por exemplo, os campos de tensão resultante e, bem como, os campos de tensão cisalhante máxima para determinar sobre qual tensão resultante irá ocorrer a falha. Também é analisado, por exemplo, se algum elemento sofreu distorção excessiva ou deformação de forma a prejudicar a análise. Caso isso ocorra, é necessário um maior refinamento da malha ou mudanças na geometria. No entanto, para evitar tais erros, é recomendável a realização de análise prévia de convergência de malha, em que a malha do modelo é refinada até que se obtenha, graficamente, uma tensão constante.

2.4 Teoria de falhas usando o MEF

Segundo Oliveira et al. (2006), um material isotrópico é um material em que as propriedades físicas e mecânicas são independentes das direções consideradas. Muitos materiais na engenharia podem ser considerados isotrópicos, os metais em sua maioria são isotrópicos, salvo algumas exceções onde se modifica a direção das microestruturas do material através de conformação ou tratamentos térmicos.

Dickson et al. (2017) detalha que um material ortotrópico apresenta uma simetria em um dos planos nas três direções ortogonais. Geralmente vidros, madeiras e alguns polímeros e compósitos podem ser encaixados nesse grupo. Segundo Nicolas et al. (2006), alguns materiais isotrópicos podem ser modelados como ortotrópico. A maioria dos materiais utilizados na engenharia é pertencente a classe de materiais anisotrópicos. A definição de um material anisotrópico segundo Liu et al. (2019) é a presença de nenhuma simetria de propriedade nas direções dos planos ortogonais. Em certos casos a simplificação de modelos anisotrópicos pode ser pos-

sível. A atribuição mais comum é de se considerar um material anisotrópico como ortotrópico ou isotrópicos para pequenos deslocamentos.

A teoria de falha estuda os critérios de resistência para cada tipo de material quando um determinado corpo está submetido a um estado de tensão. Na engenharia é mais comumente estudado a teoria de falha para materiais isotrópicos devido ao uso extensivo dos metais na engenharia, no entanto para estudar materiais como concreto, madeira e biomateriais é necessário utilizar as abordagens de critérios de falhas para materiais ortotrópicos e anisotrópicos.

2.5 Teoria de falha para materiais ortotrópicos

Existem diversos modelos para descrever a falha em um material que apresenta característica ortotrópica. Os autores, como Hill (1950), Gol'denblat e Kopnov (1965) e Norris (1939), desenvolveram os critérios de falha para materiais ortotrópicos para determinar o limite máximo de tensão suportado em materiais como madeira, polímeros e laminados baseados em fibras naturais e sintéticas. As teorias mais aceitas para determinar o modo de falha em um material ortotrópico são: Critério de Hill, Tsai-Hill, Norris e Critério de Gol'denblat e Kolnov. Segundo Nicolas et al. (2006) os métodos de falha de Tsai-Hill, Norris são baseados diretamente da critério de Hill, somente variando quanto a determinação de algumas constantes e a adoção da condição de ruptura dependente das tensões hidrostáticas sobre o material.

2.5.1 Critério de Hill

A Equação 2.17 foi definida por Hill (1950) para determinar a falha de materiais ortotrópicos.

$$F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1 \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (2.17)$$

Hill (1950) assumiu para sua equação uma simetria com relação as tensões, ou seja, tanto a tensão de tração e compressão são iguais em módulo em todos os eixos.

Todas as análises do critério de falha ortotrópico foi baseada no estudo dos tensores de engenharia. Onde σ_i com $i=1$ a 3 representa as tensões axiais e $i=4$ a 6 representa as tensões de cisalhamento. A equação 2.18 ilustra os tensores.

$$\sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_4 & \sigma_6 \\ \sigma_4 & \sigma_2 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_5 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

O fator F_{ij} é denominado como a componente do critério de resistência do modelo. São eles que definem o limite de resistência do material quando submetidos aos carregamentos e estabelece a relação entre as tensões para a ocorrência da ação de ruptura. F_{ij} é dado por tensores de 2 ordem. A Equação 2.19 ilustra a representação de F_{ij} .

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ & & F_{33} & F_{34} & F_{35} & F_{36} \\ & & & F_{44} & F_{45} & F_{46} \\ & sim & & & F_{55} & F_{56} \\ & & & & & F_{66} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A equação 2.17 na forma expandida é determinada pela equação 2.20.

$$F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{33} \cdot \sigma_3^2 + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 2F_{13} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_3 + 2F_{23} \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 + F_{44} \cdot \sigma_4^2 + F_{55} \cdot \sigma_5^2 + F_{66} \cdot \sigma_6^2 = 1 \quad (2.20)$$

Definem-se os coeficientes do critério de resistência por meio das Equações 2.21 a 2.29.

$$F_{11} = \frac{1}{f_{t1}^2} \quad (2.21)$$

$$F_{22} = \frac{1}{f_{t2}^2} \quad (2.22)$$

$$F_{33} = \frac{1}{f_{t3}^2} \quad (2.23)$$

$$F_{44} = \frac{1}{f_{v4}^2} \quad (2.24)$$

$$F_{55} = \frac{1}{f_{v5}^2} \quad (2.25)$$

$$F_{66} = \frac{1}{f_{v6}^2} \quad (2.26)$$

$$2F_{12} = \frac{1}{f_{t1}^2} + \frac{1}{f_{t2}^2} - \frac{1}{f_{t3}^2} \quad (2.27)$$

$$2F_{13} = \frac{1}{f_{t1}^2} + \frac{1}{f_{t3}^2} - \frac{1}{f_{t2}^2} \quad (2.28)$$

$$2F_{23} = \frac{1}{f_{t2}^2} + \frac{1}{f_{t3}^2} - \frac{1}{f_{t1}^2} \quad (2.29)$$

em que f_{t1} , f_{t2} e f_{t3} são as tensões de falha para um ensaio de tração uniaxial para cada sentido dos eixos coordenados e f_{v4} , f_{v5} e f_{v6} são as tensões de falha para um ensaio de cisalhamento em cada eixo coordenado.

Um ponto importante a ser analisado é que os coeficientes do critério de resistência que relacionam duas tensões cisalhantes são nulos. Esse fato se deve aos planos de simetria em um material ortotrópico (NICOLAS et al., 2006).

2.5.2 Critério de Tsai-Hill

O Critério de Tsai-Hill é frequentemente usado para se determinar a ocorrência de falha em casos de reforço por polímeros (FUCHS; BHATTACHARYYA; FAKIROV, 2006). Esse método consistiu em considerar um plano de isometria no critério de Hill (TSAI, 1984). Tomando a equação 2.17 de Hill (1950) para um plano de tensões, tem se a Equação 2.30.

$$\frac{\sigma_1^2}{f_{t1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_{t2}^2} - \left(\frac{1}{f_{t2}^2} + \frac{1}{f_{t3}^2} - \frac{1}{f_{t1}^2} \right) \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2} = 1 \quad (2.30)$$

Se for considerado a isotropia do plano y-z, tem se que f_{t2} e f_{t3} são iguais, tal adaptação gerou a Equação 2.31.

$$\frac{\sigma_1^2}{f_{t1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_{t2}^2} - \left(\frac{1}{f_{t1}^2} \right) \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2} = 1 \quad (2.31)$$

Em Tsai (1984), foram obtidos resultados consistentes para casos de falha de reforços e processos de delaminação.

2.5.3 Critério de Norris

O critério de Norris também foi baseada no critério de Hill, mas agora passando a considerar a falta de simetria entre as tensões, ou seja, tensões de tração e compressão distintas em módulo (NORRIS, 1939).

Essa consideração levou ao método estabelecer uma equação distinta para cada quadrante específico de acordo com a combinação tração/compressão das tensões (Equações 2.32 a 2.36).

$$F_{11} = \frac{1}{f_{t1}^2} \quad \text{para} \quad \sigma_1 \geq 0 \quad (\text{quadrantes } 1 \text{ e } 4) \quad (2.32)$$

$$F_{11} = \frac{1}{f_{c1}^2} \quad \text{para} \quad \sigma_1 \leq 0 \quad (\text{quadrantes } 2 \text{ e } 3) \quad (2.33)$$

$$F_{22} = \frac{1}{f_{t2}^2} \quad \text{para} \quad \sigma_2 \geq 0 \quad (\text{quadrantes } 1 \text{ e } 2) \quad (2.34)$$

$$F_{22} = \frac{1}{f_{c2}^2} \quad \text{para} \quad \sigma_2 \leq 0 \quad (\text{quadrantes } 3 \text{ e } 4) \quad (2.35)$$

$$F_{44} = \frac{1}{f_{v4}^2} \quad (2.36)$$

As Equações 2.37 a 2.40 representam cada quadrante.

$$\left(\frac{\sigma_1^2}{f_{t1}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^2}{f_{t2}^2}\right) + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2}\right) = 1 \quad \text{Quadrante } 1 \quad (\sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0) \quad (2.37)$$

$$\left(\frac{\sigma_1^2}{f_{c1}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^2}{f_{t2}^2}\right) + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2}\right) = 1 \quad \text{Quadrante } 2 \quad (\sigma_1 \leq 0, \sigma_2 \geq 0) \quad (2.38)$$

$$\left(\frac{\sigma_1^2}{f_{c1}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^2}{f_{c2}^2}\right) + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2}\right) = 1 \quad \text{Quadrante 3} \quad (\sigma_1 \leq 0, \quad \sigma_2 \leq 0) \quad (2.39)$$

$$\left(\frac{\sigma_1^2}{f_{t1}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^2}{f_{c2}^2}\right) + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2}\right) = 1 \quad \text{Quadrante 4} \quad (\sigma_1 \geq 0, \quad \sigma_2 \leq 0) \quad (2.40)$$

O coeficiente do fator do critério de resistência entre as tensões σ_1 e σ_2 é dado pela Equação 2.41.

$$F_{12} = -\frac{1}{2 \cdot f_{t1} \cdot f_{t2}} \quad (2.41)$$

Segundo Nicolas et al. (2006), o critério de Norris foi desenvolvido para aplicação em madeiras e semelhantes como compensados e papelão.

2.5.4 Critério de Gol'denblat e Kopnov

O critério de Gol'dEnblat e Kopnov surgiu como um modelo proposto para todos os tipos de materiais, ou seja, uma generalização dos vários métodos de fratura, isotrópico, ortotrópico e anisotrópico. Gol'denblat e Kopnov (1965) estudou plásticos com reforços de fibra de vidro, mas pode ser aplicado na avaliação de outros materiais.

Outro ponto de bastante relevância é que o modelo Gol'denblat foi o primeiro a introduzir termos lineares das componentes do tensor de tensão e isso foi aplicado mais tarde na teoria de Tsai-Wu.

O critério de falha é governado pela Equação 2.42.

$$(F_i \cdot \sigma_i)^\alpha + (F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j)^\beta + (F_{ijk} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \cdot \sigma_k)^\gamma + \dots = 1 \quad (2.42)$$

Para determinar os coeficientes dos tensores adota-se uma configuração de $\alpha=1$, $\beta=1/2$ e $\gamma=-\text{inf}$, ficando a Equação 2.42 na forma da Equação 2.43.

$$F_i \cdot \sigma_i + \sqrt{F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j} = 1 \quad (2.43)$$

Por meio de ensaios uniaxiais e de cisalhamento puro os coeficientes dos tensores são dadas pelas Equações 2.44 a 2.48.

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{f_{t1}} - \frac{1}{f_{c1}} \right) \quad (2.44)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{f_{t2}} - \frac{1}{f_{c2}} \right) \quad (2.45)$$

$$F_{11} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{f_{t1}} + \frac{1}{f_{c1}} \right)^2 \quad (2.46)$$

$$F_{22} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{f_{t2}} + \frac{1}{f_{c2}} \right)^2 \quad (2.47)$$

$$F_{44} = \frac{1}{f_{v4}^2} \quad (2.48)$$

Por meio de ensaios de cisalhamento, é possível obter o valor de F_{12} , o qual é dado pela Equação 2.49.

$$F_{12} = \frac{1}{8} \cdot \left[\left(\frac{1}{f_{t1}} + \frac{1}{f_{c1}} \right)^2 + \left(\frac{1}{f_{t2}} + \frac{1}{f_{c2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{f_{vp}} + \frac{1}{f_{vn}} \right)^2 \right] \quad (2.49)$$

Segundo Nicolas et al. (2006), os critérios de Norris e Gol'Denblat são bastante aplicados a madeira. Outro ponto relevante é que os critérios de Norris e Gol'Denblat podem ser usados quando não há simetria nas tensões de compressão e tração.

2.6 Teoria de falha geral para materiais anisotrópicos - Critério de Tsai-Wu

Assim como os outros critérios de falha, o critério de Tsai-Wu também parte de uma análise tensorial semelhantemente mostrado nas equações 2.18 e 2.19. Como no critério de Gol'Denblat, a teoria de Tsai-Wu utilizou de tensores lineares para possibilitar o estudo das forças internas, que pode descrever a falhas ocorridas por tensões positivas e negativas (TSAI; WU, 1971). Em uma análise mais profunda, pode se perceber que o critério Tsai-Wu é um caso particular do critério de Gol'Denblat, representado pela equação 2.42, onde os valores de $\alpha = 1$, $\beta = 1$ e $\gamma = -inf$ (NARAYANASWAMI; ADELMAN, 1977). A Equação 2.50 ilustra a formulação do critério.

$$F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1 \quad (2.50)$$

No entanto, deve-se ressaltar que os modelos são distintos, o método de Gol'Denblat pode usar tensores de ordens superiores e isso pode tornar o método difícil de usar, pois é necessário a determinação de mais componentes.

O critério Tsai-Wu parte do princípio que existe uma superfície de falha no espaço das tensões e essa superfície obedece a uma forma escalar. Outras suposições são necessárias para a validade do critério de resistência do método, são elas:

(1) É uma equação escalar e a relação entre as tensões são independentes das propriedades do material.

(2) Como as componentes de resistência são tensores, suas relações de transformação e invariantes associados são bem definidos.

(3) A propriedades de simetria dos tensores de resistência e os números de componentes independentes e diferentes de zero podem ser descritos similarmente a outras propriedades de materiais anisotrópicos.

(4) Ao se conhecer a relações de transformação pode se rotacionar os eixos permitindo o estudo das propriedades de fora dos eixos principais. Outros métodos são limitados no estudo das propriedades fora dos eixos principais, por isso são limitados ao estudo de materiais ortotrópicos.

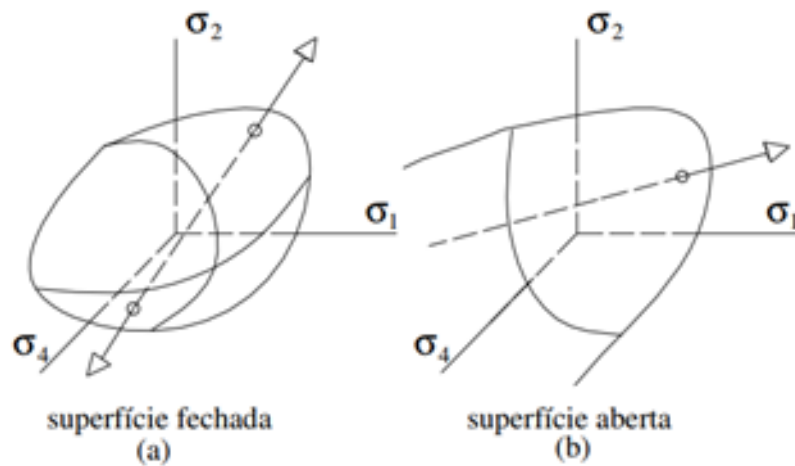
(5) Sendo invariante a equação 2.42 é válida para ser usada todos os sistemas de coordenadas. Tal validade também é conferida para coordenadas curvilíneas com pequenos ajustes.

(6) Certas condições de estabilidade são necessárias para o método apresentar validade. Essas condições são impostas aos tensores de resistência que deve obedecer a Equação 2.51.

$$F_{ii} \cdot F_{jj} - F_{ij}^2 \geq 0 \quad (2.51)$$

em que índices repetidos para i e j não são considerados na inequação. Os valores de i, j variam de 1 a 6. F_{ii} e F_{jj} não pode assumir valores negativos, no entanto o mesmo não é valido para F_{ij} , que pode assumir tantos valores positivos quanto os negativos. Essa inequação garante que o critério de falha irá interceptar todos os eixos das tensões disponíveis e que a superfície de falha será uma elipsóide, pois a superfície de falha pode apresentar duas formas, sendo que a outra superfície, que é um parabolóide aberto, pode levar a campos de tensões inexistentes nos experimentos reais. A elipsoide e parabolóide que podem ser formadas dependendo do valor de F_{12} estão representadas na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Superfície de Falha Fechada e Aberta



Fonte: Nicolas et al. (2006)

(7) O trabalho de Gol'denblat e Kopnov (1965) foi usado como base para definir a equação do critério Tsai-Wu, no entanto foi suposto que a adição de mais termos a equação não melhoraria a generalização do método.

O desenvolvimento completo da Equação 2.50 para $i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ é representado pela Equação 2.52.

$$\begin{aligned}
& F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_3 \cdot \sigma_3 + F_4 \cdot \sigma_4 + F_5 \cdot \sigma_5 + F_6 \cdot \sigma_6 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + \\
& 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 2F_{13} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_3 + 2F_{14} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_4 + 2F_{15} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_5 + 2F_{16} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_6 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + \\
& 2F_{23} \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 + 2F_{24} \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_4 + 2F_{25} \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_5 + 2F_{26} \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_6 + F_{33} \cdot \sigma_3^2 + \\
& 2F_{34} \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_4 + 2F_{35} \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_5 + 2F_{36} \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_6 + F_{44} \cdot \sigma_4^2 + \\
& 2F_{45} \cdot \sigma_4 \cdot \sigma_5 + 2F_{46} \cdot \sigma_4 \cdot \sigma_6 + F_{55} \cdot \sigma_5^2 + \\
& 2F_{56} \cdot \sigma_5 \cdot \sigma_6 + F_{66} \cdot \sigma_6^2 = 1
\end{aligned} \tag{2.52}$$

A Equação 2.52 apresenta dois conjuntos de coeficientes, o conjunto F_i trata das componentes lineares de resistência e modela a ação exclusiva das tensões nos planos i,j e k. O outro conjunto F_{ij} trata das ações conjunta entre as tensões. As matrizes F_i e F_{ij} são representadas pelas Equações 2.53 e 2.54.

$$F_i = \begin{bmatrix} F_1 & F_4 & F_6 \\ F_4 & F_2 & F_5 \\ F_6 & F_5 & F_3 \end{bmatrix} \tag{2.53}$$

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ & & F_{33} & F_{34} & F_{35} & F_{36} \\ & & & F_{44} & F_{45} & F_{46} \\ & sim & & & F_{55} & F_{56} \\ & & & & & F_{66} \end{bmatrix} \tag{2.54}$$

O método de Tsai-Wu (Tsai e Wu (1971)) pode ser dividido em 3 condições (Equações 2.55, 2.56 e 2.57), baseado nas regras para aplicação do método.

$$-\sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} < F_{12} < \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}, \quad \textit{elipse} \tag{2.55}$$

$$F_{12} = \pm \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}, \quad \textit{linhas paralelas} \tag{2.56}$$

$$F_{12} > \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}, \quad \textit{ou} \quad F_{12} < -\sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}, \quad \textit{hipérbole} \tag{2.57}$$

A primeira condição é o desejado para a validade do método, as outras condições levam as tensões a um patamar não condizente com a realidade.

Embora o método estabelece diversas diretrizes, ele não estabelece um valor fixo para os coeficientes de resistência, F_{12} , F_{13} e F_{23} . Em verdade, F_{ij} só tem que estar entre os valores estabelecida pela Equação 2.51. Os outros componentes são facilmente determinados utilizando ensaios simples de compressão, tração e cisalhamento como F_1 a F_6 e F_{11} a F_{66} . Segundo Nicolas et al. (2006) os coeficientes F_{12} , F_{13} e F_{23} , que relacionam tensões distintas, podem ser mensurados através de ensaios bidimensionais ou de ensaios uniaxiais com planos a 45° , onde a direção principal do material está em ângulo em com a vertical.

2.6.1 Determinação dos coeficientes de resistência para o critério Tsai-Wu

Tomando a Equação 2.52 e aplicando-a somente a um caso de tração simples no eixo de direção 1, tem-se a Equação 2.58.

$$F_1 \cdot f_{t1} + F_{11} \cdot f_{t1}^2 = 1 \quad (2.58)$$

Realizando o mesmo procedimento levando-se em consideração esforços de compressão, tem-se a Equação 2.59.

$$-F_1 \cdot f_{c1} + F_{11} \cdot f_{c1}^2 = 1 \quad (2.59)$$

Resolvendo-se o sistema, tem-se as Equações 2.60 e 2.61.

$$F_1 = \frac{1}{f_{t1}} - \frac{1}{f_{c1}} \quad (2.60)$$

$$F_{11} = \frac{1}{f_{t1} \cdot f_{c1}} \quad (2.61)$$

Para os demais eixos, o valor das componentes são obtidas da mesma forma (Equações 2.62 a 2.65).

$$F_2 = \frac{1}{f_{t2}} - \frac{1}{f_{c2}} \quad (2.62)$$

$$F_{22} = \frac{1}{f_{t2} \cdot f_{c2}} \quad (2.63)$$

$$F_3 = \frac{1}{f_{t3}} - \frac{1}{f_{c3}} \quad (2.64)$$

$$F_{33} = \frac{1}{f_{t3} \cdot f_{c3}} \quad (2.65)$$

Para as componentes F_{44} , F_{55} e F_{66} , utiliza-se o cisalhamento puro para determinar as tensões de falha e repete-se o mesmo processo usada nas Equações 2.58 e 2.59 para determiná-las.

Levando-se em consideração o eixo 1 para cisalhamento, tem-se as Equações 2.66 e 2.67.

$$F_{44} \cdot f_{v4p}^2 = 1 \quad (2.66)$$

$$F_{44} \cdot (-f_{v4n})^2 = 1 \quad (2.67)$$

Adotando que ocorra falha para o mesmo módulo da tensão, ou seja, $f_{vp} = f_{vn}$, tem-se a Equação 2.68.

$$F_{44} = \frac{1}{f_{v4}^2} \quad (2.68)$$

E para os demais eixos, tem-se as Equações 2.69 e 2.70.

$$F_{55} = \frac{1}{f_{v5}^2} \quad (2.69)$$

$$F_{66} = \frac{1}{f_{v6}^2} \quad (2.70)$$

Para as componentes F_{ij} , onde $i \neq j$, torna um problema determinar os seus valores, como já dito o método só estabelece somente uma faixa. Assim resta duas opções, a primeira seria determinar via ensaio biaxial, mas o equipamento tem um valor elevado o que pode não ser viável. Pode ainda se utilizado o ensaio uniaxial, no entanto é necessário preparar os corpos de prova onde o sentido primário do material esteja a 45° com a vertical, isso é viável, mas é necessária uma preparação correta do material como em Narayanaswami e Adelman (1977) que

apresentaram uma pequena variação no ângulo, maior que 3%, pode tornar totalmente obscuro a determinação do parâmetro F_{12} .

A segunda opção é utilizar as componentes de resistência F_{ij} , onde $i \neq j$, já desenvolvidas para outros métodos. Nicolas et al. (2006) e Todeschini et al. (2009) utilizaram as componentes de resistência de Cowin (1979) e do critério Tsai-hill e obtiveram bons resultados comparados com os ensaios testados, no entanto para o critério Tsai-hill seria necessário uma equação diferente para cada quadrante no diagrama de tensões.

O valor de F_{12} definido por Cowin (1979) para o método de falha de Tsai-Wu é definido pela Equação 2.71.

$$F_{12} = \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} - \frac{1}{2 \cdot f_{v4}^2} \quad (2.71)$$

Outros autores estabeleceram outro intervalo menor dentro do intervalo pré-estabelecido pela condição 6 do método. Narayanaswami e Adelman (1977) estabeleceu uma condição parecida onde utiliza o valor de $F_{12} = \pm 0.5 \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}$ e até para $F_{12} = 0$, na modelagem de compósitos laminados. Para $F_{12} = 0$ foram obtidos erros abaixo de 10%. A justificativa parte das dimensões assumidas pelos limites externos, que são pequenos, mas podem ainda atrapalhar a estabilidade do método.

Wu e Stachurski (1984) também definiram valores para F_{12} de tal forma que fosse somente dependente de F_{11} e F_{22} para o caso planar e que obedeça a todos os pré-requisitos. Wu e Stachurski (1984) estabeleceu uma relação entre F_{12} e o ângulo de rotação da elipse para o maior valor dos coeficientes de resistência, F_{11} e F_{22} . O valor de F_{12} é dado pela Equação 2.72.

$$F_{12} = -\frac{1}{f_{t1} \cdot f_{c1} + f_{t2} \cdot f_{c2}} \quad (2.72)$$

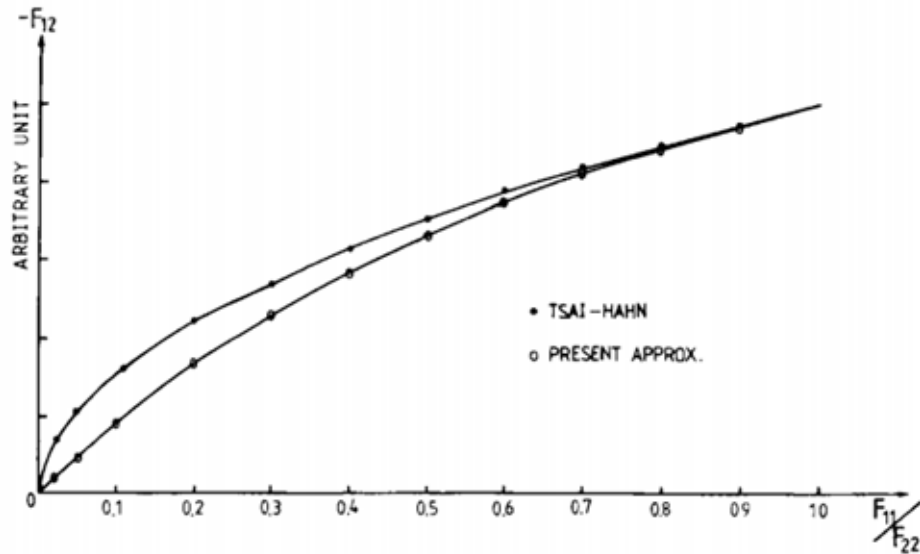
Segundo Wu e Stachurski (1984) os resultados obtidos em Narayanaswami e Adelman (1977) não podem ser aplicados para os materiais anisotrópicos de um maneira generalizada, talvez para casos onde os materiais são altamente anisotrópicos.

Tsai e Hahn (1981) também propôs valores para F_{12} , em que F_{12} assume o valor segundo a Equação 2.73.

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (2.73)$$

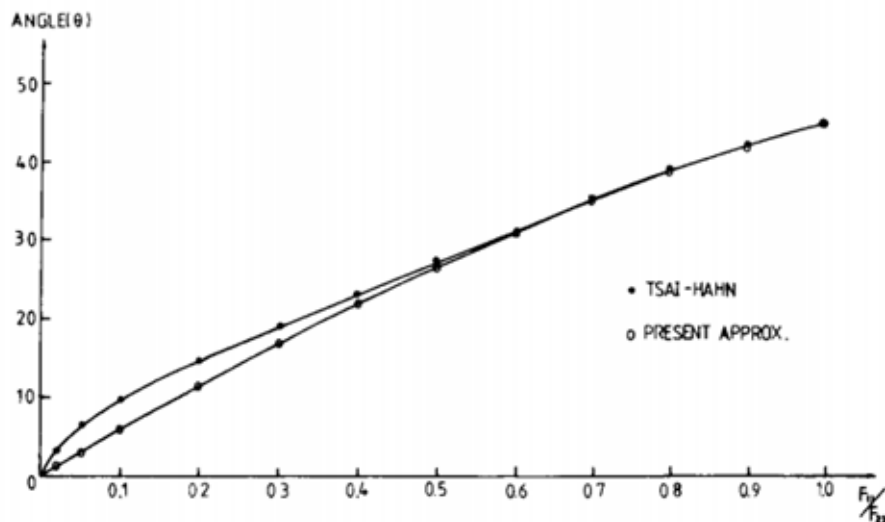
Wu e Stachurski (1984) estabeleceu um comparativo com a formulação de Tsai e Hahn (1981). A Figura 2.10 apresenta o comparativo relacionado a razão entre F_{11} e F_{22} e os vários graus de anisotropia e a Figura 2.11 apresenta a relação entre o ângulo de rotação da elipse em vários graus de anisotropia e a razão de F_{11} e F_{22} .

Figura 2.10 – Variação de F_{12} em vários graus de anisotropia



Fonte: Wu e Stachurski (1984)

Figura 2.11 – Relação de F_{12} entre os ângulos de rotação e em vários graus de anisotropia



Fonte: Wu e Stachurski (1984)

A conclusão de Wu e Stachurski (1984) sobre o valor dos coeficientes é que ambos os modelos de F_{12} são adequados para ser utilizados no critério de falha de Tsai-Wu, no entanto o coeficiente de Tsai e Hahn (1981) apresenta melhores resultados para materiais que apresenta

um maior grau de anisotropia, enquanto o coeficiente desenvolvido por ele apresenta melhores resultados para materiais que tem um menor grau de anisotropia.

2.7 Inferência Estatística

A inferência estatística é a parte da estatística convencional que é responsável por obter resultados de uma determinada população baseando-se no estudo de uma amostra dessa mesma população, no qual a amostra contém um menor número de indivíduos. Assim, o uso dessa ferramenta é necessário, pois dependendo do tamanho da população torna-se impraticável utilizar-la. Caso uma população fosse muito grande, a necessidade de conhecer e coletar informações de todos indivíduos torna todo trabalho árduo e em alguns casos impossível (ZHAO; BALL; HAZELTON, 2018).

A estatística amostral torna-se então importante para estimar os parâmetros da população de uma maneira mais viável e sobre uma margem de erro segura. Mas antes, é necessário conhecer que tipo de distribuição probabilística que a variável de estudo apresenta. Na estatística há dois ramos que separa o tipo de operação a qual os dados serão submetidos, que são: a estatística paramétrica e a estatística não-paramétrica.

A estatística paramétrica é um ramo da estatística onde os dados apresentam uma distribuição normal e seguem o teorema do limite central. A maioria dos testes estatísticos mais comuns são de ordem paramétrica e exigem que os dados tenham uma distribuição normal (TING; MIAO, 2018).

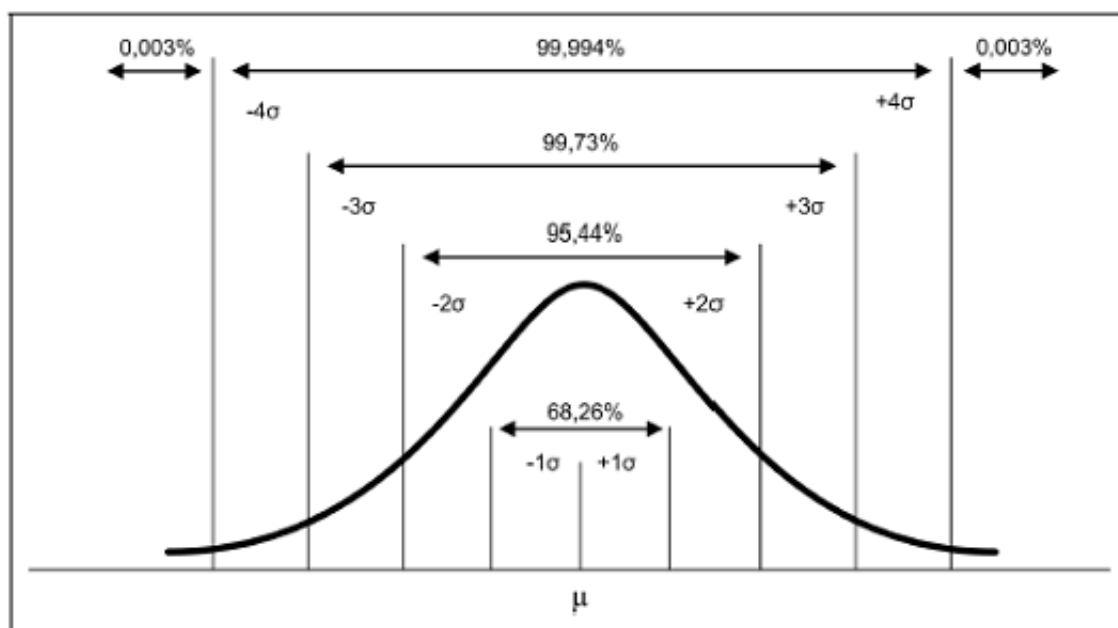
As distribuições normais são muito usadas na matemática, biologia e física para modelar eventos probabilísticos presentes na natureza. A curva tem forma de um sino simétrico entorno da média e a suas extremidades possuem uma curvatura suave. Uma das características principais dessa curva é que a média, a mediana e a moda são iguais e a área total sob a curva é igual a 1. Um exemplo de distribuição normal é representado na Figura 2.12.

Outro ponto que ainda tem que ser levantado em questão é o teorema do limite central, que é o teorema alicerce para a estatística inferencial, e estabelece uma correlação entre a distribuição normal e o tamanho da amostras, sendo possível usar estatísticas amostrais para inferir sobre parâmetros de um população (ZHANG; ZHANG, 2017).

O Teorema do limite Central apresenta duas diretrizes:

1. Se as amostras apresentarem um tamanho $n > 30$ de indivíduos e serem retiradas a caso de uma população e a média apresentar um valor m e o desvio padrão um valor de s , então

Figura 2.12 – Exemplo de uma distribuição normal



Fonte: Action (2020)

a distribuição amostral das médias se aproximam de uma distribuição normal. Quanto maior for o tamanho da amostra mais precisa é a aproximação.

2. Se a população em estudo for normalmente distribuída, então a distribuição amostral é normalmente distribuída para qualquer tamanho da amostra.

No entanto, podem haver situações onde não são conhecidos os tipos de distribuições da população e também a amostra apresenta um número $n < 30$ de indivíduos. Nesses casos é necessário recorrer a testes para classificar se uma determinada amostra apresenta uma distribuição padrão ou não. Há diversos teste para analisar como os dados são distribuídos. Os mais comuns são: Anderson-Darling, Shapiro-wilk e Kolmogorov-Smoirnov.

Todos os testes de normalidade baseiam-se em testes de hipóteses para validar se os dados são normais. Cada teste tem sua peculiaridade. O teste de Anderson-Darling é bastante robusto e é especialmente eficaz na detecção de desvio da normalidade nos valores superiores e inferiores de uma distribuição. O teste de Shapiro-Wilk também é um teste muito robusto e é baseado na correlação entre os dados da amostra e os dados que se esperaria de uma distribuição normal. O teste de Kolmogorov-Smoirnov é o menos robusto se comparado aos outros dois últimos, no entanto é um teste largamente utilizado (MINITAB LLC., 2018).

Caso a distribuição dos dados não siga nenhuma das condições citadas acima trata se então de um estudo não-paramétrico.

A estatística não-paramétrica é um conjunto de procedimentos no qual a distribuição dos dados seguem uma distribuição independente ou livre. Em uma análise não-paramétrica há pouca ou nenhuma exigência sobre a população e os dados amostrais. Os testes não paramétricos se baseiam na aleatoriedade dos dados e na organização dos dados de forma ordenada, ou seja, os dados são colocados em ordem de forma ranqueada, para se analisar os sinais e as medias entre dados adjacentes.

A analogia entre os testes paramétricos e não-paramétricos é detalhada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar

Paramétrico	Não-Paramétrico
Coefficiente de Pearson para Correlação	Coefficiente de Spearman para Correlação
Teste-t 1 Amostra	Teste de Wilcoxon 1 Amostra
Teste-t Pareado	Teste de Wilcoxon Pareado
Teste-t 2 Amostras	Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney
ANOVA	Teste de Kruskal-Wallis
ANOVA Experimento fatorial em blocos	Teste de Friedman

Fonte: Action (2020)

3 MATERIAL E MÉTODOS

Um fluxograma contendo todas atividades executadas para a consecução dos objetivos deste trabalho está apresentado na figura 3.1 .

Figura 3.1 – Fluxograma da etapas executadas no trabalho



Fase 1 : Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da cana-de-açúcar;

Fase 2: Reprodução do trabalho de Xie et al. (2018) para reconstrução do ambiente de simulação

Fase 3: Realização de um estudo de caso utilizando a modelagem proposta da cana-de-açúcar e o ambiente de simulação obtido na reprodução

Fase 4: Simular o corte basal do colmo da cana-de-açúcar usando a modelagem proposta da cana-de-açúcar

Fonte: Autor

3.1 Propriedades Físicas da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar utilizada para a realização desse estudo foi obtida na propriedade da empresa Cachaça Bocaina localizada na região da cidade de Lavras nas coordenadas $21^{\circ}16'01.7''S$ $45^{\circ}00'11.0''W$ (Figura 3.23). A variedade usada nos testes foi a RB966928, pois é a espécie mais utilizada na região Centro-Sul do Brasil (NOVACANA, 2020).

Figura 3.2 – Fazenda Bocaina - Região de colheita



Fonte: Autor

Na Figura 3.23 é possível visualizar a região de colheita demarcada. A retirada das amostras se deram nos dias 11 de outubro de 2018, 25 de outubro de 2018 e 9 de novembro de 2018. O total de amostras retiradas foram 35 unidades, no entanto somente 21 unidades foram utilizadas, pois embora as amostras estivessem aptas para a colheita, a presença de brocas, fungos e outras deformidades impossibilitaram o seu uso (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Broca presente na cana-de-açúcar em um das amostras colhidas



Fonte: Autor

Foram realizados ainda estudos laboratoriais para determinar as propriedades físicas da cana-de-açúcar como densidade, porcentagem de matéria seca, FDN (fibra detergente neutra), FDA (fibra detergente ácida), Lignina e Grau Brix das amostras. As análises para matéria seca, FDN, FDA, Lignina foram realizadas pela empresa 3Rlab, localizada na cidade de Lavras na coordenada 21°14'36.2"S 45°01'04.6"W. Nessas análises foram separadas 3 amostras escolhidas ao acaso para a caracterização do material.

As outras análises foram realizadas no Departamento de Engenharia de alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram analisadas 21 amostras no total. Como o número de amostras foi inferior a 30 e não era conhecida a distribuição populacional da área analisada, segundo o teorema do limite central nada pode ser afirmado sobre a distribuição amostral. Assim, para determinar qual o tipo de distribuição dos dados, foram usados testes de normalidade para avaliar a distribuição amostral do conjunto de dados extraídos do experimento. Foram usados os testes de Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade dos dados. O software adotado para a realização dos testes de normalidade foi o Minitab®.

Para a determinação do grau Brix foi usado um refratômetro digital da marca Atago® modelo pal-1. Após cada medição o leitor ótico era higienizado com álcool etílico 96% para que a amostra medida não interferisse nas próximas medições. Foi considerado um nível de confiança de 95% em todas as análises. Para a análise de grau Brix foi considerado 19 amostras das 21 existentes, pois 2 amostras apresentaram valores discrepantes caracterizando um erro de execução nas análises.

3.2 Corpos de Prova

Para modelar e simular o corte mecanizado da cana-de-açúcar é necessário conhecer primeiramente as propriedades mecânicas da planta, como Módulo de Young, Coeficiente de Poisson, Tensão de escoamento, Tensão última de tração e compressão. Alguns trabalhos como o de Huang et al. (2011b) e Yang et al. (2011) coletaram essas propriedades para variedades específicas de cana-de-açúcar.

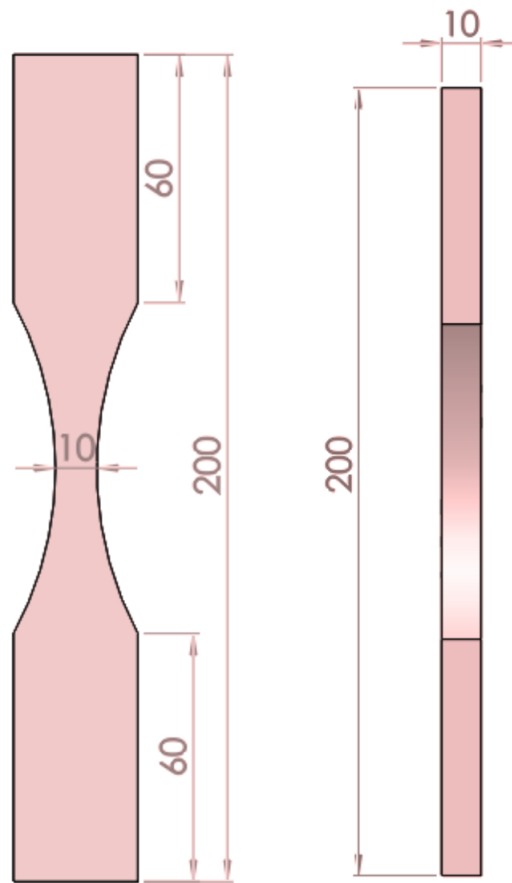
Para obter as propriedades mecânicas de qualquer material é necessário a preparação de corpos de prova para realização de ensaios. Para alguns materiais há normas específicas para as dimensões do corpo de prova e para a execução de todo o processo de ensaio. Entretanto, para alguns materiais biológicos, como a cana-de-açúcar não existe uma norma específica para a definição dos corpos de prova.

Neste trabalho, foi utilizado diversas normas como base para se definir formatos e medidas próprias dos corpos de prova. As normas mais usadas foram as normas voltadas para o ensaio da madeira e para materiais compósitos, pois são materiais que apresentam similaridades com a planta e também são anisotrópicos (RAMLEE et al., 2019; KUMAR et al., 2017). As normas utilizadas neste trabalho foram:

- ASTM D143 - Standard Test Methods For Small Clear Specimens of Timber (ASTM INTERNATIONAL, 2009);
- ASTM D3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM INTERNATIONAL, 2017a);
- ASTM D5379 - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method (ASTM INTERNATIONAL, 2017b);
- ISO 22157 - Bamboo structures-Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2019);

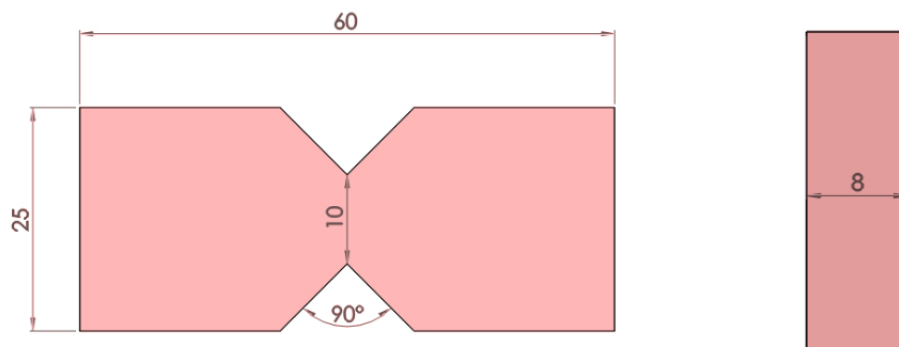
Outro problema encontrado foi as dimensões dos corpos de prova, pois o corpo da cana-de-açúcar apresenta um tamanho reduzido, devido as dimensões da planta, assim, foi estabelecido medidas apropriadas para os corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova usadas para a realização dos ensaios são apresentadas nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

Figura 3.4 – Corpo de Prova para ensaio de tração no sentido da fibra



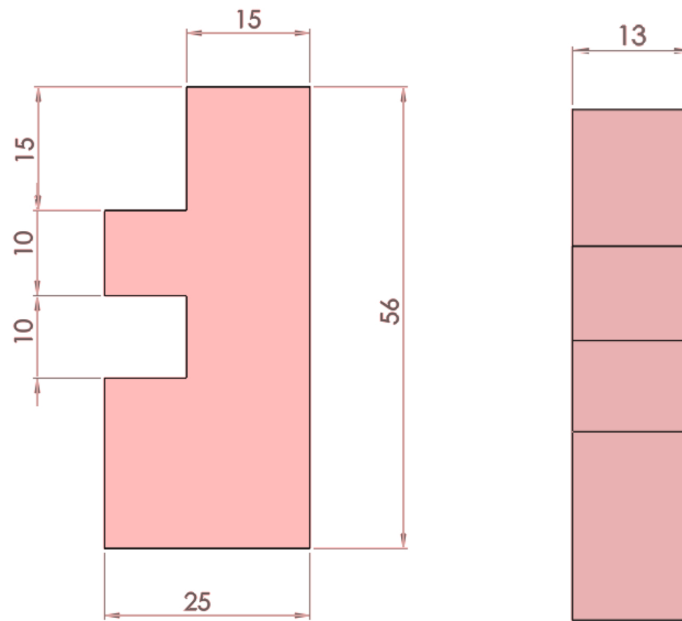
Fonte: Autor

Figura 3.5 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento transversal a fibra



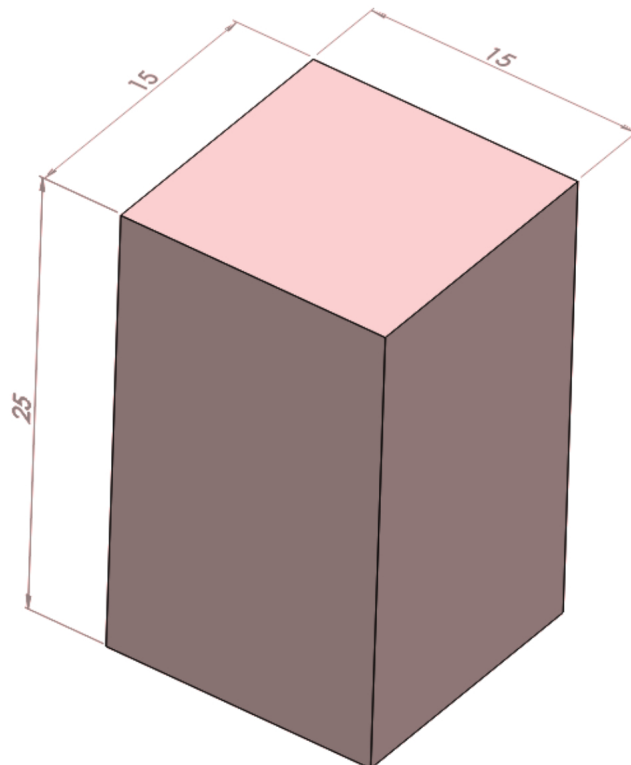
Fonte: Autor

Figura 3.6 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento no sentido da fibra



Fonte: Autor

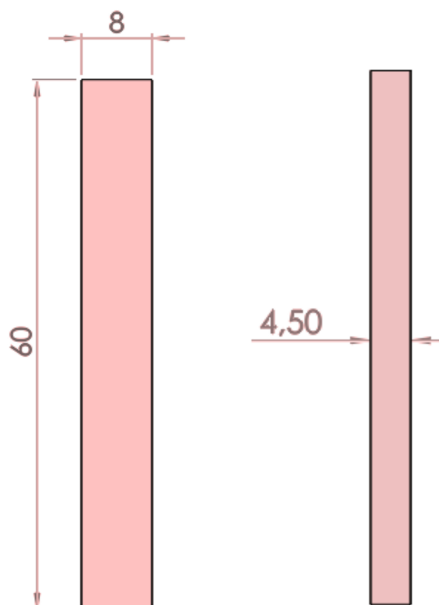
Figura 3.7 – Corpo de Prova para ensaio de compressão no sentido da fibra e transversal a fibra



Fonte: Autor

No decorrer da realização dos ensaios foi notado que as propriedades mecânicas da casca e da polpa da cana-de-açúcar apresentaram valores distintas, onde a casca por conter maior quantidade de lignina e ter uma espessura considerável influenciava nas análises. Assim foi definido um corpo de prova para a casca da cana-de-açúcar.

Figura 3.8 – Corpo de Prova para o ensaio de tração da casca da cana-de-açúcar



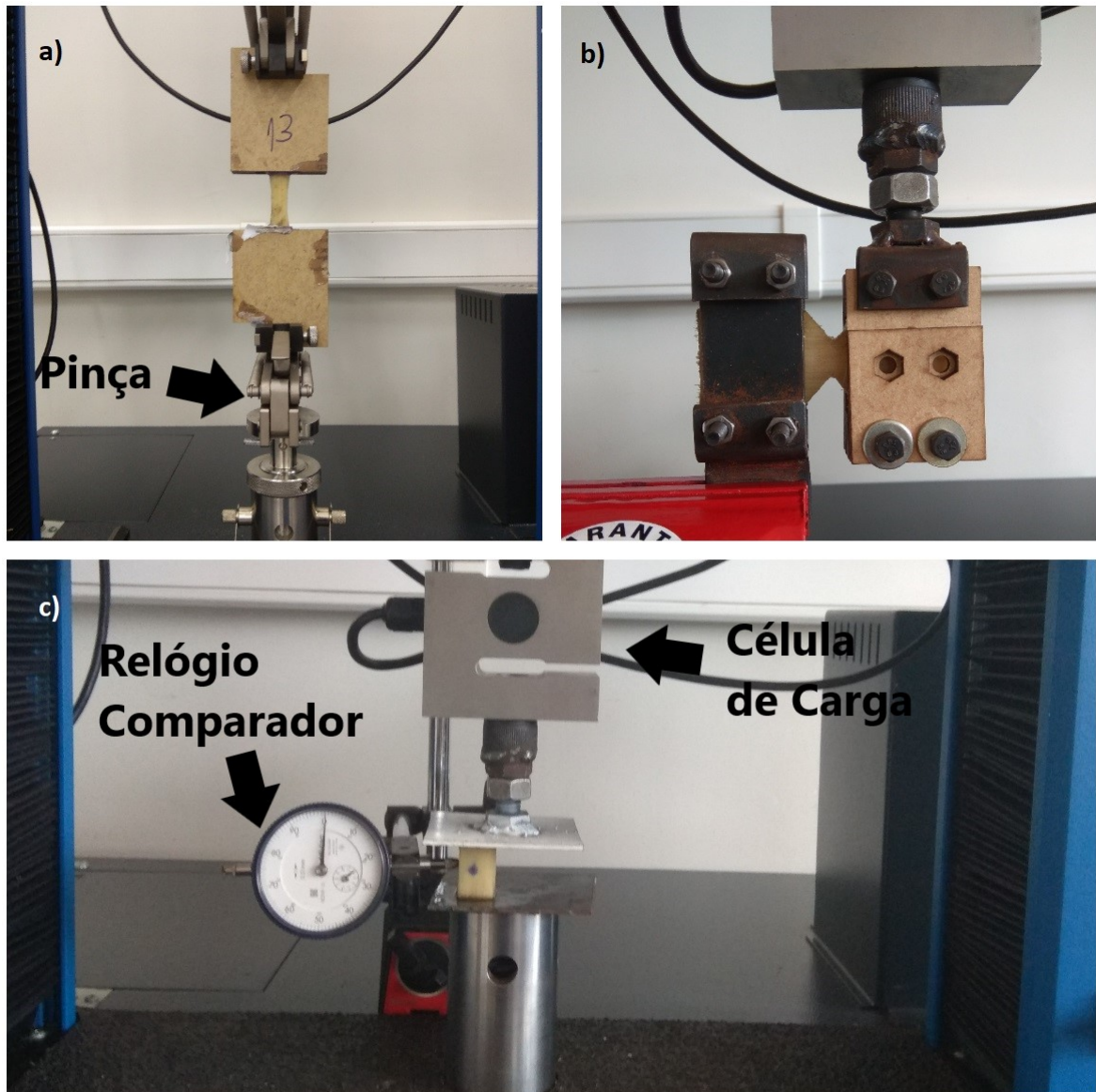
Fonte: Autor

Como a cana-de-açúcar trata-se de um material biológico em alguns casos pode ser difícil alcançar as dimensões exatas estipuladas para os corpos de prova, no entanto as dimensões ficaram em faixas seguras para que o corpo de prova não ficasse descaracterizado.

3.3 Propriedades Mecânicas da Cana-de-Açúcar

Foi usada uma máquina de ensaio universal INSTRON[®] EMIC 23-20, com uma célula de carga de 20 kN (Figura 3.9) para o ensaio dos corpos de prova da cana-de-açúcar. A máquina está localizada no Departamento ABI - Engenharias da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A velocidade de ensaio usada foi de 0,3 mm/min, cuja a escolha se deu através da análise dos ensaios padronizados pela norma ASTM D143 para a realização em ensaios em madeira.

Figura 3.9 – Ensaio realizado na Máquina de Universal: a) Ensaio de tração ; b) Ensaio de cisalhamento perpendicular a fibra ; c) Ensaio de Compressão



Fonte: Autor

Como a cana-de-açúcar é um material anisotrópico com uma simetria em um de seus planos, foram realizadas ensaios somente em 2 dos seus eixos. Os eixos presentes em um colmo da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 3.10. Como as propriedades radiais da cana são as mesmas, logo é necessário realizar ensaios somente em um dos eixos radiais, neste caso, x ou y.

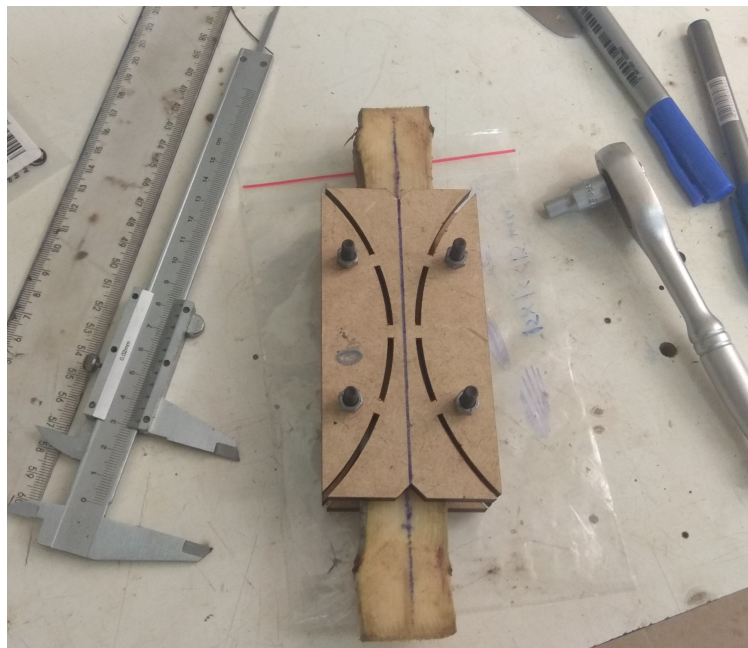
Figura 3.10 – Eixos considerados no estudo das propriedades da cana-de-açúcar



Fonte: Autor

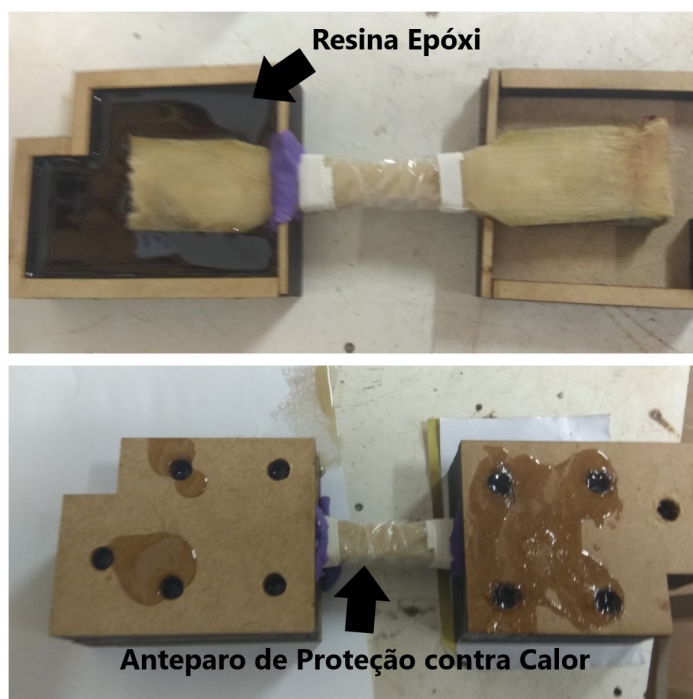
Para a constituição dos corpos de prova foram usados gabaritos de madeira e paquímetro, para comparação e ajuste dos corpos de prova (Figura 3.11). Em alguns corpos de provas foi necessário utilizar resina epóxi para dar maior sustentação nos ensaios, que foi o caso para o ensaio de tração no sentido longitudinal da fibra (Figura 3.12).

Figura 3.11 – Gabarito utilizado para controle das dimensões dos corpos de prova



Fonte: Autor

Figura 3.12 – Uso da resina epóxi para melhorar sustentação nos ensaios



Fonte: Autor

Para preservar as propriedades físicas e mecânicas do material, os corpos de prova eram mantidos refrigerados entre entre 5°C a 10 °C em um refrigerador Venax NGV10. No transporte dos corpos de prova era utilizada uma sacola térmica e bolsas térmicas em gel para o controle de temperatura também na faixa de 5°C e 10 °C.

Para determinar o coeficiente de poisson foi utilizado um relógio comparador, da marca Mitutoyo® e modelo Série analógica 1, para medir no ensaio de compressão o deslocamento horizontal, quando o corpo de prova era submetido a um deslocamento vertical, conforme Figura 3.9(c). O número total de ensaios realizados para obter as propriedades mecânicas da cana-de-açúcar foram de 114 ensaios.

Foram consideradas 19 amostras para a realização dos testes de normalidade e todas as amostras foram selecionadas aleatoriamente. Nas análises foi considerado um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Para a determinação das propriedades mecânicas da polpa da cana-de-açúcar foram realizados os ensaios de tração no sentido da fibra, cisalhamento no sentido da fibra, cisalhamento no sentido transversal a fibra, compressão no sentido da fibra e compressão no sentido transversal a fibra. Não foi possível a realização dos ensaios de tração no sentido transversal a fibra, pois como as dimensões da cana-de-açúcar no sentido transversal eram pequenas, com os equi-

pamentos disponíveis não foram capazes de confeccionar e ensaiar os corpos de prova. As propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio da polpa da cana-de-açúcar

Teste	Propriedade Mecânica
Tração no sentido da fibra	- Módulo de Young - Resistência Mecânica a Tração
Cisalhamento no sentido da fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano zy -Resistência ao Cisalhamento no plano zy
Cisalhamento transversal a fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano xy -Resistência ao Cisalhamento no plano xy
Compressão no sentido da fibra	-Resistência Mecânica a compressão -Coeficiente de Poisson zy
Compressão transversal a fibra	-Resistência Mecânica a compressão -Coeficiente de Poisson xy

A resistência mecânica a tração transversal a fibra para a polpa da cana-de-açúcar foi extraída dos trabalhos de Huang et al. (2011b) e Yang et al. (2011).

Na determinação das propriedades mecânicas da casca da cana-de-açúcar foram realizados somente os ensaios de tração no sentido da fibra e o cisalhamento transversal a fibra. Também a realização dos outros ensaios não foi possível, devido ao tamanho reduzido da casca da cana-de-açúcar e dos equipamentos disponíveis, não sendo possível a confecção e ensaio dos corpos de prova. Na tabela 3.2 são apresentado as propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio realizado da casca da cana-de-açúcar.

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio da casca da cana-de-açúcar

Teste	Propriedade Mecânica
Tração no sentido da fibra	- Módulo de Young
Cisalhamento transversal a fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano xy -Resistência ao Cisalhamento no plano xy

As demais propriedades faltantes para a modelagem da casca da cana-de-açúcar foram extraídas dos trabalhos de Huang et al. (2011b) e Yang et al. (2011).

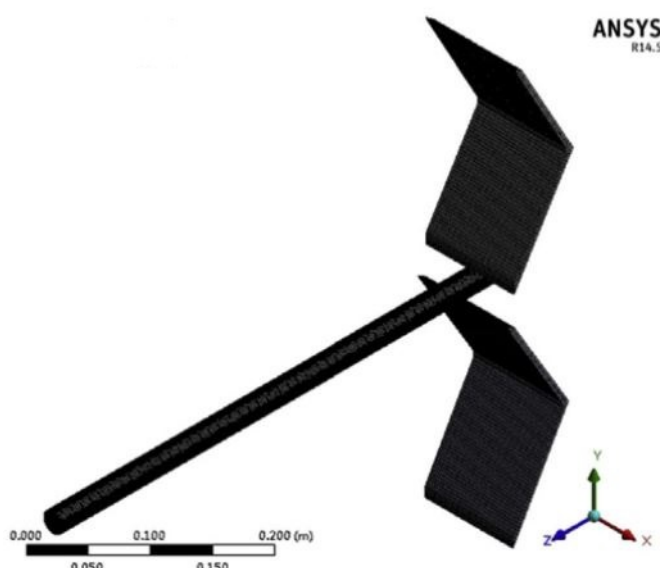
Os testes de normalidade foram aplicados aos dados coletados nos ensaios. Em todos os testes, os dados apresentaram uma distribuição normal.

3.4 Reprodução dos dados de literatura

Como não foi possível a realização do experimento prático do corte basal da cana-de-açúcar, foi estudado um caso similar na literatura para reprodução, com o objetivo de reconstruir o seu ambiente de simulação. O motivo para reconstrução do ambiente de simulação é obter uma ambiente de testes confiável para a realização de um estudo de caso, onde será estudado as respostas para a modelagem da cana-de-açúcar proposto por esse trabalho e logo após, simular o corte basal da cana-de-açúcar. O estudo base usado na reprodução foi o modelo de Xie et al. (2018). O trabalho de Xie et al. (2018) detalha um processo realizado dentro da colhedora da cana-de-açúcar responsável por dividir a planta em pequenas partes para ser transportado pelos tratores de apoio. Essas pequenas partes são chamadas de toletes ou rebolos e facilitam o transporte, armazenamento e o beneficiamento do produto para a produção do etanol e açúcar.

Xie et al. (2018) simplificou todo o modelo de corte da máquina para simulá-lo. O picador, comumente, tem 3 ou 4 lâminas, no entanto para reduzir o custo de processamento Xie et al. (2018) foi somente representado 2 lâminas no modelo. O modelo resultante é apresentado na figura 3.13

Figura 3.13 – Modelo simplificado do picador



Fonte: Xie et al. (2018)

O modelo analisado por Xie et al. (2018) considerou a cana-de-açúcar constituída por material anisotrópico e fibroso não-linear, no entanto não foi definido uma diferença entre a polpa e casca do fruto. Na modelagem de Xie et al. (2018) foi considerado o aço da lâmina

como um material isotrópico e atuante somente seu regime elástico, pois a resistência mecânica do aço é muito maior do que o da planta, não havendo deformação plástica da lâmina ao cortar a cana-de-açúcar, e na simulação foi considerada uma análise explícita e para a constituição da malha foi usado um elemento hexaédrico tridimensional de 20 nós, de código SOLID 164, segundo a biblioteca do Ansys workbench®. As propriedades mecânicas e o número de nós e elementos usados nas simulações estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas da cana-de-açúcar no estudo de Xie et al. (2018)

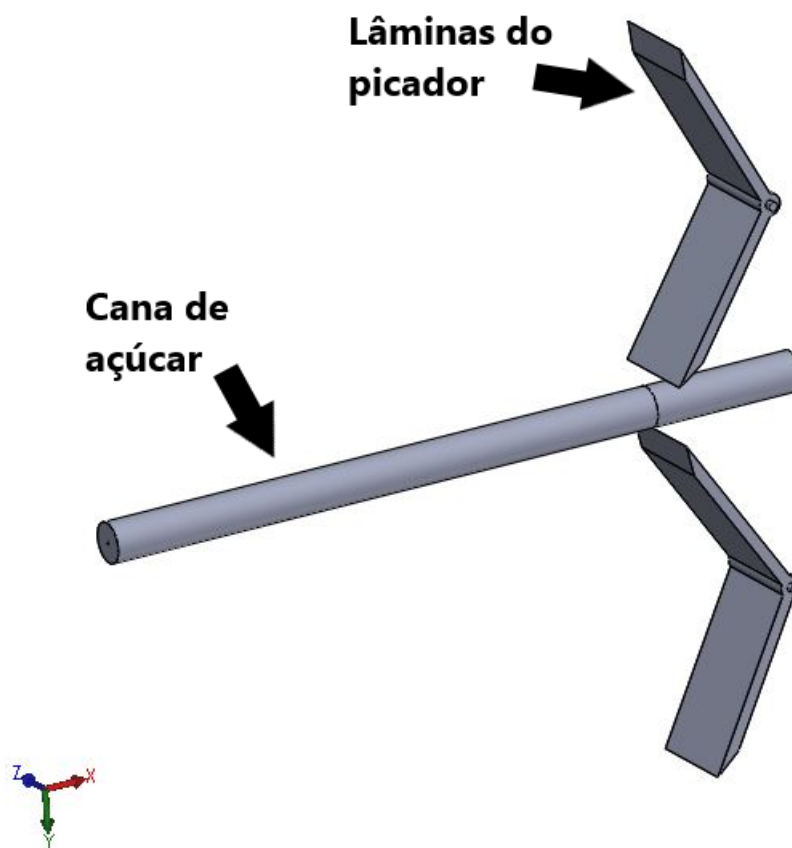
	Cana-de-Açúcar	Lâminas
Número de nós	82012	6510
Número de Elementos	63400	3300
Densidade (kg m-3)	1136	7850
Módulo de Young E (MPa)	X 50	200000
	Y 50	
	Z 250	
Coefficiente de Poisson	X 0,42	0,3
	Y 0,35	
	Z 0,35	
Módulo de Cisalhamento G (MPa)	X 17,6	
	Y 92,8	
	Z 92,8	

Fonte: (XIE et al., 2018)

A velocidade de rotação dos picadores considerado no estudo foi de 250 rpm. Foi também estabelecido um coeficiente de atrito no contanto das laminas com a cana-de-açúcar, onde o coeficiente de atrito estático definido foi de 0,60 e o dinâmico foi de 0,52.

Para a modelagem em CAD foi utilizando o software SolidWorks®, conforme Figura 3.14. Foi usado o software Ansys Workbench® para a reprodução da simulação de Xie et al. (2018) com as mesmas condições de contorno descritas em seu trabalho.

Figura 3.14 – Modelo em CAD no SolidWorks

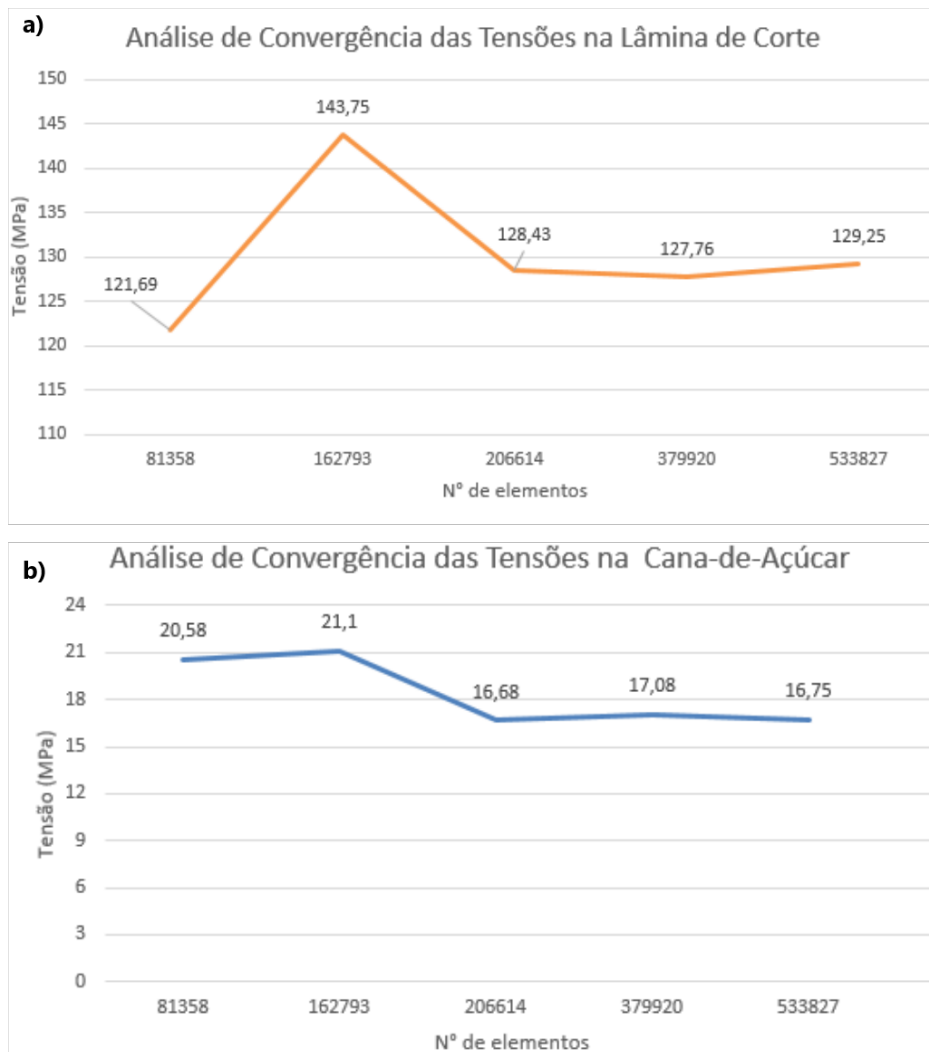


Fonte: Autor

Para avaliar se a reprodução está sob as mesmas condições estabelecidos no trabalho de Xie et al. (2018) foi analisado os valores das maiores tensões alcançadas e a sua localização. Caso o erro entre a reprodução e o trabalho sejam pequenos pode se inferir que a reprodução apresenta um ambiente de simulação similar ao encontrado em Xie et al. (2018).

Foi realizado ainda um estudo de convergência da reprodução do estudo para garantir a confiabilidade dos resultados. Na figura 3.15 é apresentado o estudo de convergência da reprodução do estudo de Xie et al. (2018) para a lâmina de corte e no colmo da cana-de-açúcar.

Figura 3.15 – Convergência de malha para a reprodução: a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar



Fonte: Autor

Assim, para análise e comparação entre reprodução e o trabalho de Xie et al. (2018) para a obtenção do ambiente de simulação (fase 2) foi considerado a malha com 206614 elementos, pois foi a malha que deu início ao processo de convergência do modelo.

3.5 Estudo de Caso

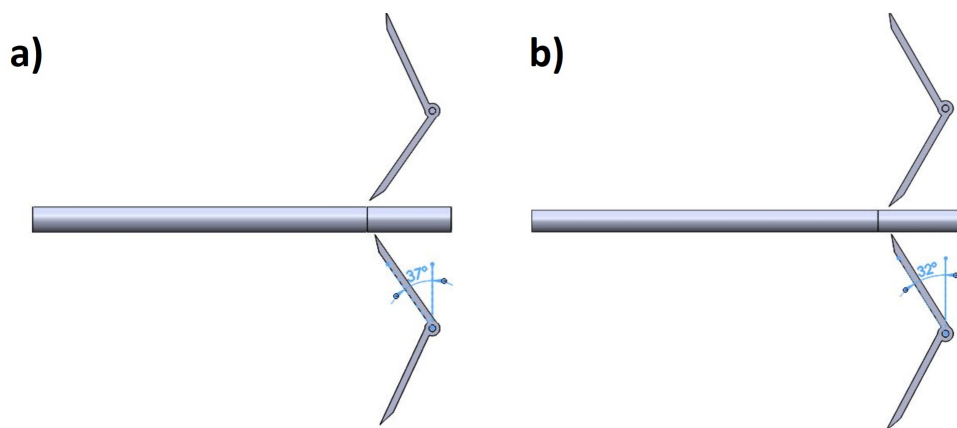
Uma vez realizada a reprodução e for obtido um ambiente de simulação similar ao trabalho de Xie et al. (2018), o próximo passo para estudar o corte basal da cana-de-açúcar consiste na realização de um estudo caso, onde nesse estudo o modelo de cana-de-açúcar proposto por este trabalho será submetido ao ambiente de simulação encontrado pela reprodução. Assim, será possível avaliar e comparar a resposta do modelo proposto da cana-de-açúcar com o mo-

delo de Xie et al. (2018) encontrado na literatura. Os parâmetros analisados nos modelos são a tensão na lamina de corte e no colmo da cana-de-açúcar.

No entanto, no início do estudo de caso observou-se uma diferença nas dimensões das canas-de-açúcar utilizadas em ambos os modelos. No modelo estudado por Xie et al. (2018), a cana-de-açúcar apresentava diâmetro de 25 mm e a cana-de-açúcar estudada no presente trabalho apresenta um diâmetro de 30 mm. Para contornar esse problema foi adotado uma redução escalonada do modelo da cana de 30 mm, onde a casca e a polpa da cana-de-açúcar foram reduzidas em proporção de tal forma que seu diâmetro externo coincidissem com o do modelo de Xie et al. (2018).

Esse procedimento foi adotado para que o corte do modelo proposto da cana-de-açúcar ocorresse na mesma angulação do modelo de Xie et al. (2018). A diferença entre a angulação de corte, caso não fosse adotado o procedimento de redução escalonada, é apresentada Figura 3.16(a) e (b). Essa diferença poderia causar um aumento das tensões de corte, onde quanto maior a angulação, maior é o braço de momento atuando nas lâminas do picador. Assim, para evitar essa interferência geométrica, foi adotada essa redução do modelo para a cana-de-açúcar de 30 mm.

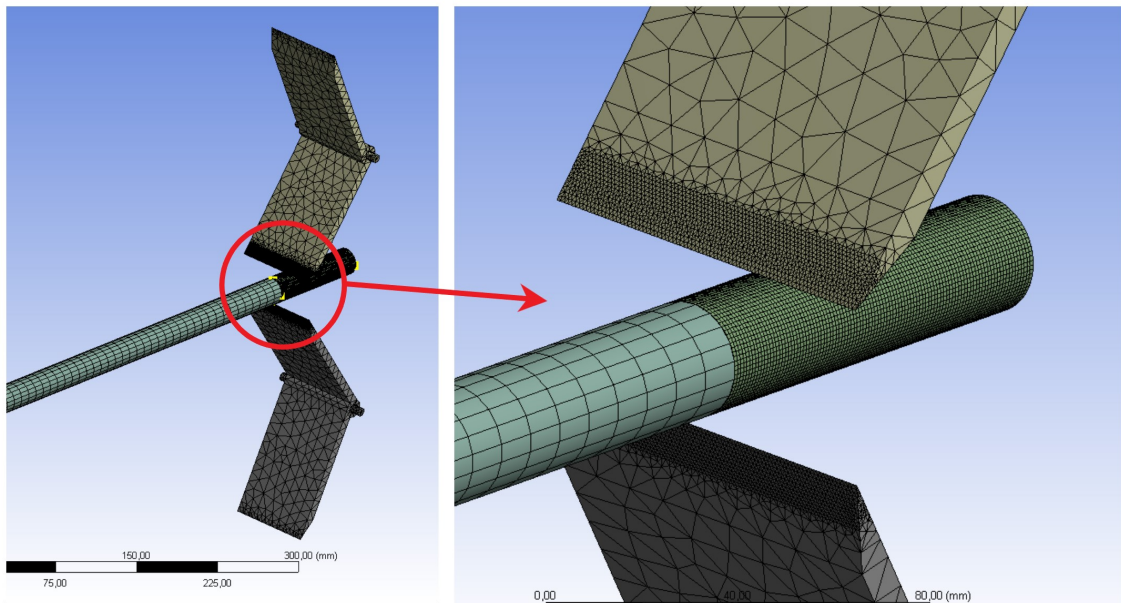
Figura 3.16 – Comparação entre o modelo com cana de 30 mm (a) e 25 mm (b)



Fonte: Autor

Em relação a malha, as áreas próximas do gume de corte e uma porção da planta da cana-de-açúcar foram as que tiveram um maior refinamento, pois são as áreas mais solicitadas no processo de corte no picador, não sendo necessário refinar toda a lâmina e nem todo corpo da planta. (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Refinamento localizado de malha usado no modelo

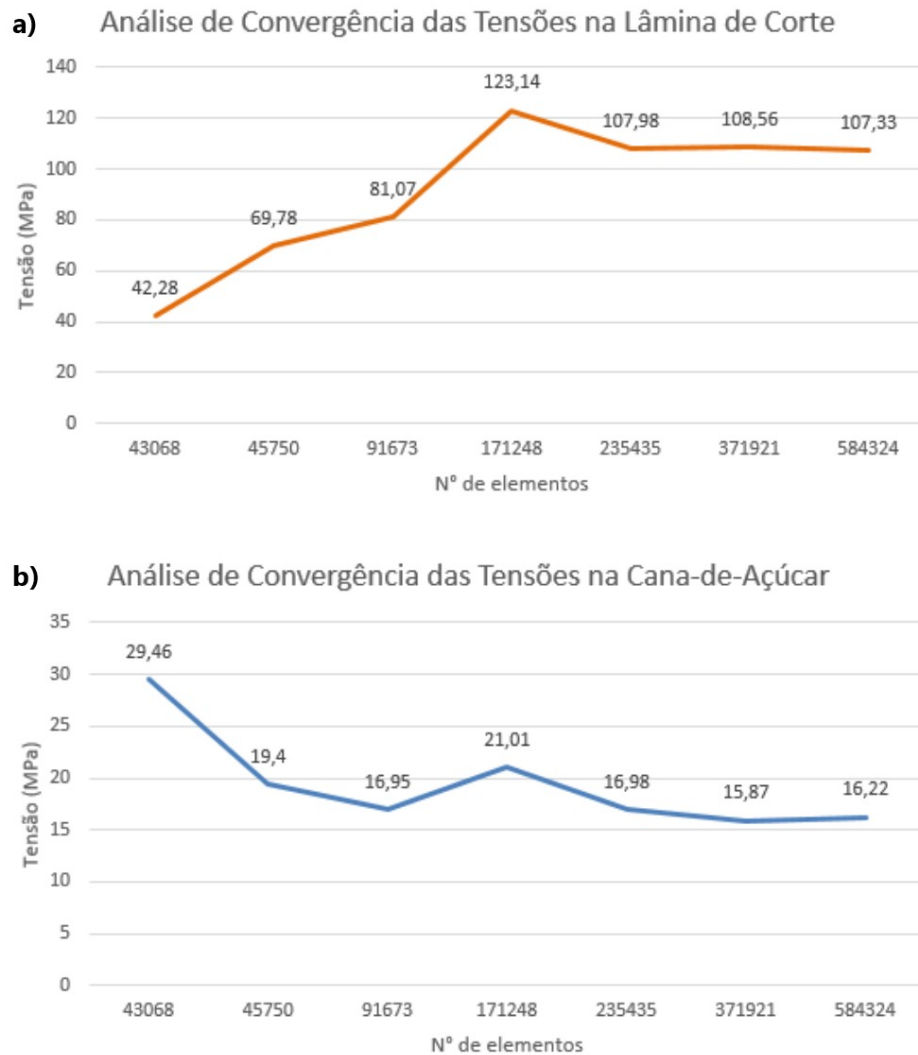


Fonte: Autor

Também foi realizado uma análise de convergência no estudo de caso para garantir a confiabilidade dos resultados.

Os resultados do estudo de convergência da malha para o estudo de caso na lâmina de corte e no colmo da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Convergência de malha para o estudo de caso: a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar



;

Assim, para analisar os resultados do estudo de caso (fase 3) foi considerado no estudo a malha com 235435 elementos, pois foi a malha que se iniciou o processo de convergência do modelo.

3.6 Simulação do corte basal dos colmos da cana-de-açúcar

Uma vez realizadas as duas etapas anteriores torna-se possível a modelagem e a simulação do corte basal da cana-de-açúcar, pois a modelagem proposta da cana-de-açúcar gerou respostas similares ao que foi apresentado por Xie et al. (2018).

O corte da cana-de-açúcar ocorre pela rotação do disco de corte presente na linha de processamento da máquina colhedora. Como o objetivo deste trabalho não foi analisar os campos de tensão no disco de corte e sim as tensões de corte geradas no colmo da cana-de-açúcar no corte basal, o disco de corte foi então desconsiderado na análise. Essa primeira simplificação foi adotada no sentido de reduzir o tempo de máquina necessário para resolver a simulação. Desconsiderando o disco de corte, o tempo de processamento foi reduzido em 73,45%.

A representação completa da lâmina de corte também não se faz necessária, uma vez que parte da lâmina é fixada por meio de uma junta aparafusada. Assim, para a análise de corte, foi considerada apenas uma região da lâmina.

Para a construção das geometrias e para a realização das simulações foi utilizado um computador com processador Intel Core i7-7700, memória RAM de 16GB e placa de vídeo GeForce GTX1050Ti com uma memória GDDR5 de 4 GB, situado no laboratório de processamento de Dados II, da Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Automação da Universidade Federal de Lavras - UFLA.

Para a construção do modelo geométrico foi utilizado o software comercial SolidWorks, e para as simulações numéricas foi utilizado o software Ansys Workbench®. A análise utilizada foi uma análise explícita, pois houve deformação excessiva da malha do modelo.

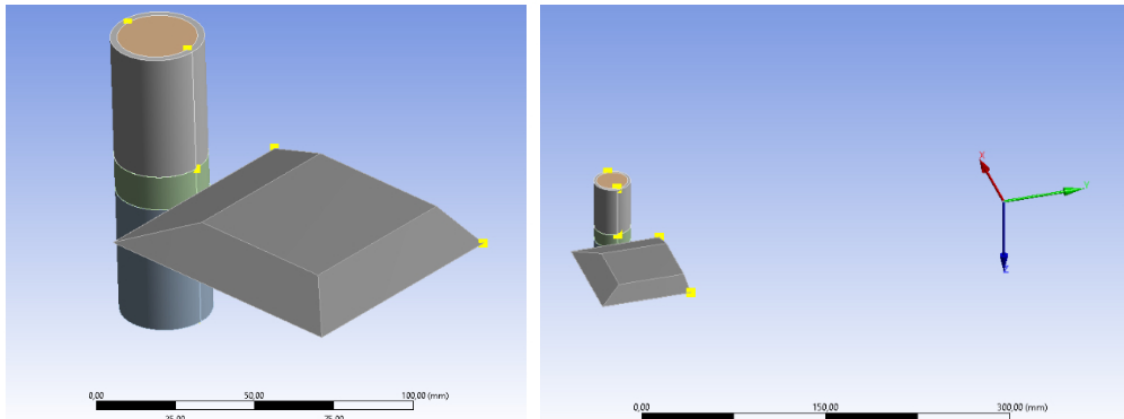
Para a modelagem do corte basal, foi necessário primeiramente determinar as dimensões dos elementos e os parâmetros que envolvem o corte, tal como a velocidade de rotação dos discos de corte, a distância que a lâmina se encontra para fora do disco e o tipo de material usado na lâmina.

A máquina usada como base para retirar essas informações foi a colhedora de cana-de-açúcar da empresa Case, modelo A8800. As informações foram retiradas do manual de manutenção disponibilizado pela empresa.

O diâmetro do disco de corte utilizado pela máquina foi de 565 mm e a rotação de operação de 640 rpm. Todo o conjunto é movido por um motor hidráulico M51 (CNH INDUSTRIAL, 2018).

O material utilizado na lâmina foi o aço AISI 5160, um aço de baixa liga e de alta resistência e resiliência mecânica. O posicionamento da lâmina para fora do disco de corte varia de 0,07 a 0,075 m, pois esse é o local onde geralmente se encontra a área de desgaste da ferramenta. O modelo final para o corte basal, após todas as considerações é apresentado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – O modelo final para o corte basal



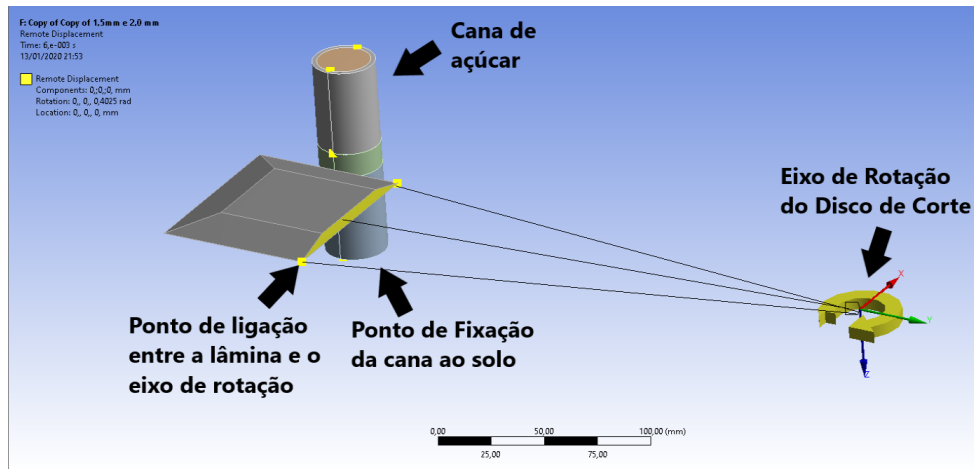
Fonte: Autor

3.6.1 Condições de contorno e contatos

Como foi considerado somente uma região da lâmina nas simulações, onde ocorreu o corte na modelagem, foi necessário inserir uma condição de contorno para simular uma conexão entre a parte da lâmina com o centro de rotação do disco de corte. Tal condição é denominada por "deslocamento remoto". Como o disco possui diâmetro de 565 mm, o raio é metade desse valor, assim a distância que o eixo de rotação deva ficar é de 282,5 mm. A rotação aplicada ao eixo foi o mesmo encontrado nos manuais da máquina que é de 640 RPM. Os detalhes das condições de contorno do modelo estão representados pela cor amarela na Figura 3.20.

Outra condição de contorno aplicada foi a de velocidade angular inicial, que é de 640 rpm. Essa condição determina que o corpo esteja em movimento antes de ser submetido a um esforço a partir de uma certa velocidade. Caso não fosse considerada essa condição, ao aplicar uma rotação o corpo sofreria uma aceleração brusca, gerando tensões internas proveniente da inercia do corpo, o que não representa as condições reais em campo.

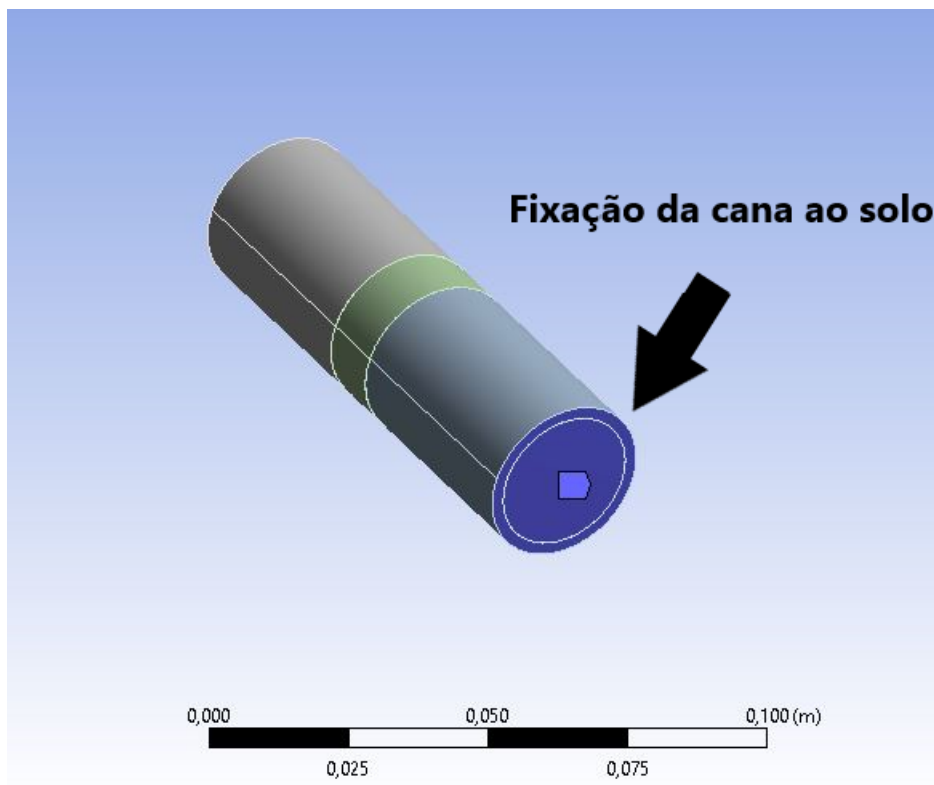
Figura 3.20 – Aplicando a condição de contorno Deslocamento Remoto



Fonte: Autor

Foi ainda estabelecida uma condição de contorno que representa a fixação da cana-de-açúcar ao solo. Aqui foi considerado que não há deslocamento nas direções x, y e z no momento do corte basal, no entanto eixos de momento não foram restringidos. Na figura 3.21 é apresentado a fixação da planta.

Figura 3.21 – Condição de fixação a cana-de-açúcar



Fonte: Autor

Ainda foi inserida uma condição de interação entre os corpos. Essa condição estabelece uma condição de interferência que permite a detecção de contato e ruptura do material quando um corpo colide ao outro. Essa condição é denominada por "Interação entre corpos", no qual pode ser definido certos parâmetros de atrito para uma modelagem mais precisa. Como não é conhecido o valor do coeficiente de atrito e também o atrito de corte a uma velocidade elevada, foi então considerado que a interação ocorre sem atrito.

Como o disco não foi considerado na simulação a inercia do sistema foi modificado. Assim para compensar foi adicionado uma condição de contorno que permita que a velocidade continue a mesma na realização do corte. Essa condição é um deslocamento angular em relação ao eixo de rotação do disco de corte, garantindo que a velocidade permaneça constante ao longo de toda simulação. O valor desse deslocamento angular é dado dividindo a velocidade angular (640 rpm) pelo tempo de simulação (0,006 s), que é de 0,4025 radianos

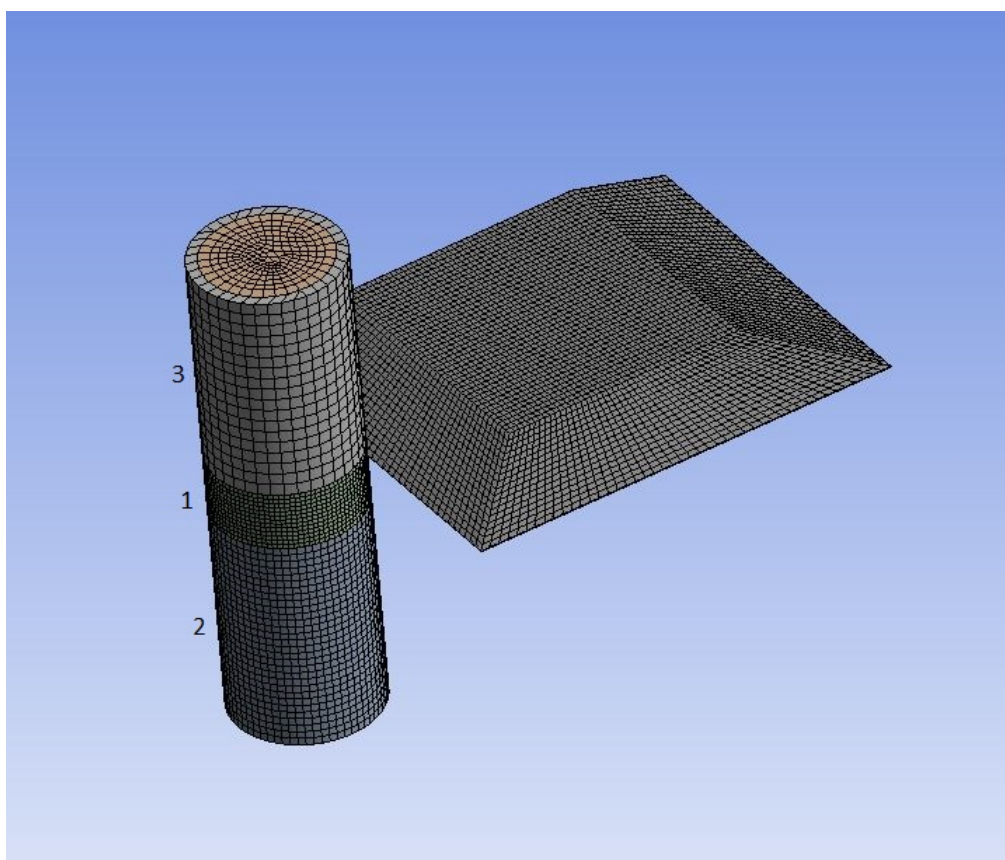
Abaixo são listados em tópicos todas as condições de contorno aplicadas:

- Condição de "deslocamento remoto" para modelagem do raio do disco de corte como o valor de 282,5 mm
- Velocidade inicial angular de 640 rpm
- Movimento angular uniforme
- Interação entre corpos
- Gravidade sentido -z ($9,806 \text{ m/s}^2$)
- Deslocamento $z=0$, $y=0$ e $x=0$ na base da cana-de-açúcar
- Deslocamento angular para a permanência constante da velocidade de corte

3.6.2 Geração de malha

O modelo foi dividido em partes para obter uma maior controle dimensional da malha. O total de divisão foram de 6, as quais foram unidas por um contado entre materiais de forma a se tornarem um só no modelo final. A região do modelo em que foi realizada um maior refinamento de malha foi justamente a área onde é realizado o corte (Figura 3.22), pois é a região que apresenta maior solicitação.

Figura 3.22 – Regiões de refinamento local de malha: 1 - região de corte ; 2 - região de suporte da cana-de-açúcar ; 3 - Porção superior da cana-de-açúcar



Fonte: Autor

O tipo de elemento adotado foi um elemento tridimensional hexaédrico de 20 nós, de código SOLID 186 presente na biblioteca de elementos do software Ansys®.

Por fim, foi realizado um estudo de convergência de malha para garantir a confiabilidade do modelo e os pontos para monitoramento de tensões utilizados na análise de convergência é apresentado na Figura 3.23. Os resultados do estudo de convergência de malha para o corte basal da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 3.24.

Assim, para as análises das tensões no colmo da cana-de-açúcar (fase 4) foi considerado a malha com 69131 elementos, pois foi a malha que deu início ao processo de convergência do modelo.

Figura 3.23 – Pontos estudados para a convergência de malha do corte basal

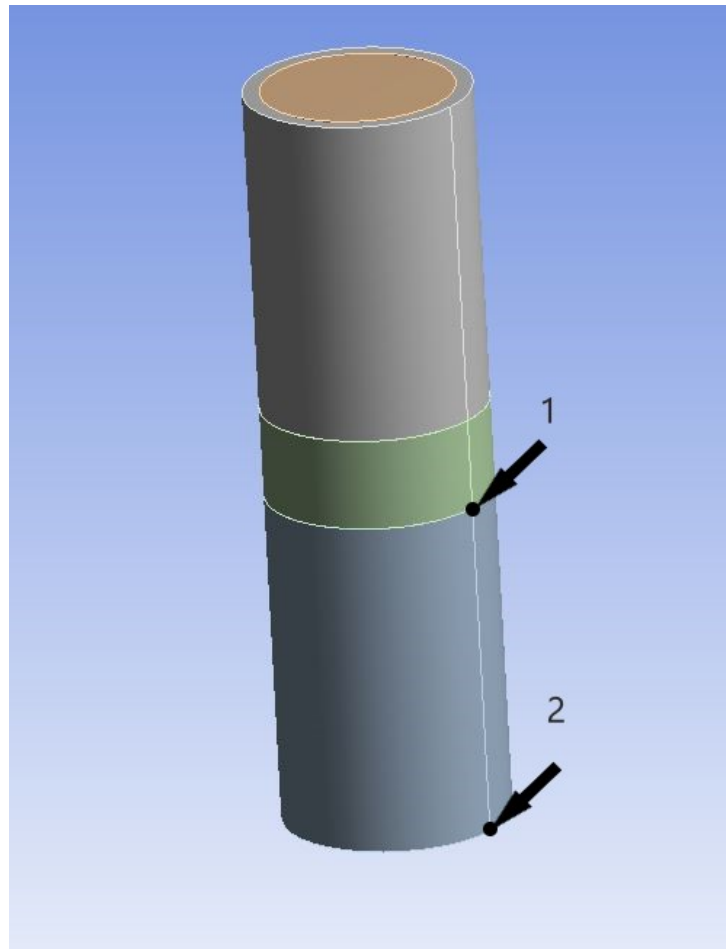
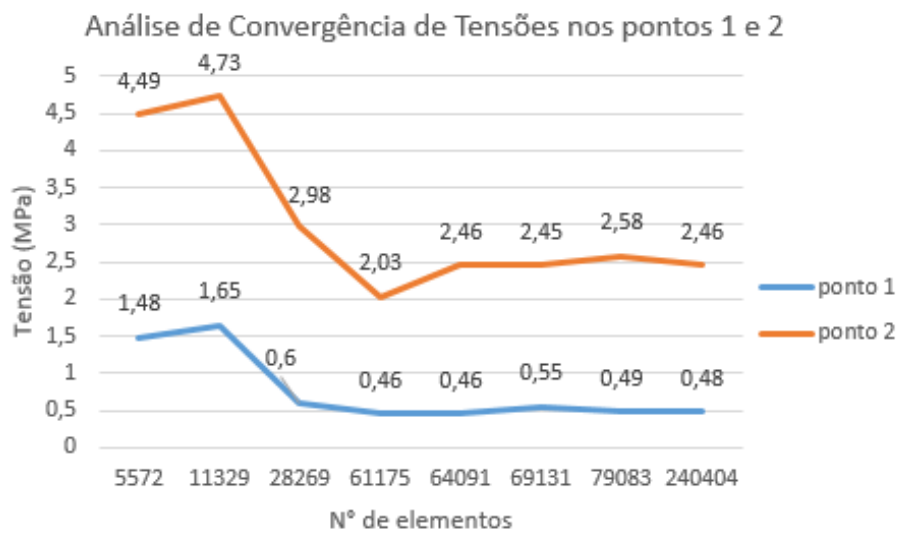


Figura 3.24 – Análise de convergência de malha para o corte basal do colmo da cana-de-açúcar



4 CONCLUSÃO

- Este trabalho simulou o processo mecanizado de corte basal da cana-de-açúcar e propôs a modelagem da cana-de-açúcar considerando a não-homogeneidade do corpo, onde a casca e a polpa da planta apresentaram propriedades mecânicas distintas.

- As tensões obtidas por meio de simulações realizadas neste trabalho foram de 24,12 MPa na casca da cana-de-açúcar e apresentaram-se coerentes com os valores encontrados na literatura (16,76 MPa), levando-se em consideração algumas condições de contorno distintas.

- A diferença entre os valores obtidos neste trabalho e dos encontrados na literatura ficou em torno de 30%. No entanto, deve-se levar em consideração que esse percentual elevado pode estar relacionado, principalmente, com a inclinação do ângulo de corte, podendo ser o maior influenciador nos resultados de tensões geradas no corpo da planta.

- Ao analisar os dados da literatura, observou-se ainda que, quanto maior a velocidade de corte, maiores são as tensões geradas. Para valores de velocidades de corte de 5 ms^{-1} e $17,74 \text{ ms}^{-1}$, foram obtidos tensões de corte da ordem de 13,52 MPa e 16,76 MPa, respectivamente. Para esse trabalho, com uma velocidade de corte de $18,92 \text{ ms}^{-1}$, os resultados da tensão de corte foram de 24,12 MPa, concluindo-se que modelo proposto por esse trabalho pode ser usado para estimar parâmetros em campo.

- Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que o método dos elementos finitos pode ser considerada uma ferramenta viável na avaliação de modelos para prever o comportamento mecânico dos materiais envolvidos no corte basal dos colmos da cana-de-açúcar e que sua validação deve ser realizada por meios experimentais.

REFERÊNCIAS

- ACTION. 2020. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas>>. Acesso em: 10/01/2020.
- ANDRADE, H. d. C.; LEONEL, E. D. Análise da propagação de múltiplas fissuras em meios frágeis utilizando o método dos elementos de contorno dual. In: **Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2017.
- ANSYS COMPANY. **Ansys Material Theory**. EUA, Massachusetts: ANSYS, 2014.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D143 - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. West Conshohocken, PA, 2009. Disponível em: <www.astm.org>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA, 2017. Disponível em: <www.astm.org>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5379 - Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method**. West Conshohocken, PA, 2017. Disponível em: <www.astm.org>.
- BATHE, K.-J. **Finite Element Procedures**. Upper Saddle River, New Jersey: PRENTICE HALL, 1996.
- CNH INDUSTRIAL. **Colhedora de Cana Série A8000 Mecânica, Hidráulica e Elétrica - Clientes**. [S.l.], 2018. 177 p. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/414531011/Apostila-Case-8000-Hidraulica-Eletrica-Mecanica-2>>. Acesso em: 09/01/2019.
- COWIN, S. On the strength anisotropy of bone and wood. **Journal of Applied Mechanics**, American Society of Mechanical Engineers, v. 46, n. 4, p. 832–838, 1979.
- DEERE, J. 2018. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/colhedora-de-cana/ch670/>>. Acesso em: 04/08/2018.
- DICKSON, A. N. et al. Fabrication of continuous carbon, glass and kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 16, p. 146–152, 2017.
- FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Erica, 2000.
- FUCHS, C.; BHATTACHARYYA, D.; FAKIROV, S. Microfibril reinforced polymer–polymer composites: Application of tsai-hill equation to pp/pet composites. **Composites science and technology**, Elsevier, v. 66, n. 16, p. 3161–3171, 2006.
- GOL'DENBLAT, I.; KOPNOV, V. Strength of glass-reinforced plastics in the complex stress state. **Polymer Mechanics**, Springer, v. 1, n. 2, p. 54–59, 1965.
- HILL, R. **The mathematical theory of plasticity**. Clarendon Press, 1950.
- HUANG, H. et al. Finite element simulation of sugarcane cutting. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, v. 27, n. 2, p. 161–166, 2011.

HUANG, H. et al. Finite element simulation of sugarcane cutting. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural . . . , v. 27, n. 2, p. 161–166, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22157:2019 - Bamboo structures — Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms — Test methods**. Geneva, CH, 2019. Disponível em: <www.iso.org>.

KUMAR, G. H. et al. Investigations on mechanical properties of glass and sugarcane fiber polymer matrix composites. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 4, n. 4, p. 5408–5420, 2017.

LIMA, S. M. V.; CASTRO, A. M. G. de; TONANI, F. L. Brazilian agri-industry complex of biofuels (bach) from sugarcane/complexo agro-industrial brasileiro de biocombustíveis (bach) de açúcar. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 19804–19826, 2019.

LIU, H. et al. Anisotropic finite strain viscoelasticity: Constitutive modeling and finite element implementation. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Elsevier, v. 124, p. 172–188, 2019.

MALAVALTA, E. et al. **CULTURA E ADUBAÇÃO DA CANA DE ACCAR**. São Paulo: INSTITUTO BRASILEIRO DE POTASSA, 1964.

MELLO, R. d. C.; HARRIS, H. Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 7, n. 2, p. 355–358, 2003.

MINITAB LLC., . . C. **MINITAB. V.18**. 2018.

MONTEIRO, S. N. et al. Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. **European Polymer Journal**, Elsevier, v. 78, p. 173–185, 2016.

NARAYANASWAMI, R.; ADELMAN, H. M. Evaluation of the tensor polynomial and hoffman strength theories for composite materials. **Journal of Composite Materials**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 11, n. 4, p. 366–377, 1977.

NASA. 2015. Disponível em: <<https://software.nasa.gov/software/LAR-16804-GS>>. Acesso em: 05/05/2018.

NICOLAS, E. A. et al. Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira. [sn], 2006.

NORRIS, C. The elastic theory of wood failure. **Trans ASME**, v. 61, p. 259–261, 1939.

NOVACANA. **Variedades RB ocupam 65% das áreas de cana em SP e MS, segundo Censo Varietal**. Nova Cana, 2020. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/variedades/variedades-rb-65-areas-cultivadas-cana-sp-ms-censo-varietal-2016-310816>>.

OLIVEIRA, J. A. D. d. et al. **Modelação micromecânica do comportamento de materiais Compósitos de Matriz de Alumínio**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2006.

QINGTING, L. et al. , , , v. 22, n. 6, p. 201–204, 2006.

- RAMLEE, N. A. et al. Tensile, physical and morphological properties of oil palm empty fruit bunch/sugarcane bagasse fibre reinforced phenolic hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 8, n. 4, p. 3466–3474, 2019.
- SANTOS, E. C. d. **Colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sem queima prévia: análise de parâmetros de desempenho efetivo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- SEGERLIND, L. J. **APPLIED FINITE ELEMENT ANALYSIS**. Canada: JONH WILLEY AND SONS, 1984.
- SIBIYA, N. et al. Morphology and properties of sugarcane bagasse cellulose-natural rubber composites. **WOOD RESEARCH, SLOVAK FOREST PRODUCTS RESEARCH INST LAMACSKA CESTA 3, BRATISLAVA, SK-841 04 . . .**, v. 63, n. 5, p. 821–832, 2018.
- SILVA, E. P. d. Elementos finitos como ferramenta auxiliar na análise estrutural estática de uma colhedora de café do tipo automotriz. Universidade Federal de Lavras, 2013.
- SILVA, M. de A. et al. Base cut quality and productivity of mechanically harvested sugarcane. **Sugar Tech**, Springer, p. 1–7, 2019.
- SILVA, P. S. d. et al. Análise do uso de escalas nas simulações de processos de estampagem. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- TING, Y.; MIAO, L. An empirical analysis and test of power generation in xinjiang based on the semi-parametric statistical inference model with residual correction. **Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Science Edition)**, n. 1, p. 7, 2018.
- TODESCHINI, R. et al. Ensaio uniaxiais e biaxiais para avaliação de critério de resistência de materiais anisotrópicos aplicado a madeira. [sn], 2009.
- TOLEDO, A. d. Qualidade do corte basal na colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012.
- TSAI, S. W. A survey of macroscopic failure criteria for composite materials. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 3, n. 1, p. 40–62, 1984.
- TSAI, S. W.; HAHN, H. T. Introduction to composite materials, 1980. **Lancaster, Pennsylvania, Technomic**, v. 453, 1981.
- TSAI, S. W.; WU, E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. **Journal of composite materials**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 5, n. 1, p. 58–80, 1971.
- UNIMIL. 2018. Disponível em: <<http://www.unimil.com.br/u/pt/?p=1918>>. Acesso em: 04/08/2018.
- WU, R.-Y.; STACHURSKI, Z. Evaluation of the normal stress interaction parameter in the tensor polynomial strength theory for anisotropic materials. **Journal of Composite Materials**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 18, n. 5, p. 456–463, 1984.
- XIE, L. et al. Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. **Biosystems engineering**, Elsevier, v. 175, p. 16–26, 2018.

YANG, W. et al. Dynamic simulation experiment on effects of sugarcane cutting beneath surface soil. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural . . . , v. 27, n. 8, p. 150–156, 2011.

ZHANG, Y.; ZHANG, L. Limit theorems for dependent bernoulli variables with statistical inference. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, Taylor & Francis, v. 46, n. 4, p. 1551–1559, 2017.

ZHAO, Z.; BALL, J.; HAZELTON, P. Application of statistical inference for analysis of heavy metal variability in roadside soil. **Water, Air, & Soil Pollution**, Springer, v. 229, n. 1, p. 23, 2018.

ZULKIFLI, N. et al. Finite element modelling for fruit stress analysis-a review. **Trends in Food Science & Technology**, Elsevier, 2020.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

ARTIGO 1 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADO AO CORTE BASAL DOS COLMOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "Revista Computers and Electronics in Agriculture - Elsevier ", em que será submetido. É uma versão preliminar em português, considerando que o conselho editorial do periódico poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo.

Simulação Numérica do Corte Basal do Colmo da Cana-de-Açúcar

Alexandre Assis Rezende Santos^{a,c,*,1}, André Luis Gonçalves Costa^{a,c}, Ednilton Tavares de Andrade^{b,d}, Fábio Lúcio Santos^{b,c} and Ricardo Rodrigues Magalhães^{a,c,**,1,3}

ARTICLE INFO

Keywords:

Finite Element Method
Sugarcane Cutting
Explicit Analysis
Ansys Workbench

Resumo

Brazil is the largest producer of sugarcane in the world. In 2019, it was produced 34.1 million tons of sugar and 31.7 billion liters of ethanol. Due to increasing demand for products from sugarcane and environmental restrictions, the mechanization of the harvesting process was the solution to the problem. However, there are few studies aimed to understand the process of mechanized harvesting performed by harvesters and the failures in the cutting process. The finite element method is a useful tool for understanding events that occur in a short time. Based on that, a basal cutting of the sugarcane culm was simulated considering the sugarcane as an anisotropic and heterogeneous (rind and pulp) material. In the study was used the mechanical properties of RB966928 sugarcane, because is the most common variety in southeastern Brazil. The boundary conditions adopted in the simulation of the basal cutting of sugarcane culm were rotation speed of 640 rpm and cutting angle of 0 degree. Maximum stress reached for sugarcane cutting were 24.11 MPa at the rind and 10.29 MPa at the pulp. Compared to studies found in the literature with different conditions, stresses results presented difference around 30%, and the cutting angle was the factor that most influenced in the stress values.

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia, China e Tailândia, em respectiva ordem decrescente de produção [16]. Em 2019, o Brasil produziu 34,1 milhões de toneladas de açúcar e 31,7 bilhões de litros de etanol [19].

Os principais motivos que impulsionam a grande produtividade brasileira são o clima e o solo favoráveis para a produção de diversas lavouras e a utilização do etanol na frota de veículos do país, principalmente com o uso de veículos flex, onde se pode usar a gasolina ou etanol ou a mistura de ambos. Majoritariamente no Brasil, o etanol vem proveniente da exploração da cana-de-açúcar

O estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil e produziu cerca de 51% de toda produção nacional na safra 2018/2019 e 1/5 da produção mundial [7]. Em 2002 foi aprovada uma lei no estado de São Paulo que obrigava os produtores rurais a usar somente a colheita mecanizada na lavoura de cana-de-açúcar, pois a colheita manual causava diversos efeitos negativos na saúde da população e de cidades localizadas ao redor das lavouras, devido a queima do canavial, que é necessário na colheita manual [14].

O método mais viável para contornar esse problema foi a adoção de uma colheita completamente mecanizada para a extração da cana-de-açúcar, sem queima ou pré-processamento de colheita, no entanto isso levanta outros questionamentos. O principal deles é entender de que forma o corte basal da cana-de-açúcar é realizado e, conseqüentemente, como o processo pode ser otimizado.


Para isso, faz-se necessário a realização de estudos prévios da colheita da cana-de-açúcar. Porém a execução de testes usando modelos físicos reais demanda recursos, tempo e ainda podem sofrer influência das condições externas em experimentos envolvendo estudos em campo. Tais condições podem impossibilitar ou atrasar a implementação dos testes dos modelos [17]. Neste sentido, simular o processo de corte da cana-de-açúcar, levando-se em consideração modelos geométricos tanto da planta quanto da ferramenta de corte é de fundamental importância.

Neste sentido, o método dos elementos finitos (MEF) torna-se uma opção viável para a solução destes problemas, uma vez que vem apresentando soluções cada vez mais precisas e confiáveis nos diversos ramos da engenharia, além de outras áreas. No início, o MEF era utilizado para determinar a reação dos esforços quando uma estrutura, geralmente metálica, era solicitada. Com o passar do tempo, sua aplicação foi expandida para líquidos, gases, bio-materiais e até mesmo para o tratamento de produtos agrícolas tais como cana-de-açúcar [25, 9, 24], café [22, 1, 21], soja [18, 8] e frutos em geral [23, 12, 27]

Alguns trabalhos utilizaram o MEF para a simulação da cana-de-açúcar, levando-se em consideração as propriedades mecânicas da planta em algumas condições, mais especificamente para o processo de corte na lavoura. Yang et al. [25] levantaram as propriedades da cana-de-açúcar usando um pêndulo Charpy e utilizaram o MEF no processo reverso de engenharia para determinar os valores das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar comparando as curvas de força de corte do experimento com o simulado. Hu et al. [9] realizaram um estudo do corte basal da cana-de-açúcar considerando certas condições no corte da cana-de-açúcar. Xie et al. [24] avaliaram o processo de corte interno da cana-de-açúcar e analisaram a influência de algumas propriedades de corte, bem como a velocidade de corte e o ângulo da lâmina de corte para otimizar e reduzir o gasto energético na geração dos toletes para beneficiamento nas indústrias.

*Corresponding author

**Principal corresponding author

 alexrezendeufv@gmail.com (A.A.R. Santos); ricardorm@ufpa.br (R.R. Magalhães)

ORCID(s):

Figura 1: Fluxograma da etapas executadas no trabalho



Fase 1 : Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da cana-de-açúcar;

Fase 2: Reprodução do trabalho de chine2018 para reconstrução do ambiente de simulação

Fase 3: Realização de um estudo de caso utilizando a modelagem proposta da cana-de-açúcar e o ambiente de simulação obtido na reprodução

Fase 4: Simular o corte basal do colmo da cana-de-açúcar usando a modelagem proposta da cana-de-açúcar

A maioria dos trabalhos que utilizam o MEF sobre a cana-de-açúcar consideraram a planta como isotrópica e homogênea, no entanto, é de senso comum que tal afirmação parte do processo de simplificação, prática comum no uso do MEF, mas somente válido para casos específicos. Baseado nisso, o objetivo deste trabalho foi simular o corte basal da cana-de-açúcar, considerando a modelagem do colmo da cana-de-açúcar como um material anisotrópico e detalhando a diferença de resistência mecânica entre a casca e a polpa da planta e comparar os resultados obtidos com casos semelhantes na literatura. Para este fim, foi realizado testes experimentais para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas da cana-de-açúcar usando como base a variedade RB966928, que é amplamente usada no Centro-Sudeste do Brasil.

2. Material e Métodos

Um fluxograma contemplando todas as atividades executadas nesse trabalho é apresentado na figura 1.

A cana-de-açúcar utilizada na realização desse estudo foi



Figura 2: Regiões de Colheita da Fazenda Bocaina

coletada em uma propriedade da empresa Cachaça Bocaina localizada na região da cidade de Lavras nas coordenadas 21°16'01.7"S e 45°00'11.0"W. A variedade da cana-de-açúcar utilizada para os testes foi a RB966928, pois é a espécie mais utilizada na região sudeste do Brasil [15].

A área de colheita da empresa foi demarcada conforme Figura 2. Todas as amostras de cana-de-açúcar foram colhidas aleatoriamente.

A retirada das amostras foi realizada entre os meses de outubro e novembro de 2018, com um número total de 35 amostras retiradas. No entanto, somente 21 unidades foram utilizadas, pois algumas amostras apresentaram deformidades como brocas e fungos.

2.1. Fase 1: Testes Experimentais

Como o número de amostras foi inferior a 30 e não era conhecida a distribuição populacional da área analisada, segundo o teorema do limite central, nada pode se afirmar sobre a distribuição que os dados amostrais apresentaram. Para avaliar a normalidade dos dados, foram utilizados os testes de Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, utilizando-se como recurso o software Minitab. Foi considerado um nível de significância $\alpha = 0,05$ para todas as análises realizadas.

2.1.1. Propriedades físicas da cana-de-açúcar

Para a determinação do grau Brix foi utilizado um refratômetro digital da marca Atago® e de modelo pal-1. Após cada medição o leitor óptico era higienizado com álcool etílico 96% para que a amostra medida não interferisse nas pró-

ximas medições.

Para o grau Brix foram consideradas 19 amostras, sendo 2 amostras consideradas como *outliers*.

Para a determinação da densidade da cana-de-açúcar foi usado um béquer forma alta graduado de 1000 ml da empresa laborglass® e uma balança semi-analítica com precisão de 0,001g da empresa Bel®. O procedimento foi primeiramente determinar o peso de um corpo de prova da cana-da-açúcar em um formato retangular padronizado de 15x15x25 milímetros, logo em seguida o béquer foi preenchido de água até 500 ml e depois colocado o corpo de prova dentro do béquer para determinar o seu volume. Para a análise de densidade foram utilizadas 19 amostras.

As propriedades físicas de matéria seca, proteína bruta, FDA (Fibra Detergente Ácida), FDN (Fibra Detergente Neutra) Lignina e Lignina % FDN, que servem para caracterização do material, foram analisadas em laboratórios com certificação e equipamentos adequados atendendo as normas técnicas.

2.1.2. Propriedades Mecânicas da cana-de-açúcar

Para obter os valores das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar foi utilizado uma máquina universal de ensaio da marca INSTRON modelo EMIC 23-20, com uma célula de carga de 20 kN.

Para a confecção dos corpos de prova e execução dos ensaios, foram utilizadas as normas: ASTM D143 ([2]), ASTM D3039 ([3]), ASTM D5379 ([4]), ISO 22157 ([11]).

Na confecção dos corpos de prova, foram utilizados gabaritos de madeira e paquímetro para comparação e ajuste das dimensões (Figura 3). Em alguns corpos de provas foi necessário utilizar resina epóxi para obter maior sustentação nos ensaios, que foi o caso para o ensaio de tração no sentido da fibra (Figura 4).

Os corpos de prova foram confeccionados logo após a colheita da planta da cana-de-açúcar, e depois eram ensaiados no dia seguinte. Para preservar as propriedades físicas e mecânicas do material, os corpos de prova eram mantidos refrigerados entre 5°C a 10°C em um refrigerador Venax NGV10. No transporte dos corpos de prova era utilizada uma sacola térmica e bolsas térmicas em gel para o controle de temperatura também na faixa de 5°C e 10°C.

Para determinar o coeficiente de Poisson foi utilizado um relógio comparador, da marca Mitutoyo® e modelo Série analógica 1, para medir no ensaio de compressão o deslocamento horizontal, quando o corpo de prova é submetido a um deslocamento vertical, conforme Figura 5(c). O número total de ensaios realizados para obter as propriedades mecânicas da cana-de-açúcar foram um total de 114.

A velocidade de ensaio foi de 0,3 mm/mim, baseando-se na norma ASTM D143 ([2]) para ensaios em madeira. Foram realizados ensaio de tração (Figura 5(a)), ensaio de cisalhamento perpendicular a fibra (Figura 5(b)) e ensaio de compressão (Figura 5(c)).

Como a cana-de-açúcar é um material anisotrópico com simetria no sentido radial, os ensaios de tração, compressão

Figura 3: Gabarito utilizado para controle das dimensões dos corpos de prova

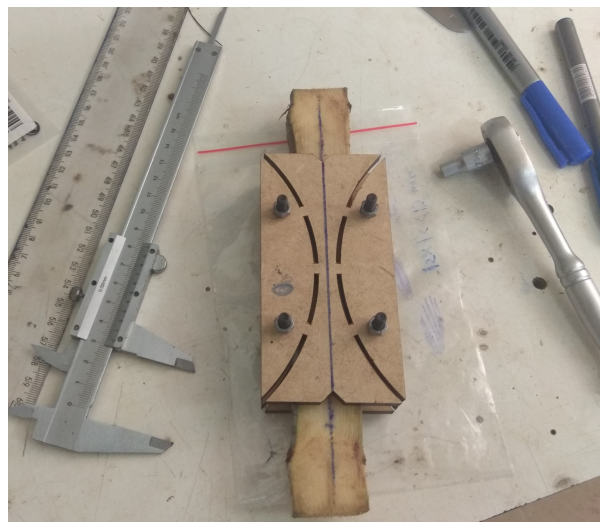
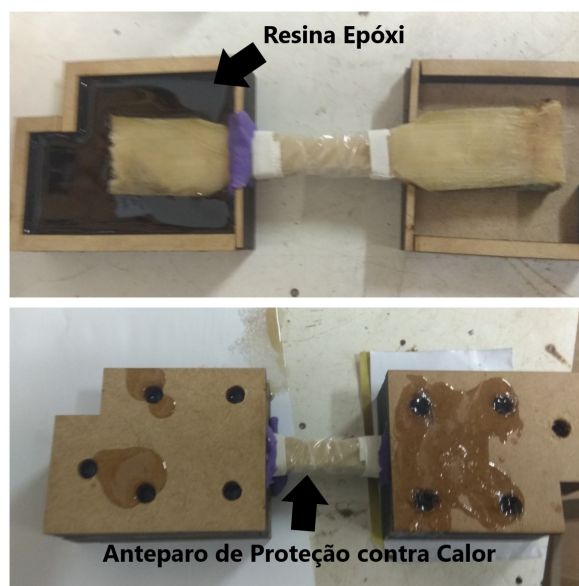


Figura 4: Uso da resina epóxi para aumentar a sustentação nos ensaios



e de cisalhamento foram realizadas somente em 2 eixos.

Também foram consideradas 19 amostras para a realização dos testes de normalidade e as amostras foram selecionadas aleatoriamente e nas análises foi considerado um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Para a determinação das propriedades mecânicas da polpa da cana-de-açúcar foram realizados os ensaios de tração no sentido da fibra, cisalhamento no sentido da fibra, cisalhamento transversal a fibra, compressão no sentido da fibra e compressão transversal a fibra. Não foi possível a realização dos ensaios de tração no sentido transversal a fibra, pois como as dimensões da cana-de-açúcar no sentido transversal eram pequenas, com os equipamentos disponíveis não foi possível produzir corpos de prova com as tolerâncias dimen-

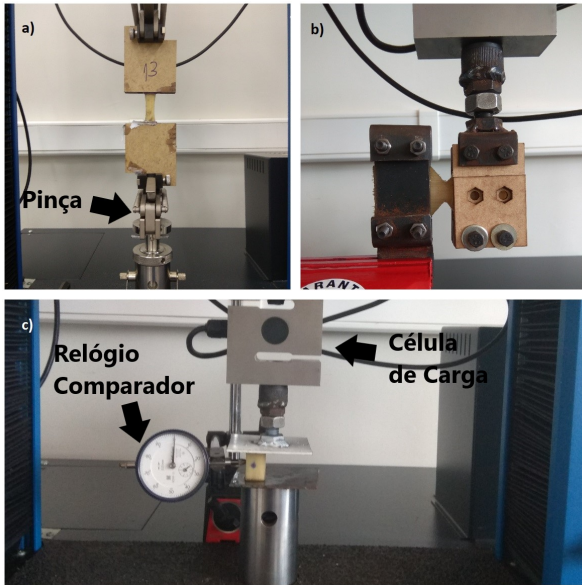


Figura 5: Ensaios realizados na Máquina de Universal para a cana-de-açúcar: a) Tração no sentido da fibra ; b) Cisalhamento no sentido transversal a fibra; c) Compressão do sentido da fibra

Tabela 1

Propriedades mecânicas extraídas para cada ensaio da polpa da cana-de-açúcar

Teste	Propriedade Mecânica
Tração no sentido da fibra	- Módulo de Young - Resistência Mecânica a Tração
Cisalhamento no sentido da fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano zy -Resistência ao Cisalhamento no plano zy
Cisalhamento transversal a fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano xy -Resistência ao Cisalhamento no plano xy
Compressão no sentido da fibra	-Resistência Mecânica a compressão -Coeficiente de Poisson zy
Compressão transversal a fibra	-Resistência Mecânica a compressão -Coeficiente de Poisson xy

sionais adequadas. As propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio são apresentadas na tabela 1.

A resistência mecânica a tração transversal a fibra foi extraída dos trabalhos de Huang et al. [10] e Yang et al. [26].

Na determinação das propriedades mecânicas da casca da cana-de-açúcar foram realizados somente os ensaios de tração no sentido da fibra e o cisalhamento transversal a fibra. A realização dos demais ensaios não foi possível, devido ao tamanho reduzido da casca da cana-de-açúcar e dos equipamentos disponíveis, não sendo possível a confecção e ensaio dos corpos de prova. Na tabela 2 é apresentado as propriedades mecânicas extraídas de cada ensaio realizado da casca do colmo da cana-de-açúcar.

As demais propriedades faltantes para a modelagem da casca da cana-de-açúcar foram extraídas dos trabalhos de Huang et al. [10] e Yang et al. [26].

Tabela 2

Propriedades mecânicas extraídas para cada ensaio da casca da cana-de-açúcar

Teste	Propriedade Mecânica
Tração no sentido da fibra	- Módulo de Young
Cisalhamento transversal a fibra	-Módulo de Cisalhamento no plano xy -Resistência ao Cisalhamento no plano xy

Os testes de normalidade foram aplicados aos dados coletados nos ensaios. Em todos os testes, os dados apresentaram uma distribuição normal.

2.2. Fase 2: Reprodução dos dados de literatura

Como não foi possível a realização do experimento prático do corte basal da cana-de-açúcar, foi estudado um caso similar na literatura para reprodução, com o objetivo de reconstruir o seu ambiente de simulação. O motivo para reconstrução do ambiente de simulação é obter um ambiente de testes confiável para a realização de um estudo de caso, onde será estudado as respostas para a modelagem da cana-de-açúcar proposto por esse trabalho e logo após, em uma quarta fase, simular o corte basal da cana-de-açúcar. Foi utilizado dados do trabalho de Xie et al. [24] para avaliar a resposta do modelo da cana-de-açúcar.

O trabalho de Xie et al. [24] detalha o processo realizado dentro da colhedora da cana-de-açúcar, responsável por dividir a planta em pequenas partes e serem transportadas pelos tratores de apoio. Essas pequenas partes foram denominadas por toletes. A cana-de-açúcar no estudo (Xie et al. [24]) foi modelada como um material anisotrópico, fibroso e não-linear, no entanto não foi definido uma diferença entre a polpa e casca do fruto, sendo considerado a polpa e casco sendo um único material.

A velocidade de rotação dos picadores considerado no estudo foi de 250 rpm. Foi também estabelecido um coeficiente de atrito no contato das laminas com a cana-de-açúcar, onde o coeficiente de atrito estático definido foi de 0,60 e o dinâmico foi de 0,52.

Para a reprodução do modelo em CAD do estudo (Xie et al. [24]) foi utilizando o software SolidWorks® (figura 6), e foi usado o software Ansys Workbench® para a realização da simulação sob as mesmas condições de contorno descritas no trabalho de Xie et al. [24].

Para avaliar se a reprodução está sob as mesmas condições estabelecidos no trabalho de Xie et al. [24] foi analisado os valores das maiores tensões geradas na reprodução e a sua localização. Caso o erro entre a reprodução e o trabalho seja pequeno pode-se inferir que a reprodução e o trabalho apresentem ambientes de simulação similares.

Foi realizado ainda um estudo de convergência de malha para reprodução do estudo de Xie et al. [24], garantindo a confiabilidade dos resultados (figura 7). O estudo foi localizado na lâmina de corte e no colmo da cana-de-açúcar.

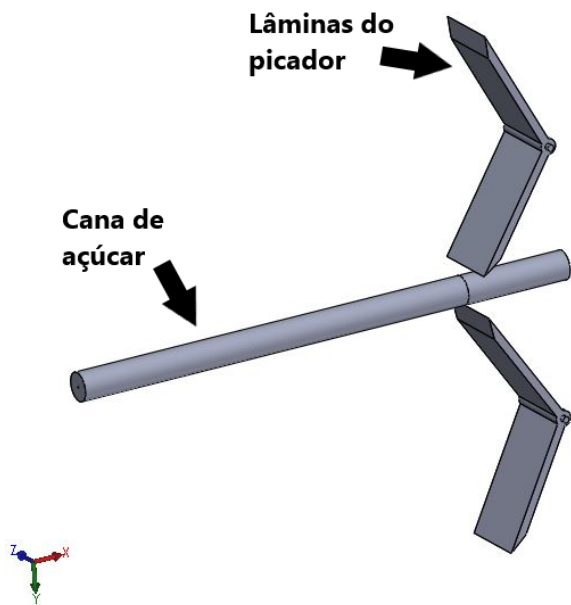


Figura 6: Modelagem do Picador em CAD

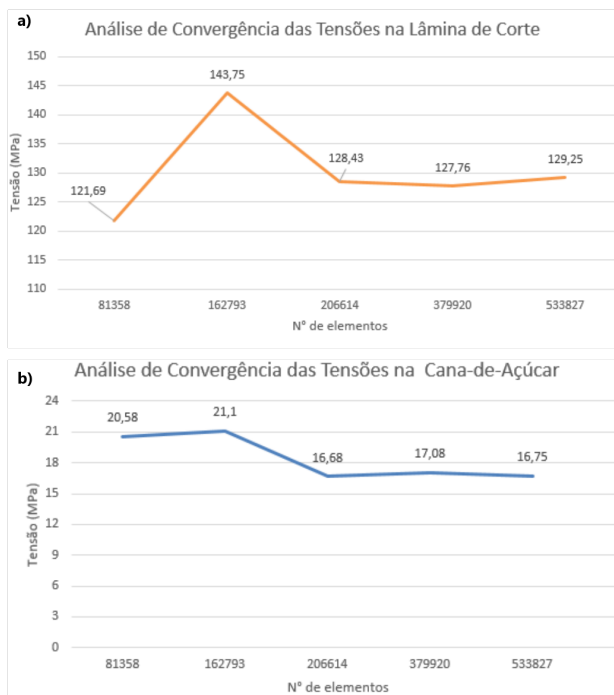


Figura 7: Convergência de Malha para a Reprodução (Fase 2) - a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar

2.3. Fase 3: Estudo de Caso

Uma vez realizada a reprodução e obtido um ambiente de simulação similar ao trabalho de Xie et al. [24], o próximo passo para estudar o corte basal da cana-de-açúcar consistiu em realizar um estudo de caso, onde nesse estudo o modelo de cana-de-açúcar proposto por este trabalho será submetido ao

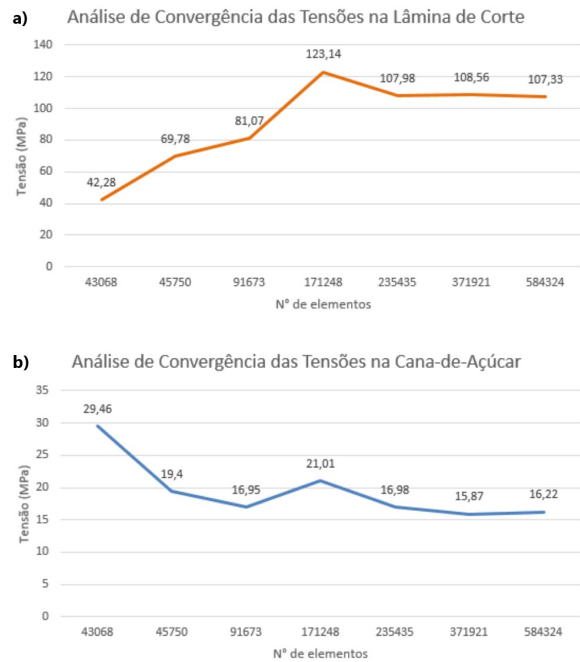


Figura 8: Convergência de Malha para o Estudo de Caso (Fase 3): a) Para o picador; b) Para a cana-de-açúcar

ambiente de simulação encontrado pela reprodução. Assim, será possível avaliar e comparar a resposta do modelo proposto da cana-de-açúcar com o modelo de Xie et al. [24] encontrado na literatura. Os parâmetros analisados nos modelos é a tensão na lamina de corte e no colmo da cana-de-açúcar.

No entanto, notou-se uma diferença nas dimensões dos corpos utilizados. No modelo estudado por Xie et al. [24], a cana-de-açúcar apresentou diâmetro médio de 25 mm e a cana-de-açúcar estudada no presente trabalho apresentou diâmetro médio de 30 mm.

Para contornar essa diferença dimensional foi adotado uma redução escalonada do modelo da cana-de-açúcar de 30 mm, onde a casca e a polpa da cana-de-açúcar foram reduzidas em proporção de tal forma que o diâmetro externo fosse de 25 mm. Esse procedimento foi adotado em razão de que o corte da cana-de-açúcar com diâmetro de 30 mm ocorre com uma maior angulação das lâminas, podendo levar a um aumento das tensões de corte.

Também foi realizado uma análise de convergência de malha no estudo de caso para garantir a confiabilidade dos resultados.

Os resultados do estudo de convergência da malha para o estudo de caso na lâmina de corte e no colmo da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 8.

Assim, para analisar os resultados do estudo de caso (fase 3) foi considerado no estudo a malha com 68795 elementos, pois foi a malha que se iniciou o processo de convergência do modelo.

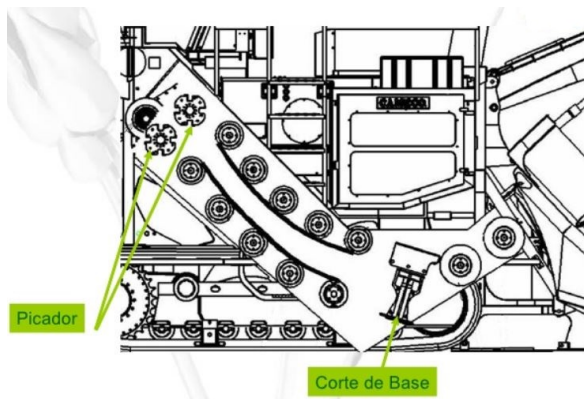


Figura 9: Processo de corte interno da colhedora da cana-de-açúcar

2.4. Fase 4: Simulação do corte basal da cana-de-açúcar para o modelo proposto

Realizadas as duas etapas anteriores, torna-se então possível a modelagem e a simulação do corte basal da cana-de-açúcar, pois a modelagem proposta da cana-de-açúcar gerou respostas similares e coerentes ao que foi apresentado por Xie et al. [24].

O processo do corte interno da colhedora de cana-de-açúcar é apresentado na Figura 9, onde a primeira etapa consiste no corte basal da cana-de-açúcar.

O corte da cana-de-açúcar ocorre pela rotação do disco de corte. Como a intenção do trabalho não foi analisar as tensões no disco de corte, a retirada dessa peça do modelo foi a primeira simplificação considerada para reduzir o tempo de máquina necessário para resolver problemas na simulação. Desconsiderando o disco de corte, o tempo de processamento foi reduzido em 73,45%.

Também a representação completa da lâmina de corte não foi necessária, uma vez que o estudo não estava focado em analisar as tensões na lâmina. Além disso, a porção útil de corte da lamina ocorre entre 0,07 a 0,075 m [6].

O sistema de corte usado como base para esse estudo foi o da colhedora Case modelo A8800. Todas as informações referentes as dimensões do modelo e condições de contorno foram retiradas no manual da máquina.

Foi utilizado na simulação, um recurso de erosão dos elementos que atingiram o limite de deformação ou a tensão de falha do material. Esse recurso foi utilizado para facilitar a convergência do modelo. O procedimento remove elementos distorcidos, os quais aumentam a complexidade da solução do problema.

As definições para a erosão dos elementos foram consideradas na falha do material e quando o elemento atingisse deformação 1,5 vezes seu limite de deformação. Os elementos que apresentaram essa condição não foram considerados válidos na solução da simulação, no entanto, seus efeitos inerciais permaneceram inalterados

2.4.1. Condições de Contorno

O tempo aplicado a simulação para a realização do corte foi de 0,006 segundos, sendo um tempo suficiente para a lâmina realizar o corte ao longo de todo diâmetro da cana-de-açúcar.

Como foi considerado somente uma região da lâmina (onde ocorre o corte), foi necessário inserir uma condição de contorno que simulasse uma conexão entre a lâmina com o centro de rotação do disco de corte. Essa condição é definida como "deslocamento remoto".

O diâmetro do disco de corte utilizado pela máquina foi de 565 mm e a rotação de operação do disco é de 640 rpm [5]. Como na operação de corte todo conjunto mantém velocidade uniforme, na simulação, no instante $t = 0$, considerou-se rotação inicial de 640 rpm.

Assim, dada as informações, foram consideradas uma condição de velocidade inicial da lâmina de 640 rpm e para permitir que a velocidade seja constante ao longo do processo de corte para $t > 0$, foi aplicado um deslocamento angular localizado ao eixo de rotação da lâmina. O valor desse deslocamento angular é dado dividindo a velocidade angular (640 rpm) pelo tempo de simulação (0,006 s), que é de 0,4025 radianos.

Foi ainda inserida uma condição de interação entre os corpos, a qual estabelece uma relação de interferência que permite a detecção de contato e ruptura do material quando um corpo colide com outro. Essa condição define parâmetros de atrito entre os corpos para uma simulação mais precisa. Como o atrito entre corpos não é conhecido, atribuiu-se uma interação sem atrito. Para a representação da ligação cana-de-açúcar ao solo foi considerado na base do modelo da planta um deslocamento $x = 0$, $y = 0$ e $z = 0$.

Todas condições de contorno foram aplicadas para realizar as simulações, conforme segue:

- Condição de "deslocamento remoto" para modelagem do raio do disco de corte como o valor de 282,5 mm
- Velocidade inicial angular de 640 rpm
- Interação entre corpos
- Gravidade sentido -z (9,806 m/s²)
- Deslocamento $z=0$, $y=0$ e $x=0$ na base da cana-de-açúcar
- Deslocamento angular para a permanência constante da velocidade de corte

O modelo final depois de aplicadas todas as condições de contorno é apresentada na Figura 10.

2.4.2. Geração de Malha

Para obter maior controle dimensional da malha o modelo foi dividido em 6 partes e foram unidos em um único corpo. A região de corte foi a que recebeu maior refinamento (Figura 11), pois foi considerada a área mais crítica do modelo. Foi adotado um elemento tridimensional hexaédrico

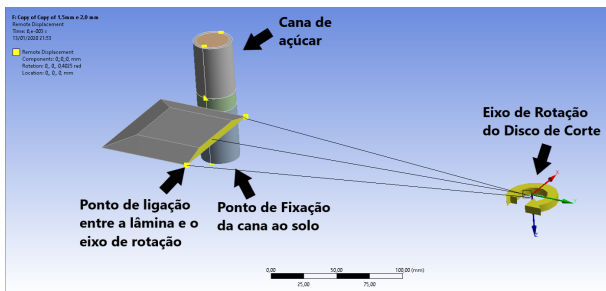


Figura 10: Modelo final logo após as aplicações de contorno

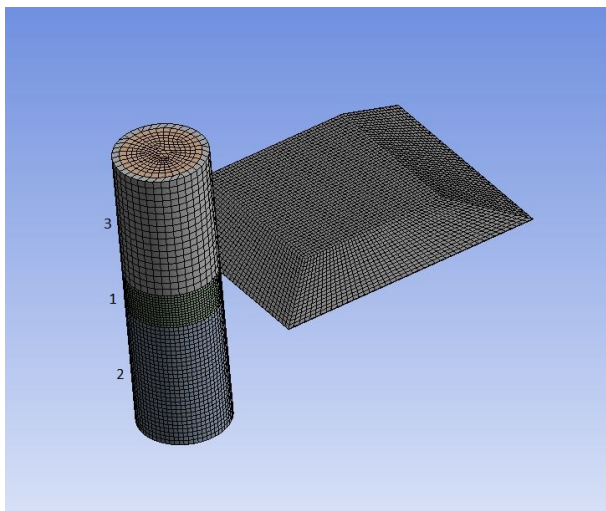


Figura 11: Regiões de refinamento local de malha: 1 - região de corte; 2 - região de suporte da cana-de-açúcar; 3 - Porção superior da cana-de-açúcar

de 20 nós, SOLID 186, de acordo com a biblioteca do programa Ansys.

Por fim, foi realizada uma estudo de convergência de malha para garantir a confiabilidade do modelo e os pontos para monitoramento de tensões utilizados na análise de convergência é apresentado na Figura 12.

Os resultados do estudo de convergência de malha para o corte basal da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 13.

Assim, para as análises das tensões no colmo da cana-de-açúcar (fase 4) foi considerado a malha com 69131 elementos, pois foi a malha que deu início ao processo de convergência do modelo.

3. Resultados e discussão

3.1. Resultados dos testes experimentais

3.1.1. Resultados dos testes das propriedades físicas

Analisando a distribuição dos dados do grau Brix apresentados na Figura 14, observa-se que os dados se aproximam da linha de teste. Quanto mais próximo os dados da

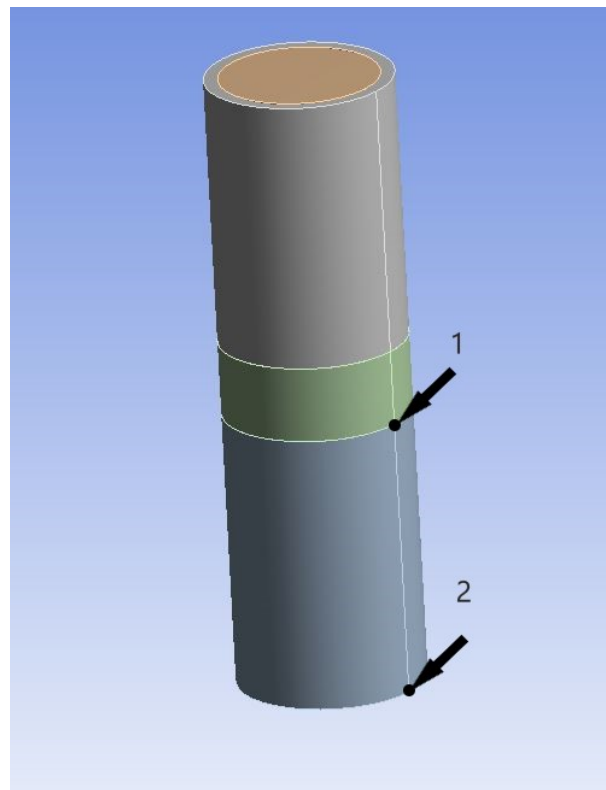


Figura 12: Pontos estudados para a convergência de malha do corte basal

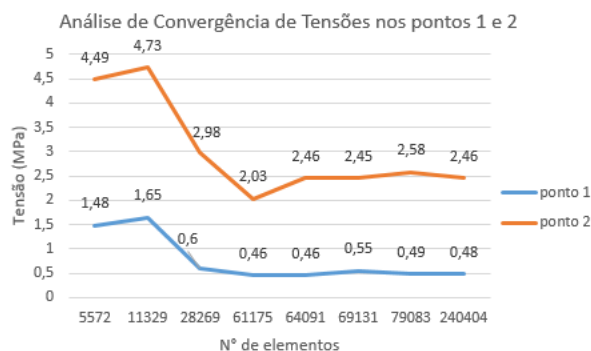


Figura 13: Análise de convergência de malha para o corte basal da cana-de-açúcar

linha de teste, melhor é o indicativo de que os dados apresentem distribuição normal. Com base nos dados da Tabela 3 é possível afirmar que os dados apresentam um distribuição normal, pois o valor-p de todos os testes foram maiores que $\alpha = 0,05$.

Como o desvio padrão da população de cana-de-açúcar não era conhecido, utilizou-se o teste t para determinar intervalos de confiança para o valor médio de brix com nível de significância de 0,05. Os resultados do grau Brix para as amostras de cana-de-açúcar apresentaram média de 23.06 com um desvio de 0.268.

Foi adotado o mesmo procedimento para avaliar a densidade da cana-de-açúcar. Os dados da densidade também

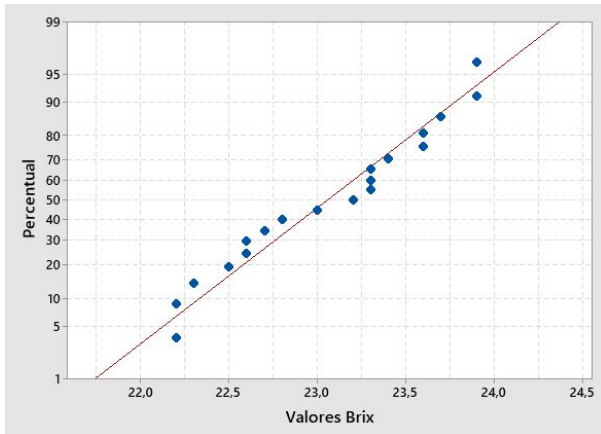


Figura 14: Análise de Normalidade para grau brix

Tabela 3

Resultados de normalidade para a Densidade e Brix da cana-de-açúcar

Métodos	Valor-P (Brix)	Valor-P (Dens.)
Shapiro-Wilk	P > 0,1	P > 0,1
Kolmogorov-Smirnov	P > 0,15	P > 0,15
Anderson-Darling	0,362	0,323

Tabela 4

Resultados das propriedades físicas das 3 amostras - Obs: (% MS = Porcentagem de Matéria Seca)

	1 (% MS)	2 (% MS)	3 (% MS)
Matéria Seca	23,45	32,58	30,92
Proteína Bruta	2,73	1,52	2,10
FDA	23,43	29,20	22,60
FDN	33,98	29,20	22,60
Lignina	2,30	2,86	1,86
Lignina % FDN	6,77	6,27	4,91

apresentaram uma distribuição normal (Tabela 3) e foi utilizado o teste t com um nível de significância $\alpha = 0,05$. A média da densidade foi de 1122 Kg/m^3 com um desvio de 20 Kg/m^3 .

Ainda foram preparadas 3 amostras para avaliar as propriedades físicas referentes a FDA (Fibra Detergente Ácida), FDN (Fibra Detergente Neutra), matéria seca e lignina presentes da cana-de-açúcar, para a caracterização das amostras (Tabela 4).

3.1.2. Resultados dos Testes das propriedades mecânicas

Para os testes de normalidade aplicado, todas as propriedades mecânicas da cana-de-açúcar apresentaram uma distribuição normal dos dados. Os valores médios de cada parâmetro das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar e lâmina de corte e seus respectivos intervalos de confiança estão presentes na Tabela 5.

As propriedades mecânicas do aço da lâmina do corte basal são apresentadas também na Tabela 5.

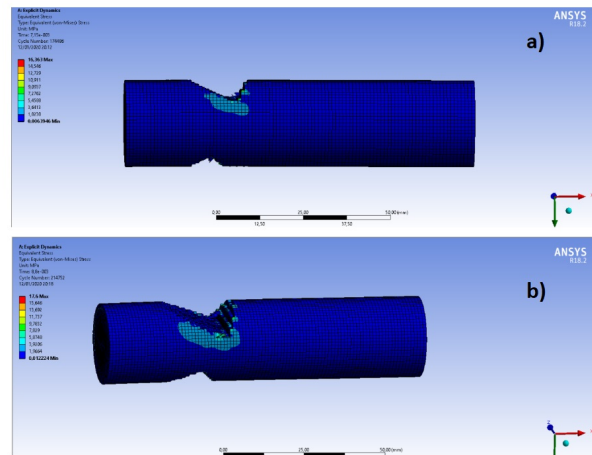


Figura 15: Gradiente Tensão gerada no corpo da cana-de-açúcar no picador

3.2. Resultados da reprodução dos dados da literatura

Analisando os resultados das tensões obtidas na reprodução do estudo de Xie et al. [24] tem-se que na cana-de-açúcar a tensão foi de 16,68 MPa e na lâmina de corte a tensão foi de 128,46 MPa. Em comparação com o que foi alcançado por Xie et al. [24] tem-se que na cana-de-açúcar a tensão foi de 16,87 MPa e na lâmina de corte a tensão foi de 115,12 MPa. O Erro das tensões em relação a Xie et al. [24] para a cana-de-açúcar foi de 1,12% e para a lâmina de corte foi de 11,08

Além dos valores das tensões, a localização delas na reprodução foram praticamente idênticas ao que foi descrito no trabalho de Xie et al. [24] e ocorreram no início do processo de corte do picador.

Assim é possível concluir que o ambiente de simulação utilizado na reprodução do estudo é similar ao que é encontrado no trabalho de Xie et al. [24]. Logo, o ambiente de simulação utilizado na reprodução pode ser usado para a realização de estudos que avaliam as respostas de outros modelos para a cana-de-açúcar.

3.3. Resultados do estudo de caso

Levando-se em consideração as tensões obtidas na cana-de-açúcar para o estudo de caso, nota-se que no início do corte, a tensão foi de 16,22 MPa (Figura 15(a)). No entanto, à medida que o corte se processou, a lâmina comprimiu o material com o auxílio da lâmina inferior do conjunto, esmagando o corpo da planta, aumentando-se a tensão até o valor de 17,6 MPa (Figura 15(b)).

Em relação às tensões obtidas nas lâminas do picador (Figura 16), nota-se que o pico de tensão ocorre justamente no início do corte e foi localizado no gume da lâmina. A tensão gerada foi de 107,33 MPa, sendo distribuída ao longo da área de contato.

Os resultados das tensões obtidas por Xie et al. [24] foram de 115,72 MPa no gume da lâmina e de 16,87 MPa na

Tabela 5
Resultados das propriedades mecânicas do colmo da cana-de-açúcar e lâmina de corte

	Média (MPa)	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança para a Média (MPa)
Tração (eixo Z)	2,366	0,347	2,179 - 2,549
Compressão (eixo Z)	2,926	0,340	2,757 - 3,096
Cisalhamento (planos ZX e ZY)	0,461	0,163	0,388 - 0,534
Compressão (eixo X e Y)	1,343	0,151	1,256 - 1,430
Poisson (planos ZX e ZY)	0,404	0,166	0,312 - 0,496
Poisson (Plano XY)	0,244	0,120	0,179 - 0,310
Mod. de Young (eixo Z)	66,00	11,02	60,65 - 73,85
Mod. de Young (eixo X e Y)	62,00	-	-
Mod. de Cisalhamento (ZX e ZY)	26,00	8,38	23,37 -32,30
Mod. de Cisalhamento (plano XY)	28,00	11,47	23,10 -35,33
Mod. de Young (eixo Z) - Casca	262,7	-	-
Tração (eixo Z)- Casca	47,03	-	-
Tração (eixo X e Y)- Casca	2,57	-	-
Poisson - Casca	0,25	-	-
Cisalhamento - Casca	2,25	-	-
Mod. de Young - Lâmina	205000	-	-
Ten. de Escoamento - Lâmina	1070	-	-
Poisson - Lâmina	0,29	-	-
Mod. de Cisalhamento - Lâmina	80000	-	-

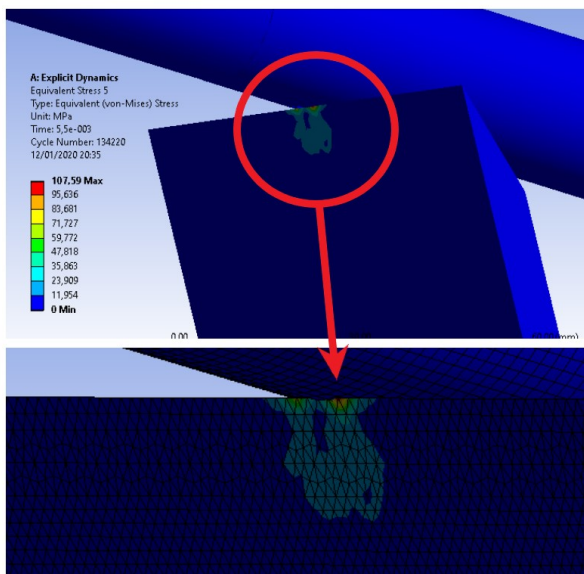


Figura 16: Gradiente de Tensão na lâmina do picado

cana-de-açúcar. Comparando-se os resultados, em termos de gradiente de tensões, para a cana-de-açúcar, a diferença foi de 4,14% e, para a lâmina do picador, a diferença foi de 7,03%. Deste modo, foi possível elaborar o modelo proposto para a cana-de-açúcar, levando-se em consideração a pequena diferença encontrada entre os valores de gradiente de tensões encontrados neste estudo de caso e no trabalho de Xie et al. [24].

3.4. Resultados do modelo proposto

Como o modelo proposto contém dois tipos de corpos

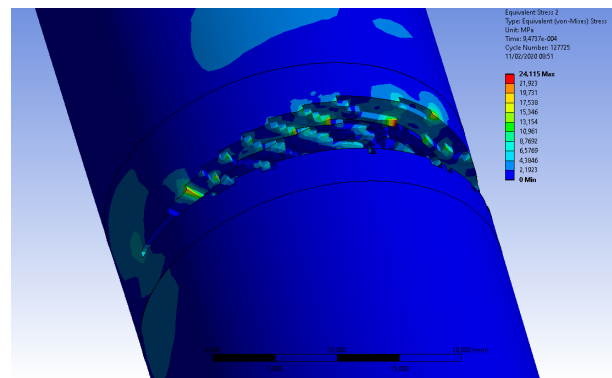


Figura 17: Tensão de Von Mises do corte basal na casca da cana-de-açúcar

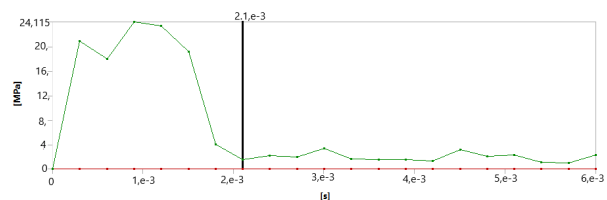


Figura 18: Evolução das tensões máximas para a casca da cana-de-açúcar

(polpa e casca), foi possível observar em simulações realizadas, que as maiores tensões foram concentradas na casca da cana-de-açúcar (Figura 17), cujo o valor é 24,12 MPa. A evolução das tensões máximas na casca do modelo de corte basal da cana-de-açúcar está apresentado na Figura 18.

As tensões máximas simuladas para a polpa da cana-de-açúcar foram de 10,29 MPa, em alguns instantes antes da finalização do corte (Figura 19). A evolução das tensões má-

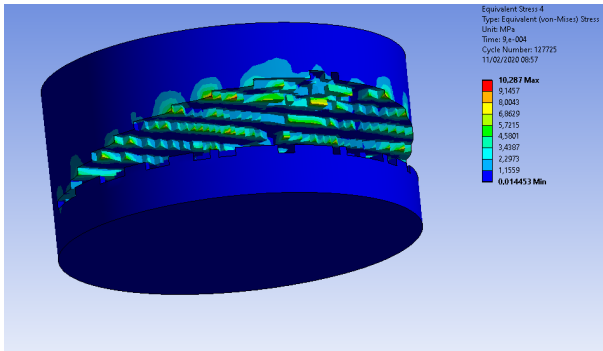


Figura 19: Tensão de Von Mises do corte basal na polpa da cana-de-açúcar

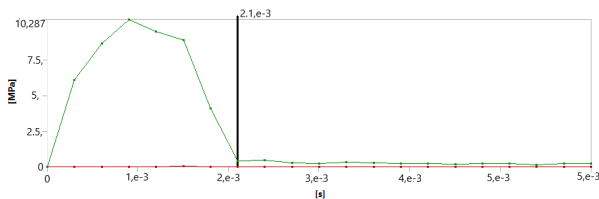


Figura 20: Evolução das tensões máximas na polpa da cana-de-açúcar

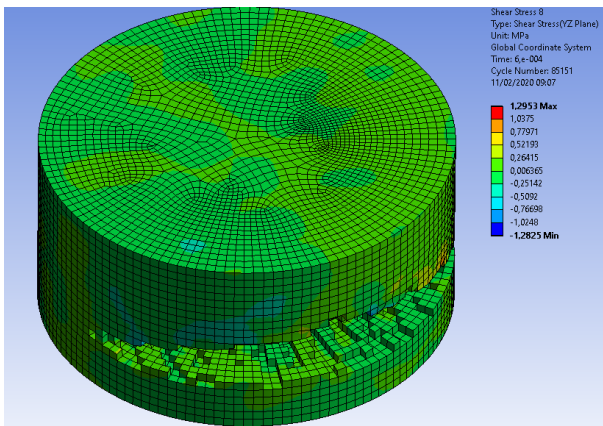


Figura 21: Tensões de cisalhamento no sentido axial da cana-de-açúcar

ximas na polpa do modelo de corte basal da cana-de-açúcar está apresentado na Figura 20.

Observou-se ainda, nas simulações realizadas, a inexistência de falhas no sentido longitudinal (axial) da fibra, sendo que as tensões simuladas foram baixas, ou seja, menores que 1,3 MPa (Figura 21). Levando-se em consideração, ocorrências em campo no corte mecanizado da cana-de-açúcar, falhas no sentido longitudinal ocorrem devido à condições fora dos padrões de corte, podendo ser considerado o motivo da inexistência deste evento nas simulações.

3.5. Considerações finais

Em alguns trabalhos foram realizados estudos com propostas similares, mas em condições distintas. Yang et al.

[25] analisou a influência do cisalhamento axial em relação ao módulo de elasticidade do solo. Segundo Yang et al. [25], quanto maior o módulo de elasticidade do solo, menor será a deformação gerada no solo. Consequentemente, há um aumento do efeito suporte da planta, o que reduz sua deformação por flexão, gerando baixo esforço de cisalhamento no sentido axial.

Yang et al. [25] também analisou as tensões geradas no corte da cana-de-açúcar. As propriedades mecânicas da cana-de-açúcar foram determinadas usando o processo inverso de ensaio, no qual a curva de força versus deformação gerada no corte da cana-de-açúcar serviu como referência. Com o auxílio do MEF foi possível levantar as propriedades mecânicas da cana-de-açúcar, comparando a curva experimental com dados de simulação. A amostra de cana-de-açúcar utilizada por Yang et al. [25] foi a Taiwan sugar 22.

Yang et al. [25], em seu experimento, usou um pêndulo charpy com uma massa de 10,45 kg e uma lâmina com angulação do gume de corte 19,5°, ângulo de corte 20,5° e espessura de 0,005 m. A velocidade do corte alcançada pelo pêndulo foi de 5 m.s⁻¹. A tensão máxima alcançada pela simulação, depois de validada pelo ensaio foi de 13,52 MPa.

Hu et al. [9] analisou o corte mecanizado da cana-de-açúcar e avaliou os impactos do corte gerados na planta, disco de corte e lâminas. Neste caso, o modelo do mecanismo foi simplificado e considerou o disco de corte e a lâmina como um único corpo. A condições de entrada do modelo para esse estudo foram próximas de uma aplicação prática. A velocidade de corte do disco foi de 600 rpm, com um avanço de corte de 0,5 m.s⁻¹. As lâminas apresentaram angulação de 20° e o ângulo do gume de corte foi de 18°.

Resultados alcançados por Hu et al. [9], via simulações numéricas, apresentaram tensão máxima equivalente de 16,76 MPa no corpo da cana-de-açúcar. Observou-se ainda a ocorrência de uma alta carga compressiva no corpo da cana-de-açúcar, levando o modelo da cana-de-açúcar ao colapso, ficando mais evidente no final do corte nas simulações realizadas. A lâmina de corte não sofreu danos devido à diferença de resistência mecânica entre os materiais, o que já era esperado e previsto em fase experimental.

Levando-se em consideração os resultados obtidos neste trabalho e comparando-se com os resultados apresentados por Yang et al. [25] e Hu et al. [9], notou-se diferença significativa nas tensões de 44% e 30%, respectivamente. Porém, deve ser levado em consideração que as condições de simulações foram distintas. Como exemplos, citam-se o tipo de lâmina usada nas simulações e a variedade da cana-de-açúcar usadas nas simulações numéricas. As lâminas utilizadas nos estudos de Yang et al. [25] e Hu et al. [9] apresentaram ângulos de corte e ângulos de gume diferentes da lâmina avaliada nesse trabalho. A lâmina usada no presente estudo é uma lâmina reta e não apresenta ângulo de corte, além de possuir ângulo de gume de 16,7°. Segundo Ma et al. [13], existem valores ideais para reduzir a força e a energia necessárias para o corte da cana-de-açúcar. Os valores ideais para o corte são valores de 20° a 50° para o ângulo de corte, pois prioriza o efeito de cisalhamento no corte da planta. A

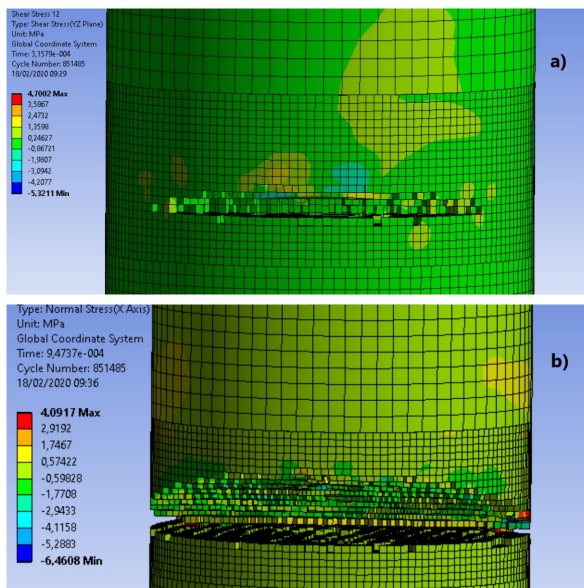


Figura 22: a) Tensão de cisalhamento no plano yz; b) Tensão de normal de compressão no eixo x

velocidade de corte é estipulada dentro de uma faixa de valores que variam entre 13,8 a 18,4 $m.s^{-1}$. Para velocidades superiores à 19,4 $m.s^{-1}$, ocorre um aumento na energia gasta no corte, podendo aumentar as tensões geradas na lâmina de corte e no corpo da cana-de-açúcar. Neste caso, é recomendado um ângulo do disco de 20° a 50° de inclinação.

A utilização de um lâmina reta, sem ângulo de corte, eleva a energia necessária para corte da cana-de-açúcar e das tensões geradas na planta, pois aumenta a superfície de contato da lâmina no início do corte. Como toda uma porção da lâmina é pressionada contra o corpo da cana-de-açúcar, sem que haja cisalhamento (presente nas lâminas anguladas devido a angulação de corte), a cana-de-açúcar é cortada pelas lâminas retas sob o efeito de maiores tensões de compressão. Por meio de simulações numéricas realizadas neste trabalho, notou-se que as tensões de cisalhamento no plano atingiram valores em torno de 5,32 MPa (Figura 22(a)) e as tensões normais de compressão foram de aproximadamente 6,46 MPa (Figura 22(b)). Com isso, se justifica a utilização deste tipo de lâmina no presente trabalho, além de ser uma peça padrão utilizada nas colhedoras de cana-de-açúcar para o mercado brasileiro.

Segundo Shangle and Shixing [20], a velocidade de corte da lâmina é influenciada pela força de corte e por esforços gerados no corpo na planta. A velocidade de corte pode apresentar relação linear com a força necessária para o corte da cana-de-açúcar. Assim, é esperado que quanto maior a velocidade de corte, maiores são os esforços gerados, o que foi confirmado a partir dos resultados de simulações alcançados neste trabalho e também por Hu et al. [9] e Yang et al. [25].

4. Conclusões

- Este trabalho simulou o processo mecanizado de corte basal da cana-de-açúcar e propôs a modelagem da cana-de-açúcar considerando a não-homogeneidade do corpo, onde a casca e a polpa da planta apresentaram propriedades mecânicas distintas.

- As tensões obtidas por meio de simulações realizadas neste trabalho foram de 24,12 MPa na casca da cana-de-açúcar e apresentaram-se coerentes com os valores encontrados na literatura (16,76 MPa), levando-se em consideração algumas condições de contorno distintas.

- A diferença entre os valores obtidos neste trabalho e dos trabalhos de Yang et al. [25], Hu et al. [9] e Ma et al. [13] ficaram em torno de 30%, no entanto, deve-se levar em consideração que esse percentual elevado pode estar relacionado, principalmente, com a inclinação do ângulo de corte, podendo ser o maior influenciador nos resultados de tensões geradas no corpo da planta.

- Ao analisar os dados da literatura, observou-se ainda que, quanto maior a velocidade de corte, maiores são as tensões geradas. Para valores de velocidades de corte de 5 $m.s^{-1}$ e 17,74 $m.s^{-1}$, foram obtidos tensões de corte da ordem de 13,52 MPa e 16,76 MPa, respectivamente para os trabalhos de Yang et al. [25] e Hu et al. [9]. No presente trabalho, para uma velocidade de corte de 18,92 $m.s^{-1}$, os resultados de tensão foram de 24,12 MPa, concluindo-se que modelo proposto por esse trabalho pode ser usado para outras aplicações.

- Baseado nos resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que o MEF pode ser considerada uma ferramenta viável na avaliação de modelos para prever o comportamento mecânico dos materiais envolvidos no corte da cana-de-açúcar, levando-se em consideração propriedades físicas e mecânicas da casca e da polpa, obtidas por meios experimentais.

Referências

- [1] de Araújo Carvalho, E., Magalhães, R.R., Santos, F.L., 2016. Geometric modeling of a coffee plant for displacements prediction. Computers and Electronics in Agriculture 123, 57–63.
- [2] ASTM D143, 2009. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Standard. ASTM International. West Conshohocken, PA. URL: www.astm.org.
- [3] ASTM D3039 / D3039M-17, 2017. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Standard. ASTM International. West Conshohocken, PA. URL: www.astm.org.
- [4] ASTM D5379 / D5379M-19, 2017. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. Standard. ASTM International. West Conshohocken, PA. URL: www.astm.org.
- [5] Case, 2018. Colhedora de Cana Série A8000 - Mecânica, Hidráulica e Elétrica - Clientes. CNH Industrial. URL: <https://pt.scribd.com/document/414531011/Apostila-Case-8000-Hidraulica-Eletrica-Mecanica-2>.
- [6] Deere, J., 2020. Cultivo da cana-de-açúcar. URL: <https://www.slideshare.net/rafaelreginato7/aula-cultivo-da-canadeacar>.
- [7] Ferreira, N., Matos, G., Rouws, J., Reis, V., Rouws, L., 2018. Inoculação com rhizobium sp. acelera a brotação de minitoletes de cana-de-açúcar cultivar rb867515., in: Embrapa Agrobiologia-Artigo em anais de congresso (ALICE), In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS PARA PRODUÇÃO VEGETAL NO SEMIÁRIDO, 3 ...
- [8] Herrero-Huerta, M., Rainey, K.M., 2019. High throughput phenotyping of physiological growth dynamics from uas-based 3d modeling

in soybean. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* , 357–361.

- [9] Hu, D., Zheng, Y., Zhao, Y., 2016. Movement simulation of sugarcane harvester cutter based on ansys/ls-dyna, in: 2016 International Conference on Engineering Science and Management, Atlantis Press.
- [10] Huang, H., Wang, Y., Tang, Y., Zhao, F., Kong, X., 2011. Finite element simulation of sugarcane cutting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 27, 161–166.
- [11] ISO 22157:2019, 2019. Bamboo structures — Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms — Test methods. Standard. International Organization for Standardization. Geneva, CH.
- [12] Kshirsagar, R., Shoor, S., 2017. Finite Element Analysis of Jute and Banana Fibers Reinforced Composites for Mechanical Properties. Ph.D. thesis. Lovely Professional University.
- [13] Ma, S., Karkee, M., Scharf, P.A., Zhang, Q., 2014. Sugarcane harvester technology: a critical overview. *Applied engineering in agriculture* 30, 727–739.
- [14] Nicolella, A.C., Belluzzo, W., 2015. The effect of reducing the pre-harvest burning of sugar cane on respiratory health in brazil. *Environment and Development Economics* 20, 127–140.
- [15] NovaCana, 2020. Variedades rb ocupam 65% das áreas de cana em sp e ms, segundo censo varietal. URL: <https://www.novacana.com/n/cana/variedades/variedades-rb-65-areas-cultivadas-cana-sp-ms-censo-varietal-2016-310816>.
- [16] de Oliveira Bordonal, R., Carvalho, J.L.N., Lal, R., de Figueiredo, E.B., de Oliveira, B.G., La Scala, N., 2018. Sustainability of sugarcane production in brazil. a review. *Agronomy for sustainable development* 38, 13.
- [17] Pratama, J., Fitriyana, D.F., Siregar, J.P., Caesarendra, W., et al., 2020. A low cost validation method of finite element analysis on a thin walled vertical pressure vessels, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. p. 012042.
- [18] Pratama, P., Yang, J., Nam, M., Byun, J., Lee, K., Choi, W., et al., 2018. Cutting analysis of crusher machine based on finite element method. , 61–61.
- [19] Rural, G., 2020. URL: <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cana/noticia/2019/05/globo-rural-safra-brasileira-de-cana-em-201920-deve-atingir-61598-milhoes-de-t-diz-conab.html>.
- [20] Shangle, L.Q.O.Y.Q., Shixing, H., 2007. High-speed photography analysis on the damage process in cutting sugarcane stalk with smooth-edge blade [j]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 10.
- [21] de Oliveira da Silva, F., Andrade Tavares, E., 2018. Static pressure drop across a bed of coffee beans: Finite element analysis. *Revista Ciências Técnicas Agropecuárias* 27.
- [22] Souza, V.H.S., Dias, G.L., Santos, A.A.R., Costa, A.L.G., Santos, F.L., Magalhães, R.R., 2018. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. *Computers and electronics in agriculture* 150, 476–483.
- [23] Velloso, N.S., Costa, A.L.G., Magalhães, R.R., Santos, F.L., de Andrade, E.T., 2018. The finite element method applied to agricultural engineering: A review. *Current Agriculture Research Journal* 6, 286–299.
- [24] Xie, L., Wang, J., Cheng, S., Zeng, B., Yang, Z., 2018. Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. *Biosystems engineering* 175, 16–26.
- [25] Yang, W., Yang, J., Liu, Z., Liang, Z., Mo, J., 2011a. Dynamic simulation experiment on effects of sugarcane cutting beneath surface soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 27, 150–156.
- [26] Yang, W., Yang, J., Liu, Z., Liang, Z., Mo, J., 2011b. Dynamic simulation experiment on effects of sugarcane cutting beneath surface soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 27, 150–156.
- [27] Zulkifli, N., Hashim, N., Harith, H.H., Shukery, M.F.M., 2020. Finite element modelling for fruit stress analysis-a review. *Trends in Food*