



ANTÔNIO CARLOS LIMA NETO

**EFEITO DA FADIGA EM UMA HASTE SULCADORA DE
SEMEADORADA AGRÍCOLA DA SÉRIE 1100 DA JOHN
DEERE PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**

LAVRAS – MG

2023

ANTÔNIO CARLOS LIMA NETO

**EFEITO DA FADIGA EM UMA HASTE SULCADORA DE SEMEADORA
AGRÍCOLA DA SÉRIE 1100 DA JOHN DEERE PARA DIFERENTES TIPOS DE
SOLOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Orientador

LAVRAS – MG

2023

ANTÔNIO CARLOS LIMA NETO

**EFEITO DA FADIGA EM UMA HASTE SULCADORA DE SEMEADORA
AGRÍCOLA DA SÉRIE 1100 DA JOHN DEERE PARA DIFERENTES TIPOS DE
SOLOS**

**THE EFFECT OF FATIGUE IN JOHN DEERE 1100 SERIES FURROW ROD FOR
DIFFERENT SOIL TYPES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 19/07/2023

Prof. Dr. Francisco Scinocca (UFLA)

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos (UFLA)

Prof. Dr. Francisco Scinocca

Orientador

LAVRAS – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que tornaram este trabalho possível. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder sabedoria e direção durante o processo de pesquisa e escrita. Também agradeço a minha família, que sempre esteve presente com seu amor e apoio, e à minha namorada, que foi uma fonte de motivação. Além disso, gostaria de expressar meu agradecimento aos meus amigos e colegas, que compartilharam suas experiências e conhecimentos, enriquecendo ainda mais este trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade.

Por fim, minha gratidão especial ao professor Francisco Scinocca, pela orientação dedicada, paciência e disposição para me ajudar ao longo de todo o processo. Sua expertise e apoio foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

A todos vocês, muito obrigado por fazerem parte desta jornada e por sua valiosa colaboração.

RESUMO

Além dos fatores mecânicos, o tipo de solo e sua composição influenciam significativamente na vida útil da haste sulcadora da plantadeira agrícola. A variação da resistência e da dureza do solo afeta diretamente as cargas aplicadas à haste sulcadora, o que pode acarretar em falhas prematuras devido ao efeito de fadiga. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, os Latossolos, Argissolos, Neossolos, Planossolos e Nitossolos representam aproximadamente 70% do território brasileiro. Esses tipos de solo são os mais comuns encontrados no Brasil e foram considerados nesta pesquisa. O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos do solo na vida útil da haste sulcadora da Série 1100 da John Deere. Para isso, foi realizada uma análise detalhada, incluindo desde a nucleação da trinca até a falha do componente mecânico. Com base nas informações obtidas, foi conduzida uma análise por elementos finitos da haste sulcadora de plantadeira agrícola, revelando as concentrações de tensão e os principais pontos a serem melhorados. As análises realizadas com o auxílio do software ANSYS® proporcionaram um entendimento aprofundado do comportamento da haste sulcadora sob diferentes cargas e em diversos tipos de solo. Os resultados demonstraram a importância de considerar fatores como tipo de solo, densidade, umidade e velocidade da máquina, pois esses aspectos influenciam significativamente as tensões aplicadas. Dentre os solos examinados, pode-se concluir que o Argilossolo Vermelho-Amarelo se destacou de forma preocupante, apresentando uma tensão de von Mises de 1253,30 MPa, um fator de segurança alarmantemente baixo de 0,7 e uma vida útil limitada a 22895 ciclos.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Fadiga. Concentradores de Tensão. Propagação de Trinca. Haste Sulcadora. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

ABSTRACT

Besides mechanical factors, the type of soil and its composition have a significant influence on the service life of the agricultural planter's furrow rod. The variation in soil strength and hardness directly affects the loads applied to the furrow opener, which can lead to premature failure due to the fatigue effect. According to the Brazilian Soil Classification System, the Latosols, Argissols, Neosols, Planosols and Nitosols represent approximately 70% of the Brazilian territory. These soil types are the most common found in Brazil and were considered in this research. The present study aims to analyze the effects of soil on the service life of the furrow opener of John Deere's 1100 Series. To achieve this, a detailed analysis was conducted, including from crack nucleation to the failure of the mechanical component. Based on the information obtained, a finite element analysis of the agricultural planter's furrow opener was performed, revealing stress concentrations and identifying key areas for improvement. In conclusion, the analyses conducted with the aid of ANSYS® software provided a thorough understanding of the behavior of the furrow rod under different loads and in several soil types. The results demonstrated the importance of considering factors such as soil type, density, moisture, machine speed and furrower width, as these aspects significantly influence the applied stresses. Among the soils analyzed, the soil Red-Yellow Argylosolo exhibited more alarming results, showing a von Mises stress of 1253.30 MPa, an alarmingly low safety factor of 0.7 and a limited lifetime of 22895 cycles.

Keywords: Finite Elements. Fatigue. Stress Concentrators. Crack Propagation. Furrower Rod. Soils Types.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barra de arrasto da semeadora 1100	17
Figura 2 - Chassi pivotado.....	18
Figura 3 - Chassi pantográfico	18
Figura 4 - Reservatórios da Semeadora Série 1100.....	19
Figura 5 - Dosador de fertilizante helicoidal	19
Figura 6 - Dosador de fertilizante tipo rotores dentados	20
Figura 7 - Sistema de disco horizontal	21
Figura 8 - Escova de limpeza do dosador pneumático.....	22
Figura 9 - Ejetor do dosador pneumático.	22
Figura 10 - Comporta do dosador pneumático.....	22
Figura 11 - Sistema pneumático.....	23
Figura 12 - Sistema de transmissão de uma semeadora - adubadora.....	23
Figura 13 - Limitador de profundidade da Semeadora Série 1100 da John Deere.....	24
Figura 14 - Alavanca do limitador de profundidade.....	24
Figura 15 - Rodas compactadoras metálicas.....	25
Figura 16 - Rodas compactadoras de borracha.....	26
Figura 17 - Disco compactador inclinado.....	26
Figura 18 - Marcador de linha.....	27
Figura 19 - Disco de corte liso, estriado, ondulado e recortado.....	27
Figura 20 - Discos ondulados com haste sulcadora da semeadora Série 1100.....	28
Figura 21 - Discos Duplos.....	29
Figura 22 - Sulcador tipo haste ou facão	30
Figura 23 - Sulcador com haste	30
Figura 24 -Representação gráfica das fases do processo de fadiga.....	37
Figura 25 - Aparência típica da superfície onde ocorreu fratura por fadiga.....	38
Figura 26 - Parâmetros para descrever os ciclos de fadiga de amplitude constante.....	39
Figura 27 - Ciclo de tensão alternada.....	40
Figura 28 - Curva S-N	40
Figura 29 - Curva S-N para um aço maciço e uma liga de alumínio.....	41
Figura 30 - Laço de histerese sob carga cíclica.....	42
Figura 31 - Fluxograma das atividades.....	44
Figura 32 - Haste KK13478 e sua representação em CAD.....	45
Figura 33 - Propriedades do aço estrutural.....	46

Figura 34 - Condição de contorno da Haste Sulcadora	47
Figura 35 - Convergência de Malha.	52
Figura 36 - Primeiro estágio da convergência de malha.	52
Figura 37 - Último estágio da convergência de malha.	53
Figura 38 - Resultado de carregamento	54
Figura 39 - Deformação da estrutura - Planossolo Hidromórfico.	54
Figura 40 - Tensão de von Mises - Planossolo Hidromórfico.....	55
Figura 41 - Vida sob fadiga - Planossolo Hidromórfico.	55
Figura 42 - Deformação da estrutura - Nitossolo Vermelho Distroférico.....	56
Figura 43 - Tensão de von Mises – Nitossolo Vermelho Distroférico.....	56
Figura 44 - Vida sob fadiga – Nitossolo Vermelho Distroférico.	57
Figura 45 - Deformação da estrutura – Latossolo Vermelho Distrófico.	58
Figura 46 - Tensão de von Mises – Latossolo Vermelho Distrófico.....	59
Figura 47 - Vida sob fadiga – Latossolo Vermelho Distrófico.	59
Figura 48 - Deformação da estrutura – Neossolo Quartzarênico.	60
Figura 49 - Tensão de von Mises – Neossolo Quartzarênico.	60
Figura 50 - Vida sob fadiga – Neossolo Quartzarênico.....	61
Figura 51 - Deformação da estrutura – Argilossolo Vermelho Distrófico.	61
Figura 52 - Tensão de von Mises – Argilossolo Vermelho Distrófico.....	62
Figura 53 - Vida sob fadiga – Argilossolo Vermelho Distrófico.	62
Figura 54 - Deformação da estrutura – Argilossolo Vermelho-Amarelo.	63
Figura 55 - Tensão de von Mises – Argilossolo Vermelho-Amarelo.....	63
Figura 56 - Vida sob fadiga – Argilossolo Vermelho-Amarelo.	64
Figura 57 - Fator de Segurança.....	65
Figura 58 - Análise do Dano.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensões e percentuais de ocorrências das principais classes de 3º nível	33
Tabela 2 - Força Resultante e Informações dos Solos para Análise de Haste Sulcadora.....	49
Tabela 3 - Tabela de convergência de malha.	51
Tabela 4 - Resultados obtidos na análise.....	64
Tabela 5 - Fator de Segurança e Dano.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.1.3	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Mecanização agrícola	14
2.1.1	Evolução das máquinas agrícolas	14
2.1.2	Semeadora.....	15
2.2	Solo	31
2.2.1	Relação do Sulcador com o solo.....	35
2.2.2	Força sobre o Sulcador	35
2.3	Fadiga	36
2.3.1	Parâmetros dos ciclos de tensão.....	38
2.3.2	A Curva S-N	40
2.3.3	Relação entre tensão e deformação durante a fadiga.....	42
3	METODOLOGIA.....	44
3.1.	Escopo de atividades.....	44
3.2.	Detalhamento das etapas.....	44
3.2.1.	Escolha do componente	44
3.2.2.	Desenho do componente.....	45
3.2.3.	Definição do material	45
3.2.4.	Aplicação de malha.....	46
3.2.5.	Casos de carga e condições de contorno.....	47
3.2.6.	Convergência de malha.....	48
3.2.7.	Execução da análise de fadiga via software.....	48
3.2.8.	Análises dos resultados obtidos	49

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	67
5.1.	Conclusão	67
5.2.	Trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO 1 – Desenho técnico.....	75

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos no século XXI são ilimitados, tanto no que concerne às áreas de comunicação, eletricidade, medicina quanto aos equipamentos voltados para o agronegócio. Os avanços são possíveis devido ao conhecimento derivado de pesquisas aplicadas que visam solucionar problemas específicos, com o intuito de otimizar desempenho ou aprimorar a produtividade.

Particularmente, no campo da mecanização agrícola, cuja evolução tecnológica tem ajudado no aumento da produtividade por hectare (ha), no Brasil, nos últimos 40 anos, no intervalo de 1975 a 2015, tornou-se responsável por 59% do crescimento do valor bruto da produção de grãos (BOLFE, 2018). Esta inovação tecnológica protege o ecossistema, ao produzir mais, em uma área menor, sem a necessidade de aumentar a área de cultivo, o que reduz, o desmatamento (ALVES, 2008; PICCOLI, 2018).

No ano de 1977, quando começaram os incentivos à pesquisa e à inovação na agricultura, assim como a implantação de equipamentos de plantio, a área utilizada para o cultivo era de aproximadamente 37,3 milhões de hectares, que equivalia a uma produção próxima de 46,9 milhões de toneladas, porém já no ano de 2017, a área era de 60,9 milhões de hectares, com uma produção de 237,6 milhões de toneladas (BOLFE, 2018). Enquanto o aumento da área cultivada foi de aproximadamente 63%, a produção teve um aumento de 407%, o que demonstra que com o avanço da pesquisa e com a utilização de equipamentos de plantio, proporcionaram um melhor aproveitamento da área plantada.

O avanço tecnológico influenciou em alguns aspectos como na atenção aos problemas ambientais, ao uso de materiais que não prejudicassem o ecossistema, além de a redução de peso e custo na produção dos equipamentos agrícolas (DIAS, 2015). Influenciou, também, no que se refere à resistência dos implementos tida como uma condição necessária para que eles não falhassem durante o seu uso. Considerando, primeiramente, os riscos que essas falhas poderiam trazer às pessoas envolvidas no processo, assim como, em relação aos custos de produção, tempo do equipamento fora da operação, tanto para manutenção preventiva quanto preditiva, os prejuízos que circundam esse problema são inúmeros.

E como qualquer máquina, esses equipamentos agrícolas estão sujeitos a diversos esforços aleatórios e repetitivos, devido os seus modos de trabalho e superfícies associadas, que na sua maioria, são áreas não muito bem estruturadas, que tendem assim a realizar esforços com seus diferentes perfis do solo (PARAFOROS, 2016). Por esse motivo, é de extrema importância realizar estudos de fadiga para esses tipos de implementos, pois, caso um equipamento

apresente qualquer tipo de falha durante a época de plantio, isso pode resultar em prejuízos consideráveis e até mesmo na perda de uma safra inteira (ROCCO, 2018).

Mesmo que as análises estáticas possam dizer a respeito dos esforços e o nível de tensão máximo dos componentes mecânicos, não são capazes de prever a durabilidade de um componente sujeito a esforços cíclicos, conhecido pela comunidade científica como efeito à fadiga (BATHIAS, 2010).

Como forma de garantir uma maior vida útil desses componentes, normalmente eles são superdimensionados, levando em consideração um coeficiente de segurança, para que consigam evitar a falha por fadiga, no entanto, essa abordagem eleva o custo de produção do equipamento o que, muitas vezes, inviabiliza uma determinada aplicação, como visto na indústria da mobilidade, indo desde aplicações agrícolas, aeroespaciais ou biomecânicas. Porém, apenas essa ação não garante uma total eficácia do componente, muito menos o tempo de vida útil esperado para tal, pois um esforço com uma intensidade relativamente menor sendo aplicada muitas vezes, também é capaz de levá-lo à falha (BARNA, 2014). A esta, dá-se o nome de fadiga. Segundo OSGOOD (1982), todas as análises de estresse são basicamente análises de fadiga, a diferença está no número de ciclos de estresse aplicado ao produto.

Em outras palavras, pode-se dizer que fadiga é a aplicação de cargas cíclicas abaixo dos limites de escoamento do material, até que este chegue à falha de maneira frágil (FACCHINETTI, 2015; ZAHAVI, 1996).

O presente estudo tem como objetivo analisar a propagação de trincas e os esforços multiaxiais que levam à falha prematura de uma haste sulcadora. Para isso, a pesquisa aborda a análise de fadiga, com ênfase em conceitos de relevância significativa para o tema. Além disso, estão sendo realizadas análises de fadiga na haste sulcadora da plantadeira agrícola por meio de métodos baseados em elementos finitos, visando avaliar o desempenho desse componente e identificar pontos críticos em diferentes tipos de solo. Os resultados indicam que a variabilidade dos solos existentes no território nacional compromete a vida útil da sulcadora devido às condições adversas impostas pelo ambiente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a fadiga em uma haste sulcadora de semeadora agrícola da Série 1100 da John Deere, utilizando uma abordagem computacional com o método de elementos finitos, considerando seu uso ou aplicação em diferentes tipos de solo.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- compreender o diagnóstico analítico de uma falha por fadiga;
- projetar e dimensionar uma haste sulcadora da semeadora agrícola da Série 1100 da John Deere, a qual estará sujeita aos efeitos de fadiga, devido ao impacto pela sua utilização;
- modelar e analisar via elementos finitos uma haste sulcadora da semeadora agrícola da Série 1100 da John Deere;
- pesquisa analítica da predição dos efeitos da fadiga na haste sulcadora da semeadora agrícola da Série 1100 da John Deere para um determinado tipo de solo;
- análise do efeito da variabilidade dos principais tipos de solo do Brasil como parâmetro de entrada de vida em fadiga da haste sulcadora;

1.1.3 Justificativa

A segurança e a eficiência do equipamento de semeadura são fundamentais para garantir a produção agrícola de forma efetiva e rentável. A quebra prematura da haste sulcadora de uma semeadora agrícola durante determinados períodos de semeadura pode prejudicar uma safra inteira, resultando em perdas financeiras significativas. Isso inclui a necessidade de adquirir peças de reposição, o transporte complicado do equipamento para manutenção e a perda do momento ideal para o plantio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção trata dos principais assuntos fundamentados por autores que darão sustentação ao alcance dos objetivos propostos já apresentados.

2.1 Mecanização agrícola

São denominados como máquinas agrícolas, as máquinas e implementos utilizados no desenvolvimento de operações usuais na agricultura, os quais têm como objetivo otimizar a produtividade dos trabalhos e atividades agrícolas, simplificar os processos, torná-los mais eficientes e limitar perdas (SILVA, 2014).

2.1.1 Evolução das máquinas agrícolas

A agricultura sempre foi e sempre será uma das atividades básicas para a sobrevivência humana. Com essa grande necessidade, a busca por alternativas que possam facilitar o trabalho nesse meio, sempre esteve presente. Têm-se relatos da aplicação de equipamentos utilizados pelo homem já na época do antigo Egito (6000 a.C.), quando essa aplicação necessitava de um grande esforço humano, e todos os equipamentos eram confeccionados em madeira. A evolução foi lenta, e os equipamentos, ainda utilizavam pedras ou madeira, mas aos poucos foram substituindo a tração humana pela tração animal (SILVA, 2014; VIAN et al, 2013).

Têm-se relatos de que as primeiras ferramentas agrícolas com a utilização de tração animal, surgiram trezentos anos antes de Cristo, na região da Mesopotâmia. Eram peças simples e rudimentares, mas que permitiam ao homem um melhor desempenho (SILVA, 2014).

E, com o tempo esses equipamentos foram evoluindo cada vez mais, saíram da utilização apenas de equipamentos como o arado para outros tipos de aplicação. Mas, foi com a invenção do motor de combustão interna de ciclo Otto, em 1866 e o ciclo Diesel, em 1892, que a evolução da mecanização agrícola se intensificou (SILVA, 2014; VIAN et al., 2013).

Em 1892, foi construído o primeiro trator movido a gasolina por Froelich, que logo foi adquirido por John Deere. E em 1905, surgiu a primeira fábrica de tratores, a Hart-Parr Company. Mas, foi em 1917, que a Ford lançou o primeiro trator que fez grande sucesso e, em que 1925 já havia próximo de 110 mil tratores vendidos no Estados Unidos (FONSECA, 1990).

O projeto Fordson da Ford, ainda era um trator bem rudimentar, útil mais para as atividades de gradear e arar. Porém, a evolução tecnológica das máquinas agrícolas teve um

novo impulso com o passar das guerras, e em 1947, com a criação de um sistema de “três pontas” e do controle hidráulico remoto na operação, o qual possibilitou, a partir de então, a utilização de outros tipos de implementos (FONSECA, 1990), viabilizou a evolução cada dia mais, tendo-se hoje o que se chama agricultura de precisão (SILVA, 2014).

Com o desenvolvimento da mecanização agrícola surgiu a necessidade de uma classificação dos tipos de máquinas agrícolas. Sendo classificadas conforme o tipo de operação produtiva e complexidade. Inicialmente as máquinas para o preparo do solo, as responsáveis pela limpeza ou remoção de árvores, como por exemplo, serras, lâminas empurradoras, lâminas niveladoras, escavadeiras e perfuradoras; máquinas para aplicação, carregamento e transporte de adubos e corretivos, máquinas para o cultivo, desbaste e poda, máquinas para aplicação de defensivos, máquinas para colheita, para transporte, elevação e manuseio, para o processamento, para o tratamento e polimento, para conservação do solo, irrigação e drenagem, para o reflorestamento, máquinas motoras e tratores e máquinas para a atividade de semeadura, plantio e transplante (SANTOS FILHO; GARCIA DOS SANTOS, 2001; GIANEZINI, 2014).

2.1.2 Semeadora

Primeiramente, é importante familiarizar-se com a terminologia utilizada para máquinas agrícolas. Em relação à operação, a semeadura é a prática de implantar sementes de plantas no solo, o plantio é a ação de introduzir partes vegetativas de plantas no solo, e o transplantio é a realização de implantar plantas no estágio inicial no solo. Essas são definições simples, no entanto, caracterizam o tipo de máquina, que pode ser diferenciada pela sua função. A semeadora é o implemento agrícola que pode realizar a operação de semeadura, a plantadeira é aquela que realiza a operação de implantação de órgãos vegetativos, e a transplantadora é a máquina que realiza o transplante de mudas (MARQUES, 2015). Popularmente, a semeadora é definida como a máquina para sementes miúdas e a plantadeira para sementes graúdas, no entanto, ambas se referem à mesma máquina (TOLEDO, 2015).

Em outras palavras, a semeadora é a máquina que tem como função, implantar diversos tipos de sementes no solo, fazendo isso conforme a densidade, o espaçamento e a profundidade recomendada de cada tipo de cultivar (MIALHE, 2012).

No que se refere a classificação do grupo de semeadoras ela é realizada considerando a forma de distribuição das sementes, o acionamento, o tamanho da semente, assim como o mecanismo dosador (SENAR, 2017). No conjunto das semeadoras-adubadoras convencionais existem quatro sistemas importantes: a distribuição de sementes, a distribuição de adubo, a

profundidade de semeadura e a compactação da semente. Caso o sistema de semeadura seja direto, é necessário mais um sistema: o de corte de palhada. É de extrema importância que cada um dos sistemas tenha um bom desempenho para que a semeadura seja bem feita. A falha de um ou de mais de um desses sistemas pode comprometer o conjunto e dificultar a implantação de uma determinada cultura (MANTOVANI, 2015).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1994), as semeadoras possuem diferentes formas de distribuição. Uma delas é a distribuição por linha de fluxo contínuo, na qual as sementes são depositadas em linha reta, porém, com largura de trabalho variável, em um fluxo contínuo, sem separação entre as sementes dentro da linha. Outra forma é a distribuição em linha de precisão, na qual a distribuição é realizada com espaçamento uniforme, em intervalos regulares, de acordo com a densidade de semeadura preestabelecida. Há também a máquina para semeadura e adubação a lanço, na qual as sementes e/ou fertilizantes são lançados aleatoriamente sobre a superfície do solo. Além disso, existe a máquina para semeadura e adubação em linha, na qual as sementes e/ou fertilizantes são implantados no solo ao longo da largura da máquina, em linhas diferenciadas, com distância horizontal previamente definida, podendo ou não serem cobertas com solo. O espaçamento entre as linhas deve estar de acordo com as recomendações agronômicas para cada tipo de cultura (SENAR, 2017; PORTELLA, 1997).

A classificação segundo a forma de acionamento ocorre da seguinte forma: manual, de tração animal e tratorizada. A semeadora manual é uma máquina acionada pelo próprio operador, sua utilização se dá, principalmente, no cultivo de milho e hortaliças em propriedades de pequeno porte. A semeadora de tração animal é uma máquina tracionada por animais como mulas, cavalos ou bois. E as tratorizadas, são semeadoras acionadas e deslocadas pelos tratores agrícolas, podendo ser acopladas ao sistema de levante hidráulico ou à barra de tração do trator, onde, pode ser “montado”, que é quando o acoplamento é feito ao sistema hidráulico de levantamento de três pontos, “semi-montadas”, o acoplamento é efetuado na barra de tração e nos dois braços inferiores e de “arrasto”, em que é acoplada em um único ponto, normalmente à barra de tração (MIALHE, 2012; SANTOS FILHO, 2001).

O material dosado pela semeadora pode ser sementes graúdas ou sementes miúdas (SENAR, 2017). Há alguns tipos de mecanismos dosadores, sendo eles (SANTOS FILHO, 2001):

- disco perfurado, vertical, horizontal e inclinado;
- correia perfurada;
- discos alveolados;

- dedos prensadores;
- orifício regulador;
- pneumático.

Após a compreensão das classificações que fazem parte de uma máquina semeadora, é importante saber, quais são seus componentes básicos: barra de tração, chassi, reservatório de fertilizante e de semente, caixa de transmissão, dosador de fertilizante, dosador de sementes, limitador de profundidade, rodas compactadoras, marcador de linhas, disco de corte da palhada e sistema de sulcadores (SENAR, 2017). A seguir serão detalhados cada um dos componentes.

- **Barra de tração:** cuja função é ligar o implemento ao trator. Geralmente é feita de chapas de aço dobradas e, dependendo do modelo do equipamento, possui um terceiro ponto acoplado para facilitar a regulagem da semeadora (SENAR, 2017). A Figura 1 apresenta uma barra de arrasto da semeadora Série 1100 da John Deere.

Figura 1 - Barra de arrasto da semeadora 1100



Fonte: JOHN DEERE (2017).

- **Chassi:** responsável por sustentar todos os outros componentes e classificado em três tipos, sendo eles: pivotado, biarticulado e pantográfico (SANTOS FILHO, 2001).

O pivotado é quando a unidade da semeadora é ligada ao chassi, por meio de uma dobradiça fixada em apenas um ponto de contato, conforme Figura 2 (SENAR, 2017). No sistema pantográfico o chassi é montado através de um paralelogramo, sendo duas barras verticais e duas horizontais, o que permite maior flexibilidade da linha semeadora para acompanhar as irregularidades do terreno, conforme Figura 3 (SILVA, 2015). Já o biarticulado possui uma parte pivotada, porém, além do sistema

pivotado, tem uma articulação no meio do chassi, que permite à unidade semeadora seguir as irregularidades do terreno (SENAR, 2017).

Figura 2 - Chassi pivotado



Fonte: SENAR (2017).

Figura 3 - Chassi pantográfico



Fonte: GIMENEZ (2016).

- **Reservatório de fertilizante e de semente:** feito de polietileno é o local onde se armazena o fertilizante e as sementes para realização da operação de semeadura, conforme mostrado na Figura 4 (SENAR, 2017).

Figura 4 - Reservatórios da Semeadora Série 1100



Fonte: JOHN DEERE (2017).

- **Dosador de fertilizante:** os sistemas dosadores de fertilizantes estão localizados logo abaixo do reservatório de fertilizante (SILVA, 2015). E têm como função controlar a quantidade de fertilizante a ser depositada no solo (PORTELLA, 1997). Existem dois principais tipos: os helicoidais ou rosca sem-fim, e o rotores dentados, sendo que o tipo helicoidal é o tipo mais comum, e encontrado na maioria das semeadoras comercializadas (SILVA, 2015; SENAR, 2017).

A dosagem do adubo no dosador helicoidal é determinada pela combinação de engrenagens na caixa de transmissão e pelo tipo de helicóide que está montado no mecanismo dosador (SENAR, 2017). A Figura 5, representa um modelo de dosador de fertilizante helicoidal.

Figura 5 - Dosador de fertilizante helicoidal



Fonte: GIMENEZ (2016).

Já o dosador de rotores dentados, contém uma série de discos horizontais, um para cada linha de semeadura, conforme apresentado na Figura 6. Seu movimento de giro é dado por um sistema de engrenagem individual, mas acoplado a um eixo único. Por meio desse movimento e pela ação dos ressaltos, o fertilizante é levado até os tubos de distribuição. Suas rosetas podem ser de dentes curtos ou longos (FLORES, 2008).

Figura 6 - Dosador de fertilizante tipo rotores dentados



Fonte: SENAR (2017).

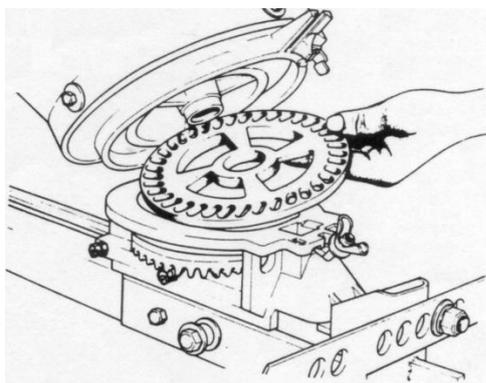
- **Dosador de sementes:** é o mecanismo que proporciona a distribuição de sementes nas linhas de semeadura, sendo o responsável pela população de plantas (SENAR, 2017). Existem seis tipos de dosador: disco perfurado horizontal, vertical ou inclinado; cilindro canelado, para sementes miúdas; correia perfurada, para sementes graúdas; discos alveolados, para sementes graúdas; dedos preensores, dedos articulados e pneumáticos (CONTE, 2019).

Sendo os sistemas de distribuição de discos horizontais e discos pneumáticos, os mais utilizados. E nos modelos comerciais do Brasil, o principal é o disco horizontal, pois seu custo de aquisição é menor, tornando-se mais viável aos pequenos proprietários, mesmo que, sua precisão seja menor e cause mais danos as sementes (SILVA, 2015).

O sistema de disco horizontal, ilustrado na Figura 7, é composto pelo reservatório de semente no qual dentro contém um pequeno plástico no formato de chapéu, que protege o disco do peso das sementes, contém o disco que é perfurado para capturar e conduzir as sementes, um ejetor para garantir a saída da semente, uma escova, que elimina o excesso de sementes de cada célula, um disco de compensação, para

compensar as diferenças de espessura entre os diferentes discos e o disco de sustentação que é o responsável por suportar os discos de sementes e o disco de compensação. Esse sistema fica posicionado no fundo do reservatório na posição horizontal e possui furos para alojar e distribuir as sementes (SILVA, 2015; SENAR, 2017). Com o movimento da semeadora o disco gira, largando as sementes sobre o tubo condutor que as conduz até a superfície do sulco (SILVA, 2015).

Figura 7 - Sistema de disco horizontal



Fonte: GIMENEZ (2016).

No sistema pneumático, utiliza-se o vácuo ou a pressão para dosar as sementes, que ficam presas ao disco por meio da pressão do ar e, posteriormente, são liberadas. Com o movimento da semeadora, o disco vertical gira, aprisionando as sementes de um reservatório localizado em sua base, e um dispositivo de corte de pressão libera as sementes quando estão sobre os tubos condutores (SILVA, 2015; SENAR, 2017). O dosador de semente pneumático é constituído por um dosador na parte externa, um organizador de semente que retira o excesso de sementes que se prende ao disco devido ao vácuo, uma escova de limpeza, como mostrado na Figura 8, que remove possíveis resíduos do disco de sementes, um ejetor, ilustrado na Figura 9, responsável pela saída das sementes, uma borracha de vedação do vácuo, um disco de semente, um anel de encosto, um condutor de semente e uma comporta que evita danos mecânicos às sementes e permite a dosagem adequada para a população, como apresentado na Figura 10 (SENAR, 2017).

Figura 8 - Escova de limpeza do dosador pneumático.



Fonte: SENAR (2017).

Figura 9 - Ejetor do dosador pneumático.



Fonte: SENAR (2017).

Figura 10 - Comporta do dosador pneumático.



Fonte: SENAR (2017).

A Figura 11, apresenta um sistema de dosador pneumático.

Figura 11 - Sistema pneumático.



Fonte: JOHN DEERE (2017).

- **Sistema de acionamento e transmissão:** tem a função de dar movimento aos dosadores de fertilizante e de sementes, possui uma transmissão para cada um deles, de forma independente (SENAR, 2017). Essa transmissão pode ocorrer via correntes, cardãs ou mista, sendo que as correntes necessitam de maiores cuidados no quesito manutenção em virtude de seu desgaste (SILVA, 2015). Essa transmissão pode ser acionada por pneu rodando no solo, motores hidráulicos e motores elétricos (CONTE, 2019; GIMENEZ, 2016). A Figura 12, representa um sistema de transmissão de uma semeadora-adubadora.

Figura 12 - Sistema de transmissão de uma semeadora - adubadora.



Fonte: SENAR (2017).

- **Limitador de profundidade:** trata-se de um componente que tem como função realizar o controle da profundidade, em que a semente será depositada no solo (SENAR, 2017). Ele fica localizado próximo ao disco de abertura do sulco e com o seu controle de profundidade possibilita que ocorra uma emergência uniforme das plantas (SILVA, 2015; SENAR, 2017). Ele é constituído por duas rodas, e permite a regulagem em diferentes profundidades por meio de alavancas e manoplas (SENAR, 2017). Como pode ser visto nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Limitador de profundidade da Semeadora Série 1100 da John Deere.



Fonte: JOHN DEERE (2017).

Figura 14 - Alavanca do limitador de profundidade.



Fonte: KUHN (2020).

- **Rodas compactadoras:** são os elementos responsáveis por promover uma maior interação entre o solo e a semente, no sentido de facilitar a absorção de umidade e evitar espaços com ar. Porém, nessa compressão é importante calcar apenas ao redor da semente, pois uma grande compressão poderá causar problemas para a germinação da planta (PORTELLA, 1997).

Essas rodas podem ser de diferentes tipos e formatos, como: corrente, rodas metálicas, rodas de borracha e discos inclinados (PORTELLA, 1997).

A compressão por corrente é realizada por anéis posicionados atrás dos sulcadores, que são arrastados pelo solo, promovendo a cobertura da semente e do fertilizante após sua passagem. As rodas metálicas, como mostrado na Figura 15, são compostas por dois aros metálicos conectados lado a lado por uma chapa. Entre os aros, há um pequeno espaço que evita a compactação da semente. As rodas de borracha, ilustradas na Figura 16, possuem um aro metálico em seu centro, na posição vertical, revestido por um pneu de borracha. No entanto, esse tipo de roda não é recomendado para áreas muito úmidas devido à formação de crostas em sua superfície (PORTELLA, 1997).

Quanto aos discos inclinados, apresentados na Figura 17, eles possuem um formato em "V" e são acompanhados por duas rodas para o fechamento e compactação lateral do sulco. Esse tipo de compactador é amplamente utilizado, e seu uso envolve duas alavancas com molas que permitem ajustar a abertura e o fechamento do ângulo das rodas. Isso possibilita o controle da quantidade de solo depositado e a pressão exercida pela roda sobre o sulco (SENAR, 2017).

Figura 15 - Rodas compactadoras metálicas.



Fonte: BALDAN (2020).

Figura 16 - Rodas compactadoras de borracha.



Fonte: BALDAN (2020).

Figura 17 - Disco compactador inclinado.



Fonte: SENAR (2017).

- **Marcador de Linha:** constituído por uma barra telescópica articulada com disco na extremidade, que marca onde o operador deve passar, utilizando os riscos feitos no chão como guia para uma passagem subsequente com a semeadora, mantendo o espaçamento do mesmo tamanho (SENAR, 2017; CONTE, 2019). A Figura 18, apresenta um marcador de linha em uso.

Figura 18 - Marcador de linha.



Fonte: SENAR (2017).

- **Disco de corte de palha:** realiza o corte da palhada que se encontra sobre o solo e, ao mesmo tempo, facilita a abertura dos sulcos do fertilizante e da semente (SENAR, 2017).

Trata-se de um sistema que é utilizado no plantio direto, o qual é um manejo, onde não ocorre mobilização do solo, sendo assim, as máquinas são utilizadas só para trabalhar com os restos de vegetais da cultura anterior (SILVA, 2003). Por esta razão, a escolha do formato e do tamanho do disco ideal para a operação é feita levando-se em consideração o tipo de solo e a palhada a ser cortada (SENAR, 2017).

Os tipos de disco de corte, podem ser de diferentes tamanhos e formatos, lisos, ondulados, estriados, corrugados ou recortados, sendo que os discos lisos apresentam melhor performance para o corte da vegetação e requerem menor força para penetrar no solo (PORTELLA, 1997). A Figura 19, apresenta alguns tipos de disco de corte.

Figura 19 - Disco de corte liso, estriado, ondulado e recortado.



Fonte: SANTO (2015).

- **Sistema sulcadores:** fazem a abertura do sulco para a deposição da semente e do fertilizante (PORTELLA, 1997; SCHLOSSER, 1997). O posicionamento dos sulcadores é muito importante, pois caso a semente seja posicionada junto com o

fertilizante, pode ser prejudicial à semente, devido ao efeito de salinização que pode causar redução da germinação e emergência destas sementes (LAMBRECHT et al., 2017).

Para o sistema de plantio direto, é muito importante, também realizar uma boa escolha de qual sulcadora utilizar, pois a eficiência no rompimento do solo no sistema de plantio direto, baseia-se em três aspectos, quais sejam: o corte da palha; o fluxo desta pelos sulcadores e a abertura dos sulcos para sementes e fertilizantes. Sendo assim, o bom desempenho está relacionado com a escolha correta (LAMBRECHT et al., 2017).

Os tipos de sulcadores existentes são: disco duplo, disco duplo desencontrado, disco duplo defasado desencontrado, guilhotina e haste sulcadora, objeto deste estudo (CONTE, 2019). Destaca-se que as operações com a haste sulcadora demandam maior energia do trator para realizar o deslocamento da semeadora-adubadora (SENAR, 2017). Já os discos duplos, têm uma menor demanda de energia, pois mobilizam um menor volume de solo, o que pode resultar em uma melhor uniformidade de distribuição de sementes (CONTE, 2019). As Figuras 20 e 21 apresentam, respectivamente, a haste sulcadora e o disco duplo.

Figura 20 - Discos ondulados com haste sulcadora da semeadora Série 1100.



Fonte: JOHN DEERE (2017).

Figura 21 - Discos Duplos.



Fonte: SENAR (2017).

O sulcador tipo disco duplo, que pode ser observado na Figura 21, é indicado para solos leves e médios, apresentando excelente desempenho em terrenos úmidos e com grande quantidade de palha.

Este estudo tem como objeto de análise o efeito da fadiga na variabilidade da vida útil da haste sulcadora da Semeadora agrícola Série 1100 da John Deere. Por essa razão serão apresentadas a seguir algumas informações mais detalhadas acerca deste implemento. Apesar deste sulcador tipo haste ser indicado para solos argilosos e com alta compactação, a pesquisa abarcará vários tipos de solo do Brasil.

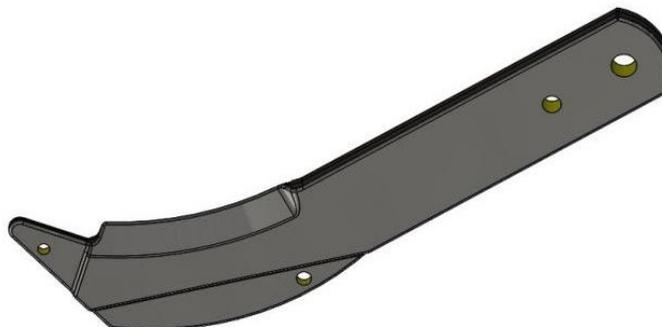
Sulcador tipo haste ou facão, ilustrado na Figura 22, é recomendado para solos argilosos e com alta compactação. O desenho da haste ou facão provoca descompactação com mínimo revolvimento do solo. É apropriado para abrir sulcos para a deposição de fertilizantes a profundidades de 0,10 a 0,15 m. Seu desempenho é otimizado quando montado sobre estruturas pantográficas, pois foi projetado para trabalhar com ângulo de ataque bem definido (TRÖGER, 2010).

A haste ou facão é usado nos cultivos mínimos e sistema de plantio direto (SPD), proporciona maior movimentação de solo e, por esse motivo, o aumento da perda do teor de água ou de umidade do sulco (CHAUDHURI, 2001).

De acordo com *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE, 1995), o mecanismo sulcador tipo haste, ilustrado na Figura 23, é montado na linha de semeadura vertical ou com ângulo na direção do deslocamento da máquina, sendo utilizado para a penetração em solos com menor teor de água. Destaca-se, no entanto, que o rompimento das camadas compactadas com o uso de hastes sulcadoras durante o processo de semeadura

favorece o desenvolvimento vegetativo da lavoura, além de protelar o uso dos escarificadores e subsoladores (GERMINO & BENEZ, 2006).

Figura 22 - Sulcador tipo haste ou facão



Fonte: JOHN DEERE (2017).

Figura 23 - Sulcador com haste



Fonte: JOHN DEERE (2017).

Segundo Tröger (2010), os sulcadores com haste com desarme automático são pivotados em um chassi e são equipados com um mecanismo de mola que impede a fratura da ponteira e/ou do facão quando encontram um objeto rígido. Para evitar a quebra do facão, é necessário ajustar corretamente a pressão da mola de segurança. Recomenda-se que a mola esteja pouco tensionada para solos arenosos e muito tensionada para solos argilosos (BALASTREIRE, 2005).

Ao finalizar a análise das semeadoras-adubadoras e de seus mecanismos de plantio, observou-se que a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado utiliza combinações de mecanismos para a concepção da linha de semeadura. Esses equipamentos incluem um disco de corte com borda lisa para cortar os resíduos culturais, uma haste sulcadora para formar o sulco para a deposição de fertilizantes, uma rosca sem-fim para controlar a dosagem, um dosador de disco horizontal, um disco duplo para fazer o sulco para a semente, e mecanismos de cobertura do tipo rodas em "V" (LAMBRECHT et al., 2017).

2.2 Solo

O solo é uma formação natural tridimensional composta por materiais minerais e orgânicos, além de matéria viva, resultante do intemperismo sobre um material de origem em decorrência de uma longa ação do clima e bioma. Ele ocupa a maior parte do manto superficial das extensões continentais do planeta (DOS SANTOS, 2018; JACOMINE, 2008). Sua principal função é fornecer suporte e nutrientes para o crescimento de plantas, além de atuar como reservatório de água e filtro natural de impurezas (DOS SANTOS, 2018). Além disso, o solo é responsável por armazenar carbono e contribuir para o controle de temperatura e emissões de gases de efeito estufa (BERNARDI, 2020; BATISTA, 2014).

O solo desempenha um papel fundamental no equilíbrio ecológico, e sua importância se estende além do suporte e nutrição de plantas. Além de armazenar água, ele também filtra a água e ajuda no controle de temperatura e emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o solo age como um reservatório de carbono, podendo armazenar mais carbono do que a vegetação (BERNARDI, 2020; BATISTA, 2014). É importante ressaltar que as propriedades do solo podem variar de acordo com sua composição, textura e outros fatores, e, portanto, é crucial entender as particularidades do solo em diferentes regiões, como parte do esforço para manter a saúde do solo e proteger o ecossistema (DOS SANTOS, 2018; JACOMINE, 2008).

O solo é um elemento essencial para a sobrevivência humana. No entanto, por ser um recurso natural dinâmico, ele é suscetível à degradação devido ao uso inadequado, o que pode levar à redução da fertilidade, erosão hídrica e eólica, contaminação por resíduos industriais e urbanos, além de níveis elevados de compactação, entre outros fatores (LIMA, 2005).

Considerando a importância do solo, é fundamental que todos adquiram pelo menos um conhecimento básico antes de utilizar esse recurso natural na agricultura. Entre os pontos-chave desse conhecimento, é essencial saber classificar os tipos de solo de acordo com seu uso e condições de manejo, além de identificar as tecnologias disponíveis para aprimorar suas condições (LIMA, 2005).

No Brasil, a classificação do solo é realizada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), essa classificação é determinada pela interpretação de características morfológicas e propriedades físicas, químicas e mineralógicas captadas em campo e analisadas em laboratório (BERNARDI, 2020). O sistema nacional classifica os solos em seis níveis diferentes, sendo cada nível um grau diferente de especificação ou detalhe. Sendo eles: Ordem, Sub Ordem, Grande Grupo, Sub Grupos, Família e Série (DOS SANTOS, 2018).

Um dos objetivos dessa classificação é enquadrar os solos brasileiros em um sistema hierarquizado, ajudando assim nas tomadas de decisões, e nos processos de análises de forma geral, pois essas classificações tem em seu processo inúmero atributos de diagnósticos que ajudam à avaliar os potenciais e as limitações de cada solo. Alguns desses atributos são: material orgânico, material mineral, atividade de fração argila, saturação por bases, mudança textural abrupta, plintita, petroplintita, superfícies de fricção, caráter alumínico, caráter carbonático, teor de óxido de ferro, grau de decomposição do material orgânico, entre outros (BERNARDI, 2020; DOS SANTOS, 2018).

No Brasil temos uma ampla variedade de solos, devido a grande diversidade de pedoambientes e também devido a vastos fatores de formação do solo. Sendo ao todo 13 ordens diferentes, e dentro de cada uma dessas se dividindo em outros 5 níveis de classificação. O número de classes aumenta de 13 para 44, da categoria taxonômica de ordem para a de subordem, e de 198 para 861, quando se refere aos grandes grupos e subgrupos, respectivamente (DOS SANTOS, 2018; LEPSCH, 2021).

Dentre as Ordens temos: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. Porém, dentre esses, os que predominam são os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que juntos abrangem aproximadamente 70% do território nacional. E as classes Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% da área, sendo esses solos profundos, altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, com alta saturação por alumínio (DOS SANTOS, 2018; LIMA, 2010).

Além da classificação dos solos, há também uma lista dos tipos de solos mais presentes em cada estado e região, incluindo informações sobre a extensão dessas áreas e a porcentagem de ocorrência. Esta lista é apresentada na Tabela 1, classe de nível 3 (AGLIO, 2011; DOS SANTOS, 2018).

Tabela 1 - Extensões e percentuais de ocorrências das principais classes de 3º nível

CLASSES DE 3º NIVEL	ÁREA	%
	Km ²	
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	1.529.037,80	18,02
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	1.465.868,68	17,28
Latossolos Amarelos Distróficos	1.008.686,30	11,89
Neossolos Quartzarênicos Órticos	440.711,57	5,20
Plintossolos Háplicos Distróficos	433.549,90	5,11
Neossolos Litólicos Distróficos	408.963,12	4,82
Cambissolos Háplicos Tb Distróficos	270.756,95	3,19
Argissolos Vermelhos Alíticos	245.402,83	2,89
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	240.421,65	2,83
Neossolos Litólicos Eutróficos	194.894,87	2,30
Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos	192.381,61	2,27
Planossolos Háplicos Eutróficos	178.102,16	2,10
Luvissolos Crômicos Órticos	172.804,95	2,04
Espodossolos Ferrihumilúvicos Hidromórficos	160.842,88	1,90
Argissolos Vermelhos Eutróficos	160.766,90	1,90
Plintossolos Pétricos Concrecionários	156.151,11	1,84
Latossolos Vermelho Distroféricos	149.734,81	1,77
Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos	134.783,98	1,59
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	116.996,78	1,38
Argissolos Vermelhos Distróficos	77.750,89	0,92
Luvissolos Crômicos Pálicos	69.103,75	0,81
Nitossolos Vermelhos Eutróficos	65.070,46	0,77
Gleissolos Háplicos Ta Distróficos	63.456,22	0,75
Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos	33.915,32	0,40
Cambissolos Húmicos Distróficos	32.295,47	0,38
Planossolos Nátricos Órticos	32.303,75	0,38
Latossolos Brunos Distróficos	29.746,27	0,35
Chernossolos Argilúvicos Órticos	25.079,14	0,30
Argissolos Amarelos Distrocoesos	25.145,40	0,30
Neossolos Flúvicos Ta Eutróficos	19.757,31	0,23
Gleissolos Sálidos Sódicos	17.628,22	0,21
Planossolos Háplicos Distróficos	16.154,05	0,19
Neossolos Regolíticos Eutróficos	13.900,99	0,16
Nitossolos Vermelhos Distróficos	13.122,89	0,15
Afloramentos de Rochas	10.827,71	0,13
Nitossolos Háplicos Eutróficos	10.998,19	0,13
Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	8.364,82	0,10
Latossolos Vermelho Eutroféricos	8.012,66	0,09
Nitossolos Háplicos Distróficos	7.340,92	0,09
Vertissolos Ebânicos Órticos	7.785,30	0,09
Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos	7.035,84	0,08
Latossolos Vermelho-Amarelos Distroféricos	6.570,23	0,08
Gleissolos Tiomórficos Órticos	6.113,21	0,07
Chernossolos Rêndzicos Órticos	6.174,78	0,07

Chernossolos Ebânicos Órticos	5.952,10	0,07
Argissolos Amarelos Distróficos	5.020,95	0,06
Neossolos Regolíticos Distróficos	4.940,45	0,06
Neossolos Flúvicos Tb Distróficos	4.950,14	0,06
Latosolos Vermelho Eutróficos	4.582,53	0,05
Vertissolos Ebânicos Carbonáticos	3.953,56	0,05
Vertissolos Háplicos Órticos	4.164,83	0,05
Espodossolos Ferrihumilúvicos Órticos	3.148,90	0,04
Espodossolos Ferrihumilúvicos Hiperespessos	3.514,33	0,04
Organossolos Háplicos Hêmicos	2.231,32	0,03
Cambissolos Háplicos Perférricos	1.672,28	0,02
Argissolos Acinzentados Distrocoesos	1.824,70	0,02
Vertissolos Hidromórficos Órticos	1.727,17	0,02
Gleissolos Sálidos Órticos	1.064,98	0,01
Neossolos Flúvicos Tb Eutróficos	560,42	0,01

Fonte: AGLIO (2011).

Mesmo conhecendo a classificação do solo, é importante considerar a sua heterogeneidade, que pode ser influenciada por fatores como topografia, grau de intemperismo, vegetação e mineralogia, além dos atributos físicos e químicos (SILVA, 2012).

Como exemplo uma possível modificação, é a compactação do solo, muitas vezes causada pelo uso incorreto ou excessivo de tratores e máquinas, que pode reduzir a capacidade de aeração, a permeabilidade e o teor de água disponível para as plantas, prejudicando seu desenvolvimento (ROSA, 2007).

O aumento da compactação do solo, ocasionado pelo uso excessivo de tratores e máquinas, impacta negativamente no crescimento das plantas, já que aumenta a demanda de tração da semeadora e, conseqüentemente, a resistência do solo à penetração. A resistência à penetração é um dos principais fatores que afetam o crescimento radicular das plantas, visto que a elevação desse parâmetro implica em um maior impedimento mecânico para o crescimento das raízes. Entretanto, outros atributos, como a umidade, densidade, cimentação, teor de matéria orgânica e mineralogia, também influenciam na resistência do solo à penetração (GONÇALVES, 2017).

2.2.1 Relação do Sulcador com o solo

Um fator crucial para o crescimento vegetativo das plantas é a resistência do solo à penetração (RP), considerada a propriedade mais adequada para medir o grau de compactação do solo e a facilidade de penetração das raízes (PEREIRA, 2002). A resistência do solo à penetração é influenciada por várias propriedades do solo, como agregação, teor de umidade, densidade, textura, cimentação, teor de matéria orgânica e mineralogia (TAVARES FILHO et al., 2012). Valores acima de 2,0 MPa de resistência podem restringir o crescimento radicular das plantas (GONÇALVES, 2017).

Portanto, o uso do sulcador é uma operação de preparo que não só abre sulcos para o depósito de sementes e fertilizantes, mas também reduz a compactação do solo e oferece condições para o melhor desenvolvimento das plantas. Além disso, a utilização do sulcador pode promover modificações nos atributos físicos, como densidade e resistência do solo à penetração, reduzindo a resistência à penetração em até 20% (GONÇALVES, 2017).

2.2.2 Força sobre o Sulcador

Para obter bons resultados com o uso do sulcador, é fundamental ter uma compreensão clara da dinâmica entre a máquina e o solo. Essa dinâmica envolve tanto o conhecimento mecânico relacionado ao implemento quanto o conhecimento sobre as propriedades do solo.

Na interação entre máquina e solo, é possível identificar três sistemas de força: a força do solo sobre a ferramenta, a força peso que atua no centro de gravidade do sulcador e a força que atua entre o movimento. Essas forças são influenciadas pelo movimento e pelo formato da ferramenta, bem como pelas condições do solo. Reduzir esses sistemas a uma força e um momento pode facilitar o processo de medição e ajudar a otimizar o uso do sulcador (PAYNE, 1956; ROSA, 2007).

2.3 Fadiga

De acordo com a American Society for Testing Materials (ASTM E466-07), o conceito de fadiga está relacionado a uma mudança progressiva e permanente na estrutura de um material, ocorrendo quando submetido a condições que geram flutuações de tensão e deformação em pontos específicos. Esse processo culmina no surgimento de trincas ou até mesmo na fratura total após um número suficiente de ciclos de carga.

O fenômeno da fadiga é descrito como uma falha ou ruptura que ocorre após um componente ou estrutura ter sido submetido a ciclos de tensões repetidos ou flutuantes, em que a tensão nominal máxima é inferior ao limite de escoamento do material (TORRES, 2002; CAMARGO, 2007).

Estudos comprovam a existência de situações nas quais as tensões cíclicas aplicadas na estrutura ou componentes multiplicam-se várias vezes devido aos defeitos superficiais dos componentes (concentradores de tensões geométricos, K_t) presentes, principalmente, na superfície desses elementos, que o levam ao rompimento devido ao acúmulo de danos físicos ao nível inicialmente microscópico do material constituinte (DIETER, 1988; SCHIJVE, 2001; PADILHA, 2004).

A avaria por fadiga limita a vida útil de muitos componentes de engenharia sujeitos a carregamentos cíclicos. Esse tipo de avaria se manifesta através da nucleação de trincas por fadiga e sua propagação até a falha completa. No caso de componentes críticos, essa avaria pode resultar em falhas catastróficas, com consequências que envolvem perda de vidas humanas, danos materiais e/ou prejuízos aos equipamentos (MARCO, 2003).

A literatura pertinente estabelece que as fraturas por fadiga ocorrem devido à ação simultânea de três fatores: tensão cíclica, tensão de tração e deformação plástica. A presença dos três é essencial para a ocorrência desse fenômeno (BAPTISTA, 2000). A tensão cíclica inicia a formação da trinca por fadiga, a tensão de tração promove sua propagação, e a natureza irreversível do escoamento plástico contribui para o acúmulo de danos a cada ciclo.

As tensões residuais próximas à superfície têm uma importante influência na vida em fadiga. Quando se têm tensões residuais de compressão, ao longo de uma superfície, a vida em fadiga é aumentada, enquanto tensões residuais de tração na superfície podem causar uma menor resistência à fadiga. A formação de uma tensão residual de compressão favorável é provavelmente o mais eficiente método para aumentar o desempenho em fadiga. Sabe-se que as tensões residuais têm um papel importante na iniciação e crescimento de trincas por fadiga.

A fadiga causa a maioria das fraturas em materiais, portanto, é essencial realizar um estudo aprofundado nos projetos de peças sujeitas a carregamento cíclico, visando garantir a segurança estrutural e a confiabilidade dos componentes estruturais.

Dois enfoques importantes em projetos relacionados à fadiga precisam ser considerados: um baseia-se no conceito de “vida segura”, o segundo na “falha segura” (PAYNE, 1976).

O processo de fadiga se divide em três estágios:

No Estágio I, ocorre a nucleação da trinca por meio de uma deformação plástica localizada.

No Estágio II, ocorre o crescimento da trinca em um plano perpendicular à direção da tensão principal de tração.

No Estágio III, a trinca atinge um tamanho crítico durante a sua propagação progressiva no último ciclo de tensões.

A Figura 24 ilustra as fases do processo de fadiga.

Figura 24 -Representação gráfica das fases do processo de fadiga.

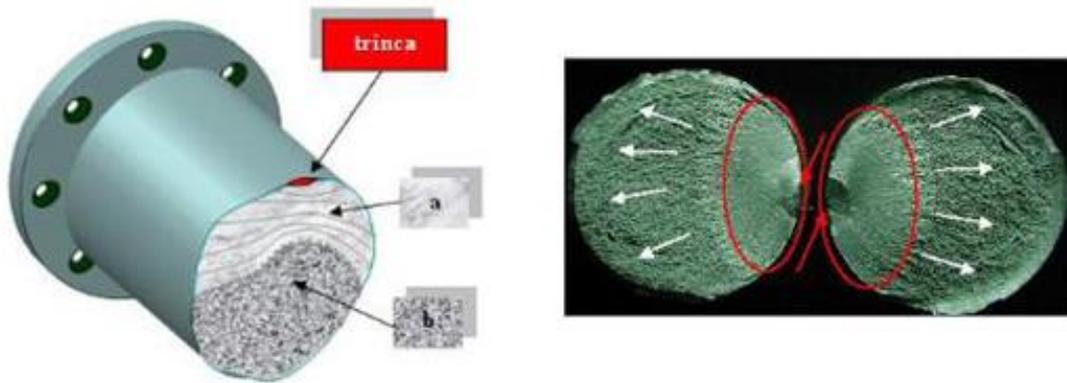


Fonte: FADEL (2010).

De acordo com Garcia *et al.* (2000), a trinca em fadiga avança de modo cíclico, e a cada novo ciclo de tensão ou etapa de abertura ou fechamento da trinca, deixa na macroestrutura da superfície de fratura sinais conhecidos por marcas de praia (*beachlines*). Essas marcas apresentam-se curvadas em relação à origem da falha, admitindo assim, investigações que conduzam à identificação do ponto de origem do processo de fratura.

Na Figura 25 é possível notar as marcas de praia. As bandas mais claras representam uma programação basicamente plana, já as mais escuras uma propagação tortuosa, rugosa (caracterizada por níveis de tensão mais elevados).

Figura 25 - Aparência típica da superfície onde ocorreu fratura por fadiga.



Fonte: FADEL (2010).

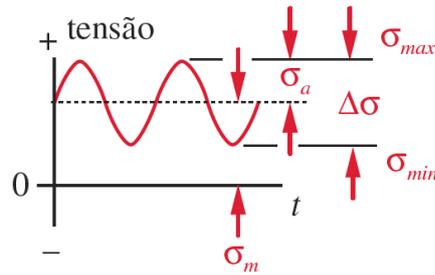
A última etapa é conhecida como ruptura final, que é uma falha catastrófica. Ela ocorre quando o limite de tenacidade à fratura ou valor crítico do comprimento da trinca é atingido. Neste momento a seção transversal da peça não suporta a carga aplicada. Na Figura 25 observam-se as etapas dos processos de fratura, o início da trinca, a propagação da trinca (marcas de praia) e a região da ruptura final (PINTO NETO, 2013).

2.3.1 Parâmetros dos ciclos de tensão

O número de ciclos de tensão ou deformação exigidos para ocasionar a falha é que representa a vida em fadiga de qualquer material. Nesta avaliação os materiais são submetidos a testes laboratoriais sujeitos a diversos tipos de carregamentos, dos quais os mais empregados são: ensaios de fadiga que compreendem carga axial, flexão rotativa e flexão alternada (CAMARGO, 2007; PADILHA, 2004).

De acordo com Pinto Neto (2013), a fadiga é o resultado obtido quando uma peça é submetida a uma tensão que varia de forma cíclica ao longo do tempo. A tensão controlada, conforme ilustra a Figura 26 é responsável por definir a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$), para um tipo de carregamento, onde estas tensões são positivas (pulsantes).

Figura 26 - Parâmetros para descrever os ciclos de fadiga de amplitude constante.



Fonte: NORTON (2013).

Onde:

$\sigma_{\text{máx.}}$ - tensão máxima, maior valor algébrico atingido pela tensão durante o ciclo.

$\sigma_{\text{mín.}}$ - tensão mínima, menor valor algébrico atingido pela tensão durante o ciclo.

$\sigma_{\text{média}}$ - tensão média.

$$\sigma_{\text{média}} = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}) / 2 \quad \text{Eq. [1]}$$

$\Delta\sigma$ ou σ_r - variação de tensão.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad \text{Eq. [2]}$$

São conceituados ainda os parâmetros:

R - razão de tensão.

$$R = \sigma_{\text{mín}} / \sigma_{\text{máx}} \quad \text{Eq. [3]}$$

σ_a - amplitude da tensão.

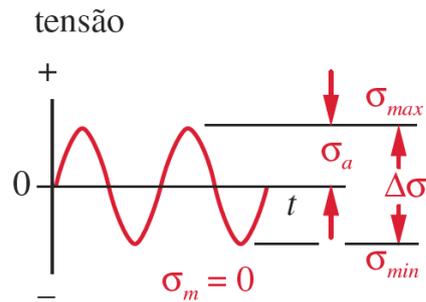
$$\sigma_a = \Delta\sigma / 2 \quad \text{Eq. [4]}$$

Em um ciclo alternado de tensões, onde os valores absolutos da tensão máxima e mínima são iguais, tem-se que a razão de cargas $R = -1$, e no ciclo repetido ou flutuante, $R \geq 0$.

A Figura 26 ilustra o ciclo de tensão flutuante, com $R \neq 0$ e a Figura 27 um ciclo onde $R = -1$.

A Figura 27 ilustra um ciclo de tensões alternadas de forma senoidal. Para este tipo de ciclo de tensões, as tensões máxima e mínima são iguais, porém, de sinais contrários.

Figura 27 - Ciclo de tensão alternada.

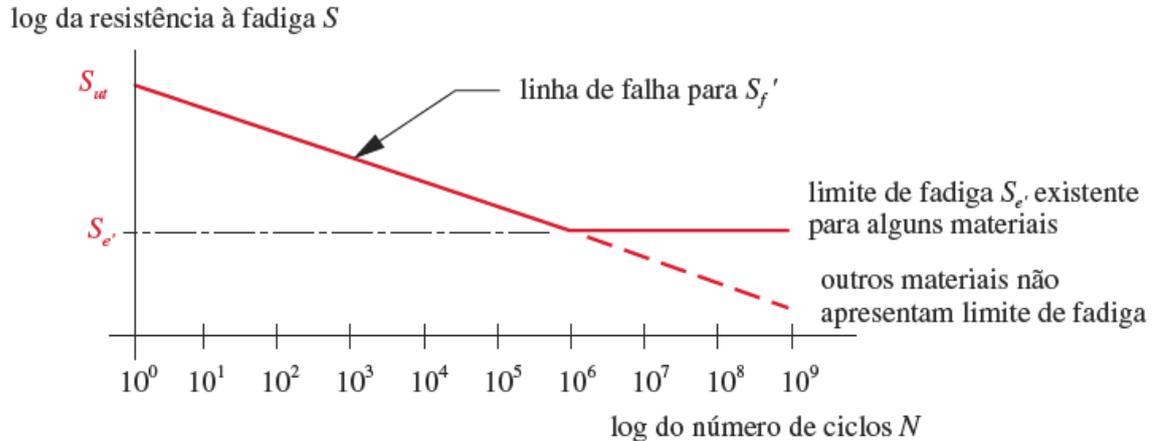


Fonte: NORTON (2013).

2.3.2 A Curva S-N

A Figura 28 ilustra uma das formas para se representar a vida em fadiga em relação ao esforço cíclico aplicado a diferentes materiais.

Figura 28 - Curva S-N



Fonte: NORTON (2013).

A norma ASTM E 739 (*Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data*) determina como se deve proceder para determinar uma curva S-N, nesta pesquisa denominada curva S-N. Segundo a norma, a curva S-N é obtida com a determinação do número de ciclos até a ruptura dos corpos de prova e da tensão a qual estes são submetidos. Nos ensaios, as condições iniciais devem ser idênticas, de modo a evitar influências externas nos ensaios. Cada corpo de prova é submetido a uma determinada amplitude de tensão que se mantém constante durante todo o ensaio, que termina

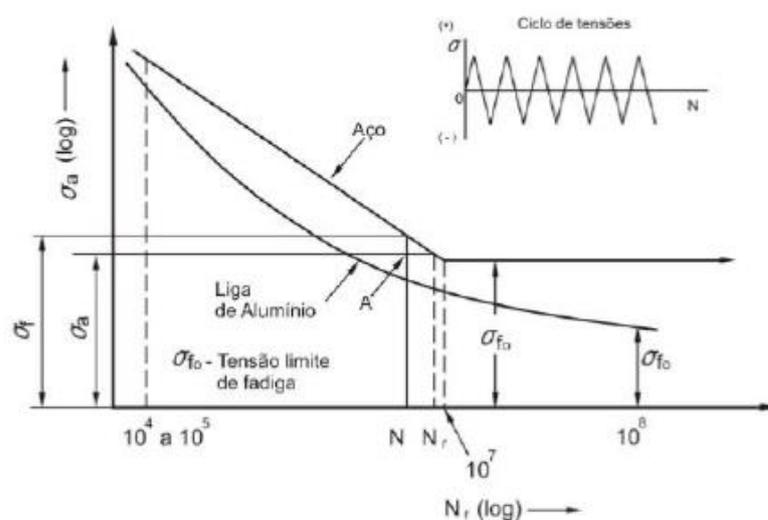
quando o corpo de prova é rompido ou, quando se exceder um determinado número de ciclos muito longo, interrompe-se o ensaio. No eixo das ordenadas, pode-se também utilizar como controle a tensão máxima ou a tensão média (PINTO NETO, 2013).

A curva S-N básica, para o caso mais crítico de carregamento, é obtida quando a tensão média é zero, isto é, a tensão mínima é compressiva com $|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$, a razão de carregamento é $R = -1$, porém, pode-se utilizar outros valores de razão de carga R .

A curva S-N pode ser representada com o número de ciclos N (ou $\log N$) no eixo das abscissas e com os valores da tensão máxima, $|\sigma_{\max}|$, no eixo das ordenadas, que também poderão ser expressos em escala logarítmica (PINTO NETO, 2013).

A Figura 29 mostra de forma comparativa uma curva S-N para o aço e outra para uma liga de alumínio.

Figura 29 - Curva S-N para um aço maciço e uma liga de alumínio.



Fonte: FADEL (2010).

No caso do aço há uma região para valores aproximadamente da ordem de 10^7 ciclos, em que uma reta delimita um patamar de tensão. O nível de tensão deste patamar é chamado limite de resistência à fadiga e se traduz como sendo o nível de tensão máximo para o qual o material poderia suportar um número infinito de ciclos sem que ocorra uma falha (PINTO NETO, 2013). Além disso, vale mencionar que algumas literaturas, como Norton (2013), adotam o número de 10^6 ciclos como referência para a vida infinita na análise da fadiga.

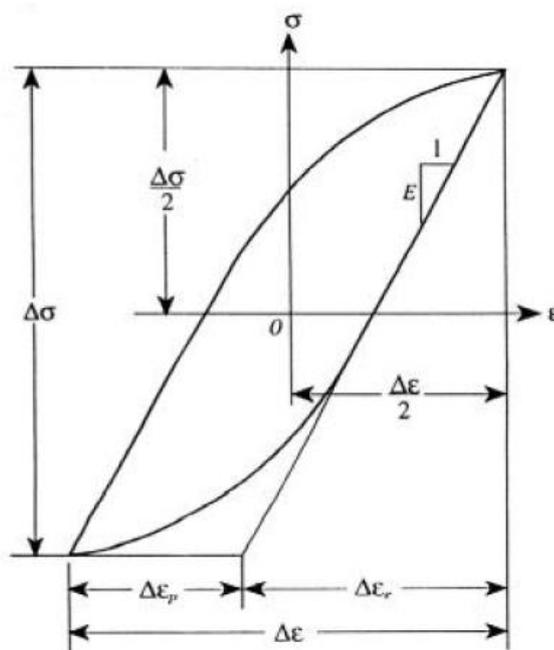
No caso do alumínio, o comportamento é diferente. O patamar do limite de resistência à fadiga é menos evidente. O que ocorre nesses casos é um comportamento assintótico tendendo

para um σ_{f0} dado valor. É comum definir a vida infinita como sendo algo da ordem de 10^7 ciclos para materiais que possuem este tipo de comportamento (ALENCAR, 2013).

2.3.3 Relação entre tensão e deformação durante a fadiga

A Figura 30 apresenta a relação entre a tensão e a deformação plástica durante a alternância de tensões. Um ciclo completo, com tração e compressão, dá um laço de histerese que fornece uma forma de descrição do comportamento do material sob carregamento cíclico (ZAHAVI, 1996; PADILHA, 2004).

Figura 30 - Laço de histerese sob carga cíclica.



Fonte: ZAHAVI (1996) *apud* PADILHA (2004).

As deformações elásticas e plásticas são dadas respectivamente por:

$\Delta\epsilon_e$ = deformação elástica;

$\Delta\epsilon_p$ = deformação plástica;

σ = tensão aplicada;

E = módulo de elasticidade longitudinal.

Para o primeiro carregamento em tração, a curva é idêntica à curva tensão – deformação obtida por meio de um ensaio estático. Em tensões baixas, a deformação é integralmente elástica e a curva acompanha em linha elástica, porém, acima do limite elástico incide a deformação plástica com a ampliação da tensão. Descarregando, a deformação segue em

direção à esquerda do eixo ϵ , sendo que, para os metais, de forma geral, é paralela à linha elástica (PADILHA, 2004).

No carregamento por compressão, a deformação plástica tem início em uma direção oposta – na redução do limite elástico na compressão é resultado da pré-carga na tração, conhecido como efeito Bauschinger¹. No descarregamento da compressão, outra vez a linha obtida é paralela à linha elástica. Então, recarrega-se em tração (ZAHAVI, 1996; PADILHA, 2004).

Se os níveis alternados de tensão são idênticos entre tensão e compressão, a deformação de tração deverá ser anulada pela deformação de compressão e, após poucos ciclos de tensões é obtido um laço fechado (closed loop) (ZAHAVI, 1996; PADILHA, 2004).

A faixa de deformação durante um ciclo de tensão é igual à soma das deformações elástica e plástica. A deformação plástica é igual à largura do laço de histerese em sua seção central.

No decorrer do ensaio de fadiga sob carga constante, a deformação plástica que ocorre em cada ciclo vai variando durante o ensaio (ZAHAVI, 1996).

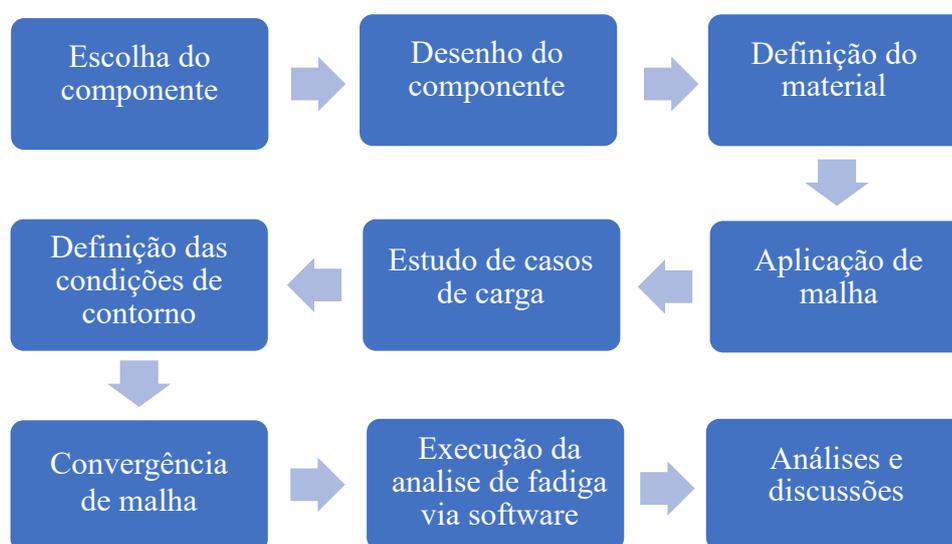
¹ O efeito Bauschinger se refere a uma propriedade dos materiais em que as características de tensão / deformação do material mudam como resultado da distribuição microscópica da tensão do material. Por exemplo, um aumento da tração ocorre à custa de compressão força de rendimento.

3 METODOLOGIA

3.1. Escopo de atividades

Para a concepção do projeto, foi conduzida uma análise minuciosa sobre fadiga e a haste sulcadora, utilizando de forma abrangente as capacidades do software de Análise de Elementos Finitos (FEA) do ANSYS® na versão de estudante 2023R1 para avaliação dos dados. Para o estabelecimento da metodologia, foram seguidas as etapas delineadas no fluxograma ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma das atividades.



Fonte: Do autor (2023).

3.2. Detalhamento das etapas

3.2.1. Escolha do componente

Foi realizado uma pesquisa, como a intenção de compreender todos os elementos constituintes de uma semeadora, com foco especial em um componente submetido a elevadas cargas e suscetível a falhas por fadiga, a haste sulcadora. Com o intuito de investigar esse componente, foram analisados os diversos tipos de hastes sulcadoras disponíveis no mercado, com destaque para aquelas mais amplamente utilizadas. Como resultado, optou-se pelo modelo comercializado pela John Deere, denominado KK13478.

3.2.2. Desenho do componente

Com base nessa fase inicial, iniciou-se o processo de pré-processamento, que incluiu a criação de um modelo CAD da haste sulcadora. Para isso, tomou-se como base o modelo comercializado pela John Deere, o KK13478, que passou por algumas modificações, como a remoção de todos os orifícios de conexão do tubo de fertilizante e a adição da ponteira. Isso pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 - Haste KK13478 e sua representação em CAD.



Fonte: Do autor (2023).

3.2.3. Definição do material

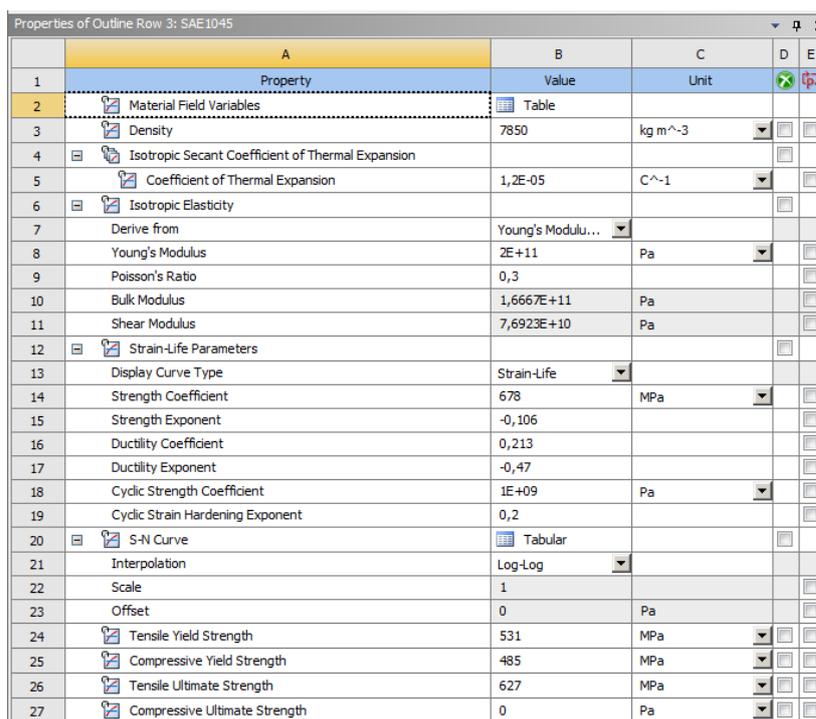
Ao definir o material e as propriedades da haste sulcadora, é crucial considerar que, geralmente, a fabricação desse componente emprega aço ou ferro fundido devido às suas características mecânicas, como alta resistência à tração e boa dureza. A seleção do material depende de fatores como o tipo de solo, as condições operacionais e as exigências de custo. Alguns fabricantes utilizam materiais compostos, como aço revestido com materiais resistentes ao desgaste, a fim de prolongar a vida útil da haste sulcadora (MARTINS, 2020).

No entanto, o aço carbono SAE 1045 é amplamente empregado para essa aplicação, devido à sua combinação favorável de propriedades mecânicas, incluindo alta resistência à tração e boa dureza. O SAE 1045 é de fácil usinagem e amplamente disponível, tornando-se uma escolha atrativa para muitos fabricantes (MARTINS, 2020; MOHAMMAD, 2018). Assim, o aço SAE 1045 foi selecionado como o material para o presente projeto, como um cenário

específico de teste. No entanto, é importante destacar que essa seleção não implica necessariamente que o aço SAE 1045 seja o material definitivamente utilizado pela haste sulcadora da John Deere.

Com a escolha do material realizada, as informações referentes às propriedades foram obtidas a partir do livro de Norton (2013) e do artigo de Rahman (2008). Em seguida, esses dados foram inseridos no software ANSYS®, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Propriedades do aço estrutural



Properties of Outline Row 3: SAE1045				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulu...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
13	Display Curve Type	Strain-Life		
14	Strength Coefficient	678	MPa	
15	Strength Exponent	-0,106		
16	Ductility Coefficient	0,213		
17	Ductility Exponent	-0,47		
18	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa	
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2		
20	S-N Curve	Tabular		
21	Interpolation	Log-Log		
22	Scale	1		
23	Offset	0	Pa	
24	Tensile Yield Strength	531	MPa	
25	Compressive Yield Strength	485	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	627	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Fonte: Do autor (2023).

3.2.4. Aplicação de malha

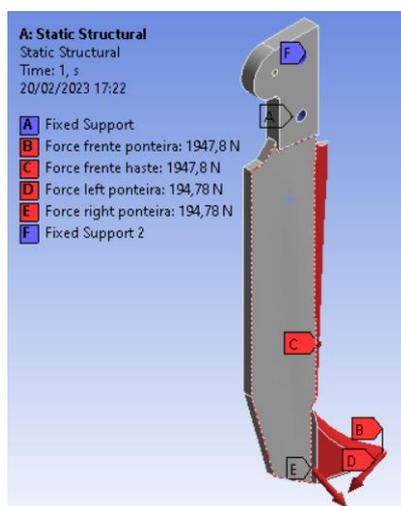
Uma vez definido o material do componente e finalizado o desenho CAD, foi criada uma malha inicial abrangendo toda a estrutura, garantindo um processamento adequado. Para isso, foram gerados um total de 14.719 nós e 8.355 elementos, de modo a representar de forma precisa o componente em análise.

3.2.5. Casos de carga e condições de contorno

Após gerar a malha, procedeu-se à definição das condições de contorno para o problema. Inicialmente, foram identificados os pontos que receberiam a carga aplicada, seguidos daqueles com restrições de movimento. Para o primeiro teste, as cargas foram estabelecidas com base na utilização convencional da haste em solo classificado como Planossolo Hidromórfico, utilizando os dados coletados por Troger (2012). As cargas selecionadas correspondem às médias extremas encontradas na pesquisa, sendo uma força horizontal de 1.755 N e uma força vertical de 845 N, resultando em uma força resultante de 1.947,8 N. Com o intuito de assegurar a integridade estrutural e prevenir sobrecargas nas partes do equipamento associadas à resistência lateral, foi adotada como margem de segurança uma carga lateral correspondente a 10% da força resultante.

O engaste foi aplicado nos furos de fixação da haste, e a força foi aplicada na região de contato com o solo, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Condição de contorno da Haste Sulcadora



Fonte: Do autor (2023).

A solução foi processada por meio do software ANSYS®, e durante a etapa de pós-processamento, foi analisada a coerência dos resultados obtidos em relação ao problema físico em questão. Nesse estágio, foi crucial verificar se a solução era aceitável e representava adequadamente o fenômeno. Caso contrário, seria necessário retornar à etapa de pré-processamento, rever as condições e realizar uma nova simulação.

3.2.6. Convergência de malha

Com as definições preliminares estabelecidas, deu-se início ao processo de convergência da malha. A análise de convergência da malha é uma etapa fundamental no estudo de elementos finitos e é especialmente relevante em problemas de análise estrutural. Seu propósito é avaliar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos por meio da simulação numérica. Para realizar essa análise, o modelo de elementos finitos é construído com uma malha inicial e, em seguida, a malha é progressivamente refinada até que se alcance a convergência (ALVES FILHO, 2018).

A convergência da malha é atingida quando o resultado da análise numérica não é mais influenciado pelo aumento na densidade da malha. Em outras palavras, considera-se que o resultado obtido com a malha mais refinada possível é o resultado exato. A análise de convergência da malha permite avaliar se o modelo de elementos finitos é suficientemente preciso para fornecer informações relevantes sobre a resistência e a vida útil do componente em estudo (ALVES FILHO, 2018).

Além disso, a análise de convergência da malha auxilia na identificação de áreas críticas do modelo que possam requerer maior refinamento da malha. A convergência da malha é avaliada por meio de análise gráfica, comparando os resultados obtidos em cada etapa da análise numérica com o resultado obtido utilizando a malha mais refinada (NORTON, 2013).

3.2.7. Execução da análise de fadiga via software

Após estabelecer a malha ideal, o processo de execução foi conduzido utilizando diferentes cargas, correspondentes a diferentes tipos de solo. Com o objetivo de conferir maior relevância ao estudo, foram selecionados os principais solos que abrangem o território nacional brasileiro. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, os Latossolos, Argissolos e Neossolos representam aproximadamente 70% desse território (SARTORI, 2011). Adicionalmente, foram incluídos os Planossolos e Nitossolos para complementar a pesquisa.

A determinação das cargas aplicadas em uma haste sulcadora é um desafio complexo, uma vez que diversas variáveis influenciam as tensões horizontais e verticais em diferentes profundidades. A densidade do solo, a umidade, a velocidade da máquina e outros fatores desempenham um papel crucial nessa variação (PALMA, 2013). Adicionalmente, é importante ressaltar que essas tensões podem variar em diferentes locais e momentos, de acordo com as

condições do solo e as atividades de plantio realizadas. Considerando a complexidade das informações em questão, optou-se por empregar casos de carga provenientes de estudos de campo que coletaram tais dados. Detalhes estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Força Resultante e Informações dos Solos para Análise de Haste Sulcadora

Solo	Fr	Profundidade	Umidade	Velocidade	Fonte
	N	m	%	Km/h	
Planossolo hidromórfico	1.947,83	0,12	13,3	1,1	TROGGER (2012)
Nitossolo Vermelho Distroférrico	1.209,30	0,2	25,5	5,19	MION (2008)
Latossolo Vermelho distrófico	1.996,60	0,12	17,4	4,5	CONTE (2008)
Neossolo Quartzarênico	2.511,00	0,2	5,7	4,31	SASAKI (2001)
Argissolo Vermelho Distrófico	2.262,50	0,133	21	5,5	CEPIK (2022)
Argilossolo Vermelho Amarelo	5.330,00	0,1	38	4,36	TRENTIN (2025)

Fonte: Do autor (2023).

Após a definição das cargas, a análise é realizada utilizando o software de simulação ANSYS®, que utiliza métodos numéricos para investigar o comportamento de estruturas submetidas a cargas repetitivas. Para a análise de fadiga, são empregados dois métodos principais: o método de elementos finitos (FEM) e o método de estimativa de vida útil (BROWELL, 2023).

3.2.8. Análises dos resultados obtidos

No método FEM, a estrutura é discretizada em elementos finitos, e as equações matemáticas são resolvidas para determinar as cargas e deformações em diferentes regiões da estrutura. A partir dessas informações, é possível calcular as tensões e deformações na superfície crítica da estrutura, onde a fadiga é mais provável de ocorrer (BROWELL, 2023).

Por outro lado, o método de estimativa de vida útil utiliza equações de fadiga para estimar a quantidade de ciclos de carga que a estrutura pode suportar antes de falhar. Essas equações incluem a curva S-N, que relaciona a tensão de fadiga com o número de ciclos de carga (BROWELL, 2023). Dessa forma, tanto o método FEM quanto o método de estimativa

de vida útil são essenciais para compreender a resistência e a durabilidade da haste sulcadora sob diferentes condições de solo. Para realizar a análise, serão verificadas as informações emitidas pelo software ANSYS para cada tipo de solo, sendo eles os resultados de deformação, tensão Von Mises, vida sob fadiga, fator de segurança e dano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de assegurar a qualidade e a precisão dos resultados do presente projeto, realizou-se uma análise de convergência de malha com base na máxima tensão de von Mises. Tal análise consistiu na execução do modelo em diferentes malhas, variando o número de elementos, a fim de verificar a estabilidade da solução. A convergência foi avaliada mediante a comparação dos valores máximos de tensão de von Mises em cada malha. Observou-se que, à medida que o número de nós aumentava, a solução se aproximava de um valor limite. Dessa forma, foi selecionado um número de nós capaz de assegurar a precisão dos resultados, sem prejudicar a eficiência computacional. Com base nessa análise, pode-se garantir que a simulação final apresentará um nível adequado de precisão e confiabilidade.

Para a análise de convergência de malha, foram coletadas as tensões de von Mises, juntamente com as informações sobre o tamanho dos elementos e o número de nós. A partir desses dados, calculou-se o erro relativo, conforme demonstrado na Tabela 3. Devido a limitação do software em versão de estudante, não possível reduzir mais o erro relativo, pois o número de nós e elementos ultrapassava o limite disponível.

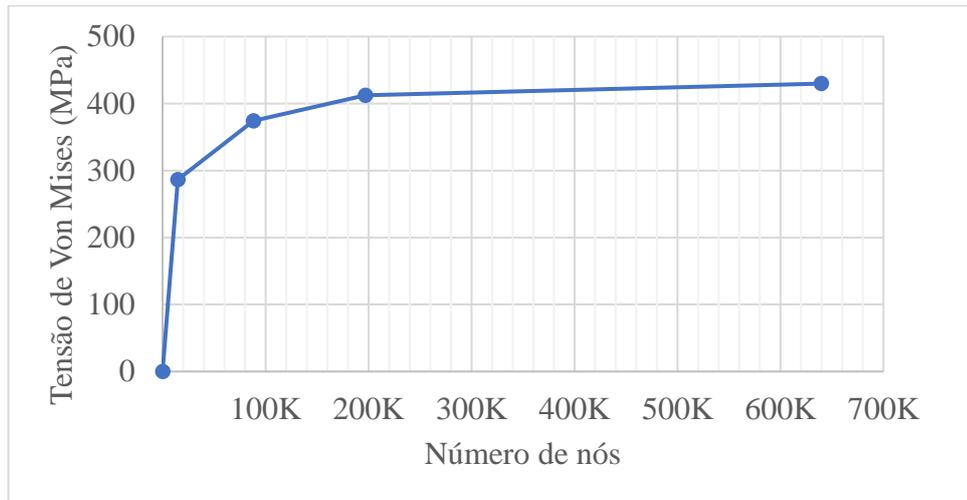
Na Figura 35 é apresentado o gráfico da convergência de malha.

Tabela 3 - Tabela de convergência de malha.

Tamanho dos elementos	Número de Nós	Tensão máxima von Mises	Erro relativo
mm		MPa	%
8	14.719	286,62	23%
4	88.264	374,27	9%
3	196.987	412,42	4%
2	639.460	429,79	-

Fonte: Do autor (2023).

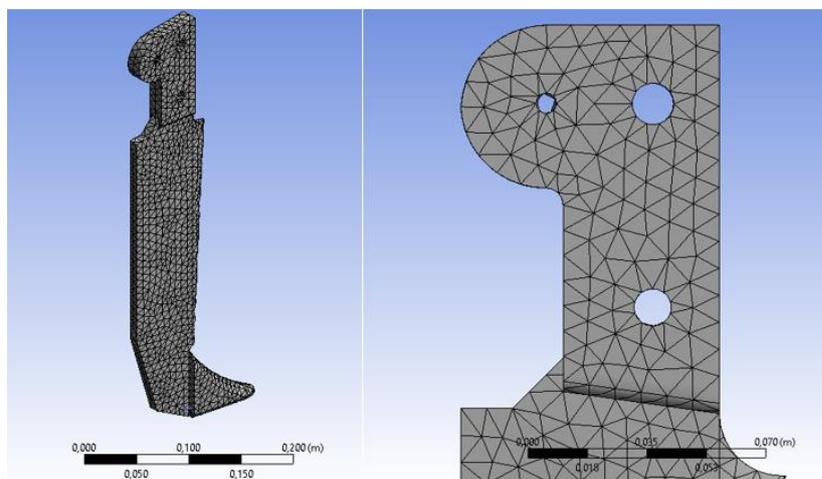
Figura 35 - Convergência de Malha.



Fonte: Do autor (2023).

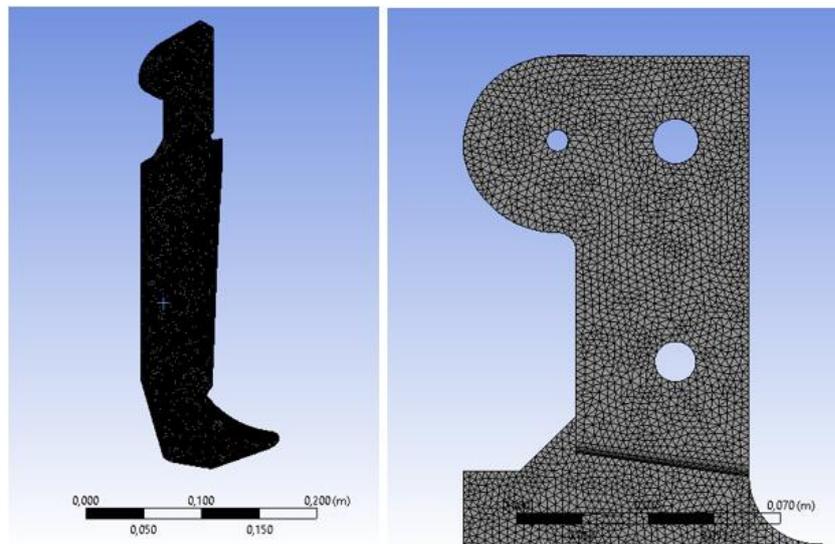
Para ilustrar a relevância da análise de convergência de malha, foram geradas duas representações visuais da haste sulcadora modelada no software ANSYS®. A Figura 36 retrata o estágio inicial da malha, onde esta ainda não passou por refinamentos e apresenta um número restrito de nós. Já a Figura 37 exibe o estágio final da malha, caracterizado por refinamentos significativos, resultando em um maior número de nós. Na Figura 36, percebe-se arestas retas nas furações e bordas da haste, enquanto na Figura 37, as bordas são mais suaves e arredondadas. Além disso, observa-se que a malha na Figura 37 é mais uniforme, sem variações expressivas no tamanho dos elementos. Essa evidência ressalta que a análise de convergência de malha é crucial para garantir a precisão dos resultados e a confiabilidade do modelo.

Figura 36 - Primeiro estágio da convergência de malha.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 37 - Último estágio da convergência de malha.



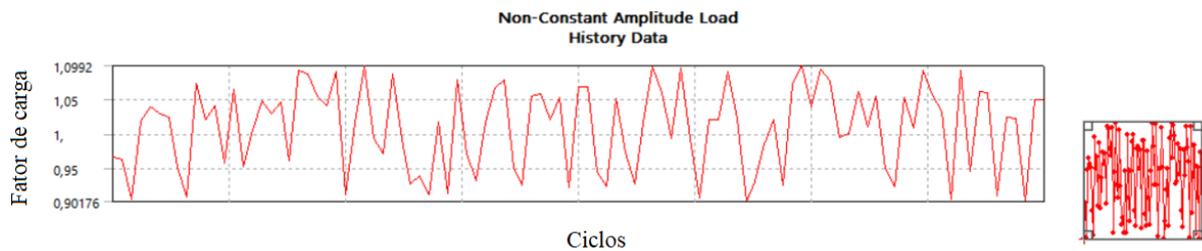
Fonte: Do autor (2023).

Após a definição da malha, iniciou-se o processo de determinação das cargas para cada tipo de solo. No entanto, essa tarefa é desafiadora devido à influência de múltiplos fatores, como a densidade, a umidade do solo e a velocidade da máquina. Para superar essa dificuldade, utilizaram-se dados obtidos em estudos de campo como referência para os cálculos. Esses dados fornecem informações sobre as tensões horizontais e verticais em diferentes profundidades e tipos de solo, permitindo a definição de valores aproximados para análise e projeto do sulcador. Essas informações são cruciais para garantir que o sulcador seja capaz de suportar as tensões durante as operações de plantio, evitando falhas estruturais e desgaste prematuro.

O estudo envolverá uma análise de resistência da haste sulcadora considerando os solos mais comuns no Brasil, como o Latossolo Vermelho Distrófico, o Planossolo Hidromórfico, o Neossolo Quartzarênico, o Argissolo Vermelho Amarelo, o Argissolo Vermelho Distrófico e o Nitossolo Vermelho Distróférrico. Essa seleção baseia-se na ampla ocorrência desses solos em várias regiões do país, fornecendo informações valiosas sobre a resistência do sulcador em diferentes condições. O objetivo principal é identificar o pior cenário de carga em relação à resistência da haste sulcadora, garantindo que o equipamento possa suportar as tensões durante as operações de semeadura.

Para aplicar as cargas nos diferentes tipos de solo, foi estabelecido um perfil de carregamento considerando um efeito de variabilidade. Esse efeito é caracterizado por uma variação aleatória com uma amplitude de 20% em relação ao valor da carga, podendo ser até 10% maior ou 10% menor. Essa abordagem de carregamento foi adotada para todos os solos investigados, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Resultado de carregamento



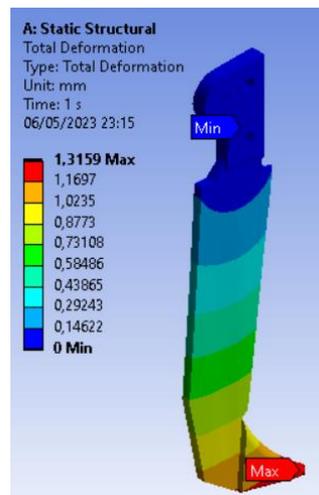
Fonte: Do autor (2023).

A análise inicial foi conduzida no Planossolo Hidromórfico, utilizando os dados de campo coletados por TRÖGER (2012). Considerando as cargas extremas encontradas durante o estudo, foram obtidas uma força horizontal de 1755 N e uma força vertical de 845 N. Utilizando análise vetorial, de acordo com a equação 5, obteve-se uma força resultante de 1947,83 N.

$$F_R = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad \text{Eq. [5]}$$

As condições de carga foram aplicadas conforme representado na Figura 34. Os resultados obtidos, mostrados na Figura 39, revelaram uma deformação máxima de 1,32 mm na região sujeita à carga.

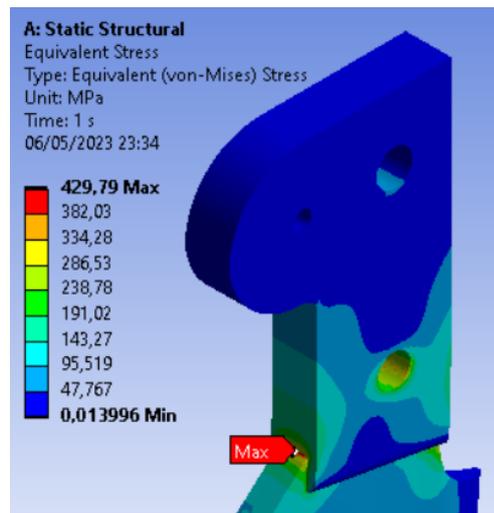
Figura 39 - Deformação da estrutura - Planossolo Hidromórfico.



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar o resultado da tensão de von Mises, observa-se uma magnitude máxima na proximidade do ponto de ancoragem do equipamento, uma área que se destaca por apresentar um elevado torque. Conforme Figura 40.

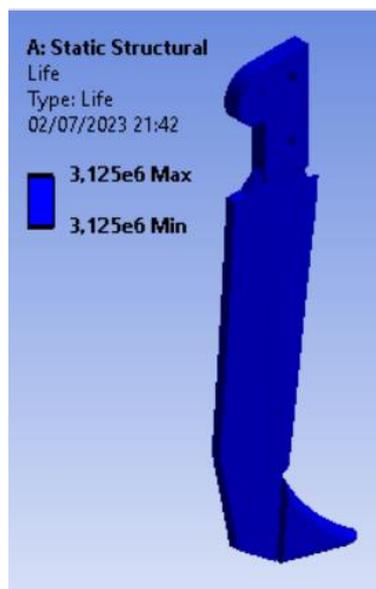
Figura 40 - Tensão de von Mises - Planossolo Hidromórfico.



Fonte: Do autor (2023).

Embora o sistema apresente uma tensão de von Mises elevada e um ponto crítico de concentração de tensão identificado, o equipamento demonstrou uma vida útil à fadiga excepcionalmente longa, podendo ser considerada praticamente infinita. Isso é ilustrado na Figura 41.

Figura 41 - Vida sob fadiga - Planossolo Hidromórfico.

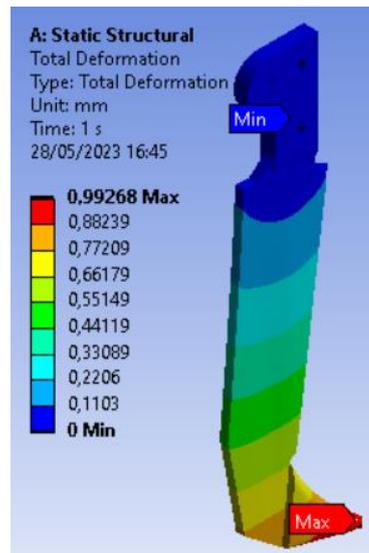


Fonte: Do autor (2023).

A segunda análise foi conduzida no Nitossolo Vermelho Distroférico, utilizando os dados coletados em campo por MION (2008). A carga adotada correspondeu à condição mais extrema encontrada no estudo para a haste sulcadora, com uma força horizontal de 1208,70 N

e uma força vertical de 38,10 N, resultando em uma força total de 1209,30 N. Para a carga lateral, foi considerada uma taxa de 10% desse valor. As condições de carregamento permaneceram inalteradas. Os resultados apresentados na Figura 42 indicam uma deformação máxima de 0,99 mm na região sujeita à carga.

Figura 42 - Deformação da estrutura - Nitossolo Vermelho Distroférico



Fonte: Do autor (2023).

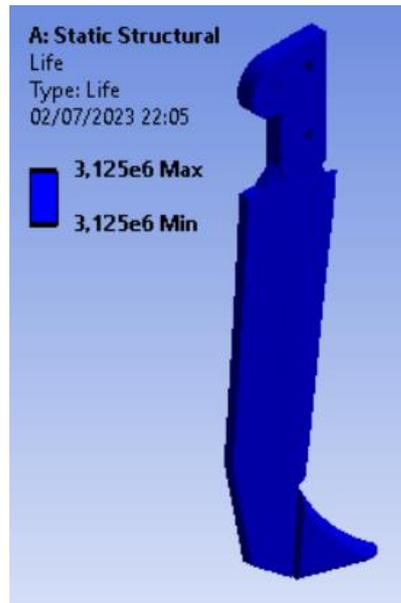
A área com a maior tensão de von Mises permaneceu inalterada, porém observou-se uma diminuição significativa de aproximadamente 30%, alcançando um valor reduzido de 313,99 MPa em comparação ao Planossolo Hidromórfico. Por outro lado, assim como na análise prévia do solo, constatou-se que o equipamento exibe uma vida útil prolongada. As Figuras 43 e 44 ilustram esses resultados.

Figura 43 - Tensão de von Mises – Nitossolo Vermelho Distroférico.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 44 - Vida sob fadiga – Nitossolo Vermelho Distroférico.



Fonte: Do autor (2023).

A terceira análise foi realizada com o Latossolo Vermelho Distrófico, com as informações coletadas em campo por CONTE (2008). No qual apresenta equações para determinar a força de tração na haste para diferentes profundidades. Optou-se por selecionar a profundidade de 12 cm, uma vez que essa é uma medida comumente utilizada na prática, juntamente com uma altura de pastagem de 30 cm. Portanto, a equação adotada para esse propósito foi a seguinte:

$$Y = -18,87X + 2557 \quad \text{Eq. [6]}$$

Onde:

Y = força de tração

X = Altura do pasto

Resolvendo a equação, foi obtido um valor de força de tração de 1996,6 N. Com base nessa informação, determinou-se a força horizontal por meio da relação entre o ângulo formado pela ponteira e o solo, conforme apresentado por ROSA (2009):

$$F_T = \frac{F_H}{\cos \alpha} \quad \text{Eq. [7]}$$

Onde:

Fh – Força horizontal

F_t – Força de tração

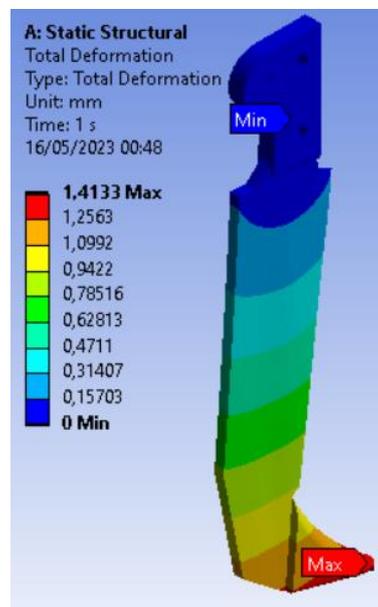
α – ângulo de ataque (°)

O ângulo de ataque adotado é de 11°, conforme indicado no Anexo 1. Ao aplicar esse valor na equação, encontra-se uma força horizontal de 1959,92 N. Para determinar a força vertical correspondente, é considerado que a força de tração é igual à força resultante, permitindo a aplicação de uma análise vetorial, sendo necessário apenas isolar a força vertical.

$$F_v = \sqrt{F_R^2 - F_h^2} \quad \text{Eq. [8]}$$

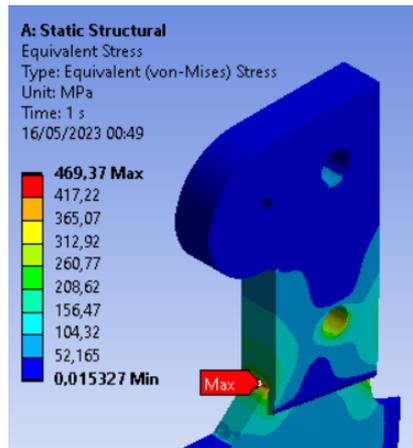
Após substituir os valores e resolver a equação, obteve-se aproximadamente 380,95 N como valor da força vertical. Estabeleceu-se uma taxa correspondente a 10% desse valor para a carga lateral, mantendo as condições de carga inalteradas. Como resultado, verificou-se uma deformação de 1,41 mm, conforme ilustrado na Figura 45. Além disso, a região crítica, identificada pela tensão de von Mises de 469,37 MPa, permanece consistente com análises anteriores, conforme demonstrado na Figura 46.

Figura 45 - Deformação da estrutura – Latossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: Do autor (2023).

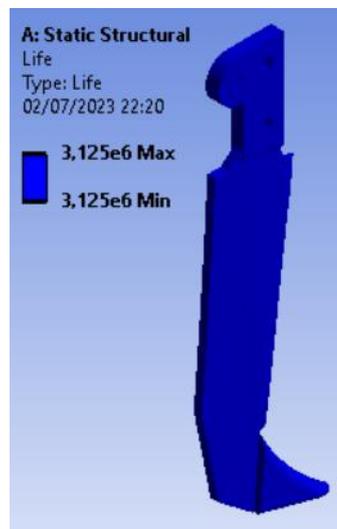
Figura 46 - Tensão de von Mises – Latossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: Do autor (2023).

Independentemente das variações nos solos, constata-se que o equipamento apresenta uma notável vida útil à fadiga, caracterizada como excepcionalmente longa, com todos os casos considerados como vida infinita. Essa informação pode ser observada na Figura 47.

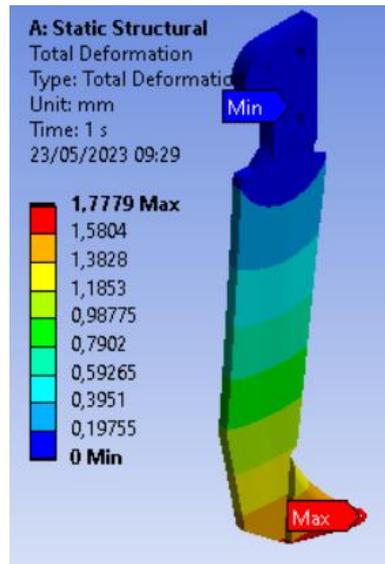
Figura 47 - Vida sob fadiga – Latossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: Do autor (2023).

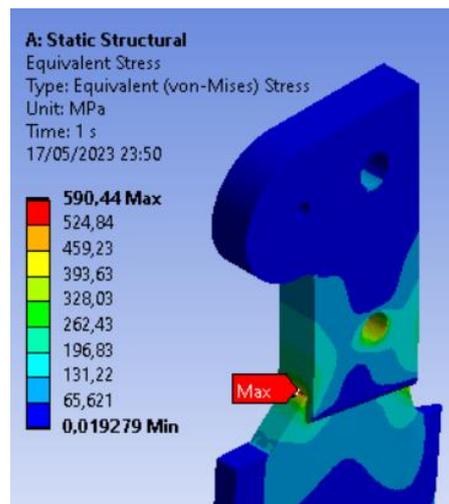
A quarta análise empregou o Neossolo Quartzarênico, utilizando os dados de campo coletados por SASAKI (2001). Nesse solo, identificou-se uma média de força de tração de 2511 N na haste, operando a uma profundidade de 20 cm. Com base nesse valor de força de tração, foram determinadas uma força horizontal de 2464,87 N, por meio da equação 6, e uma força vertical de 479,1 N, calculada com a equação 8. Com essas cargas, os resultados apresentados nas Figuras 48, 49 e 50 foram obtidos, evidenciando a deformação, as áreas de maior tensão e a vida útil específica para esse solo.

Figura 48 - Deformação da estrutura – Neossolo Quartzarênico.



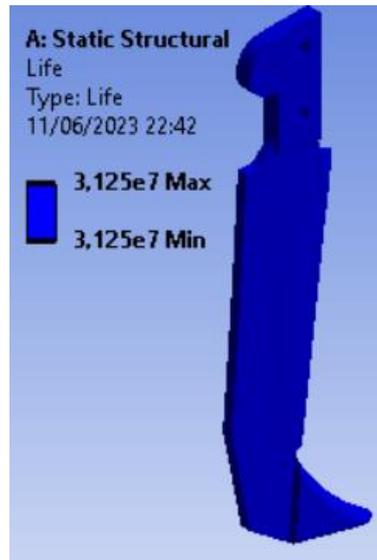
Fonte: Do autor (2023).

Figura 49 - Tensão de von Mises – Neossolo Quartzarênico.



Fonte: Do autor (2023).

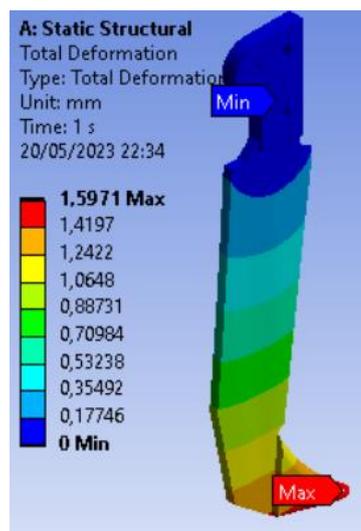
Figura 50 - Vida sob fadiga – Neossolo Quartzarênico.



Fonte: Do autor (2023).

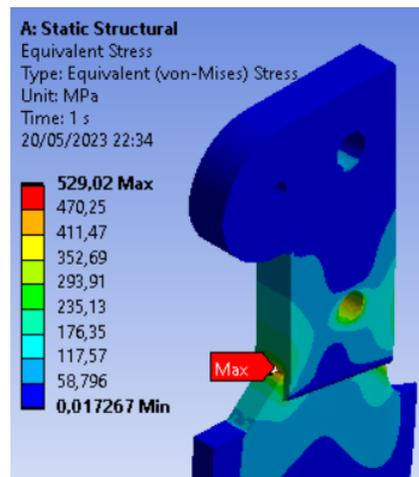
A quinta análise envolveu o Argilossolo Vermelho Distrófico, utilizando os dados coletados em campo por CEPIK (2002). A carga extrema encontrada durante a pesquisa foi considerada, resultando em uma força horizontal de 2201 N e uma força vertical de 524 N, totalizando uma força resultante de 2262,5 N. Para carga lateral foi convencionado uma taxa de 10% desse valor. As condições de carga permaneceram consistentes com as análises anteriores. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 51, 52 e 53.

Figura 51 - Deformação da estrutura – Argilossolo Vermelho Distrófico.



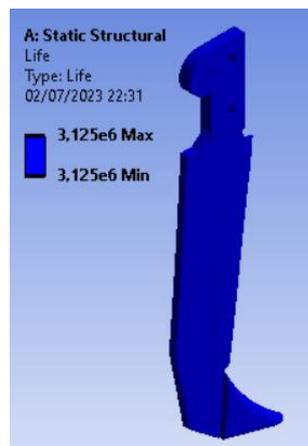
Fonte: Do autor (2023).

Figura 52 - Tensão de von Mises – Argilossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: Do autor (2023).

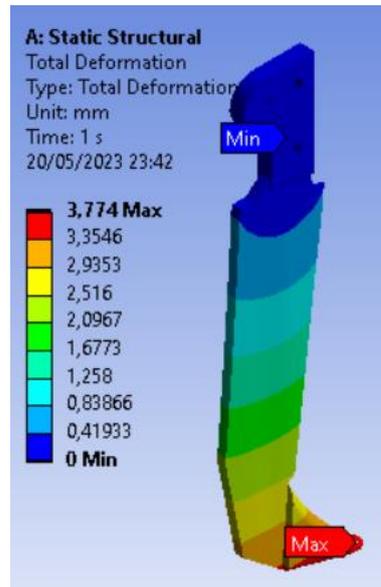
Figura 53 - Vida sob fadiga – Argilossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: Do autor (2023).

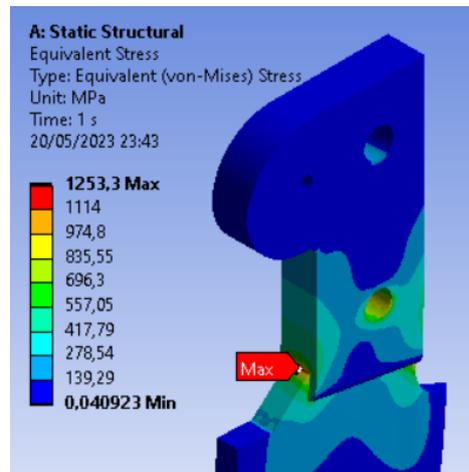
Na sexta e última análise, o Argilossolo Vermelho-Amarelo foi investigado com base nos dados de campo coletados por TRENTIN (2015). Nesse solo, foi registrada uma força média de tração de 5330 N na haste. A partir dessa informação, determinou-se uma força horizontal de 5232,07 N, por meio da equação 7, e uma força vertical de 1017,03 N, calculada com a equação 8. Utilizando essas cargas, foram obtidos os resultados representados nas Figuras 54, 55 e 56, que apresentam as áreas críticas e a vida útil específica desse solo.

Figura 54 - Deformação da estrutura – Argilossolo Vermelho-Amarelo.



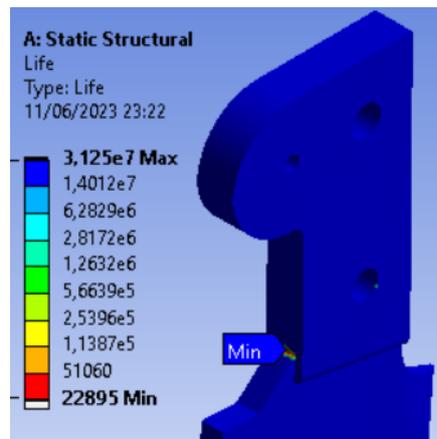
Fonte: Do autor (2023).

Figura 55 - Tensão de von Mises – Argilossolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 56 - Vida sob fadiga – Argilossolo Vermelho-Amarelo.



Fonte: Do autor (2023).

Após a realização de todas as análises, foi possível identificar os pontos submetidos a maiores tensões, o comportamento estrutural durante o processo de deformação, a distribuição do tempo de vida útil do componente, os locais com maior fator de segurança e a região onde ocorre o dano em cada tipo de solo.

Ao analisar os resultados da deformação estrutural, constata-se que a maior deformação ocorre na área sujeita à máxima intensidade de força aplicada. Após essa análise, a tensão de von Mises foi examinada. Quanto mais próximo o valor de von Mises estiver do limite de tensão do material, maior será a proximidade do componente ao escoamento e, portanto, à falha. Essa observação permite identificar o ponto com maior probabilidade de falha do material.

Ao analisar os resultados de von Mises e avaliar a vida útil do componente, observa-se que a região mais afetada e com menor número de ciclos de vida é exatamente onde a Tensão de von Mises é mais elevada, indicando um ponto de concentração de tensão. Um resumo das informações coletadas nas análises pode ser encontrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos na análise.

SOLO	Fr	Deformação	von Mises	Vida
	N	Mm	MPa	Ciclos
Planossolo Hidromórfico	1947,83	1,32	429,79	+1,0E6
Nitossolo Vermelho Distroférico	1209,30	0,99	313,99	+1,0E6
Latossolo Vermelho Distrófico	1996,60	1,41	469,37	+1,0E6
Neossolo Quartzarênico	2511,00	1,78	590,44	+1,0E6
Argilossolo Vermelho Distrófico	2262,50	1,60	529,02	+1,0E6
Argilossolo Vermelho-Amarelo	5330,00	3,77	1253,30	22895

Fonte: Do autor (2023).

Ao examinar o fator de segurança da haste nos diferentes solos, verifica-se que os pontos próximos aos locais de concentração de tensão apresentam um fator de segurança inferior a 1 apenas para o Argilossolo Vermelho-Amarelo. Isso indica a instabilidade dessas regiões e sua propensão a falhar após um número específico de ciclos, não apresentando uma vida útil infinita. Observa-se o mesmo padrão em relação ao dano, onde a área com maior dano está localizada próxima aos pontos de concentração de tensão.

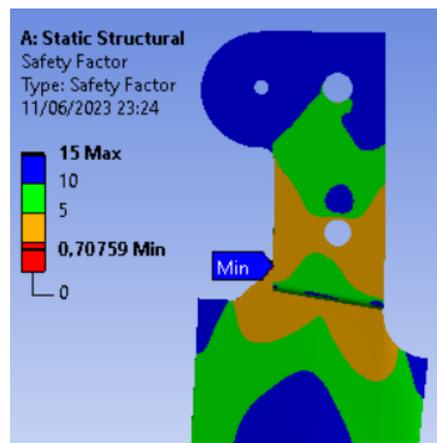
A Tabela 5 fornece os valores encontrados, seguida das Figuras 56 e 57, que ilustram o pior caso de fator de segurança e dano.

Tabela 5 - Fator de Segurança e Dano.

Solo	Fr	Fator de Segurança	Dano
	N		
Planossolo Hidromórfico	1.947,83	2,06	32
Nitossolo Vermelho Distroférrico	1.209,30	2,82	32
Latossolo Vermelho Distrófico	1.996,60	1,89	32
Neossolo Quartzarênico	2.511,00	1,50	32
Argilossolo Vermelho Distrófico	2.262,50	1,68	32
Argilossolo Vermelho-Amarelo	5.330,00	0,71	43679

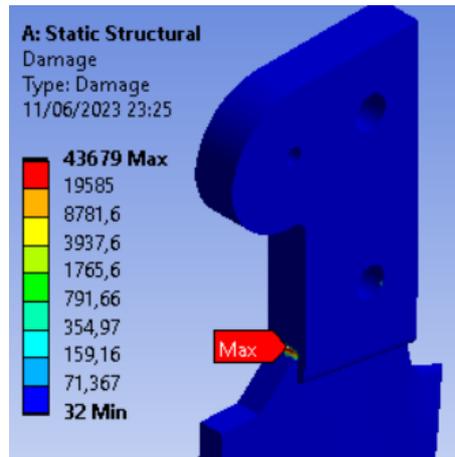
Fonte: Do autor (2023).

Figura 57 - Fator de Segurança.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 58 - Análise do Dano.



Fonte: Do autor (2023).

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusão

Após minuciosa análise das deformações estruturais e das tensões de von Mises, foram identificadas áreas críticas com elevadas concentrações de estresse, que estão diretamente associadas aos pontos de máxima tensão, indicando uma maior susceptibilidade a falhas. Essa análise aprofundada permite adotar medidas adequadas para evitar o escoamento e preservar a integridade da haste sulcadora durante toda a sua vida útil.

Cabe ressaltar que esses resultados consideram a utilização do material SAE1045 na Haste Sulcadora, assim como a profundidade de trabalho nos solos, situando-se entre 0,1 e 0,2 metros, e uma umidade máxima de 38%.

Neste contexto, torna-se evidente a importância de levar em conta fatores como tipo de solo, densidade, umidade e velocidade da máquina, visto que essas variáveis exercem influência significativa sobre as tensões aplicadas. Em particular, os resultados apontam para a relevância do solo Argilossolo Vermelho-Amarelo, que apresentou resultados mais críticos. Notou-se que as áreas adjacentes aos pontos de concentração de tensão mostraram fatores de segurança inferiores a 1 nesse solo, indicando a instabilidade da região e a necessidade de aprimoramentos no projeto.

Diante dessas conclusões, é imprescindível direcionar esforços ao desenvolvimento de melhorias no projeto, especialmente considerando os desafios impostos pelo Argilossolo Vermelho-Amarelo. A obtenção dessas informações é essencial para garantir a segurança, eficácia e sustentabilidade das operações de sulcagem na agricultura, assegurando um desempenho otimizado da haste sulcadora ao longo do tempo.

5.2. Trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- alteração do material do componente por um aço mais resistente;
- redução dos ângulos da haste perto dos pontos concentradores de tensão;
- refinamento da malha de elementos finitos em um software licenciado;
- criação de novas interações de carga, realizando uma alteração das condições de contorno, tanto em relação a intensidade das cargas, como em relação aos ângulos de ataque;
- análise de incerteza de acordo com a variabilidade do solo.

REFERÊNCIAS

AGLIO, MLD. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

ALENCAR, R.F.M. **Fadiga em Cabos Condutores tipo CAL Dispostos em Feixe Duplo Vertical - Um Estudo de Caso Para uma Linha de Transmissão de 230 kV.** Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais de Engenharia. Publicação FGA.DM - 005A/2013, Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília – Faculdade do Gama/Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 102p, 2013

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos a base da Tecnologia CAE.** Saraiva Educação SA, 2018.

ALVES, ER de A. *et al.* **Evolução da produção e produtividade da agricultura brasileira.** Área de Informação da Sede-Capítulo em livro científico (ALICE), 2008.

ASAE S477. American Society of Agricultural Engineers. **Terminology for Soil-Engaging Components for Conservation-Tillage Planters, Drills, and Seeders.** ASAE S477: ASAE STANDARDS, 1995. p. 312–317.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **E466-07: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials,** 2007.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas.** Piracicaba, S.P.: Ed. Manole Ltda, 2005. v. 1p. 307 a322.

BALDAN. **PLB Directa Air - Semeadora de Linhas Baldan.** Baldan Implementos Agrícolas, Matão - SP, 2020. Disponível em: <https://www.baldan.com.br/conteudo/plb-directa-air-semeadora-de-linhas-baldan.html>. Acesso em: 10 jan. 2021.

BAPTISTA, C. A. R. P., **Modelagem preditiva do comportamento de trincas de fadiga com aplicação ao titânio de pureza comercial.** 120f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais – Materiais Refratários) – FAENQUIL, Lorena, 2000.

BARNA, R. A.; POPOVYCH, P. V. **Influence of operating media on the fatigue fracture of steels for elements of agricultural machines.** Materials Science, v. 50, n. 3, p. 377-380, 2014.

BATHIAS, Claude; PINEAU, André (Ed.). **Fatigue of materials and structures.** ISTE, 2010.

BATISTA, M. de A.; DE PAIVA, DENISE WERNECK; MARCOLINO, A. **Solos para todos: perguntas e respostas.** Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E), 2014.

BERNARDI, Alberto. **Por que o solo é tão importante quanto a água e o ar.** Embrapa Pecuária Sudeste, 2020

BOLFE, L. E. **Visão 2030: O futuro da agricultura brasileira.** Brasília, DF: Embrapa, 2018.

BROWELL, Raymond; HANCQ, Al. **Calculating and displaying fatigue results**. Ansys Inc, v. 2, 2006.

CAMARGO, J. A. M. **A Influência do shot peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico**. 2007. 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

CAMARGO, J. A. M. **Propagação de Trinca por Fadiga na Liga de Alumínio 7475-T761 Submetida a Carregamento de Amplitude Constante e Variável**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1995.

CEPIK, C. T. C. **Análise de desempenho de uma haste sulcadora de semeadora-adubadora, em diferentes teores de água no solo, velocidades e profundidades de trabalho**. 2002. 62 f. Diss. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CHAUDHURI. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills-a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Londres: 2001. v. 79p. 125–137.

CONTE, O. *et al.* **Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária**. Engenharia Agrícola, 28, 730-739, 2008.

CONTE, OSMAR. Máquinas para adubação e semeadura. **Embrapa Soja – Transferência de tecnologias (INFOTECA-E)**, 2019.

DIAS, Genebaldo Freire. **Atividades interdisciplinares de educação ambiental**. Global Editora e Distribuidora Ltda, 2015.

DIETER, G. E., **SI Edition - Mechanical Metallurgy**. McGraw Hill Book 3. ed.v. 2. p. 403-450, 1988.

DOS SANTOS, Humberto Gonçalves. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

FACCHINETTI, Matteo Luca. **Fatigue tests for automotive design: optimization of the test protocol and improvement of the fatigue strength parameters estimation**. Procedia Engineering, v. 133, p. 21-30, 2015.

FADEL, Aida Alves. **Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de EDS sobre a resistência em fadiga do condutor IBIS (CAA 397, 5 MCM)**. 2010.

FLORES, Eduardo Fiorin et al. **Análise de máquinas agrícolas distribuidoras de fertilizantes segundo requisitos projetuais**. Tese de Mestrado. Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, RS. UFSM, 2008.

FONSECA, MGD. **Concorrência e progresso técnico na indústria de máquinas para a agricultura: um estudo sobre trajetórias tecnológicas**. Tese de Doutorado. Doctoral Thesis. Campinas: UNICAMP-Instituto de Economia, 1990.

GARCIA, Amauri. *et al.* **Ensaio dos materiais**. Livros Técnicos e científicos, 2000.

GERMINO, R. & BENEZ, S. H. **Ensaio comparativo em dois modelos de hastes sulcadoras para Semeadoras-adubadoras de plantio direto**. Eng. Agrícola - Botucatu, 2006.

GIANEZINI, Miguelangelo. *et al.* **Notas sobre a evolução das máquinas e equipamentos agrícolas**. AMBIÊNCIA, v. 10, n. Sup, p. 381-388, 2014.

GIMENEZ, Leandro M. Máquinas e implementos agrícolas. **Departamento de Engenharia de Biosistemas. ESALQ/USP**. 122 p., 2016.

GONÇALVES, Saulo Boldrini. *et al.* Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, n. 3, p. 224-229, 2017.

JACOMINE, Paulo Klinger TiTo. A nova classificação brasileira de solos. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 5, p. 161-179, 2008.

JOHN DEERE. **Plantadeiras Série 1100**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, 2017. Disponível em: http://maisalimentos.mda.gov.br/upload/documentos/153193124976_Plantadeiras_1100.pdf. Acesso em: 9 jan. 2021.

KUHN. **Semeadoras mecânicas rebocadas para plantio direto**. KUHN DO BRASIL, São José dos Pinhais – PR, 2020. Disponível em: <https://www.kuhnbrasil.com.br/cultivos/semeadoras/semeadoras-mecanicas-rebocadas-para-plantio-direto/select>. Acesso em: 9 jan. 2021.

LAMBRECHT, Edson *et al.* **Semeadoras-adubadoras da atualidade e sua compatibilidade com tratores de baixa potência**. Revista Thema, v. 14, n. 2, p. 274-285, 2017.

LEPSCH, Igo F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2021.

LIMA, Marcelo Ricardo de. **O solo no ensino de ciências no nível fundamental**. Ciência & Educação (Bauru), v. 11, p. 383-395, 2005.

LIMA, Marcelo Ricardo de. **Principais Classes de Solos do Brasil**. Universidade Federal do Paraná, 2010.

MANTOVANI, Evandro Chartuni. *et al.* **Avaliação em campo de uma semeadora-adubadora para plantio de milho de alta densidade**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 14, n. 1, p. 38-48, 2015.

MARCO, A. C. **Uma Abordagem da Vida em Fadiga em Barra Estabilizadora Automotiva Considerando Defeito Superficial Fisicamente**. Tese de Doutorado. Ph. D. Thesis, IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo), 2003.

MARQUES, Gabriel H. A. *et al.* **TERMINOLOGIA DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS: ESTUDO DA ATUAL UTILIZAÇÃO PELOS FABRICANTES BRASILEIROS**. XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015, São Pedro – SP, Brasil, 2015.

- MARTINS, Gabriella A. *et al.* **Análise Comparativa do Desempenho e das Propriedades Mecânicas de Diferentes Materiais Utilizados em Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto.** Revista Processos Químicos, v. 14, n. 28, p. 125-138, 2020.
- MIALHE, Luiz Geraldo. Máquinas agrícolas para plantio. **Campinas: Millennium**, p. 179, 2012.
- MION, Renildo Luiz; BENEZ, Sérgio Hugo. **Esforços em ferramentas rompedoras de solo de semeadoras de plantio direto.** Ciência e Agrotecnologia, v. 32, p. 1594-1600, 2008.
- MOHAMMAD, Mazian *et al.* **Fatigue life assessment of SAE 1045 carbon steel under strain events using the Weibull distribution.** Journal of Mechanical Engineering (JMechE), v. 15, n. 1, p. 165-180, 2018.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas.** Bookman editora, 2013.
- OSGOOD, C. **Fatigue Design.** New York: Pergamon Press, 1982.
- PADILHA, R. Q. **Influência na vida em fadiga da espessura das camadas de níquel e cromo duro em aço ABNT 4340.** 2004. 176f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2004.
- PALMA, M. A. Z. **Desenvolvimento e avaliação de ponteiras utilizadas em hastes sulcadoras de semeadoras para plantio direto.** 2013. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- PARAFOROS, Dimitris S. *et al.* **Country road and field surface profiles acquisition, modelling and synthetic realisation for evaluating fatigue life of agricultural machinery.** Journal of Terramechanics, v. 63, p. 1-12, 2016.
- PAYNE, A. O., **The fatigue of aircraft structures, Engineering Fracture Mechanics**, v. 8, p. 157-203, 1976.
- PAYNE, P. C. J. **The relationship between the mechanical properties of soil and performance of simple cultivation implements.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 1, p. 23-50, 1956.
- PEREIRA, J. O. *et al.* **Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo.** Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, p. 171-174, 2002.
- PICCOLI, EVERTON. **A importância da soja para o agronegócio: Uma análise sob o enfoque do aumento da produção de agricultores no Município de Santa Cecília do Sul.** FAT- Faculdade e Escola Curso de Administração. Tapejara/RS, 2018.
- PINTO NETO, Edgard Soares. **Obtenção do modelo geométrico e avaliação da vida em fadiga de cabo tipo Aeroz.** Universidade De Brasília, Brasília. 2013.
- PORTELLA, J. A. **Mecanismos dosadores de sementes e de fertilizantes em máquinas agrícolas.** Embrapa Trigo-Documents (INFOTECA-E), 1997.

RAHMAN, M. M. *et al.* Finite element based fatigue life prediction of a new free piston engine mounting. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1612-1621, 2008.

ROCCO, Giancarlo. **Como erros na fase de plantio geram perdas de produtividade**. Revista Cultivar, Grupo cultivar, 2018. Disponível em: <https://www.grupocultivar.com.br/artigos/como-erros-na-fase-de-plantio-geram-perdas-de-produtividade>. Acesso em: 9 jan. 2021.

ROSA, David Peres da et al. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

ROSA, David Peres da et al. **Relação solo-máquina-planta num Argissolo cultivado e sob campo nativo**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

SANTOS FILHO, AG do et al. **Apostila de máquinas agrícolas**. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2001.

SARTORI, Aderson; GENOVEZ, Abel Maia. **Critérios Para Classificação Hidrológica de Solos Tropicais Brasileiros**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 19, 2011.

SASAKI, Cassiano Massakazu. **Força de tração e desempenho operacional de hastes subsoladoras em solos com diferentes texturas e umidade**. 2000. PhD Thesis. Universidade de São Paulo. SCHIJVE, Jaap. *Fatigue of structures and materials*. Springer Science & Business Media, 2001.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials: Residual Stress**. Chapter 41. Kluwer Academic Publishers, Holand, p. 71-83, 2001.

SCHLOSSER, J. F. **Máquinas para implantação e condução de culturas**. Caderno didático. Departamento de Engenharia Rural/CCR/UFSM. Santa Maria R.S.: 1997. p. 49.

SENAR. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Mecanização: operação e regulagem de semeadoras–adubadoras de sementes graúdas**. / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – Brasília: SENAR, 2017

SHIGLEY, Joseph E.; BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. AMGH Editora Ltda, 8ª ed, São Paulo, Brasil, 2011.

SILVA, Átila Reis da et al. **Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema**. Revista Científica Eletrônica de Agronomia, Garça, v.22, 2012.

SILVA, MR da. **Classificação de semeadoras-adubadoras de precisão para o sistema plantio direto conforme o índice de adequação**. Campinas: UNICAMP, 2003. 82p. Tese de Doutorado. Dissertação Mestrado.

SILVA, Rodrigo Berger da. **Desempenho de semeadoras no plantio de soja no município de Santa Izabel do Oeste: Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

SILVA, Rui Corrêa da. **Máquinas e equipamentos agrícolas**. São Paulo: Editora Saraiva; São Paulo: Érika, 2014.

TAVARES FILHO, J. *et al.* **Modelling of Soil Penetration Resistance for an Oxisol under No-Tillage**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, p. 89-95, 2012.

TOLEDO, Anderson. **Semeadora, semeadeira ou plantadeira? Entenda as diferenças entre os termos técnicos e as máquinas**. Blog Mecânica, 21 ago. 2015. Disponível em: <https://mecaniza.org/semeadora-semeadeira-plantadeira-diferencas/>. Acesso em: 9 jan. 2021.

TORRES, M. A S. **Uma Avaliação do Efeito do Shot Peening na Vida em Fadiga do Aço ABNT 4340 com e sem Revestimento de Cromo Duro**. 2002. 223f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

TRENTIN, Robson Gonçalves. *et al.* **Desempenho de sulcadores no desenvolvimento e produtividade da soja em solo submetido a diferentes níveis de compactação**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.

TRÖGER, H. C. H. **Análise de sulcadores de adubo empregados em semeadoras adubadoras para agricultura familiar**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas - Pelotas. 2010.

TRÖGER, H. C. H. *et al.* **Analyzing the efforts in furrow openers used in low power planters**. Engenharia Agrícola [online]. 2012, v. 32, n. 6, pp. 1133-1143. ISSN 1809-4430. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000600015>. Acesso em: 12 Nov. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses**. 3. ed. rev., atual. e ampl. Lavras, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11017>. Acesso em: 13 Out. 2022.

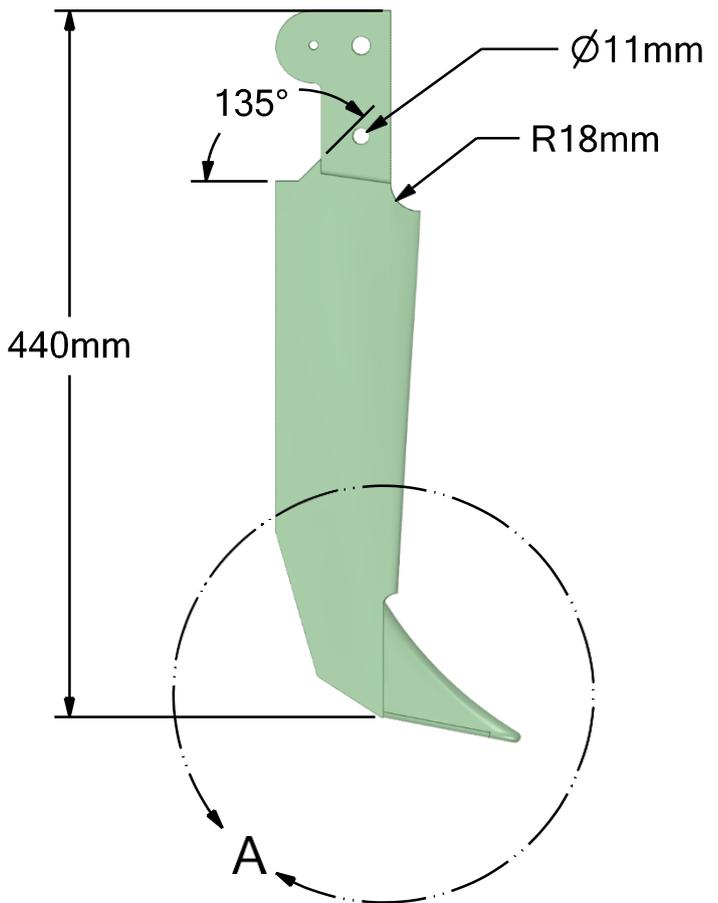
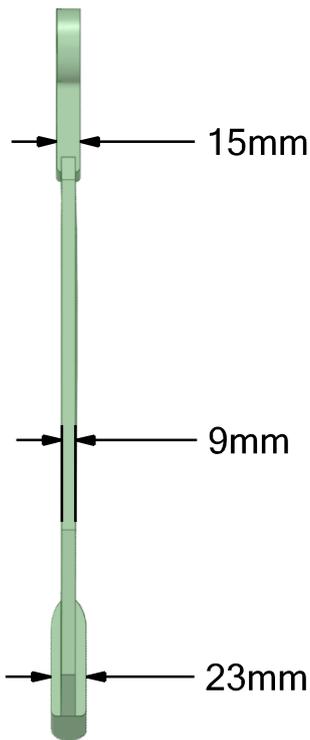
VIAN, Carlos Eduardo de Freitas *et al.* **Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas**. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 51, n. 4, p. 719-744, 2013.

ZAHAVI, Eliahu; TORBILO, Vladimir; PRESS, Solomon. **Fatigue design: life expectancy of machine parts**. CRC press, 1996.

ANEXO 1 – Desenho técnico

A

A



B

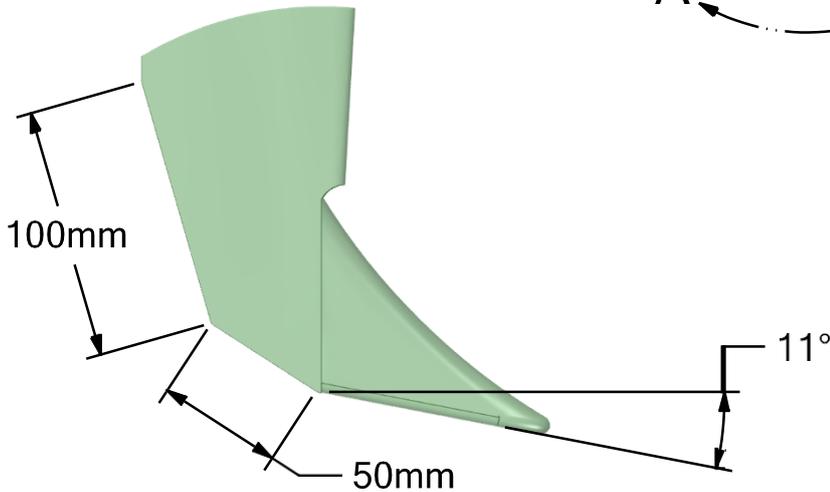
B

C

C

D

D



E

E

DETAIL A
SCALE 1:3

Departamento de Engenharia Mecânica

Criado por: Antônio Carlos Lima Neto

F

F

SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	Haste Sulcadora	REV
------	-----------	---------	-----------------	-----