

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM AFOFADOR PARA
ARRANQUIA DE MANDIOCA**

JOBERTH LUIZ SILVA SANTOS

CRUZ DAS ALMAS-BA

Agosto de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM AFOFADOR PARA
ARRANQUIA DE MANDIOCA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Adelson Ribeiro de
Almeida Júnior

Co-orientador: Prof. MSc. Vânio Vicente
Santos de Souza

JOBERTH LUIZ SILVA SANTOS

CRUZ DAS ALMAS-BA

Agosto de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM AFOFADOR PARA
ARRANQUIA DE MANDIOCA**

Aprovada em: 05 / 08 / 2022

EXAMINADORES:

Ass.: _____


Vânio Vicente S. Souza
Professor Assistente - UFRB
SIAPE 150370-1

Prof. MSc. Vânio Vicente Santos de Souza

Ass.: _____



Prof. Dr. Marcos Roberto da Silva

Ass.: _____

**Janailson Oliveira
Cavalcanti**

 Assinado de forma digital por Janailson Oliveira Cavalcanti
DN: cn=Janailson Oliveira Cavalcanti, o=UFRB, ou,
email=janailsonoliver@yahoo.com.br, c=BR
Dados: 2022.09.02 09:03:36 -03'00'

Prof. Esp. Janailson Oliveira Cavalcanti

CRUZ DAS ALMAS-BA

Agosto de 2022

RESUMO

Um dos métodos para se colher mandioca, uma planta utilizada tanto como alimento, quanto como matéria-prima da indústria, é o manual. Porém, visto que essa é uma atividade fatigante e que requer muita mão de obra, foram desenvolvidos os afofadores de mandioca. Estes são implementos agrícolas desenvolvidos para desagregar o solo e elevar as raízes da planta, de modo a tornar menos trabalhosa a sua colheita. Uma vez que poucos trabalhos acadêmicos foram desenvolvidos sobre o equipamento, no presente trabalho foi realizado um levantamento dos parâmetros construtivos dos órgãos ativos de subsoladores em geral para, então, definir os valores que trariam mais vantagens para um afofador de mandioca. De posse desses valores, e com o auxílio de uma ferramenta de CAD, foi realizada a modelagem 3D da haste, chapa de ligação e asa de um afofador de mandioca. Então, com o apoio de uma ferramenta de CAE, o valor de 25kN, estimado para a força de tração, foi aplicado sobre a asa com o intuito de averiguar a resistência estrutural do implemento, o que resultou em um fator de segurança de 2,2. Adicionalmente, tendo em vista o inevitável desgaste do material devido à abrasão com o solo, foram realizadas novas simulações para verificar a variação do fator de segurança da asa à medida que a espessura fosse reduzida. Assim, para uma asa com espessura inicial de 1” e com fator de segurança de 4,5, ao se efetuarem reduções de 5%, 10%, 25% e 40% na sua espessura, foram obtidos novos fatores de segurança de 3,98, 3,57, 2,49 e 1,6, respectivamente, demonstrando que mesmo com elevado grau de desgaste, o órgão ativo projetado ainda apresentaria condições de resistir ao carregamento de tração aplicado.

Palavras-chaves: Afofador de mandioca; Modelagem 3D; Análise estrutural.

ABSTRACT

One of the methods for harvesting cassava, a plant used both as food and as a raw material in the industry, is the manual. However, since this is a tiring activity and requires a lot of manpower, cassava uprooters were developed. These are agricultural implements developed to break up the soil and raise the roots of the plant, in order to make harvesting less laborious. Since few academic works have been developed on the equipment, in the present work a survey of the constructive parameters of the active organs of subsoilers in general was carried out to, then, define the values that would bring more advantages to a cassava uprooter. With these values in mind, and with the aid of a CAD tool, a 3D modeling of the shank, connecting plate and wing of a cassava uprooter was carried out. Then, with the support of a CAE tool, the value of 25kN, estimated for the draft force, was applied to the wing in order to determine the structural strength of the implement, which resulted in a safety factor of 2.2. Additionally, in view of the inevitable wear of the material due to abrasion with the ground, new simulations were carried out to verify the variation of the safety factor of the wing as the thickness was reduced. Thus, for a wing with an initial thickness of 1" and a safety factor of 4.5, when making reductions of 5%, 10%, 25% and 40% in its thickness, new safety factors of 3.98, 3.57, 2.49 and 1.6 were obtained, respectively, demonstrating that even with a high degree of wear, the designed active organ would still be able to resist the applied traction load.

Keywords: Cassava uprooter; 3D modeling; Structural analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Afofadores de mandioca.	10
Figura 2 – Afofador de mandioca em operação.	11
Figura 3 – (a) Distúrbio frágil e (b) distúrbio de tração.	12
Figura 4 – Chapas principais de um afofador de mandioca.	12
Figura 5 – Geometrias de hastes de subsoladores.	13
Figura 6 – (a) Haste curva operando na profundidade projetada. (b) Haste curva operando em profundidade acima da requerida. (c) Haste curva projetada para operar em maiores profundidades.	14
Figura 7 – Formato do solo compactado na ponta de ferramentas com diferentes geometrias.	14
Figura 8 – (a) Efeito da largura do dente nas forças horizontal (sólida) e vertical (tracejada) em um dente a 90° e (b) efeito do ângulo de ataque do dente nas forças horizontal e vertical.	15
Figura 9 – Seções transversais das diferentes geometrias de corte, tomadas na direção do avanço. Na 1º linha se variou a altura da aresta de corte, na 2º linha o comprimento do underside rub, e na 3º linha o ângulo de folga inferior.	16
Figura 10 – Efeito da variação da altura da aresta de corte.	17
Figura 11 – Efeito da variação do comprimento do <i>underside rub</i>	17
Figura 12 – Efeito da variação do ângulo de folga inferior.	18
Figura 13 – Efeito da inclinação da lâmina na profundidade de corte.	18
Figura 14 – Influência da forma da borda no fluxo de solo sobre uma ferramenta.	19
Figura 15 – Afofador de mandioca (à esquerda) e seu sistema de <i>Shock Control</i> (à direita)...	21
Figura 16 – Modelos de um punção: (a) em CAD e (b) em elementos finitos.	21
Figura 17 – Resultado da análise estática de um aplicador de fertilizante.	23
Figura 18 – Solução nodal para vetor de deslocamento.	24
Figura 19 – Modelo pneu-solo discretizado.	24
Figura 20 – Esforço máximo no afofador Ikeda para a respectiva compressão na mola.	25
Figura 21 – Afofador de mandioca usado.	30
Figura 22 – Localização das restrições e da força.	32
Figura 23 – Malha de elementos finitos do modelo.	33
Figura 24 – Plotagens da Qualidade dos Elementos e da Distorção.	34
Figura 25 – Modelo 3D do afofador.	35
Figura 26 – Desenho técnico da chapa de ligação.	35
Figura 27 – Desenho técnico da haste.	36

Figura 28 – Desenho técnico da asa.	37
Figura 29 – Geometria do protótipo de afofador de mandioca.....	37
Figura 30 – Plotagens da (a) Tensão equivalente e (b) Deformação Total.	39
Figura 31 – Gradiente de tensões na asa com 1” de espessura.....	40
Figura 32 – Gradientes de tensão para asas com espessura reduzida de 5%, 10%, 25% e 40%.	41
Figura 33 – Gradientes de deformação para asas com espessura reduzida de 5%, 10%, 25% e 40%.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 JUSTIFICATIVA	9
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo geral.....	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	10
2.1 AFOFADOR DE MANDIOCA	10
2.2 GEOMETRIAS DO ÓRGÃO ATIVO DO AFOFADOR DE MANDIOCA	12
2.2.1 Formatos das hastes e seus impactos.....	13
2.2.2 Ponteiras e seus impactos.....	15
2.3 RELAÇÃO ENTRE A FORÇA DE TRAÇÃO E POTÊNCIA NA BARRA DE TRAÇÃO	19
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	21
2.4.1 O método dos elementos finitos na engenharia agrícola.....	22
3 METODOLOGIA	25
3.1 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO	25
3.2 DELIMITAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO AFOFADOR DE MANDIOCA	27
3.2.1 Seleção dos parâmetros gerais.....	27
3.2.2 Seleção dos parâmetros da haste.....	27
3.2.3 Seleção dos parâmetros da asa.....	28
3.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO	31
3.4 GERAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 MODELAGEM 3D E MONTAGEM DO ÓRGÃO ATIVO DO AFOFADOR DE MANDIOCA	34
4.2 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA ESTRUTURAL UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	38
4.2.1 Tensões e deformações no afofador projetado.....	38
4.2.2 Tensões e deformações considerando espessura reduzida.....	40
5 CONCLUSÃO	43
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

A mandioca é uma planta muito importante para os brasileiros. Ela é cultivada em todas as regiões do país, tanto pela agricultura familiar, em que é usada como alimento, quanto pela indústria, em que é usada para produzir desde alimento, até papel ou medicamentos. Alguns dos fatores que explicam a popularidade dessa raiz é que, além de armazenar grande quantidade de amido (ou seja, energia), é uma planta fácil de ser cultivada, resistente a pragas e bem tolerante a períodos de pouca chuva.

Porém, o arranquio da mandioca durante a colheita é uma atividade bastante fatigante e que pode causar problemas como dores nas costas, fazendo com que alguns trabalhadores se neguem a realizar essa tarefa. Dessa forma, um implemento agrícola desenvolvido para auxiliar nessa atividade é o afoador de mandioca, que desagrega o solo na região do plantio e facilita bastante a coleta das raízes. Entretanto, ele não é tão acessível a pequenos produtores, uma vez que são necessários tratores com potências entre em torno de 70cv a 85cv para puxar o implemento.

Adicionalmente, algo comum no desenvolvimento de implementos agrícolas é que seja utilizado o método da tentativa e erro, onde vários protótipos são construídos, testados e modificados, até que um resultado satisfatório seja obtido. Um exemplo disso foi visto durante o período de estágio da universidade, onde determinada empresa fabrica os afoadores de mandioca dessa maneira, o que deixa espaço para o estudo e aprimoramento do implemento.

Para auxiliar no desenvolvimento do produto, diversas ferramentas computacionais estão à disposição. Duas delas são o CAD (Computer-Aided Design), ou Desenho Assistido por Computador, e o CAE (Computer-Aided Engineering), ou Engenharia Assistida por Computador. O primeiro deles tem o foco no desenho ou modelagem do produto, auxiliando na etapa de detalhamento do projeto. Já o segundo auxilia nas análises de engenharia do produto, como no cálculo da resistência estrutural.

Sendo assim, o trabalho trata da estimativa da força de tração a que um afoador de mandioca está sujeito durante a operação. Em seguida, do levantamento dos parâmetros construtivos de um subsolador de mandioca. Depois, da modelagem 3D do órgão ativo do referido implemento, usando uma ferramenta de CAD. E, por fim, da utilização de uma ferramenta de CAE para verificar a resistência estrutural do modelo desenvolvido.

1.1 JUSTIFICATIVA

O uso de afofadores na colheita de mandioca é uma prática existente, mas que detém um custo relativamente alto. Além disso, muitas das ferramentas usadas no campo são construídas na base da tentativa e erro, de modo que elas cumprem suas funções, mas possivelmente não de forma otimizada. Diante disso, a realização do presente trabalho busca estimular o desenvolvimento científico acerca do tema, bem como fomentar uma escolha mais racional dos parâmetros construtivos de um afofador de mandioca.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar a modelagem 3D de um afofador de mandioca e analisar sua resistência estrutural considerando, ainda, reduções na espessura de sua asa devido ao desgaste abrasivo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar a força de tração que decorre da interação equipamento-solo;
- Selecionar os valores dos parâmetros construtivos de um afofador de mandioca;
- Elaborar um modelo 3D de afofador utilizando uma ferramenta de CAD;
- Verificar a resistência estrutural do modelo 3D utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF);

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AFOFADOR DE MANDIOCA

A mandioca, também conhecida como aipim ou macaxeira, é uma fonte de energia importante devido à grande quantidade de amido que armazena em suas raízes, de modo que detém grande importância na alimentação mundial, principalmente em países em desenvolvimento, onde pode ser usada para aumentar a segurança alimentar. Porém, o uso da mandioca não ocorre exclusivamente na forma de alimento, sendo usada também na produção de etanol, madeira compensada e cosméticos (SANTOS, 2022).

As etapas que compõem uma operação de colheita da planta são a limpeza do terreno, o arranquio das raízes, a amontoa, a separação das raízes, o enchimento das sacolas, o transporte até o caminhão e, por fim, o embarque. Porém, o arranquio manual da mandioca submete os trabalhadores a riscos de acidentes, fortes dores nas costas e calosidade nas mãos, de modo que há relatos de que eles têm negado trabalhar em locais onde as raízes não tenham sido afrouxadas mecanicamente do solo (FILHO, 2001).

Segundo Otsubo e Lorenzi (2004), apesar de os pequenos produtores comumente colherem a mandioca de forma manual, a colheita para fins industriais (isto é, para a produção de farinha e fécula) no Centro-Sul do Brasil se dá, frequentemente, pelo método semimecanizado. Para isso, são usados afofadores de modelos variados (Figura 1).



Figura 1 – Afofadores de mandioca.

Fonte: (a) Filho, Sobrinho e Souza (2005), (b) adaptado de Visanorte Implementos Agrícolas (2022)

Esses implementos são constituídos de duas lâminas opostas sustentadas por um chassi central. Durante a operação essas lâminas são aprofundadas no solo abaixo das raízes, como

demonstrado na Figura 2, e no chassi existe um sistema do roda-guia que confere estabilidade ao conjunto e permite o ajuste da profundidade do implemento, o que evita danos às raízes (FILHO, SOBRINHO E SOUZA, 2005).

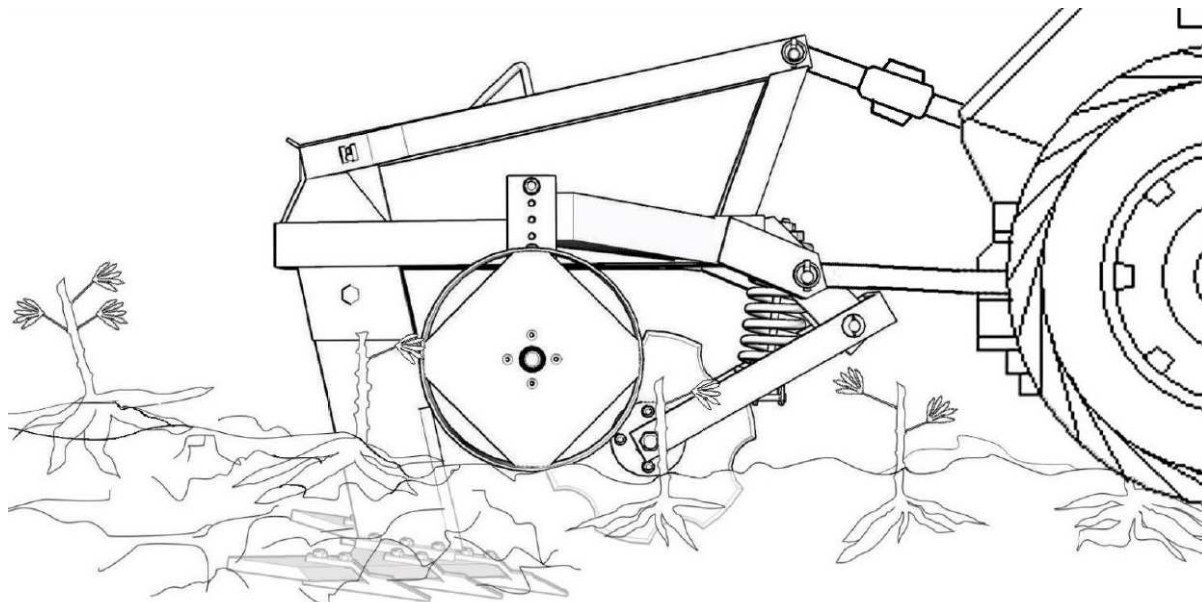


Figura 2 – Afoador de mandioca em operação.
Fonte: Asa Implementos (2021)

Adicionalmente, o desempenho de ferramentas usadas na colheita de raízes é baseado, primeiramente, no quão bem elas conseguem separar a raiz do solo e, em segundo lugar, no quanto de força é necessário para mover a ferramenta através do mesmo (GILL E BERG, 1967). A título de exemplo, no trabalho desenvolvido por Filho, Sobrinho e Souza (2005), em que avaliou-se o desempenho de um afoador, alguns dos parâmetros utilizados foram o índice de perda de raízes, de danos mecânicos (que a lâmina dos equipamentos causou às raízes), e a patinação das rodas motrizes do trator.

Por fim, os órgãos ativos de subsoladores possuem certa semelhança com o do afoador de mandioca. Dito isso, o trabalho desenvolvido por Weill (2015) mostrou que a desagregação do solo pode ocorrer de duas maneiras: por distúrbio frágil ou por distúrbio de tração. Na primeira delas, o solo é quebrado em unidades menores e desliza para cima, permitindo a sua expansão. Então, a medida que ele cai, se organiza na forma ilustrada pela Figura 3a. Já na segunda maneira, Spoor (2006) explica que a massa de solo é elevada ao deslizar sobre a asa e, à medida que atinge o topo, ela inclina e vão sendo geradas fendas de tensão que fraturam o solo (Figura 3b).

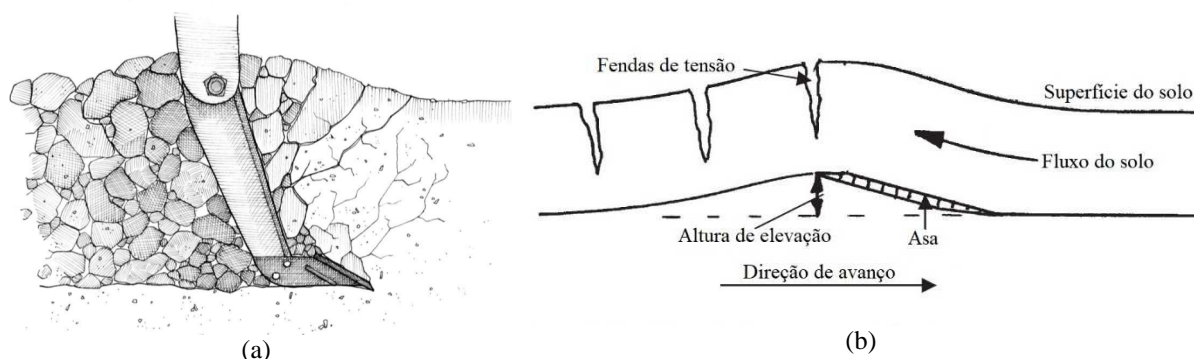


Figura 3 – (a) Distúrbio frágil e (b) distúrbio de tração.
Fonte: (a) Weill (2015) e (b) adaptado de Spoor (2006)

De forma geral, a desagregação do solo é maior quando ele passa por um distúrbio do tipo frágil. Entretanto, para que a força exercida pela ponteira mova e fracture o solo por esse mecanismo, o terreno precisa estar suficientemente seco. Nas situações em que o solo apresenta um teor de umidade mais alto, o desprendimento ocorre preferencialmente por distúrbio de tração (WEILL, 2015).

2.2 GEOMETRIAS DO ÓRGÃO ATIVO DO AFOFADOR DE MANDIOCA

O órgão ativo de um afofador de mandioca é geralmente composto de três chapas principais, conforme indicado na Figura 4. A ligação entre elas é feita da seguinte forma: à chapa 1, denominada haste, é soldada a chapa 2, denominada de chapa de ligação. Esta, por sua vez, é aparafusada à chapa 3, cujo nome é asa.

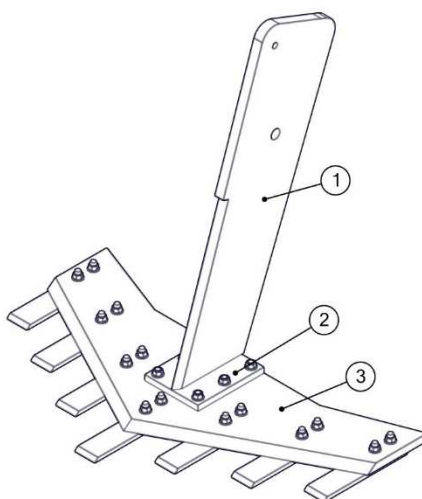


Figura 4 – Chapas principais de um afofador de mandioca.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Porém, não foram encontrados trabalhos que tratassem especificamente das geometrias de afofadores de mandioca. Assim, na presente seção serão apresentadas as variadas geometrias

que compõem o órgão ativo de subsoladores mas que, dada a semelhança, podem ser utilizadas para desenvolver um afofador.

2.2.1 Formatos das hastes e seus impactos

De acordo com Kees (2008), a espessura das hastes está geralmente na faixa entre $\frac{3}{4}$ " (19,05mm) e $1\frac{1}{2}$ " (38,1mm), e elas devem ser capazes de lidar com raízes grandes, pedras e solos muito compactados. Para o uso na agricultura, são adequadas as hastes mais finas, enquanto que em solos rochosos as hastes mais grossas resistem melhor. Entretanto, se torna necessário usar equipamentos mais potentes para puxar tais hastes espessas.

Weill (2015) explica que o formato da haste tem pouca influência sobre o modo geral como o solo é desprendido. Como a maior parte deste inicia a quebra na ponteira, o que passa pela haste é um solo já desagregado. Entretanto, o aumento da largura da haste contribui com a perturbação local do solo.

As hastes podem ser fabricadas com as seguintes geometrias, conforme ilustrado na Figura 5: Reta vertical (ângulo de 90° com o solo), Reta inclinada (ângulos de 30° , 45° ou 60° com o solo), Curva e Parabólica. Além disso, a demanda de potência do trator cai na mesma ordem exibida na figura (SILVA *et al.*, 2015).

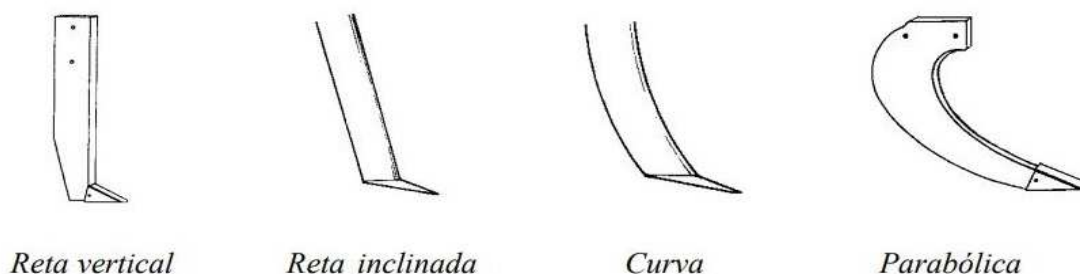


Figura 5 – Geometrias de hastes de subsoladores.

Fonte: Silva *et al.* (2015)

Entretanto, subsoladores de hastes verticais, quando posicionados a uma inclinação próxima da de uma haste curva, apresentaram reduzida demanda de força, com valores comparáveis aos da própria haste curva (RAPER, 2005). Inclusive, no estudo realizado por Upadhyaya *et al.* (1984), um subsolador com hastes retas inclinadas demandou menores forças de tração, menores potências e apresentou um menor consumo de combustível quando comparado a um subsolador de hastes curvas. Já no estudo realizado por Sasaki, Gonçalves e Bentivenha (2005), não foram percebidas diferenças entre as hastes parabólica e reta inclinada estudadas quanto ao desempenho operacional, mas observou-se que esta última apresentou

desempenhos um pouco maiores em relação à profundidade efetiva de trabalho e a área mobilizada de solo.

Gill e Berg (1967) chamam a atenção para o fato de que usar hastes que apresentam curvatura a uma profundidade maior do que a projetada pode acabar anulando a vantagem dessa geometria. Isso porque o que se espera é que a ferramenta empurre o solo para cima e para frente. Porém, como indicado na Figura 6b, trabalhar com a haste a uma profundidade incorreta acaba empurrando o solo também para baixo, de modo que ela opere como se fosse do tipo reta vertical.

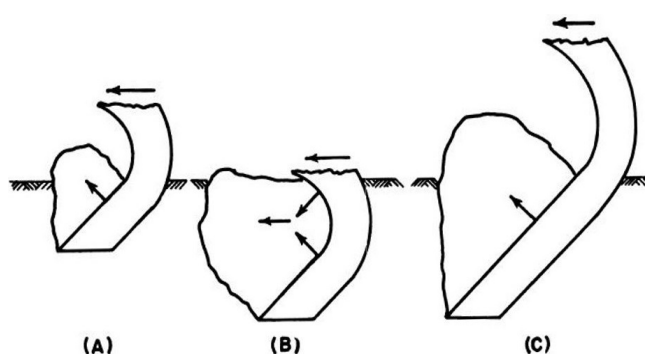


Figura 6 – (a) Haste curva operando na profundidade projetada. (b) Haste curva operando em profundidade acima da requerida. (c) Haste curva projetada para operar em maiores profundidades.
Fonte: Gill e Berg (1967)

Na região frontal da haste é necessária uma borda para possibilitar o corte do solo no plano vertical. Ela pode ser implementada realizando-se chanfros no próprio material da haste, ou montando-a na haste como uma peça separada (BALATON, 1990). Essa geometria determina se a ferramenta vai funcionar como um tipo de faca, que desliza através do solo sem que ele adira, ou se vai criar um corpo compactado de solo aderido à sua superfície, como exibido na Figura 7 (GILL E BERG, 1967).

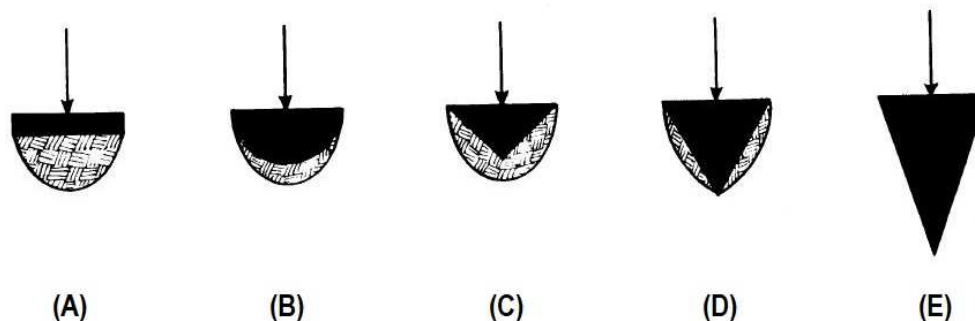


Figura 7 – Formato do solo compactado na ponta de ferramentas com diferentes geometrias.
Fonte: Zelenin (1950, apud GILL E BERG, 1967)

Essa massa compactada de solo tende a ser gerada com um formato parecido para diferentes geometrias de borda, como indicado de (a) a (c) na Figura 7, levando a um atrito

predominantemente do tipo solo-solo durante a operação. Porém, a partir de determinada geometria (Figura 7(d) e 7(e)) o solo, em vez de aderir, apresenta uma tendência maior de deslizar sobre a superfície da borda, levando a um atrito predominantemente do tipo solo-metal, que diminui a força necessária para mover a ferramenta (GILL E BERG, 1967). De acordo com Zelenin (1950, apud GILL E BERG, 1967), a região de solo compactado na borda da ferramenta aparece quando o ângulo da ponta excede 50° .

2.2.2 Ponteiras e seus impactos

A ponteira de subsoladores pode ser acompanhada ou não de asas, e estas influenciam grandemente na maneira como o solo é descompactado. Os afofadores de mandioca, por sua vez, não possuem uma ponteira propriamente dita, mas a asa é um dos principais componentes do seu órgão ativo.

Em comparação com as que não as possuem, as ponteiras aladas apresentam vantagens como (1) a desagregação de um volume muito maior de solo, (2) a redução da potência necessária por unidade de solo desagregado, e (3) um aumento na profundidade com que o trabalho pode ser realizado com eficiência (WEILL, 2015). Entretanto, se observa um aumento na força de tração e, conseqüentemente, no consumo de combustível.

Na revisão produzida por Godwin (2007), foi mostrado que as componentes horizontal e vertical da força que atua na ferramenta não são diretamente proporcionais à largura da ponteira (dente). O comportamento que se observa, na verdade, é o indicado na Figura 8(a). Já na Figura 8(b), é mostrado como as forças crescem com o aumento do ângulo de ataque da ponta. Como pode ser observado, ângulos de ataque menores facilitam a penetração da ferramenta no solo, devido a força vertical para baixo, e diminuem a força de tração, devido ao menor valor da componente horizontal.

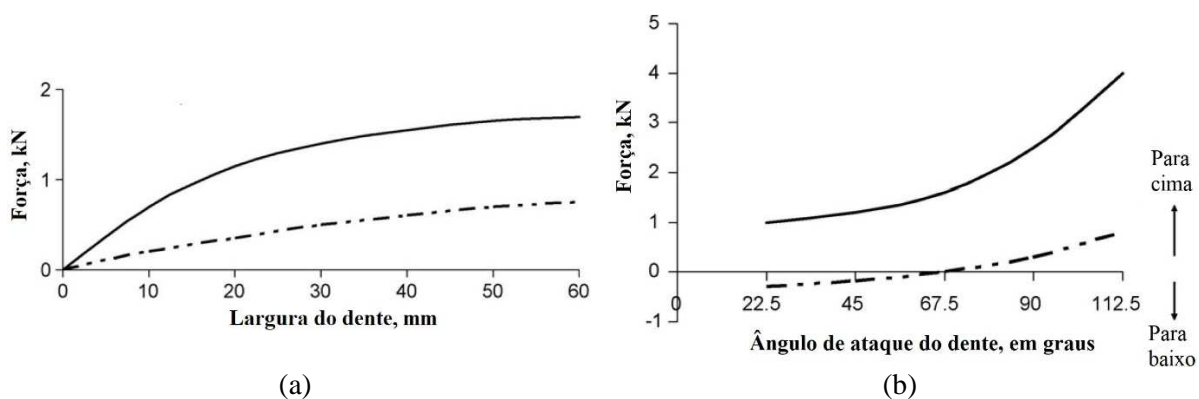


Figura 8 – (a) Efeito da largura do dente nas forças horizontal (sólida) e vertical (tracejada) em um dente a 90° e (b) efeito do ângulo de ataque do dente nas forças horizontal e vertical.

Fonte: Adaptado de Godwin (2007)

Segundo Spoor (2006), o grau de elevação e o rearranjo que ocorre no solo durante o avanço do implemento são influenciados grandemente pela altura de elevação das asas. Tal altura geralmente varia de 25mm, para operações mais rasas e onde menos desagregação é requerida, a 100mm, para profundidades e perturbações maiores. O grau com que o distúrbio ocorre pode ser modificado variando-se a altura de elevação da asa. Mas, quando isso não é possível, pode-se variar então a profundidade de trabalho.

Já no trabalho desenvolvido por Ucgul, Fielke e Saunders (2015), foram examinadas diversas geometrias de corte (Figura 9) usando o Método dos Elementos Discretos. O objetivo foi entender como a modificação da altura da aresta de corte, do comprimento do *underside rub* e do ângulo de folga inferior influenciavam na força de tração e na força vertical a que o implemento está sujeito durante a operação.

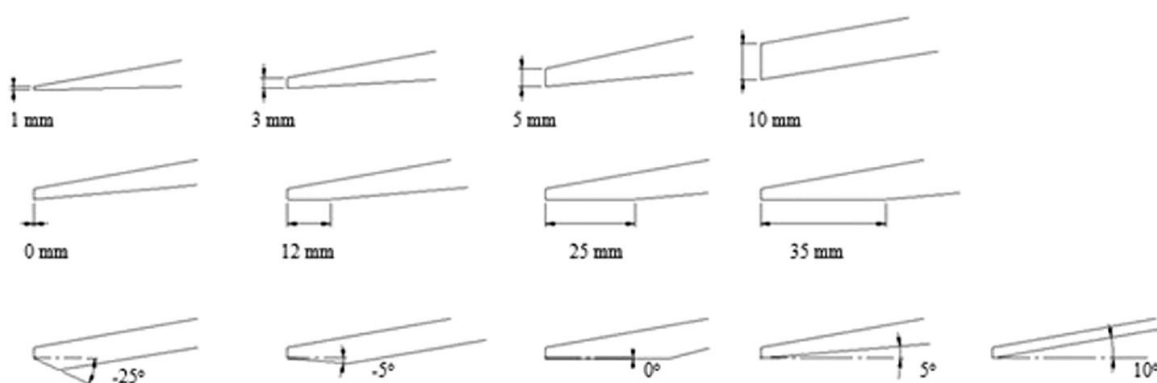


Figura 9 – Seções transversais das diferentes geometrias de corte, tomadas na direção do avanço. Na 1º linha se variou a altura da aresta de corte, na 2º linha o comprimento do underside rub, e na 3º linha o ângulo de folga inferior.

Fonte: Ucgul, Fielke E Saunders (2015)

Os resultados obtidos pelos autores com a variação de cada um dos parâmetros são condensados a seguir:

- Altura da aresta de corte

As simulações mostraram que quanto mais afiada a aresta de corte, ou seja, quanto mais próxima de zero a sua altura, maiores eram os benefícios, traduzidos em menores força de tração e força vertical para cima.

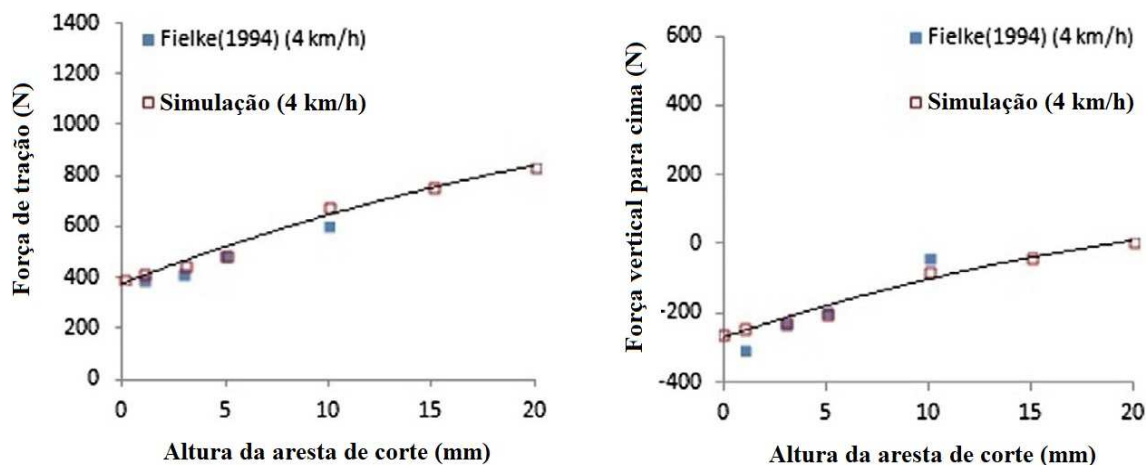


Figura 10 – Efeito da variação da altura da aresta de corte.

Fonte: Adaptado de Ucgul, Fielke e Saunders (2015)

- Comprimento do *underside rub*

Os resultados obtidos indicaram que aumentar o comprimento do *underside rub* não apresentou qualquer mudança expressiva nos valores de força de tração e força vertical, como mostrado na Figura 11.

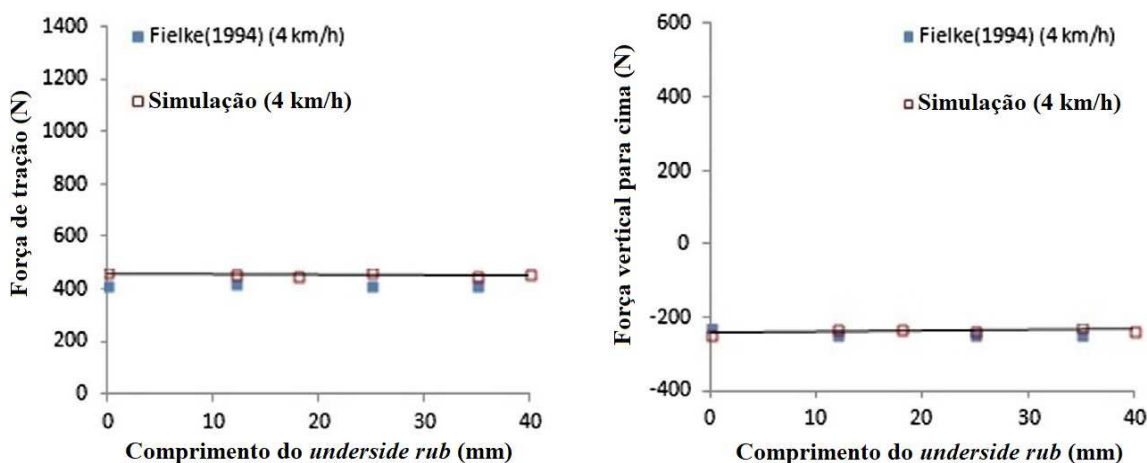


Figura 11 – Efeito da variação do comprimento do *underside rub*.

Fonte: Adaptado de Ucgul, Fielke e Saunders (2015)

- Ângulo de folga inferior

Os resultados demonstraram que a diminuição do ângulo de folga inferior negativo (indo em direção a zero) diminuía a força de tração e força vertical para cima, e que aumentando esse ângulo positivamente a partir de zero, havia uma leve redução na força de tração e ligeiro aumento na força vertical.

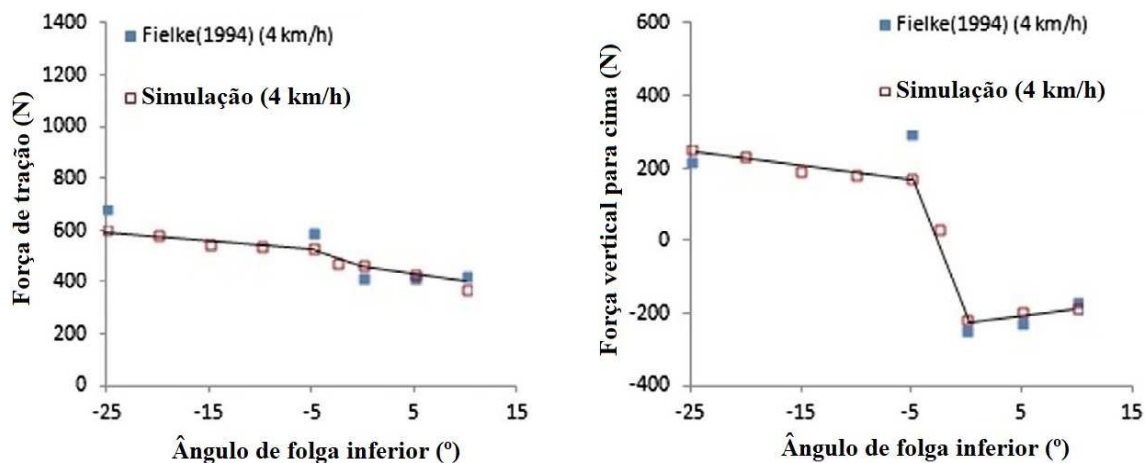


Figura 12 – Efeito da variação do ângulo de folga inferior.

Fonte: Adaptado de Ucgul, Fielke e Saunders (2015)

Vale destacar que os autores realizaram os experimentos em três velocidades de trabalho, 4 km/h, 8 km/h e 12 km/h, mas o comportamento das outras curvas geradas foram similares aos exibidos nas três figuras previamente apresentadas. O aumento da velocidade levou a um aumento nas forças de tração, mas não houveram mudanças significativas nas forças verticais.

De acordo com Gill e Berg (1967), raramente são usadas ferramentas operando em ângulos retos. Elas geralmente são inclinadas para trás a ângulos que variam de 20° a 50°, o que permite uma autolimpeza da lâmina durante a operação. Devido a essa inclinação, qualquer alteração no ângulo de ataque da haste, como indicado na Figura 13, terá um efeito na profundidade de corte. Essa elevação das extremidades das asas pode ser indesejada em várias aplicações, já que o corte não será realizado a uma fundura uniforme, e essa profundidade de corte, por sua vez, é comumente determinada com base na localização das raízes das plantas.

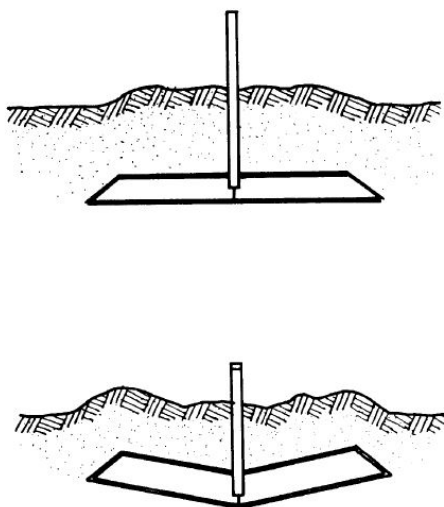


Figura 13 – Efeito da inclinação da lâmina na profundidade de corte.

Fonte: Chase (1942, apud GILL E BERG, 1967)

Chase (1942, apud GILL E BERG, 1967) reportou que a posição do chanfro na borda da ferramenta é importante. Quando na parte superior, como exibido na Figura 14(a), é gerada uma região de “baixa pressão”, que promove a aderência de solo na superfície da ferramenta e leva a um aumento da força de tração. Esse comportamento não foi observado quando o chanfro estava na parte inferior da ferramenta, como mostrado na Figura 14(b), e percebeu-se, também, que nessa posição se tornava menos frequente a necessidade de afiação da ferramenta.

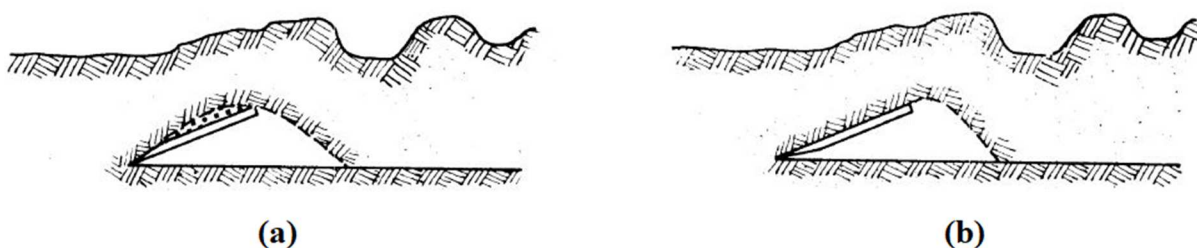


Figura 14 – Influência da forma da borda no fluxo de solo sobre uma ferramenta.
Fonte: Adaptado de Chase (1942, apud GILL E BERG, 1967)

2.3 RELAÇÃO ENTRE A FORÇA DE TRAÇÃO E POTÊNCIA NA BARRA DE TRAÇÃO

O movimento do implemento agrícola através do solo é possibilitado pelo uso de tratores, mas para que ele ocorra tais tratores devem ser capazes de superar a resistência que é oferecida e esse deslocamento. Nesse sentido, Walters (2012) apresenta um conceito importante de ser examinado: o de Força de Tração.

A Força de Tração, do inglês *Draft Force*, ou apenas *Draft*, é a força horizontal necessária para puxar um implemento a certa velocidade. Ela é determinada por fatores como a largura da ferramenta, a profundidade e velocidade da operação, e a resistência do solo que, por sua vez, depende de características como densidade, teor de umidade, e de pequenas mudanças na distribuição do tamanho das partículas (WALTERS, 2012).

Segundo os trabalhos de Furini (2018) e Walters (2012), o valor da força de tração se relaciona com a potência média na barra de tração e com a velocidade de deslocamento do trator de acordo com a Equação 1:

$$P_{cv} = \frac{\text{ForçaDeTração}_{kgf} \cdot V_{km \cdot h^{-1}}}{270} \quad (1)$$

Conforme a American Society of Agricultural Engineers, ASAE (2003), ou Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas, a potência média na barra de tração pode ser encontrada ao acompanhar o seguinte esquema:

Potência bruta no volante do motor

↓ x0,83

Potência na TDP

↓ Tabela 1

Potência na barra de tração

Ou seja, de posse da potência bruta no volante do motor, deve-se multiplicar esse valor por 0,83 para, assim, obter a potência aproximada na Tomada de Potência (TDP) do trator. Em seguida, deve-se extrair da Tabela 1 um fator que depende do tipo de terreno e tipo de trator usado e, então, multiplica-lo à potência na TDP (ASAE, 2003).

Consequentemente, se torna possível estimar a força de tração para determinada velocidade de operação utilizando a Equação 1.

Tabela 1 – Fatores multiplicativos para estimar a potência na barra de tração utilizando a potência na Tomada de Potência (TDP) de um trator.

Tipo de trator	Tipo de terreno			
	Concreto	Solo firme	Solo arado	Solo fofo
Tração em duas rodas	0,87	0,72	0,67	0,55
Tração dianteira auxiliar	0,87	0,77	0,73	0,65
Tração em quatro rodas	0,88	0,78	0,75	0,70
Esteira	0,88	0,82	0,80	0,78

Fonte: Adaptado de ASAE (2003)

Adicionalmente, existe uma outra maneira de se obter a força a que o implemento é submetido. De acordo com o manual dos afadores Ikeda (2021), alguns dos referidos implementos são equipados com um sistema de *Shock Control*, que “desarma” a haste do implemento caso obstáculos no solo (como pedras e tocos) excedam o esforço máximo admissível do sistema (Figura 15). O valor máximo definido como padrão é de aproximadamente 1800kgf (com uma compressão de 20mm da mola), mas pode ser aumentado em caso de frequente desarme do sistema, que pode ocorrer quando o solo se encontrar muito compactado. Para realizar tal regulagem, basta comprimir a mola até um valor máximo de 24mm.

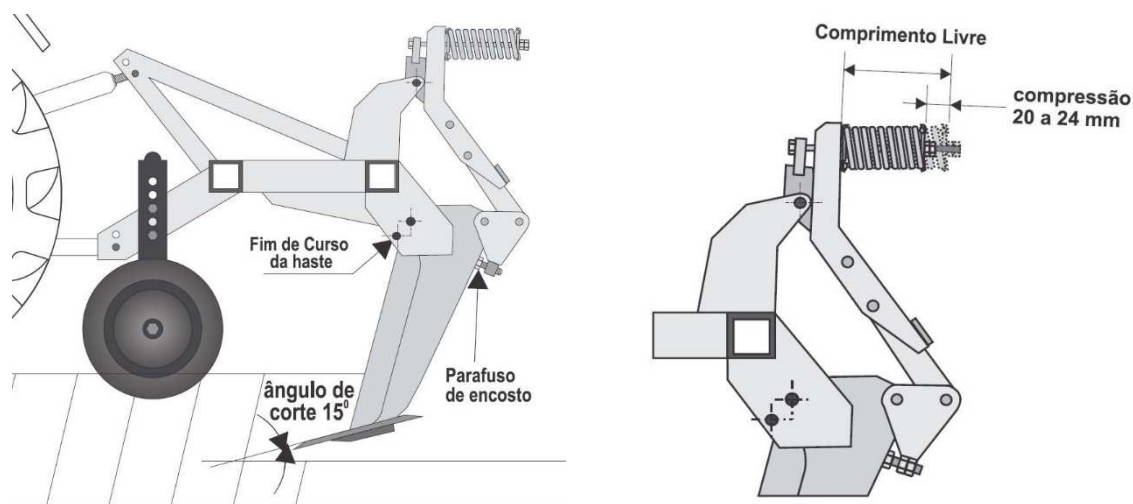


Figura 15 – Afofador de mandioca (à esquerda) e seu sistema de *Shock Control* (à direita).
Fonte: Adaptado de Ikeda (2021)

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Uma vez que o MEF é utilizado no presente trabalho, será feita uma apresentação do mesmo, bem como de algumas de suas aplicações na área da engenharia agrícola.

De acordo com Thompson e Thompson (2017), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica matemática usada para configurar e resolver equações diferenciais parciais ou integrais. Na engenharia, ele é usado para dividir problemas grandes e complexos, que não podem ser resolvidos por equações analíticas, em várias pequenas partes, ou elementos, cujas soluções são conhecidas ou podem ser aproximadas.

Para Petrova (2014), o princípio do MEF consiste em fatiar um corpo sólido em várias pequenas células de formato simples, chamadas de elementos finitos, que modelem a geometria do corpo da forma tão precisa quanto possível (Figura 16). Tais elementos se conectam uns aos outros em pontos denominados nós, e o processo de divisão de uma forma geométrica em um modelo de elementos finitos é chamado de geração de malha.



Figura 16 – Modelos de um punção: (a) em CAD e (b) em elementos finitos.
Fonte: Petrova (2014)

Alguns dos resultados que podem ser obtidos para cada um dos elementos, ao final de uma análise, são valores de tensão, deslocamento, deformação, temperatura, velocidade e aceleração. Porém, a qualidade desses resultados depende grandemente da qualidade da malha que foi produzida (PETROVA, 2014).

Segundo Filho (2013), a aplicação do Método dos Elementos Finitos passa por três etapas: a de Pré-Processamento, de Processamento e de Pós-Processamento. Na etapa de Pré-Processamento, é gerado o modelo de elementos finitos que representa a estrutura e, neste modelo, são aplicadas as condições de contorno, cargas e restrições. Em seguida, ocorre a etapa de Processamento onde, por meio de rotinas de cálculo realizadas no computador, são determinados os deslocamentos, as reações de apoios e as forças internas. Por fim, na etapa de Pós-Processamento, os resultados são interpretados pela pessoa responsável (técnico, engenheiro, etc.), que geralmente se vale de recursos gráficos, como escalas de cores associadas a valores de tensões, para facilitar o processo de análise.

Por fim, quanto à importância dos elementos finitos e da geração da malha, Thompson e Thompson (2017) afirmam que a quantidade e a forma dos elementos do modelo influenciam na precisão dos resultados da simulação. Quanto mais se aumenta o número desses elementos, menores eles ficam e, conseqüentemente, a solução se torna mais exata, detalhada e contínua. Porém, não há necessidade de reduzir o tamanho dos elementos tanto quanto possível, pois quando chega-se a um ponto em que resultados razoáveis já foram obtidos, um maior refino da malha apenas aumentaria os custos computacionais, tornando a simulação mais lenta. Como regra geral, se ao refinar a malha os resultados variarem na ordem de 1 a 3%, eles podem ser considerados aceitáveis. Já em relação à forma, deve-se ter em mente que os cálculos realizados pelos softwares de MEF levam em consideração o estado que esses elementos se encontravam quando da sua formulação. Quanto mais próximos da forma idealizada (um triângulo ou tetraedro equiláteros, quadrados, cubos, etc.), mais precisos serão os resultados alcançados. Logo, elementos muito distorcidos devem ser evitados.

2.4.1 O método dos elementos finitos na engenharia agrícola

De acordo com o trabalho desenvolvido por Velloso *et al.* (2018), o Método dos Elementos Finitos, já bastante utilizado em áreas como a engenharia mecânica e civil, é ainda pouco empregado na engenharia agrícola. Desse modo, com o intuito de disseminar o uso dessa ferramenta, os autores selecionaram trabalhos nas áreas de mecanização agrícola, processamento de produtos agrícolas e mecânica dos solos, que exemplificam de que maneiras

o MEF pode ser aplicado nesta engenharia. Algumas das aplicações e benefícios, por área, são apresentadas a seguir.

- Mecanização agrícola

Nesta área, o MEF pode ser aplicado com dois objetivos: o de modelar e simular a interação entre plantas e implementos, para que se possa prever os comportamentos biológicos envolvidos no cultivo, colheita e outros processos, e o de modelar e simular máquinas e implementos agrícolas, de modo a otimizar suas estruturas e seus processos produtivos. Um exemplo da primeira aplicação é a modelagem de pés de café e de azeitona, a fim de simular a interação dessas plantas com os equipamentos de colheita e aumentar a eficiência do processo (VELLOSO *et al.*, 2018). Ademais, um exemplo da segunda aplicação está no artigo elaborado por Patuk *et al.* (2020), onde o MEF foi utilizado para melhorar o fator de segurança e para selecionar as propriedades ideais do material que seria empregado em um aplicador de fertilizante de colocação profunda (Figura 17).

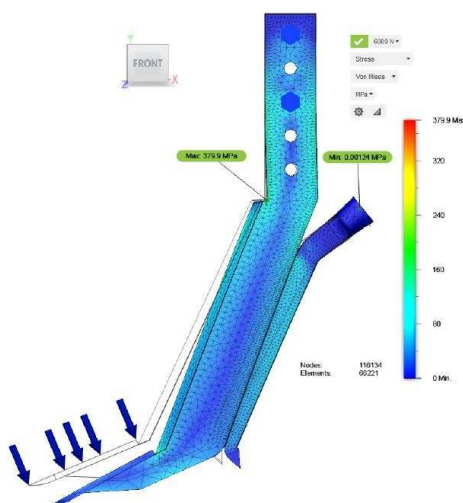


Figura 17 – Resultado da análise estática de um aplicador de fertilizante.
Fonte: Adaptado de Patuk *et al.* (2020)

- Processamento de produtos agrícolas

Quanto a esta área, umas das opções de aplicação do MEF é na predição do comportamento de grãos de café durante a secagem, o que permite estimar a cinética da secagem, a redução de volume, além dos danos mecânicos que podem causar desperdícios e reduzir o valor de mercado do produto (VELLOSO *et al.*, 2018). Adicionalmente, podem ser realizadas análises modais em melancias com o intuito de prever o seu estado de maturação. Para auxiliar nessa tarefa, Abbaszadeh *et al.* (2014) utilizaram o MEF para encontrar o melhor

local para medir a excitação e resposta de vibração, e também para analisar as formas modais da fruta (Figura 18).

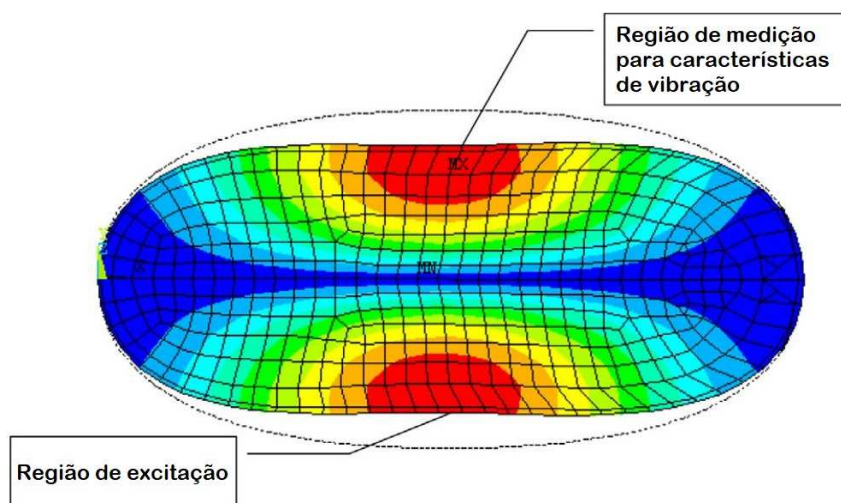


Figura 18 – Solução nodal para vetor de deslocamento.
Fonte: Adaptado de Abbaszadeh et al. (2014)

- Mecânica dos solos

Por fim, na área de mecânica dos solos, uma das aplicações do MEF é na estimativa da forma, magnitudes e distribuição das pressões no solo superficial com a passagem de pneus com diferentes pressões de enchimento, cargas no pneu e considerando diferentes teores de água no solo (Figura 19) (CUETO *et al.*, 2016). Outro exemplo de aplicação do MEF é na representação do movimento de pesticida no solo a fim de prever sua concentração durante o tempo de efetividade (VELLOSO *et al.*, 2018).

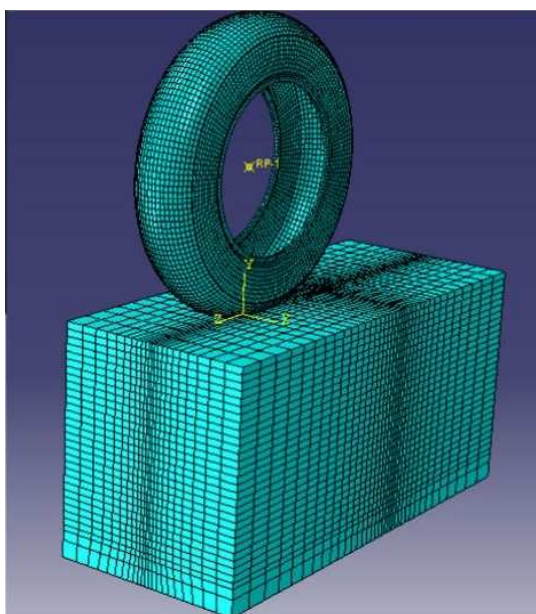


Figura 19 – Modelo pneu-solo discretizado.
Fonte: Cueto *et al.* (2016)

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho se dividiu em quatro etapas: (1) determinação da força de tração, (2) delimitação dos parâmetros construtivos do afofador de mandioca, (3) definição das condições de contorno da simulação e (4) geração e verificação da malha de elementos finitos.

3.1 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE TRAÇÃO

Como apresentado na Revisão de Literatura, existem algumas formas de se obter a força a que um implemento está sujeito durante a operação, sendo duas delas a consulta a manuais de fabricantes e a utilização de fórmulas e tabelas. Esses dois métodos retornam apenas valores estimados, mas que se tornam particularmente interessantes em situações de projeto, onde o equipamento ainda não foi plenamente desenvolvido e fabricado e, conseqüentemente, não podem ser realizadas verificações mais precisas de tais forças utilizando o implemento real.

Empregando-se o primeiro método, foi visto que com uma regulagem de 20mm no aperto da mola, o sistema de *Shock Control* possibilita um esforço máximo de 1800kgf na extremidade inferior da haste (Figura 20). Além disso, foi dito que a mola pode ser comprimida de até 24mm caso o sistema esteja desarmando com frequência. Porém, não foi dita a força na haste correspondente a essa compressão máxima.

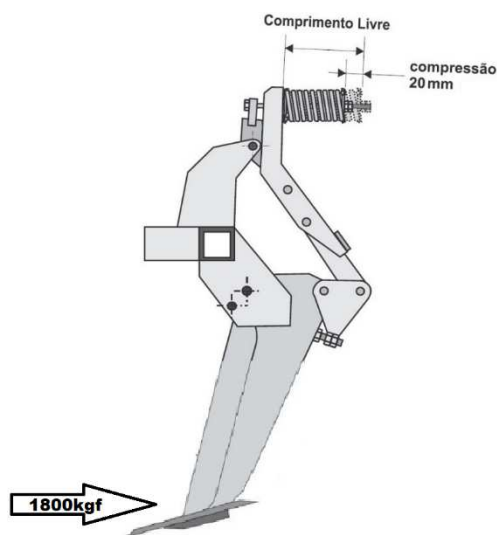


Figura 20 – Esforço máximo no afofador Ikeda para a respectiva compressão na mola.
Fonte: Adaptado de Ikeda (2021)

Então, considerando que a mola utilizada no dispositivo apresenta comportamento linear, a força a que a região inferior da haste suporta varia proporcionalmente com o valor da compressão na mola. Dito isso, foi gerada a Tabela 2 com diversos valores dessa compressão, e as respectivas forças máximas suportadas pela haste:

Tabela 2: Forças máximas suportadas pelo implemento e as respectivas compressões na mola do sistema de *Shock Control* do afofador Ikeda.

Compressão na mola	Força máxima
16mm	1440kgf
17mm	1530kgf
18mm	1620kgf
19mm	1710kgf
20mm	1800kgf
21mm	1890kgf
22mm	1980kgf
23mm	2070kgf
24mm	2160kgf

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Ou seja, ao comprimir em 24mm a mola do sistema de *Shock Control*, é possível fazer com que a extremidade inferior da haste suporte uma força máxima de aproximadamente 2160kgf durante a utilização do implemento.

Por outro lado, a aplicação do segundo método torna necessária a definição de uma potência para o trator que será utilizado e da velocidade com que a operação seria realizada. Considerando, então, um trator com potência de 75cv (55,2kW) no motor, uma velocidade de trabalho de 5km.h⁻¹, e utilizando os dados da Tabela 1, foi obtido o valor da potência na barra de tração, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Potências estimadas no trator e velocidade de trabalho.

Parâmetro	Valor
Potência do trator	75cv (55,2kW)
Potência estimada na TDP	62,25cv (48,8kW)
Potência estimada na barra de tração (considerando solo arado e trator 4x4)	46,7cv (34,3kW)
Velocidade de trabalho	5km.h ⁻¹

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Assim, aplicando a Equação 1, o valor da força de tração foi obtido:

$$P_{cv} = \frac{Força_{kgf} \cdot V_{km/h}}{270}$$

$$46,7 = \frac{Força_{kgf} \cdot 5}{270}$$

$$Força_{kgf} = 2521,8kgf$$

Ou seja, ao realizar uma operação de subsolagem a uma velocidade de 5km.h^{-1} e usando um trator de 75cv (valores obtidos para um afofador de mandioca similar ao do presente trabalho), a Força de Tração desenvolvida pelo trator na barra de tração e, conseqüentemente, no implemento, é de aproximadamente 2521,8kgf. Esse valor de força equivale a 24730,41N mas, para arredondar, foi usado nas simulações o valor de 25kN.

3.2 DELIMITAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO AFOFADOR DE MANDIOCA

A presente seção foi dividida em três tópicos. No primeiro deles, foram definidas variáveis gerais, que serviram como ponto de partida para a definição das outras dimensões. Já no segundo e terceiro, foram discutidos e selecionados os parâmetros da haste e parâmetros da asa do afofador, respectivamente.

Alguns dos parâmetros do órgão ativo tiveram seus valores prontamente definidos, enquanto que em outros, foram definidos valores próximos aos que eles poderiam assumir. A causa disso foi que a alteração de certas variáveis influenciaram na determinação de outras, de modo que a determinação das grandezas finais ocorreu apenas durante a modelagem 3D.

3.2.1 Seleção dos parâmetros gerais

Sabendo que o espaçamento das linhas durante o plantio de mandioca geralmente varia de 800mm a 1200mm, o valor definido para o comprimento da asa foi de 1400mm. Com esse valor, espera-se que não haja problemas no desenraizamento de linhas separadas de até, aproximadamente, 1000mm.

Quanto à altura da haste, bem como as posições e diâmetros dos furos por onde ela será fixada ao implemento, os valores foram definidos tomando por base um afofador de mandioca comercial. Desse modo, o órgão ativo modelado poderá ser acoplado a um chassi preexistente, de forma que seja mantida, também, a regulagem da profundidade de trabalho. Além disso, na chapa de ligação (Figura 4), cuja função principal é a conexão não permanente entre a haste e a asa, foram também usadas dimensões próximas às de um afofador comercial.

Por fim, no que concerne à espessura das chapas, foi definido um valor de 1" (25,4mm) para a haste e asa, e de $\frac{3}{4}$ " (19,05mm) para a chapa de ligação.

3.2.2 Seleção dos parâmetros da haste

Em se tratando da haste, foi visto que elas têm pouca influência sobre o modo geral como o solo é desprendido (WEILL, 2015). Entretanto, a geometria escolhida afeta a potência

que é requerida do trator, sendo a de maior demanda energética a reta vertical, passando então pela haste reta inclinada e haste curva, até chegar na parabólica, que apresenta a menor demanda de potência (SILVA *et al.*, 2015).

Por outro lado, Sasaki, Gonçalves e Bentivenha (2005) observaram ligeiras vantagens da haste reta inclinada em comparação à haste parabólica: um maior desempenho quanto à profundidade efetiva de trabalho e à área de solo que era mobilizada. Além disso, Raper (2005) verificou que ao inclinar uma haste reta de um ângulo próximo ao da haste curva, as demandas de força apresentaram valores comparáveis. Adicionalmente, considerando questões de fabricação e utilização do implemento, o uso da geometria parabólica na haste de um afoador de mandioca, que detém dimensões muito maiores que as de um subsolador de solo convencional, levaria a uma elevação no consumo de material e, conseqüentemente, nos custos de fabricação e no peso do equipamento. Assim, a geometria definida para a haste foi a reta inclinada, sendo o ângulo da haste definido em 80°.

Quanto a borda de corte na face frontal da haste, ela foi feita por chanfros no próprio material da haste, e ao longo de todo o comprimento da borda para que não fossem criados concentradores de tensão na região. Ademais, de modo a evitar a aderência de solo na borda de corte, para o ângulo de cunha foi escolhido um valor de, no máximo, 50°, conforme definido por Zelenin (1950, apud GILL E BERG, 1967).

3.2.3 Seleção dos parâmetros da asa

O primeiro dos parâmetros que foram definidos foi o ângulo de varredura, que é formado na região central da asa. Como discutido por Gill e Berg (1967), a asa é geralmente inclinada para trás de 20° a 50°, de modo a permitir a autolimpeza da mesma. Porém, um dos efeitos dessa inclinação é que qualquer aumento no ângulo de ataque da asa fará com que as laterais da mesma fiquem a uma profundidade menor. Quanto mais inclinada para trás é a asa, maior é esse efeito, o que pode acabar se tornando um inconveniente em determinadas aplicações.

Por outro lado, o aumento do ângulo de ataque da asa leva a um aumento também da altura de elevação. Sendo assim, de modo a possibilitar a variação da altura de elevação sem que se eleve muito a altura das extremidades da asa, foi usado um valor próximo a 140° para o ângulo de varredura.

Com relação à já citada altura de elevação, foram consideradas as informações disponibilizadas por Spoor (2006). Para ele, esse parâmetro varia de 25mm até 100mm, sendo

os valores mais baixos utilizados quando menos desagregação é necessária, e os valores mais altos usados quando se trabalha em maiores profundidades e se busca produzir grandes perturbações no solo. Dito isso, foi buscada uma altura de elevação de pelo menos 40mm, tendo em mente que a mesma poderá ser incrementada durante a operação do equipamento ao se aumentar o ângulo de ataque.

Já em relação à geometria de corte da asa, conforme reportado por Chase (1942, apud GILL E BERG, 1967) um chanfro na região superior da mesma leva à ocorrência de uma região de baixa pressão, que favorece a aderência de solo e aumenta a força de tração na ferramenta. Além disso, ao usar essa geometria foi percebida uma maior necessidade de afiação da borda. Por isso, o chanfro foi aplicado na região inferior da asa.

Ademais, foi considerado o trabalho de Ucgul, Fielke e Saunders (2015), onde abordaram a influência da altura da aresta de corte, do ângulo de folga inferior e do comprimento do *underside rub* nas forças de tração e vertical. Como visto na Revisão de Literatura, quanto menor a altura da aresta de corte, menores serão a força de tração e a força vertical para cima. Assim sendo, procurou-se manter esse valor no mínimo. Já em relação ao ângulo de folga inferior, percebeu-se que os valores mais proveitosos são aqueles próximos a zero ou ligeiramente positivos, visto que conferem uma ligeira redução na força de tração, mas uma grande redução na força vertical para cima. Porém, lembrando que o chanfro será feito na região inferior da asa, um ângulo inferior muito positivo se torna inviável, visto que diminuiria muito a espessura da chapa. Logo, foram almejados valores próximos a zero. Por fim, com relação ao comprimento do *underside rub*, foi observado que a sua variação não tem influência expressiva nas forças. Logo, desde que o ângulo de folga inferior seja de fato definido como próximo a zero, não foi definido um valor específico para esse comprimento.

Em se tratando do ângulo de ataque, pôde ser observado no trabalho produzido por Godwin (2007) que a sua diminuição tende a reduzir as forças horizontais e verticais. Além disso, ele afeta o grau de distúrbio que é gerado no solo, uma vez que a definição da altura de elevação e da largura da asa influenciam no valor do mesmo. Porém, essa angulação que é, de forma geral, fixa, pode ser alterada ao variar a inclinação do chassi do implemento. É o que ocorre, por exemplo, no afofador Ikeda (2021), cujo ângulo de ataque padrão é de 15°, mas que pode ser reduzido para 10°, ou aumentado para até 25°, a depender das condições do solo. Posto isso, foi definido um ângulo de ataque de aproximadamente 15° para a asa dimensionada.

Por fim, ao observar a borda de corte da asa de um afofador usado (Figura 21), percebe-se que as extremidades se encontravam mais desgastadas do que a região central. Assim, é possível inferir que, durante a operação, o escoamento de solo sobre a ferramenta na região central da asa apresenta velocidade igual ao deslocamento do trator. Porém, a medida que o solo escoava do centro para as extremidades, sua velocidade aumenta levando, também, a um incremento do desgaste causado. Por conseguinte, de modo a barrar esse aumento de velocidade do solo nas extremidades da asa e, assim, reduzir o desgaste causado, foram reduzidos para zero o ângulo de inclinação dessas regiões.



Figura 21 – Afofador de mandioca usado.
Fonte: MF Rural (2021)

A Tabela 4 resume a faixa de valores para cada um dos parâmetros construtivos e as geometrias que foram utilizadas na modelagem 3D do afofador de mandioca.

Tabela 4 – Faixa de valores dos parâmetros construtivos do afofador modelado.

Parâmetro	Configuração
Comprimento da asa	1400mm
Altura da haste	1000mm
Espessura da haste	25,4mm
Espessura da asa	25,4mm
Espessura da chapa de ligação	19,05mm
Geometria da haste	Reta inclinada
Ângulo da haste	$\approx 80^\circ$
Ângulo de cunha da haste	$\leq 50^\circ$
Ângulo de varredura da asa	$\approx 140^\circ$
Altura de elevação	≥ 40 mm
Geometria de corte da asa	Chanfro na borda inferior
Altura da aresta de corte da asa	≈ 0 mm
Ângulo de folga inferior	≈ 0 mm
<i>Underside rub</i>	Valor não definido
Ângulo de ataque da asa	$\approx 15^\circ$

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Uma vez delimitados os parâmetros construtivos do afofador de mandioca, ficou possibilitada a modelagem 3D do implemento. Para isso, foi utilizado um dos softwares incluídos no pacote de programas do ANSYS® Student 2021 R2: o ANSYS® SpaceClaim. Depois de efetuada essa modelagem, foi realizada uma análise por elementos finitos para verificar a resistência estrutural do modelo e, para tal, utilizou-se outro programa que compõe o ANSYS® Student 2021 R2: o ANSYS® Mechanical. Entretanto, foi necessário definir antes as condições de contorno da simulação e gerar uma malha de elementos finitos.

3.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO

Para a realização das simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos, algumas medidas foram tomadas. A primeira delas é que, já que os parafusos não foram dimensionados no presente trabalho, os furos da chapa de ligação e da asa, necessários para aparafusar as chapas uma a outra, foram suprimidos. Com isso, a geração da malha e análise dos esforços pôde ser simplificada.

Além disso, tornou-se necessário estabelecer como a conexão entre as chapas seria realizada. Decidiu-se, por manter a condição de contato pré-definida pelo programa, que é o tipo de contato unido. Nesse tipo de contato, as superfícies não se separam e nem deslizam entre si, comportando-se como se estivessem coladas (ANSYS INC., 2021). Essa condição de contato foi aplicada nas duas interfaces de chapa do modelo.

No que se refere à restrição usada no modelo, foi empregado o suporte cilíndrico, sendo esta restrição aplicada aos dois furos da haste, que são os locais utilizados para fixar a haste ao chassi do implemento. De modo a exercer uma função similar à de pinos, as direções radial e axial do suporte foram definidas como fixas, enquanto que a direção tangencial foi definida como livre. Ou seja, os diâmetros e o movimento axial das superfícies dos furos estavam restringidos, mas eles ainda poderiam rotacionar no próprio eixo.

Já em relação à força, foi usado o valor de 25kN, aplicado à face superior da asa e na direção oposta ao movimento do implemento. Ou seja, a força foi aplicada na direção do eixo Z, mas no sentido contrário, como pode ser visualizado na figura a seguir.

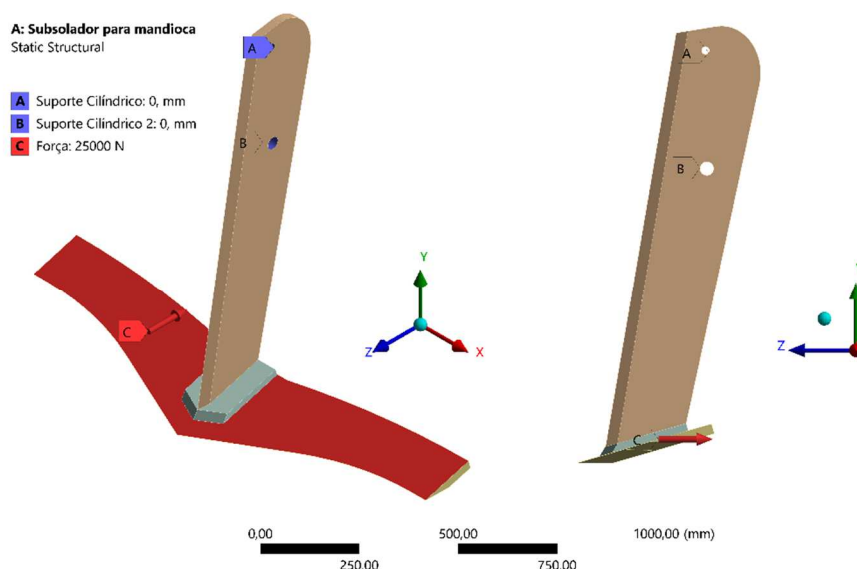


Figura 22 – Localização das restrições e da força.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Por fim, foi necessário determinar o material do implemento durante a simulação. Alguns dos requisitos de projeto para os órgãos ativos do afoador são resistência mecânica (para resistir aos esforços durante a operação), resiliência (para que não deforme plasticamente em caso de impacto com pedras ou galhos) e resistência ao desgaste (para aumentar a vida útil do equipamento). Porém, não foi realizada uma seleção minuciosa de materiais, considerando parâmetros como custo-benefício e facilidade de obtenção, ou levando em conta os tratamentos térmicos pelos quais eles poderiam passar. Sabendo que, de acordo com um fabricante de afoadores de mandioca, o material utilizado na asa e haste é o aço ASTM A36, foi utilizado na simulação o Aço Estrutural, disponível na biblioteca de materiais do ANSYS®, cujas propriedades são similares às do aço ASTM A36 e estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades do Aço Estrutural.

Aço Estrutural	
Massa específica	7850kg/m ³
Módulo de elasticidade	200GPa
Módulo de cisalhamento	76,923GPa
Limite de escoamento	250MPa
Limite de resistência à tração	460MPa
Coefficiente de Poisson	0,30

Fonte: Ansys Inc. (2021)

3.4 GERAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos do implemento foi gerada automaticamente pelo programa. Porém, algumas configurações foram modificadas para que a mesma se tornasse mais uniforme e, assim, os resultados ficassem mais próximos da realidade. De forma

particular, foi definido que os elementos seriam todos tetraédricos, e que o tamanho dos elementos da asa, especificamente, seriam de 10mm. As outras configurações foram definidas de forma geral para todo o modelo, e estão listadas na Tabela 6, em tradução livre do termos em inglês.

Tabela 6: Propriedades gerais da malha do afoador.

Propriedade	Configuração
Preferência de física	Mecânica
Ordem do elemento	Quadrática
Tamanho do elemento	20mm
Usar dimensionamento adaptável	Sim
Resolução	Padrão
Transição	Rápida
Centro de ângulo de amplitude	Médio

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Assim, foi gerada uma malha com número de nós igual a 86397, e número de elementos igual a 52907, que pode ser visualizada na Figura 23.

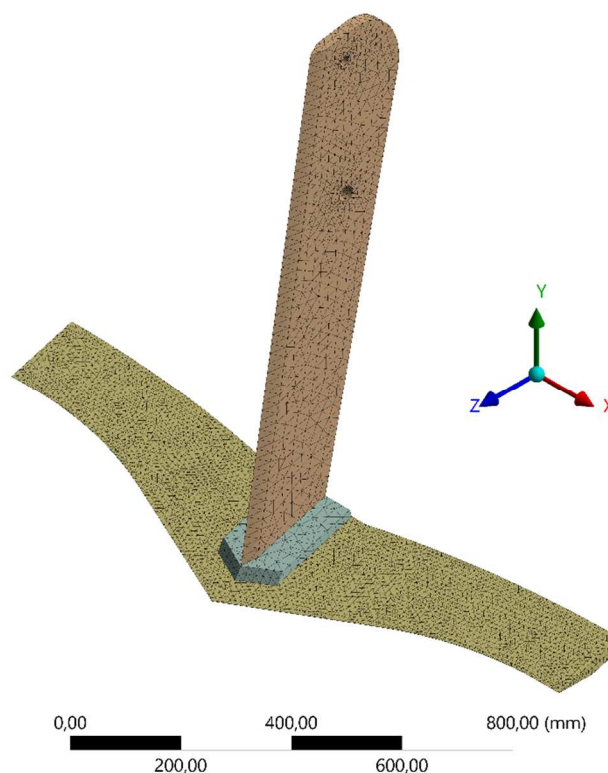


Figura 23 – Malha de elementos finitos do modelo.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para verificar a qualidade da malha, foram observadas a Qualidade do Elemento (*Element Quality*) e a Distorção (*Skewness*). Segundo Ansys (2021), a Qualidade dos Elementos é uma métrica composta que varia de 0 a 1, sendo 0 a indicação de um elemento que tem volume

nulo ou negativo, e 1 a indicação de um elemento cúbico ou quadrado perfeito. Já a Distorção se relaciona com o quão próxima uma face ou célula está do ideal (ser um triângulo equilátero ou um quadrado equiangular), sendo 0 o valor ideal, mas já apresentando um bom valor quando está dentro da faixa de valores de 0,25 a 0,5.

Posto isso, foram geradas plotagens com os valores máximos e mínimos de Qualidade dos Elementos e de Distorção, como indicado na Figura 24.

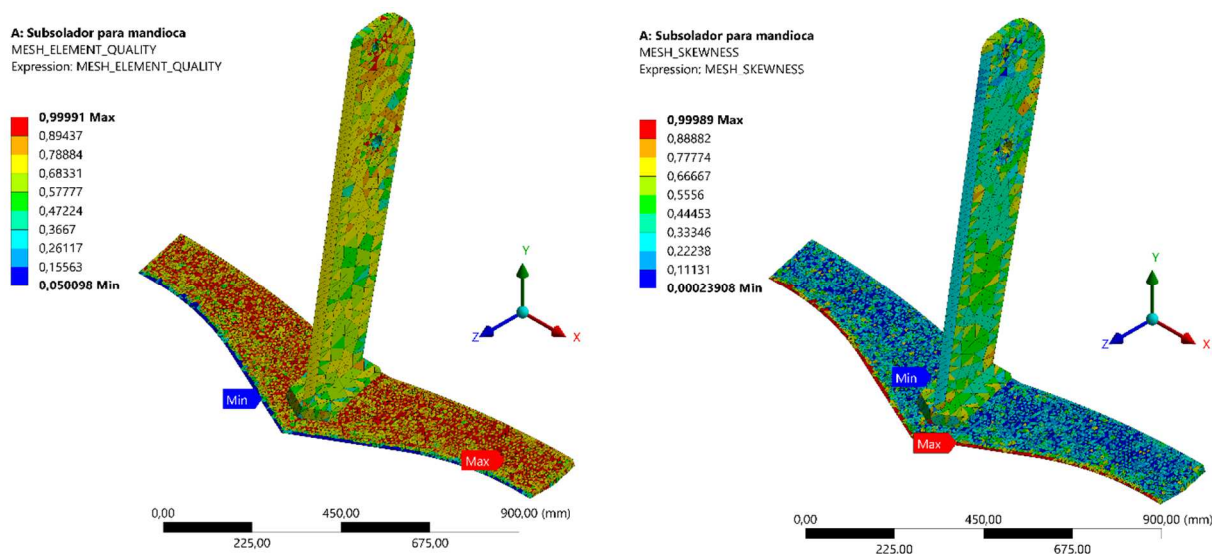


Figura 24 – Plotagens da Qualidade dos Elementos e da Distorção.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Não foi indicado na Figura 24, mas a Qualidade dos Elementos apresentou um valor médio de 0,80774, com um desvio padrão de 0,13898, enquanto que a Distorção apresentou um valor médio de 0,26653, com um desvio padrão de 0,16725.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho. Em primeiro lugar, é tratado sobre os componentes do órgão ativo do afofador, modelados em uma ferramenta de CAD e, por fim, aborda-se sobre os resultados obtidos com as análises por elementos finitos, realizadas em uma ferramenta de CAE.

4.1 MODELAGEM 3D E MONTAGEM DO ÓRGÃO ATIVO DO AFOFADOR DE MANDIOCA

Após a delimitação das dimensões do afofador de mandioca, foi realizada a sua modelagem 3D. Assim, cada um dos componentes do órgão ativo do afofador pôde ser produzido e unido em uma montagem, resultando no exposto a seguir:

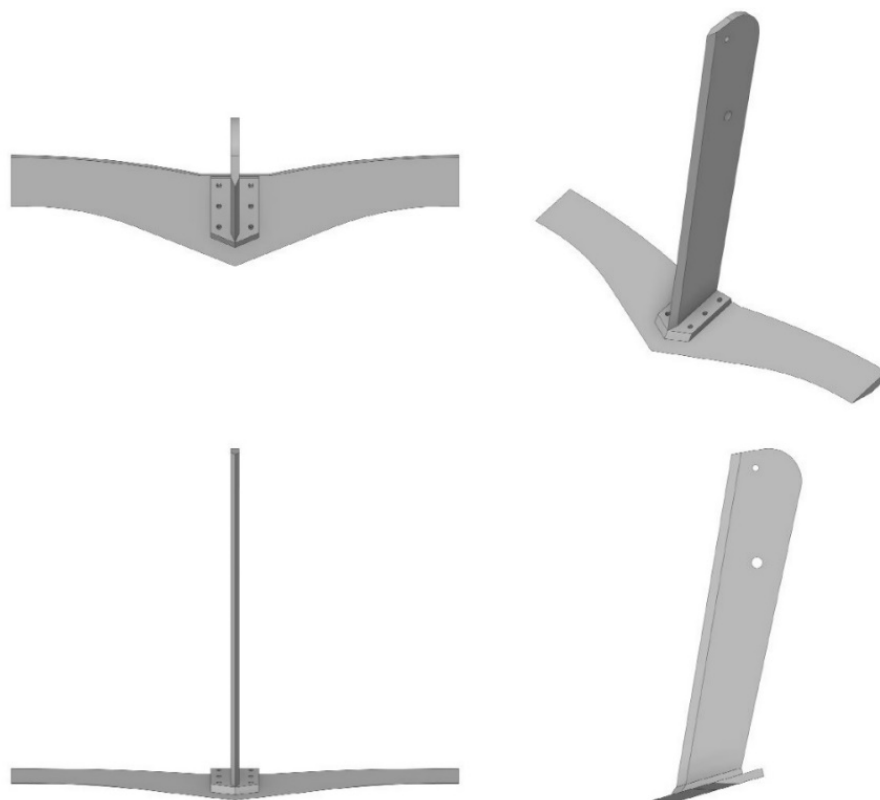


Figura 25 – Modelo 3D do afoador.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Como se nota, foram introduzidos os furos que servem para aparafusar a haste à asa. Porém, seus diâmetros e posições foram aplicados com base em um afoador comercial, uma vez que os parafusos não foram dimensionados no presente trabalho. Em seguida, é apresentado o desenho técnico de cada uma das chapas.

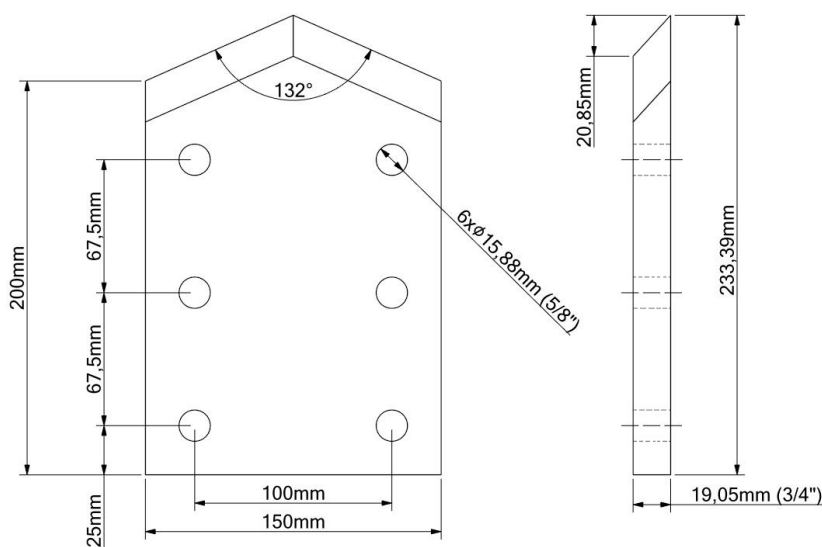


Figura 26 – Desenho técnico da chapa de ligação.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Como pode ser visto na Figura 26, em vez de uma chapa completamente retangular, foi introduzido um ângulo de varredura de 132° na extremidade que vai de encontro ao solo, bem como um chanfro em tais arestas. Embora a chapa de ligação seja pequena em comparação com a asa, ela também entra em contato com o solo, de modo que a autolimpeza da mesma pode ser vantajosa. Assim, com a adição do ângulo de varredura, espera-se uma ligeira redução na resistência ao deslocamento da ferramenta no solo.

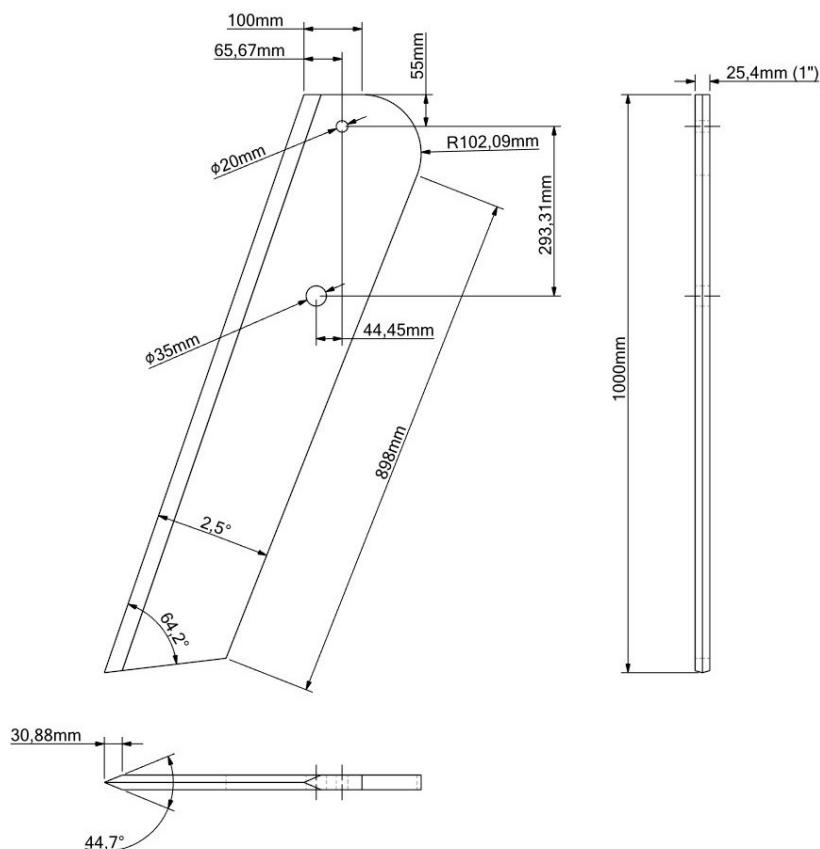


Figura 27 – Desenho técnico da haste.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Ao observar a Figura 27, percebe-se que o ângulo de cunha definido para a haste foi de $44,7^\circ$, que é inferior a 50° , como previamente estabelecido que seria. Uma vez que a haste estará sujeita à esforços de flexão, buscou-se não utilizar um valor muito menor que 50° pois, assim, evita-se uma maior redução na seção transversal da haste e, conseqüentemente, não se eleva tanto a magnitude da tensão que decorre do momento fletor. Além disso, os diâmetros e posições dos furos não são de forma alguma fixos. Eles podem ser modificados para que a haste seja fixada em outro chassi, caso necessário.

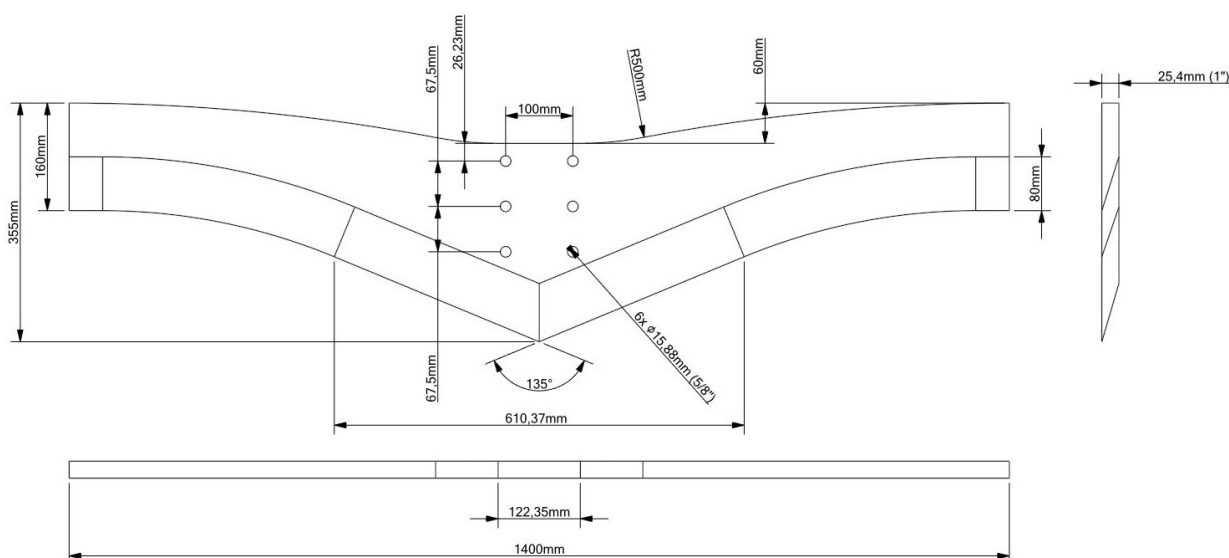


Figura 28 – Desenho técnico da asa.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Observa-se na Figura 28 que o ângulo de varredura definido para a asa foi de 135° . Este valor poderia ser maior, o que diminuiria a “ponta” que existe na frente da asa. Porém, vale destacar que alguns dos afoadores de mandioca comerciais (Figura 1) são dotados de pequenos dentes, aparafusadas abaixo da asa, que facilitam a penetração da ferramenta no solo. Por consequência, evitou-se usar um ângulo de varredura maior justamente para que essa ponta fosse gerada e facilitasse o afundamento do protótipo no solo.

Certas dimensões relevantes durante a operação do afoador, como o ângulo de ataque da asa e a altura de elevação, só podem ser observados quando o órgão ativo está montado e disposto na posição de trabalho. Na Figura 29, abaixo, estão indicadas essas e outras dimensões importantes.

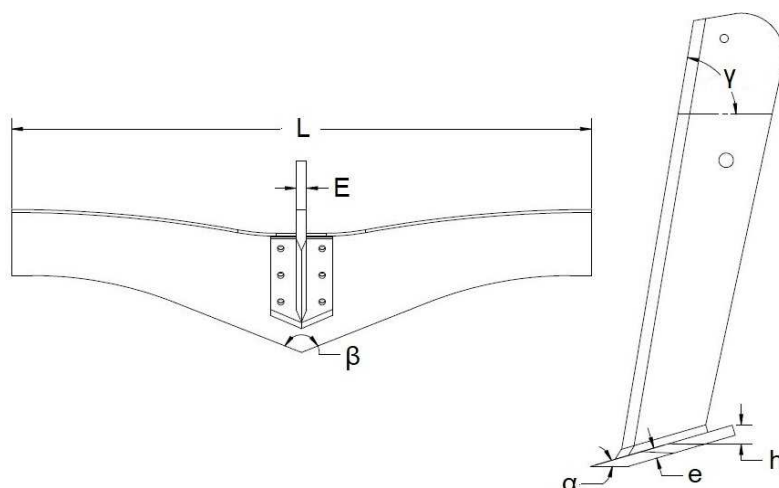


Figura 29 – Geometria do protótipo de afoador de mandioca.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Na Tabela 7, por sua vez, estão listados os valores de cada uma das dimensões indicadas na figura.

Tabela 7 – Dimensão dos parâmetros do afofador.

Parâmetro	Dimensão
Espessura da asa (e)	25,4mm
Comprimento (L)	1400mm
Altura de elevação mínima (h)	45,04mm
Ângulo de ataque da asa (α)	16,35°
Ângulo de varredura (β)	135°
Ângulo da haste (γ)	80,54°
Espessura da haste (E)	25,4mm

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Dessa maneira, pode-se observar que o ângulo de ataque e a altura de elevação mínima padrões do implemento são de 16,35° e 45,04mm, respectivamente. Todavia, esses valores podem ser modificados durante a operação, caso necessário, o que traz uma possível vantagem para a asa projetada: a auto afiação. Quando a aresta da borda de corte começar a ficar cega, devido ao uso normal do equipamento, basta trabalhar com um ângulo de ataque inferior a 16,35°. Isso propiciará um desgaste maior da região inferior da asa, como consequência do escoamento do solo, e espera-se que seja suficiente para tornar a borda afiada novamente.

Além disso, a palavra “mínima” é usada para caracterizar a altura de elevação pois, além de ser possível aumentá-la, ao se ampliar o ângulo de ataque, a região central da asa já possui, naturalmente, uma altura de elevação maior. Isso ocorre por conta da largura da asa que, como exposto nas figuras, é maior no centro do que nas extremidades.

4.2 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA ESTRUTURAL UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Esta seção trata do pós-processamento do modelo gerado. Assim, são interpretados os resultados dos cálculos numéricos realizados para o implemento modelado e, em seguida, são analisados os resultados para simulações que consideram uma redução da espessura da asa.

4.2.1 Tensões e deformações no afofador projetado

Após a geração da malha de elementos finitos do modelo 3D, foi dado o comando para que o software iniciasse o processamento do modelo. Como resultado, as soluções foram geradas e apresentadas graficamente, sendo aqui exibidas as plotagens de Tensão Equivalente, na Figura 30(a), e Deformação Total, na Figura 30(b).

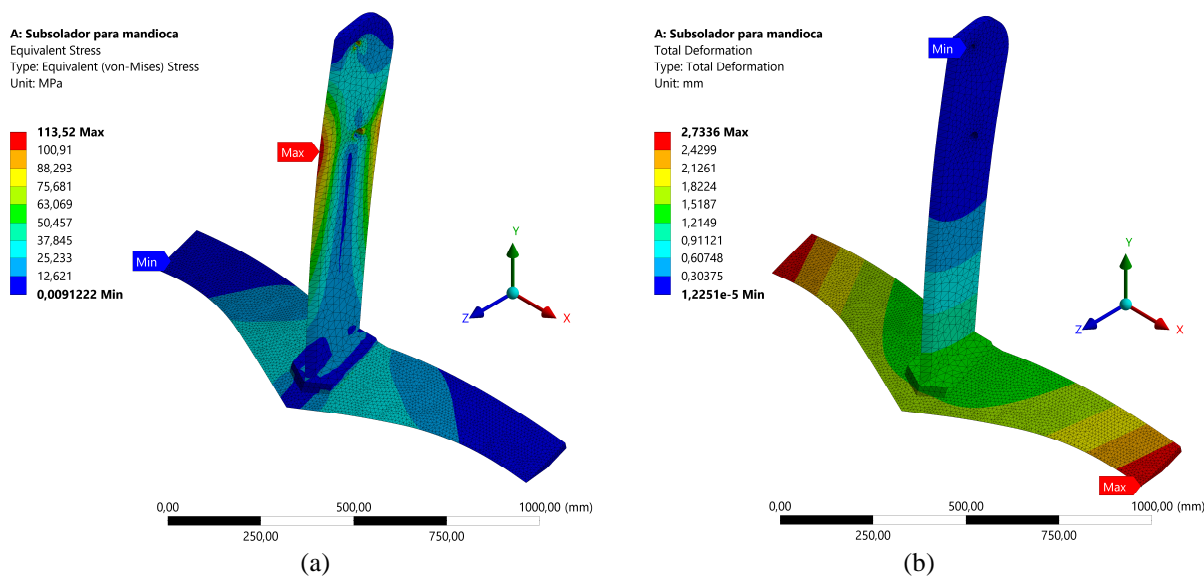


Figura 30 – Plotagens da (a) Tensão equivalente e (b) Deformação Total.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

De acordo com a simulação realizada, os maiores valores de tensão ocorram na haste, sendo a região frontal submetida a esforços de tração, e a região traseira, a esforços de compressão. Além disso, o valor máximo de tensão, de 113,52MPa, ocorreu na borda de corte, como indicado na Figura 30(a). Assim, considerando o fator de segurança como a razão entre a tensão de escoamento do material e a tensão máxima obtida na simulação, para uma força de 25kN aplicada à asa, e lembrando que o material considerado detém uma tensão limite de escoamento de 250MPa, foi obtido um fator de segurança de 2,2 para o modelo desenvolvido. Adicionalmente, a Figura 30(b) exhibe o deslocamento dos elementos do modelo em relação às posições originais e, como indicado, os valores máximos de deformação ocorreram nas extremidades da asa, com magnitude de 2,7336mm.

Posto isso, considerando a utilização do implemento desenvolvido em condições usuais de operação, quando este não é submetido a carregamento extremos, e tendo em vista o esforço de tração aplicado, as considerações realizadas e o critério de análise utilizado durante a simulação, espera-se que o órgão ativo dimensionado para um afoador de mandioca não se deforme plasticamente ou se rompa durante o uso.

Por outro lado, sabe-se que o solo é um material heterogêneo, de modo que pequenas variações de sua composição, durante a operação, podem fazer variar os esforços a que o implemento está sujeito. Assim, deve-se levar em conta que a haste estará sujeita ao fenômeno da fadiga, mas somente a realização de estudos da ocorrência desse fenômeno no equipamento poderão indicar qual o tempo de vida até a ruptura do mesmo.

4.2.2 Tensões e deformações considerando espessura reduzida

É importante ressaltar que a natureza do desgaste que ocorre nos componentes do afofador que estão em contato direto com o solo é por abrasão, que é uma remoção de material devido ao movimento de partículas duras sobre um objeto. Assim, é natural imaginar que ocorrerá severa redução da espessura de tais componentes durante a utilização do implemento.

Pensando nisso, foram realizados cortes na face superior da asa, de modo a reduzir a espessura da mesma em 5%, 10%, 25% e, por fim, 40%. Uma vez que a espessura inicial da asa é de 25,4mm (1”), essas porcentagens corresponderam a reduções de 1,27mm, 2,54mm, 6,35mm e 10,16mm na espessura, respectivamente. Com tais reduções, esperou-se representar os desgastes que ocorrerão na face superior da asa a medida que o equipamento for usado.

Adicionalmente, as malhas das geometrias com espessura reduzida foram geradas utilizando-se as mesmas configurações previamente estabelecidas (tamanho dos elementos, sem refinamento, etc.), de modo a manter uma uniformidade nos resultados. Porém, a fim de estabelecer uma base de comparação antes de apresentar os resultados para as outras espessuras, é oportuno visualizar, na Figura 31, o gradiente de tensões da asa com as dimensões iniciais.

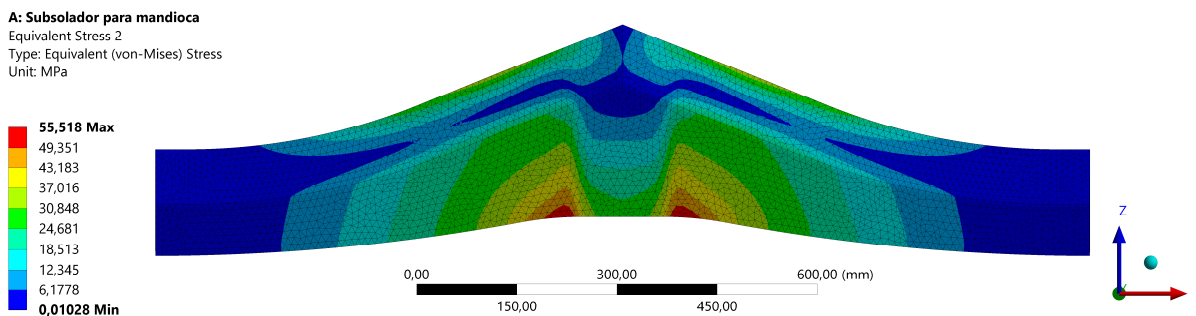


Figura 31 – Gradiente de tensões na asa com 1” de espessura.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Como se nota, os maiores valores de tensão ocorreram nas regiões vermelhas, próximas às bordas da chapa de ligação. Sabendo que uma das considerações iniciais foi a de que as chapas se comportariam como se estivessem coladas, é de se esperar que ocorra um “aumento da resistência” na área em que a asa e a chapa de ligação se encontram, tornando o local das altas tensões plausível. Ademais, considerando apenas as tensões que ocorreram na asa, pode-se dizer que a mesma apresentou um fator de segurança de 4,5.

Na figura a seguir são exibidas as asas com a espessura reduzida.

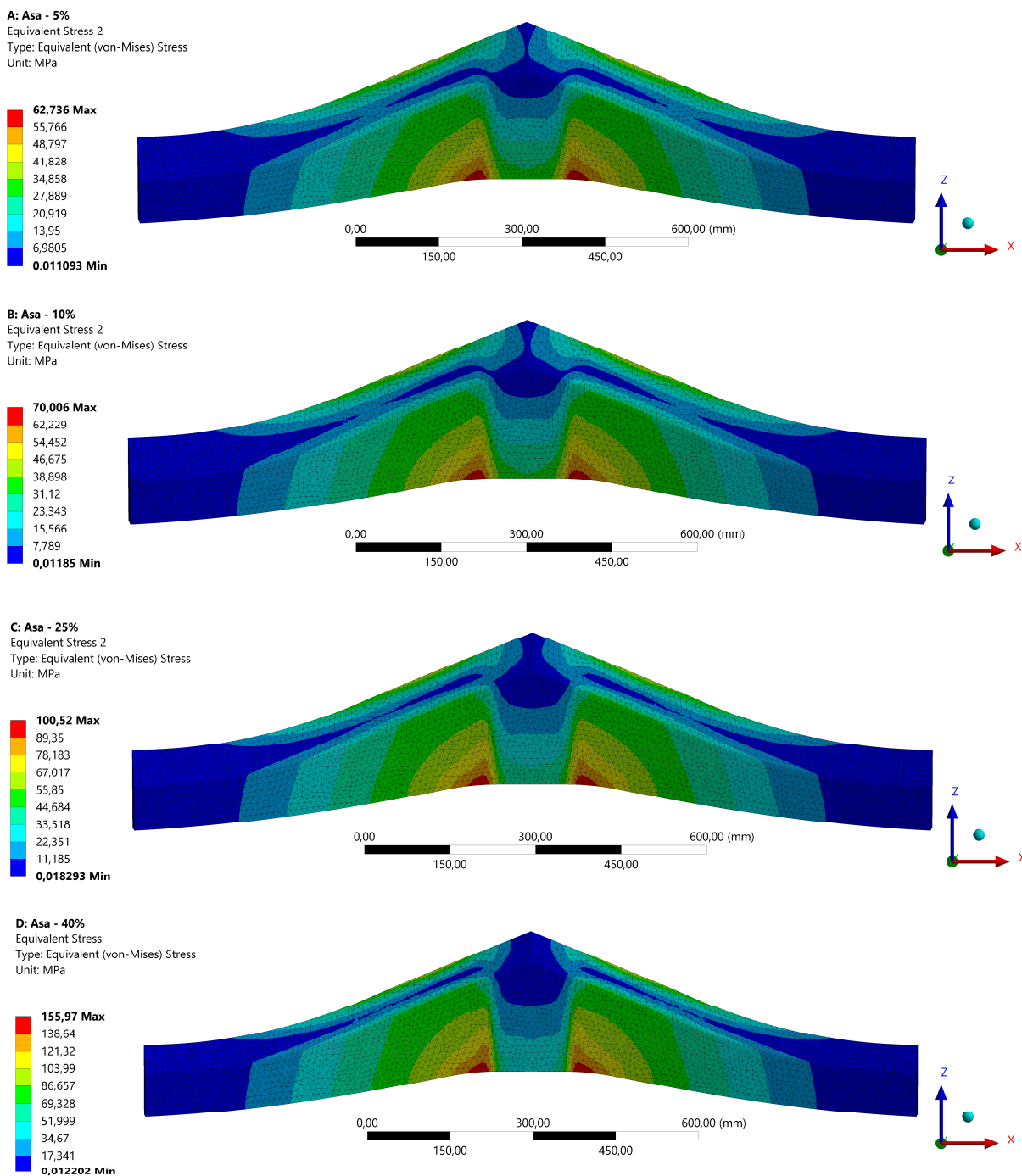


Figura 32 – Gradientes de tensão para asas com espessura reduzida de 5%, 10%, 25% e 40%.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Observa-se que as regiões em que as máximas tensões ocorrem não foi alterada. Porém, o valor de tais tensões aumentou cada vez mais, como era de se esperar, a medida que a espessura da chapa era diminuída. Da mesma forma, ao se calcular os fatores de segurança considerando apenas a asa, foram obtidos os valores de 3,98, 3,57, 2,49 e 1,6 para as asas reduzidas em 5%, 10%, 25% e 40%, respectivamente.

Quanto à deformação das extremidades da asa, pode ser visto na Figura 33 que ela aumentou desde 3,0315mm, para um desgaste de 5%, até o valor de 9,4839mm, quando o desgaste foi de 40%.

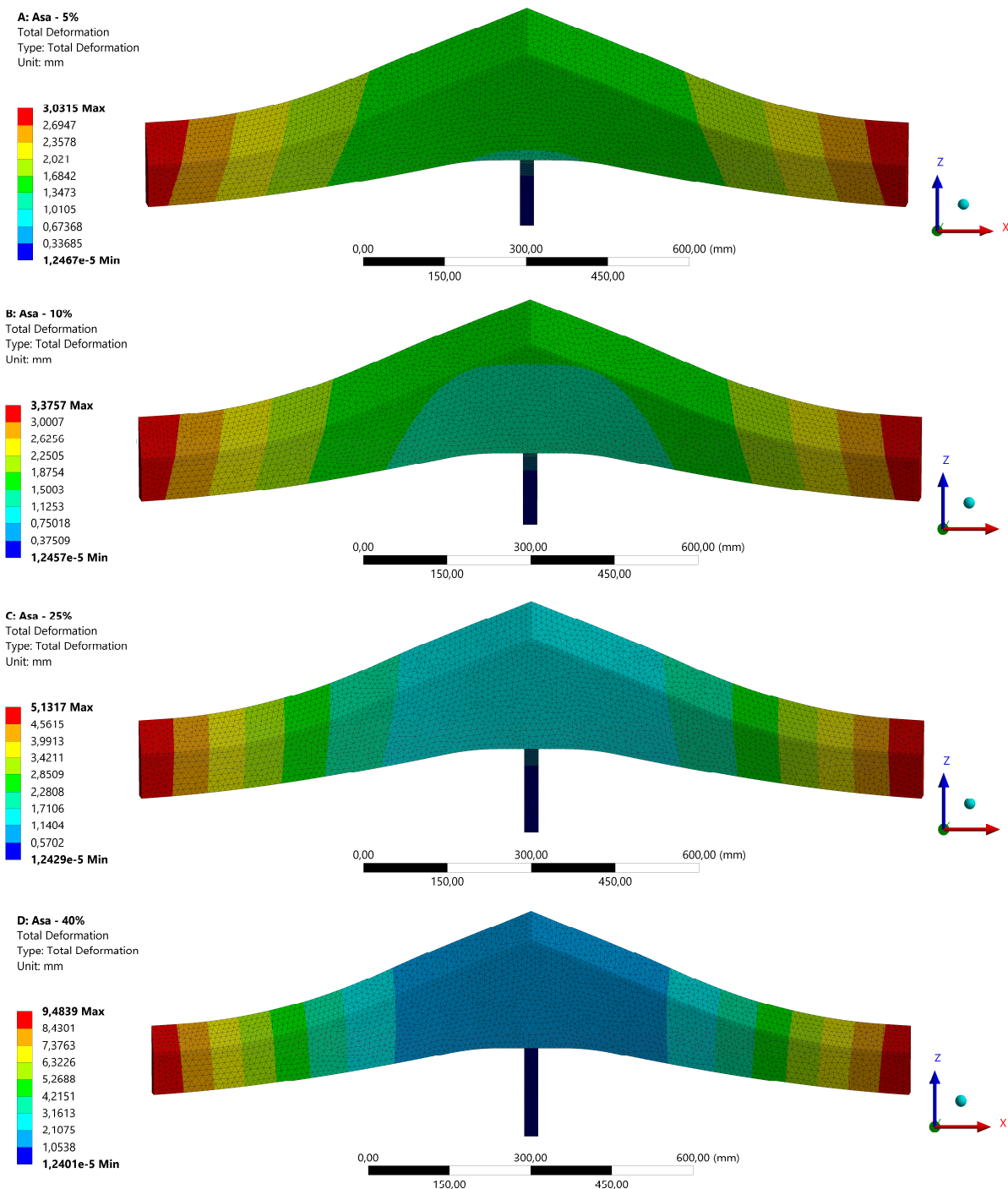


Figura 33 – Gradientes de deformação para asas com espessura reduzida de 5%, 10%, 25% e 40%.
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Conseqüentemente, pode-se inferir que mesmo com desgastes tão severos quanto uma redução de 40% na espessura da asa, o componente ainda apresenta um fator de segurança maior do que 1, de forma que existe certa garantia de que ele não irá romper-se ou deformar-se plasticamente em condições normais de operação. Além disso, se for usada uma chapa inicial mais grossa, de 31,75mm (1¼”) por exemplo, um desgaste de 20% na superfície da asa a deixaria com espessura de 1” que, como foi visto, detém um fator de segurança de 4,5.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou a estimativa do esforço de tração (que surge durante a operação) e a determinação do melhor conjunto de parâmetros construtivos para, então, desenvolver um protótipo de órgão ativo de afofador de mandioca, composto por haste, asa, e chapa de ligação. Com isso, espera-se ter obtido um equipamento funcional, que apresente reduzida resistência ao deslocamento e, conseqüentemente, menor consumo de combustível durante o uso.

Em relação à estimativa do esforço, chegou-se a um valor de 25kN para a força de tração. Além disso, foi visto que a força de tração e a velocidade de trabalho influenciam diretamente na potência requerida pelo o trator. Dessa forma, dimensionar um implemento de modo a facilitar seu deslocamento através do solo, mantendo-se inalterada a velocidade de trabalho, pode ser visto como uma maneira de reduzir a potência requerida pelo trator e, como resultado, possibilitar o uso de tratores menores, que causam menos compactação do solo e são mais baratos.

Em seguida, foi realizada uma verificação da resistência estrutural do implemento, por meio do Método dos Elementos Finitos, considerando não só a geometria inicialmente projetada, como também a geometria de asas com espessuras reduzidas de 5%, 10%, 25% e 40%, de modo a avaliar o gradiente de tensões à medida que o desgaste ocorre. Com isso, foi observado que quando novo, e sob as condições estabelecidas durante a simulação, o implemento como um todo apresenta fator de segurança de 2,2 e, particularmente, um valor de 4,5 para o fator de segurança da asa. Por outro lado, quando sob as mesmas condições de simulação, mas com a espessura da asa reduzida de 5%, 10%, 25% e 40%, foram obtidos fatores de segurança (para as asas) de 3,98, 3,57, 2,49 e 1,6, respectivamente. Portanto, a modelagem do implemento se mostrou satisfatória, uma vez que este apresentaria condições de resistir aos esforços da operação mesmo com elevado grau de desgaste.

Adicionalmente, não foi realizado o dimensionamento dos parafusos que fixariam a haste à asa. Entretanto, já que nos desenhos técnicos foram indicadas as posições e dimensões dos furos para os parafusos, com base em afofadores comerciais, o órgão ativo pode ser plenamente fabricado e testado em campo. Com isso, seria possibilitada a coleta de dados importantes, como a real força de tração, o grau de mobilização do solo pelo implemento, o consumo de combustível do trator, e a qualidade do desenraizamento da mandioca.

Por fim, o trabalho contribuiu para tratar academicamente do projeto de afofadores de mandioca, de modo a impulsionar o desenvolvimento do tema por outros pesquisadores e, assim, possibilitar que melhores equipamentos sejam concebidos.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de maneira alguma esgota os estudos que podem ser realizados acerca do tema. Dito isso, alguns dos trabalhos futuros que podem ser realizados são:

- Seleção detalhada dos materiais de maior custo-benefício a serem aplicados ao implemento;
- Estudo da diferença na taxa de desgaste dos componentes a depender do tratamento térmico aplicado;
- Estudo da velocidade com que o desgaste ocorre nos diferentes componentes, a fim de estimar o tempo de vida do implemento;
- Utilização do Método dos Elementos Discretos (DEM) para simular diferentes características de solo e, assim, estimar os esforços e desgastes sobre o implemento;
- Estudo da fadiga nos componentes do implemento;
- Dimensionamento dos parafusos que ligam a haste à asa;
- Verificação da força de tração em diferentes tipos de solo;
- Verificação experimental do desempenho do implemento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASZADEH, R. et al. **Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment**. Journal of Food Engineering, v. 127, p. 80-84, 2014.
- ANSYS INC. **Mechanical User's Guide**. 2021.
- ASA IMPLEMENTOS. **Manual de Instruções - Subsolador (Afofador) 8.80S**. Disponível em: <https://asaimplementos.com.br/site/download/>. Acesso em 22 jul. 2021.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. **ASAE D497.4: Agricultural Machinery Management Data**. St. Joseph, USA. Feb, 2003.
- BALATON, J. **Dimensioning and draft force requirement for subsoilers**. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, v. 34, n. 3-4, p. 161-170, 1990.
- CUETO, O. *et al.* **Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil**. Journal of Terramechanics, v. 63, p. 61-67, 2016.
- FIALHO, A. B. **COSMOS: Plataforma CAE do SolidWorks 2008**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2008.
- FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6 ed. São Paulo: Érica, 2013.
- FILHO H. S. **Avaliação de dois implementos na colheita semimecanizada da cultura da mandioca**. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2001.
- FILHO H. S.; SOBRINHO T. A.; SOUZA C. M. A. **Desempenho de dois equipamentos na colheita semimecanizada da cultura da mandioca**. Engenharia Agrícola, v. 25, p. 557-564, 2005.
- FURINI, L. A. **Desempenho operacional de hastes e ponteiras na descompactação de solo**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.
- GILL, W. R.; BERG, G. E. V. **Soil dynamics in tillage and traction**. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1967.
- GODWIN, R. J. **A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces**. Soil and Tillage Research, v. 97, n. 2, p. 331-340, 2007.
- IKEDA. **Subsolador de mandioca – TSM/SMDP: Manual Operacional**. [2021]. Disponível em: https://ikedaimplementos.com.br/arquivos/manual_oper_subsol_mandioca.pdf. Acesso em 28 out. 2021.
- KEES, G. **Using subsoiling to reduce soil compaction**. USDA Forest Service Technology and Development Program Missoula, MT 5E52F74 Soil Tilth Restorer. Julho, 2008.
- MF RURAL. **Afofador de mandioca**. [2021] Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/425808/afofador-de-mandioca>. Acesso em 7 dez. 2021.
- OTSUBO, A. A.; LORENZI, J. O. **Cultivo da mandioca na região Centro-Sul do Brasil**. Embrapa Agropecuária Oeste-Sistema de Produção (INFOTECA-E), 2004.

- PATUK, I. et al. **Simulation for Design and Material Selection of a Deep Placement Fertilizer Applicator for Soybean Cultivation**. Open Engineering, v. 10, n. 1, p. 733-743, 2020.
- PETROVA, R. V. **Introduction to static analysis using SolidWorks simulation**. CRC Press, 2014.
- RAPER, R. L. **Subsoiler shapes for site-specific tillage**. Applied Engineering in Agriculture, v. 21, n. 1, p. 25-30, 2005.
- SANTOS, V. S. dos. **Mandioca**, [2022]. *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/saude/mandioca.htm>. Acesso em 06 mar. 2022
- SASAKI, M. C.; GONÇALVES, J. L. M.; BENTIVENHA, S. R. P. **Desempenho operacional de hastes subsoladoras em função da ponteira e do tipo de solo**. *Scientia Forestalis*. n. 67, p. 44-52, Abril, 2005.
- SILVA, R. P. D.; FURLANI, C. E. A.; TAVARES, T. O.; VOLTARELLI, M. A. **Compactação do solo, escarificação e subsolagem**. Material didático do curso de Zootecnia – UNESP Jaboticabal, Jaboticabal, 10 p., Maio, 2015.
- SPOOR, G. **Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques**. Soil Use and Management, v. 22, n. 2, p. 113-122, 2006.
- THOMPSON, M. K.; THOMPSON, J. M. **ANSYS mechanical APDL for finite element analysis**. Butterworth-Heinemann, 2017.
- UCGUL, M.; FIELKE, J. M.; SAUNDERS, C. **Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling**. Information Processing in Agriculture, v. 2, n. 2, p. 130-141, 2015.
- UPADHYAYA, S. K.; WILLIAMS T. H.; KEMBLE L. J.; COLLINS N. E. **Energy requirements for chiseling in coastal plain soils**. *Transactions of the ASAE*, v. 27, n. 6, p. 1643-1649, 1984.
- VELLOSO, N. S.; COSTA, A. L. G.; MAGALHÃES, R. R.; SANTOS, F. L.; ANDRADE, E. T. de. **The Finite Element Method Applied to Agricultural Engineering: A Review**. Current Agriculture Research Journal, v. 6, n. 3, p. 286, 2018.
- VISANORTE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Afofador de Mandioca**. Disponível em: <https://www.visanorte.com.br/site/category/afofador-mandioca/>. Acesso em 25 jan. 2022
- WALTERS, R. D. **Soil, draft, and traction**. Technical Note 21. Department of Soil Science, North Caroline State University, 101 Derieur St. CB 7619. Raleigh, NC 27695. Robert_walters@ncsu.edu, 2012.
- WEILL, A. **A guide to successful subsoiling**. CETAB+, Victoriaville, 43 p., 2015.