

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

ADRIEL JOSÉ DE MOURA SCAPINI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise da substituição do aço e reconstrução dos roteiros de fabricação de um componente de máquina agrícola com ênfase na resistência ao desgaste.

Ibirubá

2025

ADRIEL JOSÉ DE MOURA SCAPINI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise da substituição do aço e reestruturação dos roteiros de fabricação de um componente de máquina agrícola com ênfase na resistência ao desgaste.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais metálicos

Orientador: Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

Ibirubá

2025

MOURA SCAPINI, Adriel José.

Análise da substituição do aço e reestruturação dos roteiros de fabricação de um componente de máquina agrícola com ênfase na resistência ao desgaste.

/ Adriel José de Moura Scapini, 2025

Orientador: Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá 2025.

Desgaste abrasivo, Tratamento térmico, Aletas recolhedoras, Têmpera, Carbonitreção, Colheita de milho.

Análise da substituição do aço e reestruturação dos roteiros de fabricação de um componente de máquina agrícola com ênfase na resistência ao desgaste.

Adriel José de Moura Scapini

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 25 de junho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador): Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski
IFRS - campus Ibirubá

Prof. Me. Flávio Roberto Andara
IFRS - campus Ibirubá

Prof. Me. Bruno Nonemacher
IFRS - campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me sustentado e guiado em todos os momentos dessa jornada, concedendo força, sabedoria e perseverança nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais e irmãos, pela base sólida que sempre me proporcionaram e pelo exemplo de dedicação e esforço que carregarei para sempre comigo.

À minha esposa Maria Helena e à minha filha Lavínia, pelo amor incondicional, apoio, compreensão e paciência durante todos os momentos de ausência e dedicação a esta trajetória acadêmica. Vocês são a minha maior motivação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski por toda a orientação, incentivo e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e compromisso foram fundamentais para a realização deste projeto.

Aos meus colegas de trabalho e de aula, pela troca de conhecimentos, convivência e companheirismo ao longo desta trajetória acadêmica.

Aos meus amigos, pelo incentivo constante, pelas conversas que aliviaram o peso da caminhada e por estarem sempre por perto nos momentos importantes.

A todos os professores que contribuíram com sua dedicação e conhecimento ao longo da minha formação. Cada ensinamento foi essencial para o meu crescimento pessoal e profissional.

À empresa Vende Tudo, pela oportunidade de vivenciar a prática profissional e pelo apoio concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Grefortec, pelo suporte técnico com informações fundamentais sobre os processos de fabricação das peças e pela cessão das amostras utilizadas nos ensaios.

À empresa Metalab, cuja contribuição técnica foi relevante para a condução deste trabalho.

Ao técnico de laboratório Samuel Correa Campos, do (IFRS), pelo auxílio prestado nos ensaios laboratoriais, que foram indispensáveis para a condução deste trabalho.

À banca avaliadora, pela leitura atenta, pelas contribuições relevantes e pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho. Suas considerações foram essenciais para o aprimoramento deste projeto.

A todos vocês, meu sincero muito obrigado!

*“Obstáculos são aquelas coisas
assustadoras que você vê quando tira
os olhos do seu objetivo.”*

Henry Ford

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo investigar alternativas para minimizar o desgaste abrasivo prematuro de um componente metálico aplicado em plataformas para colheita de milho. O componente avaliado faz parte da unidade recolhadora da plataforma, sendo responsável por tracionar os caules das plantas até o sistema de corte. Foram estudadas cinco diferentes condições de materiais e tratamentos: aço SAE 1045 com revestimento de carboneto de tungstênio, aço SAE 15B30 temperado e revenido com dureza de 45 HRC e 50 HRC, aço AISI A36 carbonitretado com camadas de 0,5 mm e 1,0 mm, com durezas de 55 a 60 HRC e 60 a 65 HRC respectivamente. As amostras foram submetidas à ensaios laboratoriais e testes de campo, sendo caracterizadas por meio de análises de composição química, ensaios de dureza e micro dureza, metalografia e ensaio de flexão. A aplicação em campo considerou a avaliação do desgaste dimensional após o uso em até 1000 hectares. Os resultados apontaram que as amostras com aço SAE 15B30 temperado e revenido apresentaram desempenho superior, especialmente a versão com 45 HRC, que resistiu até 4000 ha com baixo índice de desgaste e sem trincas ou falhas estruturais. A alternativa com carbonitreção do AISI A36 também apresentou bons resultados, superando o modelo original com revestimento, porém apresentou falhas estruturais nos testes de campo. Conclui-se que tratamento térmico corretamente executado pode substituir processos de revestimento superficial, resultando em menor custo e maior viabilidade industrial.

Palavras-chave: desgaste abrasivo, tratamento térmico, aletas recolhedoras, têmpera, carbonitreção, colheita de milho.

ABSTRACT

This work aims to investigate alternatives to minimize premature abrasive wear of a metallic component used in corn harvesting platforms. The evaluated component is part of the gathering unit, responsible for pulling plant stalks into the cutting system. Five different material and treatment conditions were studied: SAE 1045 steel with tungsten carbide coating; SAE 15B30 steel, quenched and tempered to hardness levels of 45 HRC and 50 HRC; and AISI A36 steel subjected to carbonitriding with layers of 0.5 mm and 1.0 mm, reaching hardness ranges of 55 - 60 HRC and 60 - 65 HRC, respectively. The samples underwent laboratory testing and field trials, and were characterized through chemical composition analysis, hardness and microhardness testing, metallography, and three-point bending tests. Field application focused on evaluating dimensional wear after operation over up to 1000 hectares. Results showed that the quenched and tempered SAE 15B30 steel samples had the best performance, particularly the 45 HRC version, which withstood up to 4000 hectares with low wear and no cracks or structural failures. The carbonitrided AISI A36 samples also performed well, surpassing the original coated model, but exhibited structural failures during field use. It is concluded that well-applied heat treatments can replace surface coating processes, offering lower costs and greater industrial feasibility.

Key words: abrasive wear, heat treatment, gathering blades, quenching, carbonitriding, corn harvesting.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI - *American National Standards Institute*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

AISI - *American Iron and Steel Institute*

ha - hectare

HRC - *Hardness Rockwell – Escala C*

HVOF – *High Velocity Oxy-Fuel*

HV - *Hardness Vickers*

IFRS - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

MPa - Megapascal

mm - Milímetro

NBR - Norma Brasileira

N·m - Newton metro

SAE - *Society of Automotive Engineers*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Complexo Industrial Fábrica Vence Tudo Ibirubá.	20
Figura 2 - Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	23
Figura 3 - Diagrama CCT.	26
Figura 4 - Curvas TTT dos aços.	28
Figura 5 - Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado da martensita.	30
Figura 6 - a) Microestrutura da martensita em ripa em um aço 4140 revenido a 150°C (MET). b) Microestrutura da martensita tipo placas em uma liga Fe – 1,86C....	31
Figura 7 - Esquemática do processo de têmpera.....	32
Figura 8 - Variação da dureza em função da temperatura de revenimento.....	33
Figura 9 - Plataforma para colheita de milho.	41
Figura 10 - Plataforma para colheita de milho acoplada à uma colhedeira automotriz.....	42
Figura 11 - Unidade recolhedor.	43
Figura 12 - Correntes recolhedoras.....	44
Figura 13 - Caule avariado.	45
Figura 14 - Rolos recolhedores.....	46
Figura 15 - Fixação das aletas.	47
Figura 16 - Aleta.	47
Figura 17 - Fluxograma de execução do trabalho.	49
Figura 18 - Guilhotina Hidráulica Durmazlar, modelo SB 3013 NT.....	60
Figura 19 - Ferramenta de estampo.	61
Figura 20 - Prensa Hidráulica Menegotto, modelo tipo H, 450 T.	62
Figura 21 - ferramenta de dobra.	62
Figura 22 - Peça conformada.	63
Figura 23 - Centro de Usinagem Horizontal marca Okuma, modelo MB-5000HII.	64
Figura 24 - Dispositivo de usinagem.	65
Figura 25 - Inspeção de usinagem.	66
Figura 26 - Linha de pintura.	70
Figura 27 - Peça pintada.	71
Figura 28 - Conjunto montado rolo recolhedor.	72

Figura 29 - Distância entre "fios".	73
Figura 30 -Durômetro Mitutoyo, modelo HR-100.	75
Figura 31 - Microdurômetro Vickers Digimes, modelo 400.310.....	76
Figura 32 - Perfil de dureza.	77
Figura 33 – Espectrômetro SPECTROMAXx.....	78
Figura 34 - Cortadora metalográfica Teclago, modelo CM 40.....	78
Figura 35 - Embutidora metalográfica Teclago, modelo EM30D.	79
Figura 36 - Suporte para lixamento.	79
Figura 37 - Lixadeira e politriz Fortel, modelo PLF.....	80
Figura 38 - Amostras prontas.....	80
Figura 39 – Microscópico Olympus, modelo BX51.....	81
Figura 40 - Equipamento de ensaios mecânicos.....	82
Figura 41 - Flexão em três pontos.	83
Figura 42 - Paquímetro digital Mitutoyo, modelo ABSOLUTE.	84
Figura 43 - Cotas inspecionadas.	87
Figura 44 - Numeração dos pontos de indentação.....	91
Figura 45 – Perfil de durezas amostra 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC.....	92
Figura 46 – Perfil de durezas amostra 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC.....	93
Figura 47 – Perfil de durezas amostra 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.....	94
Figura 48 – Perfil de durezas amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.....	95
Figura 49 - Comparativo de perfis de durezas.....	96
Figura 50 - Micrografia (amostra 1).	97
Figura 51 - Micrografia (amostra 2).	99
Figura 52 - Micrografia (amostra 3).	100
Figura 53 - Micrografia (amostra 4).	102
Figura 54 - Micrografia (amostra 5).	103
Figura 55 - Micrografia (Carbeto de Tungstênio).....	104
Figura 56 - Comparativo de flexão das 5 amostras.	105
Figura 57 - Deformação e fratura das amostras (1,2,3 e 4).	106
Figura 58 - Deformação e fratura da amostra 5.....	106

Figura 59 - Amostra 1 (1000 ha).....	107
Figura 60 – Amostra 2 (1000 ha).....	108
Figura 61 - Amostra 3 (1000 ha).....	109
Figura 62 - Amostra 4 (1000 ha).....	110
Figura 63 - Amostra 5 (1000 ha).....	111
Figura 64 - Parte traseira da amostra 5 (1000 ha).....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das amostras testadas.	51
Tabela 2 - Composição química dos aços selecionados.	56
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos aços selecionados.....	57
Tabela 4 - Produtividade de milho.....	85
Tabela 5 - Dados quantitativos de garantia.....	86
Tabela 6 - Avaliações das condições das aletas . Dados coletados em campo (10 clientes).....	87
Tabela 7 - Composição química (Amostras novas e usadas).....	88
Tabela 8 - Comparativo das composições químicas.....	89
Tabela 9 - Média de durezas superficiais.....	90
Tabela 10 - Durezas amostra 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC.....	92
Tabela 11 - Durezas amostra 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC.....	93
Tabela 12 - Durezas amostra 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.....	94
Tabela 13 - Durezas amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.....	95
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de flexão.....	104
Tabela 15 - Avaliação dimensional (1000 ha).....	112
Tabela 16 - Avaliações de 1000 ha até 4013 ha.....	113

SUMÁRIO

Sumário	
1	INTRODUÇÃO..... 18
1.1	JUSTIFICATIVA 18
1.2	OBJETIVOS..... 19
1.2.1	Objetivos específicos..... 19
2	REFERENCIAL TEÓRICO..... 20
2.1	EMPRESA..... 20
2.2	HISTÓRIA DA AGRICULTURA – UMA SÍNTESE 21
2.3	MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA 22
2.4	CLASSIFICAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS AÇOS..... 22
2.5	TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS..... 24
2.5.1	Fundamentos dos Tratamentos Térmicos 25
2.5.2	Curvas TTT e Transformações de Fase 27
2.5.3	Martensita: Formação e Características..... 29
2.5.4	Têmpera 31
2.5.5	Revenido..... 32
2.5.6	Temperabilidade e sua Importância..... 34
2.5.6.1	Fatores que Influenciam a Temperabilidade..... 34
2.5.7	Tratamentos Termoquímicos 35
2.5.7.1	Carbonitreção..... 36
2.6	REVESTIMENTOS DE SUPERFÍCIE..... 37
2.7	FORMAS DE VALIDAÇÃO DE TRATAMENTOS TÉMICOS E REVESTIMENTOS..... 38
2.8	IMPORTANCIA DA VALIDAÇÃO DE CAMPO 39
2.9	PRINCIPAIS FORMAS DE DESGASTES 39
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... 41
3.1	PLATAFORMA PARA COLHEITA DE MILHO 41
3.1.1	Unidade recolhadora (Linha)..... 42
3.1.1.1	Rolos recolhadores..... 45

3.1.1.1.1	Aletas	46
3.2	DESGASTE PREMATURO DAS ALETAS.....	48
3.3	ESTRATÉGIA DE EXECUÇÃO	49
3.3.1	Requisitos e seleção de materiais a serem empregados.....	50
3.3.2	Caracterização das amostras	50
3.4	DESENVOLVIMENTO DAS AMOSTRAS	51
3.4.1	Processo de fabricação comum às amostras	52
3.4.2	Tratamento Térmico: Têmpera e Revenido	52
3.4.3	Tratamento Termoquímico: Carbonitreção.....	52
3.4.4	Revestimento Superficial: Carbetto de Tungstênio	53
3.5	TESTES DE CAMPO	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	54
4.1.1	Propriedades gerais dos aços selecionados.....	54
4.1.2	Aços para tratamentos térmicos e termoquímicos.....	55
4.1.3	Descrição dos materiais ensaiados	56
4.1.3.1	Aço AISI A36	57
4.1.3.1.1	Características principais:.....	57
4.1.3.1.2	Justificativa para a escolha:	57
4.1.3.2	Aço SAE 1045	58
4.1.3.2.1	Características principais:.....	58
4.1.3.2.2	Justificativa para a escolha:	58
4.1.3.3	Aço SAE 15B30	58
4.1.3.3.1	Características principais:.....	59
4.1.3.3.2	Justificativa para a escolha:	59
4.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	59
4.2.1	Corte das chapas	59
4.2.1.1	Os parâmetros de corte são:.....	61
4.2.2	Conformação das peças	61

4.2.2.1	Os parâmetros de conformação são:	63
4.2.3	Usinagem das peças	64
4.2.3.1	Parâmetros de usinagem	66
4.2.4	Tratamentos térmicos	66
4.2.4.1	Têmpera e revenido	67
4.2.4.2	Tratamento termoquímico (Carbonitreção)	68
4.2.5	Aplicação de carbetos de Tungstênio	68
4.2.6	Pintura e acabamento superficial	69
4.2.6.1	Os parâmetros no processo de pintura são:	71
4.2.7	Montagem das peças	71
4.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	73
4.3.1	Ensaio de dureza	74
4.3.2	Micro dureza Vickers	75
4.3.3	Análise de composição química	77
4.3.4	Metalografia	78
4.3.5	Ensaio de flexão	81
4.3.6	Inspeções visuais e dimensionais	83
4.4	TESTES DE CAMPO	84
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1	DADOS DO PROBLEMA	86
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	88
5.2.1	Composição química	89
5.2.2	Dureza superficial	89
5.2.3	Micro dureza	90
5.2.4	Metalografia	96
5.2.4.1	Amostras 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC	97
5.2.4.2	Amostras 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC	98

5.2.4.3	Amostras 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.	100
5.2.4.4	Amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.	101
5.2.4.5	Amostra 5, aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio.	103
5.2.5	Ensaio de flexão.....	104
5.3	TESTES DE CAMPO	106
5.3.1	Primeira etapa – Avaliação até 1000 hectares	106
5.3.2	Segunda etapa – Avaliação até 4013 hectares	112
5.4	ANÁLISE DE CUSTOS	113
5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	114
6	CONCLUSÕES.....	116

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna exige equipamentos com alto desempenho, durabilidade e eficiência, especialmente em culturas de grande escala como o milho. Por exemplo, a plataforma para colheita de milho que é um implemento agrícola que trabalha acoplado à colhedora automotriz, sendo responsável por recolher, destacar e direcionar as espigas para o sistema de processamento da colhedora automotriz. Um dos componentes críticos dessa plataforma são as aletas¹ recolhedoras, que promovem a tração do caule da planta no momento da colheita.

Essas aletas operam sob condições severas, submetidas a desgaste abrasivo constante devido ao contato com caules, palhas e partículas minerais presentes no campo. A perda prematura da afiação das aletas compromete diretamente a eficiência do sistema, aumentando o consumo de combustível, reduzindo a produtividade e elevando os custos de manutenção. Além disso, o desgaste excessivo pode prejudicar a danificação do caule remanescente, afetando práticas agrícolas subsequentes, como o plantio direto.

O modelo de aleta originalmente utilizado na produção, fabricado em aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio, apresentou vida útil insatisfatória, desgaste precoce e altos custos de produção. Diante disso, este trabalho propõe uma investigação experimental comparativa entre diferentes materiais e tratamentos aplicáveis a esse componente, com o objetivo de identificar soluções que combinem maior resistência ao desgaste, integridade estrutural e viabilidade econômica para aplicação em larga escala.

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de aprimorar a resistência ao desgaste das aletas recolhedoras surgiu a partir da análise de falhas prematuras observadas em campo e de relatos provenientes do setor de garantia da empresa fabricante. Os altos índices de substituições e reclamações relacionados à durabilidade dessas peças geraram custos significativos e impactaram negativamente a percepção de qualidade por parte dos usuários finais.

Além do impacto técnico, os custos de produção associados ao modelo atual, especialmente devido à aplicação do revestimento de carbeto de tungstênio, tornaram-se

¹ Neste trabalho, a palavra aleta refere-se ao nome técnico do componente em análise deste estudo.

um fator limitante para a competitividade do produto. Considerando que cada plataforma de colheita utiliza dezenas de aletas e que o equipamento opera sob ciclos intensos e contínuos, pequenas melhorias no desempenho desse componente podem representar ganhos expressivos em durabilidade, eficiência de colheita e economia.

Dessa forma, justifica-se a realização de um estudo comparativo que avalie diferentes tipos de aço, tratamentos térmicos e superficiais, com foco na resistência ao desgaste e na viabilidade técnica de aplicação. Os resultados obtidos têm potencial de aplicação direta na indústria de implementos agrícolas, podendo reduzir custos operacionais, aumentar a confiabilidade dos equipamentos e melhorar a satisfação dos usuários.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a substituição do aço atualmente empregados nas aletas recolhedoras e a reestruturação dos roteiros de fabricação de aletas recolhedoras utilizadas em plataformas de colheita de milho, com ênfase na resistência ao desgaste e na viabilidade técnica e econômica das alternativas propostas.

1.2.1 Objetivos específicos

- Investigar o desgaste prematuro das aletas em campo e seu impacto na eficiência da colheita;
- Avaliar a composição química e as propriedades mecânicas dos materiais atualmente utilizados;
- Desenvolver e fabricar amostras utilizando diferentes aços e tratamentos (têmpera, revenido, carbonitreção e revestimento);
- Realizar ensaios laboratoriais de dureza, micro dureza, metalografia e resistência à flexão;
- Conduzir testes de campo em condições reais de operação para comparar o desempenho das amostras;
- Analisar o custo de fabricação das diferentes soluções propostas;
- Indicar a melhor alternativa técnica e economicamente viável para substituição do modelo atual.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos técnicos que embasam o desenvolvimento deste trabalho, abordando o contexto industrial da empresa envolvida, a evolução da agricultura e da mecanização, as características dos materiais utilizados, os mecanismos de desgaste e os processos aplicados para melhoria do desempenho dos componentes.

2.1 EMPRESA

A Vence Tudo Importação e Exportação Ltda. (Figura 1), é uma empresa brasileira consolidada no setor de máquinas e implementos agrícolas, com sede no município de Ibirubá, no estado do Rio Grande do Sul. Fundada em 1964, a companhia possui uma trajetória marcada pela inovação e pela contribuição significativa ao processo de mecanização agrícola nacional, atendendo tanto o mercado interno quanto o internacional (VENCE TUDO, 2025).

Figura 1 - Complexo Industrial Fábrica Vence Tudo Ibirubá.



Fonte: Vence Tudo (2025)

O portfólio da empresa contempla uma ampla gama de produtos voltados à agricultura, incluindo semeadoras, plataformas de colheita, carretas graneleiras e distribuidores de insumos. Os equipamentos desenvolvidos pela Vence Tudo são reconhecidos por sua robustez estrutural, adaptabilidade à diferentes tipos de solos e culturas, além de apresentarem desempenho confiável em variadas condições operacionais (ABIMAQ, 2025).

Ao longo de suas décadas de atuação, a Vence Tudo consolidou sua imagem como uma empresa confiável e alinhada com os desafios do agronegócio moderno, contribuindo significativamente para o desenvolvimento do setor agrícola no Brasil e em outros países da América Latina (VENCE TUDO, 2025).

2.2 HISTÓRIA DA AGRICULTURA – UMA SÍNTESE

Obviamente, é impossível tratar da história da agricultura de maneira razoável no que tange o detalhamento. Deste modo, esta seção dá uma síntese dos principais fatores a respeito desse assunto.

A agricultura é uma das atividades mais antigas da humanidade, tendo surgido há aproximadamente 10 mil anos, no período Neolítico. Nesse contexto, comunidades humanas começaram a cultivar plantas e a domesticar animais, rompendo com o modo de vida nômade baseado na caça e coleta. Essa transformação possibilitou o sedentarismo, a formação das primeiras aldeias e o surgimento das civilizações, estabelecendo a agricultura como a base econômica, social e cultural das sociedades antigas (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Durante séculos, a prática agrícola evoluiu de maneira empírica, com aperfeiçoamentos progressivos nas técnicas de plantio, irrigação e colheita (MARCONI; LAKATOS, 2005). Porém, foi apenas com a Revolução Industrial, iniciada no século XVIII, que ocorreram mudanças substanciais. A introdução de máquinas, inicialmente movidas por tração animal, como arados metálicos, semeadoras e ceifadeiras, marcou o início da mecanização agrícola (FUKS, 2016).

No século XX, a agricultura passou por um novo salto tecnológico com a chamada Revolução Verde, caracterizada pela adoção intensiva de inovações como tratores, fertilizantes químicos, defensivos, sementes geneticamente melhoradas e sistemas modernos de irrigação. Essas tecnologias permitiram o aumento expressivo da produtividade e a expansão das fronteiras agrícolas, sobretudo em países de clima tropical, como o Brasil (PENA, 2023; EMBRAPA, 2014).

No cenário nacional, o processo de mecanização intensificou-se a partir da década de 1960, impulsionado por políticas públicas, créditos rurais e investimentos em pesquisa agropecuária. Desde então, o setor agrícola brasileiro incorporou tecnologias de ponta, como sensores, sistemas de agricultura de precisão, biotecnologia e máquinas com elevada capacidade operacional (CONAB, 2022). Essa modernização transformou o Brasil em um dos principais produtores e exportadores de alimentos do mundo.

2.3 MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA

A mecanização agrícola representa um dos principais pilares da modernização da agricultura, sendo caracterizada pela substituição progressiva do trabalho manual por máquinas e implementos que otimizam as etapas do processo produtivo, como preparo do solo, semeadura, tratos culturais, colheita e transporte (EMBRAPA, 2011). O início desse processo remonta à Revolução Industrial, no século XVIII, com o surgimento de equipamentos rudimentares movidos por tração animal, como semeadoras mecânicas e ceifadeiras. Com a introdução dos motores a combustão no início do século XX, surgiram os primeiros tratores e colhedoras automotrizes, acelerando o processo de mecanização (BRASIL ESCOLA, 2023).

No Brasil, a mecanização ganhou força a partir da década de 1960, impulsionada pelo movimento global conhecido como Revolução Verde, que no Brasil ficou conhecida como “revolução agrícola tropical sustentável”. Esse período foi marcado pela introdução de sementes geneticamente melhoradas, fertilizantes químicos, defensivos agrícolas e equipamentos modernos que proporcionaram significativo aumento da produtividade e expansão da fronteira agrícola nacional (EMBRAPA, 2020).

A Revolução Verde também promoveu a transformação da lógica produtiva nas propriedades rurais, exigindo maior eficiência, escala e especialização. Segundo a Embrapa (2006), o uso de máquinas como tratores, pulverizadores, colhedoras automotrizes e sistemas de irrigação permitiu o cultivo em grandes áreas e em condições adversas, com menor dependência da mão de obra humana. Esse avanço tecnológico exigiu também o desenvolvimento de implementos e componentes mais robustos e resistentes, capazes de operar em diferentes tipos de solo, clima e culturas, motivando pesquisas voltadas ao aperfeiçoamento de projetos e materiais aplicados.

2.4 CLASSIFICAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS AÇOS

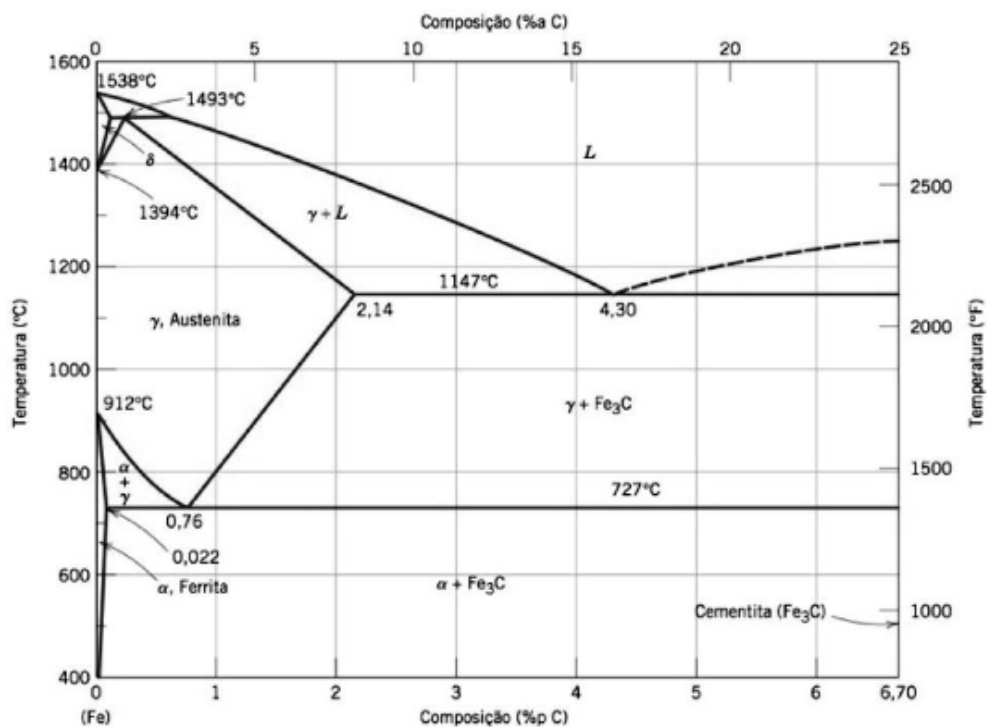
Os aços são ligas metálicas formadas essencialmente por ferro (Fe) e carbono (C), com teor de carbono compreendido entre 0,008% e 2,11% em massa. Dentro desse intervalo, o carbono atua como principal elemento de endurecimento da matriz ferrítica, aumentando a resistência mecânica e a dureza do material. Na prática, a elevação do teor de carbono reduz a ductilidade e a tenacidade do aço, tornando-o mais duro e resistente, porém mais frágil. Já os aços com menor teor de carbono são mais maleáveis, soldáveis

e possuem melhor conformabilidade, embora apresentem menor resistência mecânica (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Além do carbono, os aços podem conter elementos de liga adicionais, como manganês, cromo, níquel, molibdênio e boro, que são adicionados para modificar propriedades como resistência mecânica, dureza, temperabilidade, resistência à corrosão e usinabilidade. O molibdênio, por exemplo, quando adicionado em teores da ordem de 0,2% a 0,5%, aumenta significativamente a temperabilidade do aço, melhora a resistência à fluência em altas temperaturas e reduz a fragilização por têmpera. Já o boro, mesmo em pequenas quantidades (na faixa de 0,0005% a 0,003%), também promove um aumento considerável na temperabilidade, permitindo a obtenção de estruturas martensíticas mais profundas com menores taxas de resfriamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A compreensão do comportamento térmico e microestrutural dos aços é facilitada por meio do diagrama de fases ferro-carbono (Figura 2), o qual mostra as transformações de fase que ocorrem com a variação da temperatura e do teor de carbono. A partir dele, é possível prever a formação de estruturas como perlita, austenita, cementita e martensita, que estão diretamente relacionadas às propriedades finais do material (COSTA E SILVA; MEI, 2008).

Figura 2 - Diagrama de equilíbrio Fe-C.



Fonte: Callister (2002)

A classificação dos aços pode ser feita de diversas formas, sendo a composição química e o nível de resistência mecânica os critérios mais comuns. Os sistemas padronizados mais utilizados são os das normas SAE, AISI e ASTM. Segundo Callister e Rethwisch (2012), os aços carbono são divididos da seguinte forma:

- **Aços de baixo carbono:** até 0,30% C – são dúcteis, tenazes e facilmente soldáveis, porém com baixa resistência ao desgaste;
- **Aços de médio carbono:** 0,30% a 0,60% C – apresentam maior resistência mecânica e boa resposta a tratamentos térmicos;
- **Aços de alto carbono:** acima de 0,60% C – possuem alta dureza e resistência ao desgaste, porém com menor tenacidade e soldabilidade.

Segundo Callister (2012), os aços ligados contêm elementos adicionais em proporções específicas, com o objetivo de melhorar características como temperabilidade, resistência ao impacto e estabilidade térmica. A escolha do aço adequado deve considerar a aplicação pretendida, as exigências mecânicas e os processos metalúrgicos disponíveis.

Segundo Novikis (1981), os aços podem ser fornecidos em diferentes condições metalúrgicas, como laminados a quente, normalizados, recozidos ou temperados. A laminação a quente, por exemplo, é realizada acima da temperatura de recristalização, proporcionando boa conformabilidade e refino de grãos.

2.5 TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS

Segundo Callister (2012), os tratamentos térmicos e termoquímicos constituem um dos pilares da engenharia metalúrgica, sendo empregados para modificar as propriedades mecânicas dos metais sem alterar sua forma ou composição química global. Esses processos são baseados em transformações estruturais que ocorrem no estado sólido e que podem ser induzidas por ciclos controlados de aquecimento, manutenção térmica e resfriamento. A aplicação adequada de tratamentos térmicos permite o ajuste de propriedades como dureza, resistência ao desgaste, tenacidade, ductilidade e estabilidade dimensional, tornando os materiais adequados às exigências específicas dos serviços para os quais foram projetados. Em contrapartida, os tratamentos termoquímicos atuam também na composição química da superfície, promovendo endurecimento localizado,

ideal para componentes que exigem resistência superficial ao desgaste e um núcleo mais tenaz.

A seguir, são apresentados os fundamentos dos tratamentos térmicos e as principais transformações envolvidas, com base na metalurgia física dos aços.

2.5.1 Fundamentos dos Tratamentos Térmicos

De acordo com Callister (2002), os tratamentos térmicos consistem em ciclos controlados de aquecimento e resfriamento de metais, com a finalidade de alterar sua microestrutura e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. Esses processos são particularmente importantes no tratamento de aços, pois possibilitam o controle das fases presentes, como ferrita, perlita, austenita, martensita e bainita, dependendo da composição do material e da velocidade de resfriamento.

Chiaverini (2003) explica que os tratamentos térmicos exploram o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, que indica as faixas de temperatura em que ocorrem as transformações de fase em aços de diferentes composições. A fase austenítica, que se forma em temperaturas elevadas, é essencial nos processos térmicos, pois é a partir dela que se obtêm outras microestruturas, como martensita ou perlita, mediante o resfriamento adequado.

Segundo Callister (2012), entre os tratamentos térmicos mais aplicados em aços, destaca-se a têmpera, processo no qual o aço é aquecido até a região de formação da austenita e, em seguida, submetido a um resfriamento acelerado. Essa rápida queda de temperatura visa evitar transformações difusionais, favorecendo a formação da martensita, estrutura responsável pelo significativo aumento de dureza do material. No entanto, a obtenção dessa microestrutura depende diretamente da composição do aço e da velocidade crítica de resfriamento, que será abordada nas próximas subseções por meio da análise das curvas TTT (Tempo – Temperatura – Transformação).

A Figura 3 apresenta um diagrama CCT (*Continuous Cooling Transformation*) que ilustra as transformações microestruturais em um aço hipotético submetido a diferentes velocidades de resfriamento. No eixo vertical está representada a temperatura (°C), enquanto o eixo horizontal indica o tempo (s), em escala logarítmica. As curvas azuis correspondem a taxas de resfriamento variando de 0,5 °C/s a 200 °C/s.

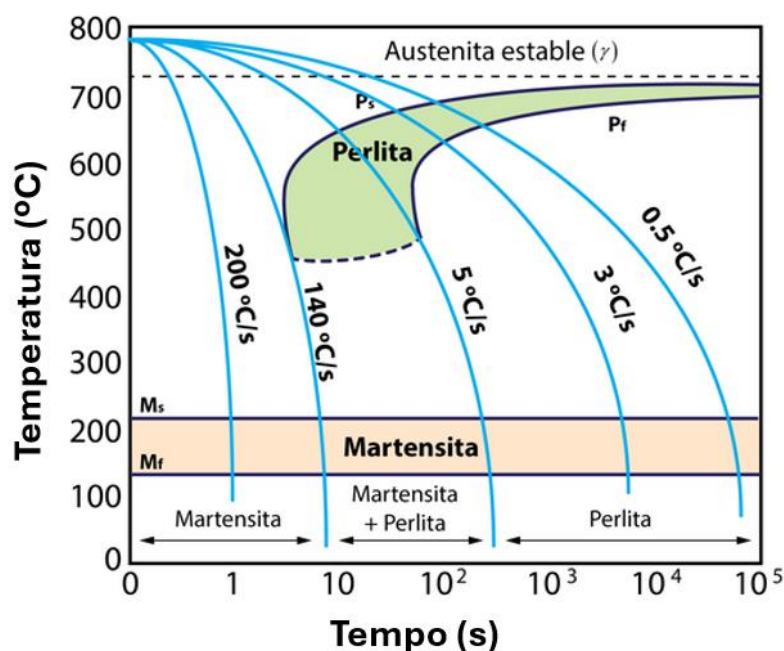
O diagrama mostra que a austenita (γ) é a fase estável em altas temperaturas. À medida que o aço resfria, diferentes microestruturas podem se formar, dependendo da

velocidade de resfriamento. Taxas mais lentas, como $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, favorecem a formação de perlita, que ocorre por transformação difusional dentro da região delimitada pelas curvas P_s (início) e P_f (fim). Em contrapartida, taxas de resfriamento mais elevadas, como $140\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ou $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, evitam essa transformação, resultando diretamente na formação de martensita, uma fase dura e frágil obtida por transformação não difusional.

As linhas horizontais indicam as temperaturas M_s (*martensita start*) e M_f (*martensita finish*), que delimitam a faixa em que ocorre a transformação martensítica. Quando a curva de resfriamento cruza essa região sem passar pela zona perlítica, forma-se martensita completa, como desejado no processo de têmpera. Em velocidades intermediárias, pode-se observar a coexistência de martensita e perlita.

Esse tipo de diagrama é fundamental para o planejamento de tratamentos térmicos, permitindo prever as microestruturas resultantes de diferentes ciclos térmicos e selecionar as condições ideais para alcançar as propriedades desejadas no material (LA WEB DE INGENIOSOS, 2023).

Figura 3 - Diagrama CCT.



Fonte: La Web de Ingeniosos (2023).

Segundo Reed-Hill (2009), a modificação microestrutural nos tratamentos térmicos ocorre por transformações no estado sólido, as quais podem ser difusionais ou não difusionais. Transformações difusionais, como a formação de perlita e bainita,

dependem de tempo e temperatura, enquanto transformações como a martensítica ocorrem de maneira quase instantânea, sem difusão atômica.

Conforme descrito por Colpaert (2008), o sucesso do tratamento térmico depende da seleção correta dos parâmetros térmicos, como a temperatura de aquecimento, o tempo de encharque e o meio de resfriamento. Além disso, fatores como o teor de carbono e a presença de elementos de liga afetam diretamente a resposta do material ao tratamento, influenciando a temperabilidade e a formação das fases desejadas.

O diagrama de equilíbrio ferro-carbono, ilustrado na Figura 2, é a principal ferramenta para entender essas transformações e definir os ciclos térmicos ideais para cada tipo de aço.

Nos próximos tópicos, serão abordados os principais mecanismos e processos envolvidos nos tratamentos térmicos, incluindo as curvas TTT, a formação da martensita, os ciclos de têmpera e revenido, além dos tratamentos termoquímicos, como a carbonitreção.

2.5.2 Curvas TTT e Transformações de Fase

O comportamento térmico dos aços durante o resfriamento é representado por diagramas conhecidos como curvas TTT (Tempo – Temperatura - Transformação), que são fundamentais para a compreensão e controle das transformações de fase nos tratamentos térmicos. De acordo com Callister (2002), essas curvas mostram quanto tempo a austenita leva para se transformar em outras microestruturas sob diferentes condições de temperatura, quando mantida de forma isotérmica.

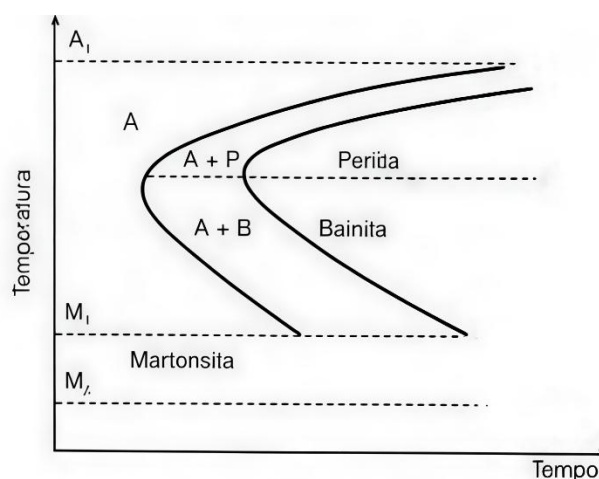
Chiaverini (2003) destaca que, para elaborar essas curvas, uma amostra de aço é primeiro aquecida até a completa austenitização e, em seguida, resfriada bruscamente até uma determinada temperatura constante, na qual se observa o tempo necessário para que as transformações iniciem e se completem. O resultado gráfico dessas observações forma curvas comumente em formato de "C", que representam os limites de início e término da transformação da austenita (Figura 4).

Segundo Reed-Hill (2009), se o resfriamento da austenita ocorrer de forma relativamente lenta, ela poderá se transformar em perlita ou bainita, por meio de processos difusionais. No entanto, se o resfriamento for rápido o suficiente para evitar tais transformações, a austenita pode se transformar em martensita, uma estrutura dura, frágil e metaestável, resultante de uma transformação não difusional.

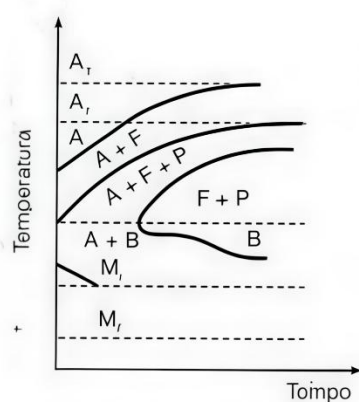
Colpaert (2008) afirma que o conhecimento e uso das curvas TTT são essenciais para engenheiros e técnicos que desejam planejar tratamentos térmicos com foco em obter propriedades mecânicas específicas. Isso é particularmente importante na têmpera, onde se busca evitar a formação de estruturas moles como a perlita, favorecendo a formação de martensita.

A Figura 4 ilustra três diagramas TTT representando diferentes composições de aço: eutetóide ($C \approx 0,8\%$), hipoeutetóide ($C < 0,8\%$) e hipereutetóide ($C > 0,8\%$). Esses diagramas indicam como variações na composição química afetam o posicionamento das curvas. Quanto mais à direita estiverem as curvas, mais lento pode ser o resfriamento necessário para se obter uma estrutura martensítica, pois há mais tempo para evitar a transformação difusional. Isso é característico de aços com elevada temperabilidade.

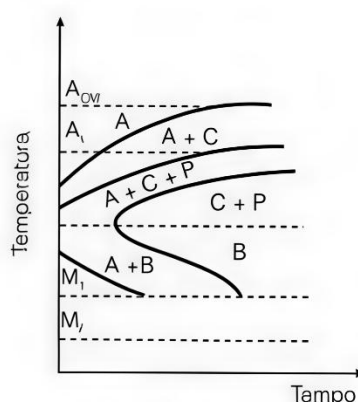
Figura 4 - Curvas TTT dos aços.



(a) Eutetóide ($C \approx 0,8\%$)



(b) Hipoeutetóide ($C < 0,8\%$)



(c) Hipereutetóide ($C > 0,8\%$)

A = Austenita
P = Perlita
B = Bainita
M = Martensita
C = Cementita
F = Ferrita

São quatro os fatores que influenciam o formato e a posição das curvas TTT:

- **Teor de carbono:** o aumento do teor de carbono desloca as curvas mais para a direita, facilitando a formação de martensita em velocidades de resfriamento mais baixas.
- **Elementos de liga (como Cr, Mo, Ni, Mn, B):** também contribuem para deslocar as curvas para a direita, retardando as transformações difusionais e aumentando a temperabilidade do aço.
- **Tamanho de grão da austenita:** grãos maiores reduzem o número de sítios de nucleação, retardando o início das transformações, o que também desloca as curvas para a direita.
- **Grau de homogeneização da austenita:** maior homogeneidade química interna tende a estabilizar a fase e atrasar o início da transformação.

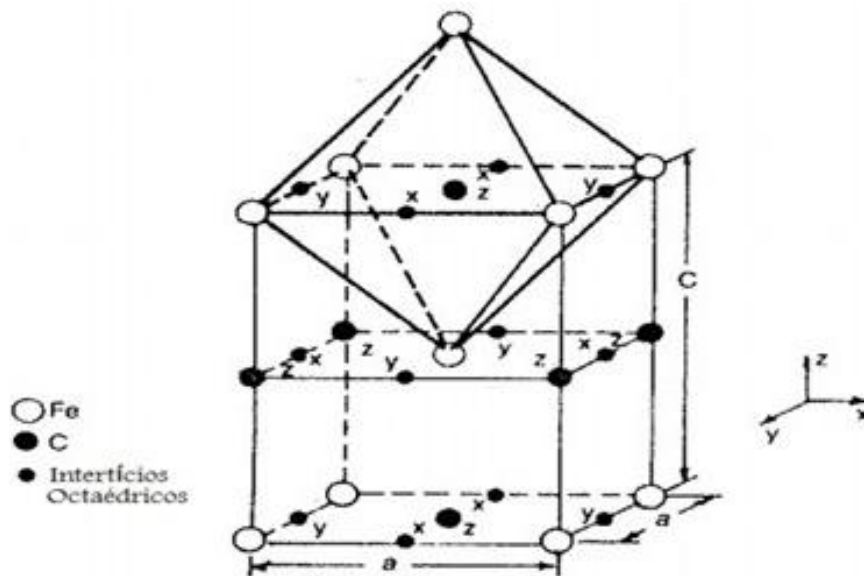
Esses fatores devem ser considerados no planejamento do ciclo térmico, permitindo escolher a combinação ideal de composição, parâmetros de aquecimento e meio de resfriamento para se atingir as microestruturas desejadas.

2.5.3 Martensita: Formação e Características

A martensita é uma fase metaestável de extrema importância nos tratamentos térmicos dos aços, obtida por meio da têmpera. De acordo com Callister (2002), essa estrutura surge a partir da transformação não difusional da austenita quando o material é resfriado rapidamente a uma taxa suficientemente alta para impedir a formação de perlita e bainita.

Segundo Callister (2012), a transformação martensítica ocorre por cisalhamento, reorganizando a estrutura cristalina sem a difusão de átomos. Como mostra a Figura 5, a martensita apresenta estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), originada pela deformação da estrutura cúbica da austenita devido à retenção de átomos de carbono na rede cristalina do ferro.

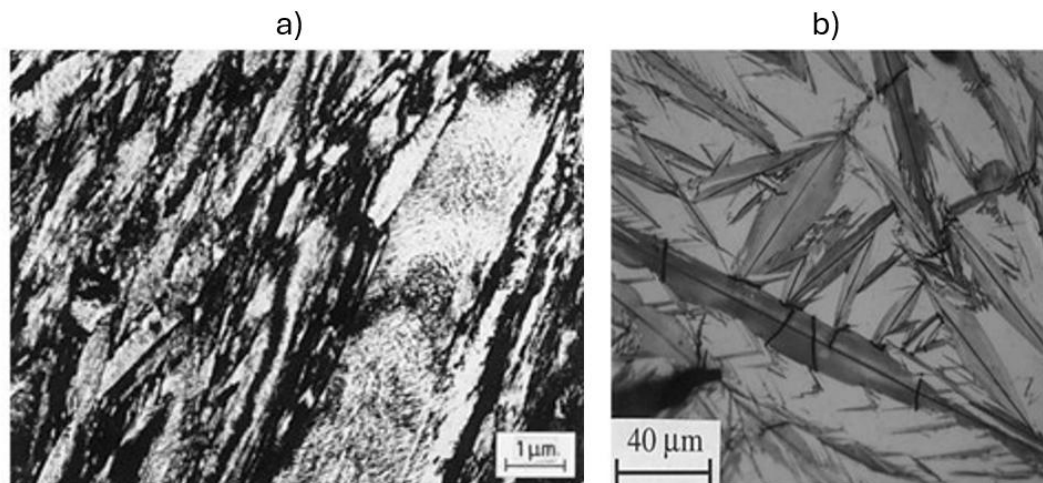
Figura 5 - Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado da martensita.



Fonte: Callister (2002)

A morfologia da martensita também varia conforme o teor de carbono do aço. Em aços com menor teor de carbono, como o SAE 4140, é comum a formação de martensita em ripa, como mostra a Figura 6 (a), após revenido a 150 °C. Essa estrutura é composta por agulhas finas e paralelas, organizadas em pacotes, o que confere maior tenacidade ao material. Já em ligas com alto teor de carbono, como a Fe-1,86%C, observa-se a formação de martensita em placas, estrutura característica de materiais com alto conteúdo de carbono. Essa microestrutura, ilustrada na Figura 6 (b), é mais frágil e apresenta maior dureza, sendo frequentemente utilizada em estudos metalográficos para representar situações extremas dentro do sistema ferro-carbono. No entanto, vale destacar que essa composição não é classificada como aço na prática industrial, sendo considerada uma liga ferro-carbono experimental com finalidades acadêmicas e de pesquisa.

Figura 6 - a) Microestrutura da martensita em ripa em um aço 4140 revenido a 150°C (MET). b) Microestrutura da martensita tipo placas em uma liga Fe – 1,86C.



Fonte: Krauss (1999)

Colpaert (2008) ressalta que a martensita é extremamente dura e frágil, exigindo, em quase todos os casos, a aplicação de um revenido subsequente, com o objetivo de aliviar as tensões internas, melhorar a tenacidade e ajustar a dureza às condições de trabalho da peça. O tratamento de revenido, assim como outros tratamentos térmicos, serão vistos nas seções seguintes.

2.5.4 Têmpera

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais utilizados na engenharia de materiais, especialmente para o endurecimento de aços. De acordo com Chiaverini (2003), esse processo consiste no aquecimento do aço à faixa de temperatura em que ocorre a formação da austenita (geralmente entre 800 °C e 900 °C, dependendo do teor de carbono), seguido de um resfriamento rápido, geralmente em água, óleo ou outro meio de resfriamento eficiente.

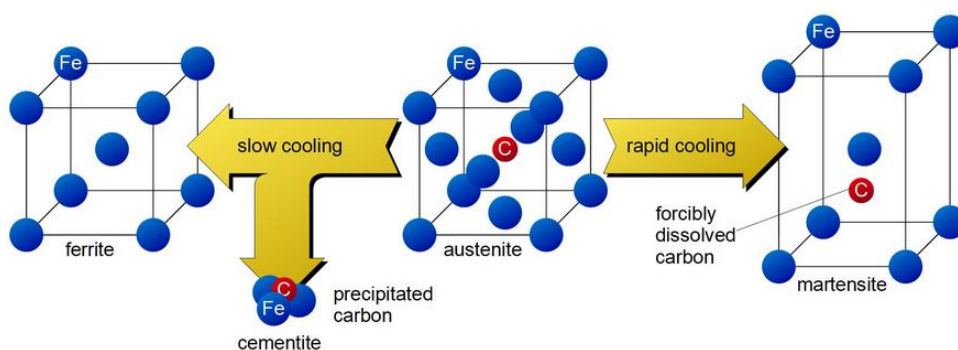
Callister (2002) explica que a finalidade da têmpera é promover a transformação da austenita em martensita, uma estrutura extremamente dura e resistente ao desgaste. O sucesso da têmpera depende diretamente da taxa de resfriamento: ela deve ser alta o suficiente para evitar a formação de perlita e bainita, o que exige que o aço atravesse rapidamente a região de transformação dessas fases no diagrama TTT.

Segundo Reed-Hill (2009), a têmpera provoca uma elevação expressiva da dureza do material, devido à formação da martensita e à elevada quantidade de tensões internas associadas à sua estrutura distorcida. No entanto, essas mesmas tensões tornam o material frágil e suscetível a trincas, sendo recomendável a aplicação posterior do revenido para ajustes nas propriedades mecânicas.

Chiaverini (2003) também destaca que a escolha do meio de resfriamento é um fator crítico no processo. Meios mais severos, como a água, proporcionam maior dureza, porém aumentam o risco de trincas e deformações mecânicas. Já os meios menos agressivos, como o óleo ou polímeros, oferecem maior controle sobre a velocidade de resfriamento, minimizando deformações e tensões internas.

A Figura 7 ilustra de forma esquemática o princípio do tratamento térmico de têmpera. O gráfico compara dois perfis distintos de resfriamento: um resfriamento lento (à esquerda), no qual ocorre a formação de cementita e outras fases moles, e um resfriamento rápido (à direita), que atravessa rapidamente a região crítica do diagrama TTT e favorece a formação de martensita. A imagem também evidencia a influência da taxa de resfriamento na microestrutura final do aço, destacando visualmente os objetivos da têmpera.

Figura 7 - Esquemática do processo de têmpera.



Fonte: TEC-SCIENCE (2025)

2.5.5 Revenido

O revenido é um tratamento térmico complementar à têmpera, aplicado com o objetivo de reduzir a fragilidade da martensita e ajustar as propriedades mecânicas do aço

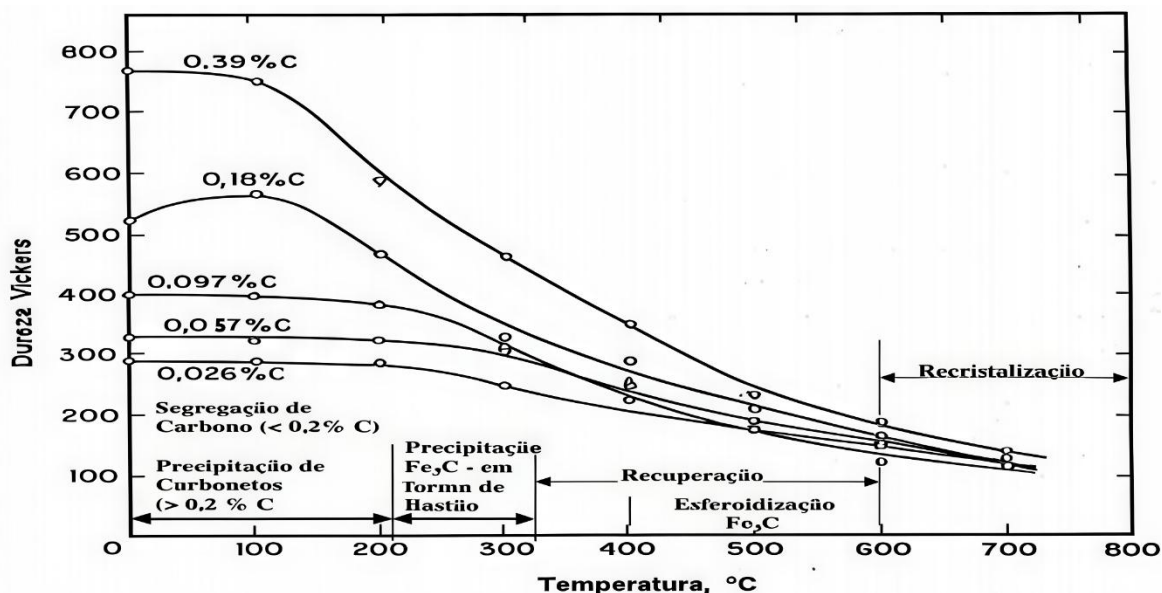
conforme os requisitos da aplicação. De acordo com Callister (2002), o processo consiste em aquecer o aço previamente temperado à uma temperatura inferior à crítica (geralmente entre 150 °C e 650 °C), mantendo-o por um determinado período e, em seguida, resfriando-o de maneira controlada.

Chiaverini (2003) destaca que o principal efeito do revenido é o alívio das tensões internas geradas durante a têmpera, tornando o material mais tenaz e menos suscetível à fratura frágil. Além disso, esse tratamento promove a decomposição parcial da martensita, com a formação de estruturas como ferrita e cementita finamente distribuídas.

Segundo Reed-Hill (2009), a escolha da temperatura de revenido está diretamente relacionada ao equilíbrio desejado entre dureza e tenacidade. Em temperaturas mais baixas (150 - 300 °C), a redução da dureza é mínima, mas ainda se obtém melhoria na estabilidade dimensional. Já em temperaturas mais elevadas (acima de 400 °C), há uma diminuição mais acentuada da dureza, com ganho significativo de ductilidade e resistência ao impacto.

Esse comportamento pode ser observado na Figura 8, que ilustra a variação da dureza do aço em função da temperatura de revenimento, evidenciando a queda progressiva da dureza conforme a temperatura aumenta.

Figura 8 - Variação da dureza em função da temperatura de revenimento.



Fonte: Reed Hill (2009)

Colpaert (2008) reforça que o revenido também influencia na resistência ao desgaste. Apesar da redução de dureza, a presença de uma microestrutura mais estável e menos tensionada pode resultar em maior durabilidade da peça em serviço, principalmente sob condições de impacto ou solicitação cíclica.

2.5.6 Temperabilidade e sua Importância

A temperabilidade é a capacidade de um aço formar martensita em maior profundidade durante o processo de têmpera. Conforme Callister (2002), esse conceito não deve ser confundido com a “facilidade de ser temperado”, que está relacionada à taxa de resfriamento. Já a temperabilidade diz respeito à distância da superfície ao centro da peça até a qual a martensita pode se formar de maneira eficaz, influenciando diretamente a uniformidade da dureza.

Chiaverini (2003) ressalta que essa propriedade depende fortemente da composição química do aço, especialmente da presença de elementos de liga como manganês, cromo, níquel e boro. Esses elementos retardam a transformação perlítica e bainítica, permitindo que a martensita se forme mesmo em regiões internas da peça.

Reed-Hill (2009) explica que a temperabilidade é crítica para aplicações em que se deseja dureza não apenas na superfície, mas também em seções mais internas da peça, ou quando há necessidade de uniformidade de propriedades mecânicas em peças de geometria espessa ou complexa.

A correta compreensão da temperabilidade permite a seleção adequada do aço e dos parâmetros de têmpera, assegurando desempenho mecânico uniforme e confiável mesmo em regiões internas da peça.

2.5.6.1 Fatores que Influenciam a Temperabilidade

Diversos fatores influenciam a temperabilidade dos aços, impactando diretamente sua capacidade de formar martensita em profundidade. De acordo com Chiaverini (2003), o principal fator é a composição química, especialmente a presença de elementos de liga que retardam a transformação da austenita em perlita e bainita durante o resfriamento, favorecendo a formação de martensita.

Entre esses elementos, o boro se destaca por seu efeito marcante, mesmo em concentrações muito baixas, tipicamente inferiores a 0,003%. Conforme apontado por

Callister (2002) e Chiaverini (2003), o boro atua intensamente no deslocamento das curvas TTT para a direita, o que permite que a martensita se forme mesmo em regiões mais internas da peça e com taxas de resfriamento menos severas.

Além da composição química, Reed-Hill (2009) observa que a granulação da austenita exerce papel relevante na temperabilidade. Grãos maiores reduzem a quantidade de contornos de grão, regiões onde frequentemente se iniciam as transformações difusionais, o que diminui os núcleos potenciais para a formação de perlita e ferrita, favorecendo a geração de martensita em profundidade. Contudo, grãos excessivamente grandes podem comprometer propriedades como a tenacidade, exigindo um controle criterioso do tamanho de grão.

Outro fator importante é o tamanho e a geometria da peça. Componentes com grande seção transversal ou com formas complexas apresentam dificuldades em resfriar de maneira uniforme. Nesses casos, a seleção de um aço com alta temperabilidade torna-se essencial para garantir endurecimento adequado em toda a peça.

Por fim, a velocidade de resfriamento e o meio de têmpera (água, óleo, polímeros ou ar) também influenciam fortemente o resultado. Chiaverini (2003) destaca que quanto maior a severidade do meio de têmpera, maior a profundidade de formação de martensita. No entanto, essa severidade também aumenta o risco de trincas e deformações, exigindo um equilíbrio entre material, geometria e processo térmico para assegurar o sucesso do tratamento.

2.5.7 Tratamentos Termoquímicos

Os tratamentos termoquímicos consistem em processos de modificação da composição química da superfície de materiais metálicos, geralmente aços, por meio da difusão de elementos como carbono, nitrogênio ou ambos, a temperaturas abaixo da linha de fusão do material base. Segundo Chiaverini (2003), esses tratamentos visam aumentar a dureza superficial, a resistência ao desgaste, à fadiga e, em alguns casos, à corrosão, mantendo o núcleo do material com tenacidade e ductilidade adequadas.

Diferentemente da têmpera, que altera a microestrutura do aço por meio de resfriamento rápido, o tratamento termoquímico de cementação modifica a composição química da superfície: o carbono difunde para dentro, formando uma camada endurecida de cerca de 2 mm de espessura, enquanto o núcleo permanece com microestrutura

original, mantendo sua ductilidade e tenacidade (CELESTINO; FELIPE; MACHADO, 2007).

Entre os tratamentos termoquímicos mais comuns estão a cementação, a nitratação e a carbonitreção, cada um com diferentes atmosferas, elementos difusores e objetivos metalúrgicos, porém devido a atuação do presente trabalho, será destacado apenas a carbonitreção.

2.5.7.1 Carbonitreção

A carbonitreção é um tratamento termoquímico realizado em atmosferas contendo gases carburantes (como metano ou monóxido de carbono) e nitrogenantes (como amônia). O processo é conduzido a temperaturas em torno de 800 °C a 880 °C, permitindo a difusão simultânea de carbono e nitrogênio para a superfície do aço. Isso resulta na formação de camadas superficiais endurecidas, com elevada dureza e resistência ao desgaste abrasivo (CALLISTER, 2002).

Reed-Hill (2009) ressalta que a adição de nitrogênio retarda a difusão de carbono, favorecendo uma camada mais fina, porém mais dura e resistente, pois a difusão de carbono fica mais difícil, evitando a formação de ferrita/perlita, favorecendo a formação de martensita. A microestrutura obtida ao final do processo pode conter martensita, carbonetos e nitretos, dependendo do aço e dos parâmetros empregados.

Colpaert (2008) destaca que a carbonitreção é particularmente indicada para aços de baixo carbono, que devido à sua baixa temperabilidade, não obteriam endurecimento suficiente apenas por têmpera. Por meio da carbonitreção, a superfície desses aços pode atingir durezas superiores a 60 *Hardness Rockwell "C"* (HRC), mesmo mantendo o núcleo em condição dúctil.

A profundidade da camada endurecida obtida em tratamentos termoquímicos, como a carbonitreção, pode ser controlada por meio do ajuste da temperatura e do tempo de permanência no forno, permitindo adaptar o tratamento às exigências específicas de desgaste das peças (COLPAERT, 2008). Em aplicações industriais, são comuns espessuras de camada entre 0,3 mm e 1,0 mm, variando conforme a sollicitação mecânica e a geometria do componente.

2.6 REVESTIMENTOS DE SUPERFÍCIE

Os revestimentos de superfície são empregados para modificar as características da camada externa de componentes metálicos, visando melhorar seu desempenho em serviço. Esses tratamentos são especialmente voltados à melhoria das propriedades tribológicas, que englobam o comportamento do material em contato com outras superfícies, incluindo resistência ao desgaste, redução de atrito e proteção contra danos por deslizamento, impacto ou abrasão (CALLISTER, 2002).

Além dos tratamentos térmicos convencionais, técnicas de revestimento superficial são amplamente empregadas para aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão de componentes metálicos, sobretudo em aplicações severas onde se busca prolongar a vida útil da peça sem comprometer as propriedades do núcleo. Entre os principais métodos utilizados, destacam-se:

- **Soldagem de Revestimento**

A soldagem de revestimento consiste na aplicação de um material sobre a superfície da peça por meio de processos de soldagem, formando uma camada resistente ao desgaste ou à corrosão. Um exemplo dessa abordagem é o revestimento por soldagem com tecimento em alta frequência utilizando arame tubular, que proporciona maior controle do perfil do cordão, menor diluição e melhor uniformidade da camada (SILVA, 2022). Essa técnica é especialmente adequada para componentes sujeitos à condições severas de abrasão e impacto, como é o caso de peças agrícolas, ferramentas de corte ou em peças sujeitas à cavitação como turbinas para geração de hidrelétricas.

- **Aspersão Térmica**

A aspersão térmica é uma técnica amplamente utilizada para revestimento de superfícies, na qual partículas metálicas ou cerâmicas são aquecidas até o estado fundido ou semifundido e projetadas contra o substrato. O processo ocorre sem fusão do metal-base, o que minimiza distorções térmicas e permite a deposição de materiais com propriedades superiores. Essa tecnologia tem se mostrado eficaz inclusive em aplicações críticas, como a recuperação de componentes com espessuras reduzidas, especialmente em setores industriais severos (SILVA; OLIVEIRA; SANTOS, 2011).

- **Eletrodeposição**

A eletrodeposição, também conhecida como galvanoplastia, é um processo eletroquímico em que íons metálicos são reduzidos e depositados sobre um substrato

condutor. Essa técnica permite a aplicação de camadas finas com excelente aderência e acabamento superficial, sendo amplamente empregada para fins estéticos, de proteção contra corrosão ou melhoria do contato elétrico. Conforme descrito pela Associação Brasileira de Tratamentos de Superfície (ABTS, 2023), a eletrodeposição é um método versátil e de baixo custo, aplicável a diversos metais.

- **Revestimento com Carboneto de Tungstênio (WC)**

Dentre os materiais empregados como revestimento, destaca-se o carboneto de tungstênio (WC), um composto cerâmico extremamente duro, formado pela combinação entre tungstênio (W) e carbono (C). Sua dureza pode ultrapassar 1500 HV, conferindo elevada resistência ao desgaste por abrasão. Segundo Chiaverini (2003), o WC também apresenta boa tenacidade para um material cerâmico, o que o torna especialmente indicado para aplicações com desgaste abrasivo severo e impacto intermitente. Pode ser aplicado por aspersão térmica ou soldagem com eletrodos tubulares, formando camadas com espessura de 0,5 mm a 2,0 mm, com boa aderência e uniformidade (DAVIS, 2001).

2.7 FORMAS DE VALIDAÇÃO DE TRATAMENTOS TÉMICOS E REVESTIMENTOS

A eficácia dos tratamentos térmicos e dos revestimentos de superfície deve ser avaliada por meio de métodos de validação que confirmem o alcance das propriedades desejadas nos componentes. Essa validação se inicia em laboratório, com o uso de ensaios normalizados que permitem verificar a microestrutura, dureza e resistência mecânica obtidas após os processos aplicados.

De acordo com Totten (2006), os ensaios de dureza (como os métodos Rockwell, Brinell e Vickers – ASTM E18, E10 e E92), a análise metalográfica (ASTM E3) e os testes de flexão e microdureza (ASTM E855) são essenciais para confirmar o sucesso do tratamento térmico. Esses ensaios indicam não apenas o valor de dureza atingido, mas também a espessura das camadas endurecidas, a homogeneidade microestrutural e a presença de eventuais falhas, como trincas ou zonas de revenido.

No caso dos revestimentos, métodos complementares são aplicados, como análise de espessura por microscopia ou ultrassom, ensaios de adesão (*pull-off test*), microdureza da camada e observações em seções transversais polidas. Conforme Silva (2007), esses testes são indispensáveis para garantir que o revestimento apresente a espessura, dureza e resistência ao desgaste previstas em projeto.

Contudo, como destacam Callister (2012) e Reed-Hill (2009), os ensaios laboratoriais não reproduzem todas as condições de serviço às quais os componentes são submetidos. Por isso, é necessário que esses resultados sejam complementados por ensaios funcionais ou testes de desempenho em operação simulada, os quais permitem verificar a durabilidade real e a estabilidade das propriedades adquiridas.

Essa abordagem combinada assegura que o material ou tratamento selecionado seja, de fato, adequado à aplicação final, promovendo maior confiabilidade nos produtos desenvolvidos.

2.8 IMPORTANCIA DA VALIDAÇÃO DE CAMPO

A validação de materiais e componentes em condições reais de operação tem uma importância relevante para garantir a confiabilidade e a durabilidade de sistemas mecânicos. Embora os ensaios laboratoriais ofereçam dados importantes sobre propriedades como dureza, resistência ao desgaste e comportamento estrutural, eles não conseguem reproduzir todas as variáveis presentes no uso prático.

Nesse sentido, os testes de campo tornam-se indispensáveis, especialmente em setores como o agrícola, onde os componentes estão sujeitos a condições severas de trabalho. Segundo Pérez (2010), a avaliação prática de ferramentas agrícolas, como lâminas de arado rotativo, revelou que os modos e as taxas de desgaste observados em campo diferem significativamente daqueles obtidos em ambiente controlado.

A Intertek (2022), empresa especializada em testes e certificações industriais, reforça que os testes de campo são fundamentais para o controle de riscos, validação de tecnologias e garantia de conformidade com padrões de qualidade e segurança. Já a TWI (2022) destaca que, em situações com múltiplas variáveis, como variações de carga, abrasão e impacto, os testes laboratoriais devem ser complementados com ensaios práticos para refletir com maior precisão o desempenho real dos componentes.

2.9 PRINCIPAIS FORMAS DE DESGASTES

O desgaste é um fenômeno amplamente estudado na engenharia mecânica e de materiais, devido ao seu impacto direto na vida útil e no desempenho de componentes submetidos a atrito, contato ou movimentação relativa. Ele representa a remoção progressiva de material da superfície de um sólido, podendo ocorrer por diferentes mecanismos, em função das condições operacionais, dos materiais envolvidos e do ambiente de trabalho.

Em sistemas mecânicos, especialmente aqueles empregados em ambientes severos como o agrícola, o desgaste está entre as principais causas de falhas prematuras. A compreensão de seus mecanismos é fundamental para o dimensionamento de peças, seleção de materiais, definição de tratamentos térmicos ou de superfície, e para a aplicação de revestimentos protetores.

Segundo Rabinowicz (1995 apud Skonieski, 2017), o desgaste não é uma propriedade do material, mas um comportamento resultante da interação entre superfícies e das condições operacionais. Por isso, sua análise deve considerar o sistema tribológico como um todo.

Conforme a classificação de Zum Gahr (1987) e Stachowiak e Batchelor (2005 apud Skonieski, 2017), os principais mecanismos de desgaste são:

- **Desgaste abrasivo:** causado por partículas duras ou asperezas que se deslocam sobre outra superfície, removendo material. Pode ocorrer por:
 - Dois corpos: contato direto entre superfícies;
 - Três corpos: atuação de partículas soltas entre elas.
- **Desgaste adesivo:** ocorre pela formação e rompimento de micro junções entre superfícies metálicas sob carga, com transferência ou remoção de material.
- **Desgaste por fadiga:** decorrente de tensões cíclicas em regiões de contato, gerando trincas subsuperficiais e destacamento de partículas.
- **Desgaste corrosivo:** combina desgaste mecânico com reações químicas ou eletroquímicas, como a oxidação, que fragiliza a superfície.

Skonieski (2017) ressalta que esses mecanismos frequentemente atuam de forma combinada, sendo essencial identificá-los corretamente para a escolha de materiais e tratamentos adequados.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PLATAFORMA PARA COLHEITA DE MILHO

A plataforma para colheita de milho analisada neste estudo, é um implemento agrícola desenvolvido pela empresa Vence Tudo, responsável por realizar a colheita direta das espigas em plantações de milho. Trata-se de um equipamento não autopropelido, que trabalha acoplado à colhedora automotriz, integrando-se ao sistema mecanizado de colheita.

Sua função é coletar o milho na lavoura de forma contínua, separando a espiga do caule da planta e direcionando-a para o sistema interno da colhedora automotriz, onde ocorre a debulha e o armazenamento dos grãos.

Esse tipo de equipamento é constituído por módulos repetitivos chamados de linhas recolhedoras, que trabalham de forma sincronizada para cortar, recolher e transportar a cultura. A plataforma pode conter diferentes quantidades de linhas, conforme o modelo e a largura de trabalho desejada.

A Figura 9 apresenta uma visão geral de uma plataforma de colheita de milho, evidenciando sua estrutura modular e os principais elementos externos.

Figura 9 - Plataforma para colheita de milho.



Fonte: Vence Tudo (2025)

Já a Figura 10 ilustra a plataforma acoplada à colheitadeira em operação, evidenciando sua integração ao sistema mecanizado de colheita.

Figura 10 - Plataforma para colheita de milho acoplada à uma colhedeira automotriz.



Fonte: Vence Tudo (2025)

Cada módulo da plataforma é composto por diversos componentes, como divisores de linha recolhedoras, rolos recolhedores, correntes transportadoras, bicos e caracóis alimentadores. Entre eles, as aletas recolhedoras desempenham um papel fundamental ao auxiliar na condução e alinhamento das plantas durante sua entrada na máquina, contribuindo diretamente para o rendimento operacional da colheita.

3.1.1 Unidade recolhedora (Linha)

A unidade recolhedora, também chamada de linha, é o conjunto funcional da plataforma de colheita de milho responsável por destacar a espiga da planta e conduzi-la até o sistema de alimentação da colhedora automotriz. Cada plataforma é composta por várias linhas montadas lado a lado, de acordo com a largura total de colheita da máquina.

O objetivo principal da linha é realizar o destacamento da espiga de forma eficiente, evitando a entrada de resíduos indesejados como caules inteiros, palhas ou folhas. A separação seletiva do material vegetal é fundamental para garantir a eficiência energética da colhedora automotriz, já que evita o processamento de materiais que não agregam valor e aumentam o consumo de combustível.

O funcionamento da unidade recolhedora inicia com dois rolos recolhedores instalados paralelamente, um do lado direito e outro do lado esquerdo, que giram em sentidos opostos, tracionando o caule da planta para baixo (Figura 11). Esse movimento

faz com que a espiga seja destacada ao colidir com as chapas despigadoras, que permanecem fixas na horizontal logo acima da trajetória dos rolos.

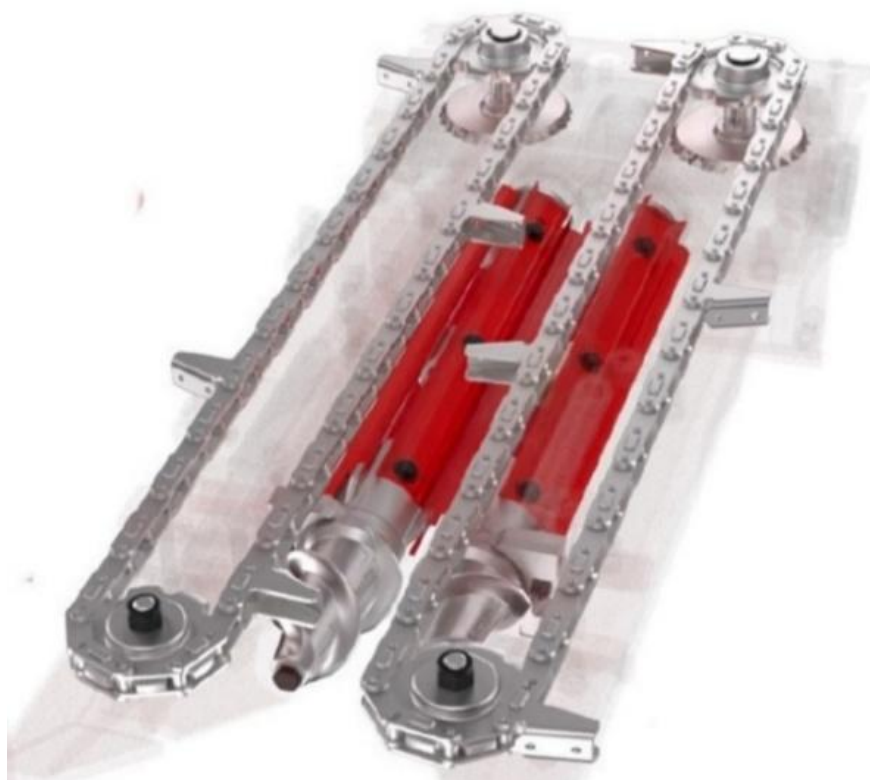
Figura 11 - Unidade recolhadora.



Fonte: Vence Tudo (2025)

Uma vez solta do caule, a espiga é direcionada pelas correntes recolhadoras (Figura 12), que se movimentam de forma sincronizada uma contra a outra, empurrando o material colhido em direção ao caracol alimentador. O caracol, por sua vez, transporta as espigas até o alimentador da colhedora automotriz, que dará sequência às etapas de separação e debulha. Todo esse sistema é acionado mecanicamente por uma caixa de transmissão, responsável por distribuir o torque necessário para o funcionamento coordenado de todos os elementos móveis da linha.

Figura 12 - Correntes recolhedoras.



Fonte: Vence Tudo (2025)

Além do destacamento da espiga, a linha tem como função provocar o dano do caule da planta que permanece no campo (Figura 13), sem ser puxado para dentro da máquina. A ação dos rolos recolhedores sobre o caule gera esmagamentos e rupturas intencionais.

Figura 13 - Caule avariado.



Fonte: Autor (2025)

Essa avaria tem como objetivo acelerar o processo de decomposição do material vegetal, facilitando os manejos posteriores como o plantio direto e contribuindo para o enriquecimento do solo com matéria orgânica.

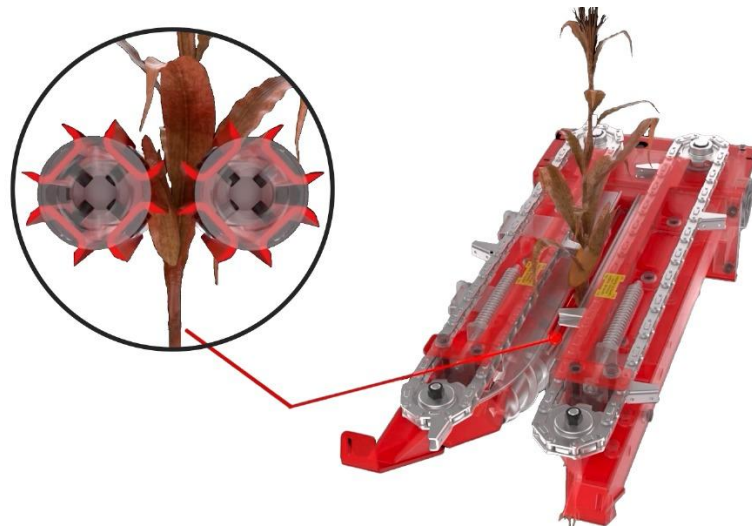
3.1.1.1 Rolos recolhedores

Os rolos recolhedores são os responsáveis por tracionar os caules das plantas de milho para baixo, em direção à base da linha recolhedora, facilitando o destacamento das espigas. Instalados em pares paralelos e girando em sentidos opostos, os rolos atuam de forma sincronizada para garantir uma operação eficiente e contínua.

Cada rolo possui, fixadas em sua superfície, as aletas de aço que promovem a tração efetiva do caule. A eficiência do sistema depende da precisão dimensional e do sincronismo entre os rolos, de modo a assegurar o alinhamento correto das aletas em operação.

A Figura 14 apresenta os rolos recolhedores em funcionamento, tracionando o caule da planta em direção à base da linha, e demonstra visualmente o princípio de atuação mecânica do sistema.

Figura 14 - Rolos recolhedores.

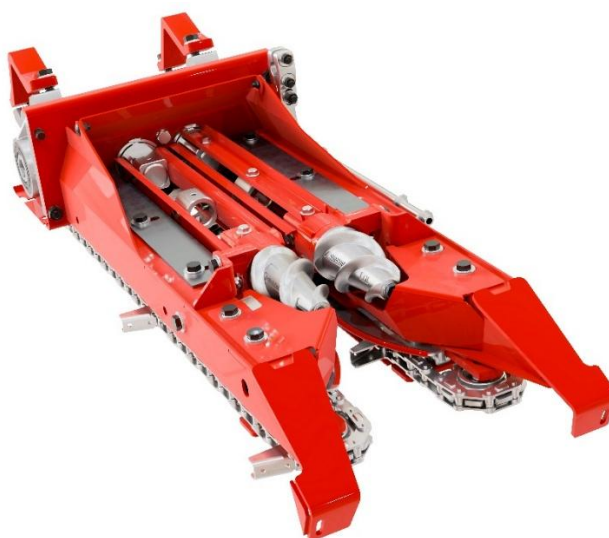


Fonte: Vence Tudo (2025)

3.1.1.1.1 Aletas

Cada rolo recolhedor possui quatro aletas de aço fixadas ao seu corpo. Essas aletas são os elementos ativos de tração do caule, pois possuem extremidades afiadas (fios) que se alinham frontalmente com as aletas opostas durante a rotação sincronizada dos rolos (Figura 15).

Figura 15 - Fixação das aletas.



Fonte: Vence Tudo (2025)

A Figura 16 apresenta uma vista de uma aleta aço, destacando seu formato, região de fixação e a geometria da extremidade da lâmina² (fio), responsável pela tração do caule durante a operação.

Figura 16 - Aleta.



Fonte: Vence Tudo (2025)

Quando alinhadas, as pontas dos fios devem manter uma distância de 1,5 mm, com tolerância de $-0,5$ mm a $+0$ mm. Sempre que essa distância excede 2,0 mm em trabalho, a eficiência da colheita é consideravelmente comprometida. Isso porque esta distância das aletas pode resultar no corte indevido do caule, fazendo com que ele, junto

² Neste trabalho, as palavras lâmina e fio serão utilizadas de forma indiscriminada para referir-se a parte afiada da aleta, em outras palavras, que realiza o corte do caule do milho.

com folhas e palhas, seja conduzido ao interior da colhedora automotriz. Tal condição acarreta aumento no consumo de combustível, desgaste prematuro dos sistemas internos da máquina e redução da eficiência do processo. Além disso, quando as aletas não pressionam adequadamente o caule, este permanece intacto no campo, dificultando sua decomposição e prejudicando os próximos manejos agrícolas.

3.2 DESGASTE PREMATURO DAS ALETAS

Conforme descrito na seção anterior, as aletas têm a função de tracionar o caule da planta para baixo, em direção à base da linha recolhadora, promovendo o destacamento da espiga e, simultaneamente, danificando o caule remanescente no campo. Esse funcionamento ocorre por meio do alinhamento frontal entre as aletas dos dois rolos, que giram em sentidos opostos, realizando o esmagamento controlado do caule. A eficiência desse processo depende diretamente da integridade dos fios cortantes das aletas e da manutenção da distância de trabalho entre elas, conforme os parâmetros de projeto.

Entretanto, foi identificado um problema recorrente de desgaste abrasivo prematuro das aletas, que comprometia de forma significativa a eficiência da colheita. Esse desgaste excessivo resulta na perda do fio das extremidades das aletas, afetando o correto alinhamento e a capacidade de tração sobre o caule. Como consequência, ocorrem falhas no destacamento adequado das espigas, aumento da quantidade de material indesejado (como palha, folhas e até caules inteiros) sendo direcionado para dentro da colhedora automotriz, além da redução da eficiência operacional do equipamento.

O problema apresentou-se ainda mais crítico pelo fato de que o desgaste acentuado das aletas ocorria antes mesmo do término do período de garantia dos equipamentos, gerando um elevado volume de atendimentos corretivos, substituições e custos associados à cobertura de garantia. A análise dos relatórios de garantia, provenientes dos setores de assistência técnica e pós-venda, foi uma das bases para dimensionar a real extensão do problema. Esses dados apontaram uma frequência elevada de falhas relacionadas às aletas em um curto intervalo de tempo e de área trabalhada, evidenciando que o componente não estava atendendo às expectativas de durabilidade previstas no projeto.

Além do impacto na eficiência da colheita, esse desgaste precoce compromete também a capacidade de danificar corretamente o caule remanescente, função essencial para o manejo agrícola subsequente, como o plantio direto. Quando as aletas perdem seu fio e sua geometria, o caule não é mais esmagado ou fraturado como projetado, o que impacta negativamente nas operações seguintes e na eficiência agrônômica do sistema.

Diante desse cenário, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar alternativas metalúrgicas e de processos que proporcionem maior resistência ao desgaste das aletas. Por meio de estudos comparativos de diferentes materiais, tratamentos térmicos, tratamentos superficiais e revestimentos, busca-se mitigar o problema do desgaste abrasivo prematuro e, conseqüentemente, aumentar a vida útil do componente, garantindo maior eficiência e desempenho do conjunto de recolhimento da plataforma.

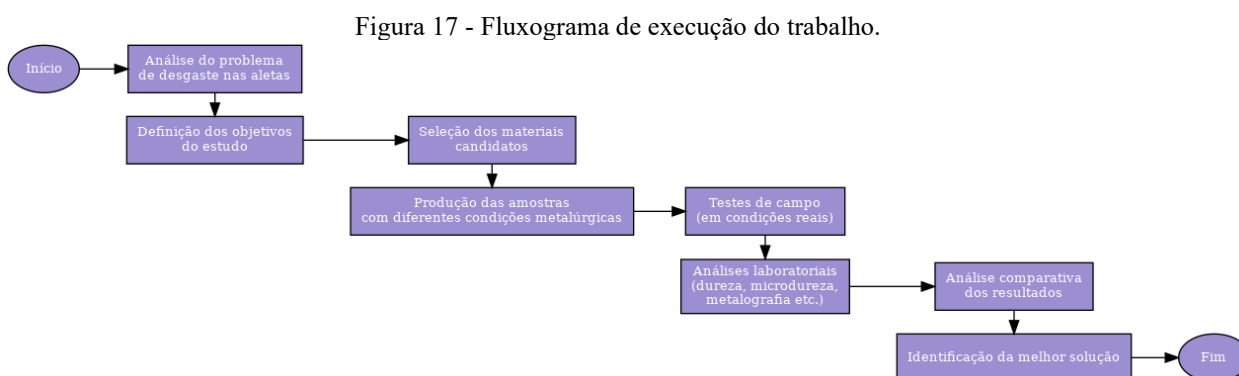
3.3 ESTRATÉGIA DE EXECUÇÃO

O desenvolvimento deste trabalho seguiu uma estratégia estruturada, apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Inicialmente, foi realizada a análise do problema de desgaste prematuro nas aletas, com o objetivo de compreender os modos de falha e as limitações do material originalmente utilizado.

Com base nesse diagnóstico, foram definidos os objetivos do estudo e selecionados materiais alternativos com potencial para melhorar o desempenho em campo. Foram então produzidas amostras com diferentes composições e tratamentos, representando alternativas viáveis à configuração original.

Na sequência, essas amostras foram submetidas a testes de campo, em condições reais de operação, visando avaliar sua resistência ao desgaste e estabilidade dimensional. Posteriormente, foram realizadas análises laboratoriais complementares, como ensaios de dureza, microdureza, metalografia e flexão com o intuito de caracterizar os materiais e os tratamentos aplicados.

Por fim, os dados obtidos nos testes práticos e nas análises laboratoriais foram comparados de forma sistemática, possibilitando a identificação das soluções com melhor desempenho técnico para aplicação em campo.



Fonte: Vence Tudo (2025)

3.3.1 Requisitos e seleção de materiais a serem empregados

A seleção dos materiais empregados neste estudo levou em consideração os requisitos funcionais da peça, especialmente sua exposição a condições severas de desgaste abrasivo durante o processo de colheita. Como estratégia para aumentar a vida útil do componente, priorizou-se o uso de materiais que apresentassem maior dureza superficial, característica diretamente relacionada à resistência ao desgaste.

Dentre os critérios estabelecidos, destacaram-se a viabilidade de tratamento térmico ou termoquímico, a disponibilidade comercial dos materiais, o custo de aquisição e processamento, e a compatibilidade com as etapas de fabricação da peça. A estratégia adotada envolveu a seleção de diferentes alternativas de materiais e rotas de tratamento, além da avaliação de uma condição já utilizada anteriormente na produção, cujo desempenho insatisfatório em campo motivou o desenvolvimento deste trabalho.

Essas diferentes configurações permitiram uma análise comparativa em termos de comportamento em serviço, viabilidade de aplicação e potencial de melhoria do desempenho frente às exigências operacionais da peça.

3.3.2 Caracterização das amostras

Com o intuito de avaliar as propriedades dos materiais selecionados para este estudo, foram realizadas diferentes técnicas de caracterização física, química e mecânica. Essas análises permitiram uma comparação técnica entre as diferentes configurações metalúrgicas utilizadas nas amostras, contemplando tanto os materiais alternativos em estudo quanto o modelo originalmente aplicado na linha de produção.

As técnicas empregadas incluíram a avaliação de micro durezas, aplicada às amostras que passaram por tratamentos térmicos e termoquímicos, com o objetivo de determinar o perfil de endurecimento superficial. Também foram realizados ensaios de dureza global, para verificar a dureza média nas amostras.

A análise da composição química foi conduzida para confirmar a conformidade com os padrões de referência de cada tipo de aço empregado, assegurando a presença e as proporções adequadas dos principais elementos de liga. Complementarmente, foram realizadas análises metalográficas, que permitiram observar a microestrutura resultante dos diferentes processos de tratamento térmico ou superficial, incluindo a morfologia da camada endurecida e a constituição da matriz metálica.

Para avaliação da tenacidade e integridade estrutural, foram conduzidos ensaios de flexão. Esses ensaios auxiliaram na identificação de possíveis falhas como trincas ou destacamentos superficiais, especialmente em regiões tratadas.

Por fim, o teste de campo também foi considerado parte do processo, sendo realizada através da análise do comportamento das peças sob condições reais de operação. Essa etapa complementa os ensaios laboratoriais, fornecendo informações sobre desgaste, resistência e integridade dimensional ao longo do uso.

3.4 DESENVOLVIMENTO DAS AMOSTRAS

Com o objetivo de investigar alternativas metalúrgicas com maior resistência ao desgaste abrasivo severo, foram desenvolvidas amostras a partir de três tipos de aço: SAE 15B30, AISI A36 e SAE 1045. Cada material passou por diferentes tratamentos térmicos ou superficiais, permitindo uma análise comparativa entre rotas de processamento distintas aplicadas ao mesmo componente.

As amostras foram numeradas de 1 a 5, conforme descrito na Tabela 1, que apresenta o material base utilizado, o tipo de tratamento aplicado, a espessura da camada endurecida (quando aplicável) e a dureza superficial obtida. Essas configurações foram selecionadas com base em critérios técnicos de viabilidade industrial e histórico de desempenho em aplicações similares.

Tabela 1 - Descrição das amostras testadas.

AMOSTRA	MATERIAL (AÇO)	PROCESSO	CAMADA (MM)	DUREZA SUPERFICIAL
1	AISI A36	CARBONITRETAÇÃO	0,5	55 a 60 HRC
2	AISI A36	CARBONITRETAÇÃO	1,0	60 a 65 HRC
3	SAE 15B30	ATRIBUIDO COMO TÊMPERA E REVENIDO	-	45 ± 2 HRC
4	SAE 15B30	ATRIBUIDO COMO TÊMPERA E REVENIDO	-	50 ± 2 HRC
5	SAE 1045	REVESTIMENTO DE CARBETO DE TUNGSTÊNIO	0,1	1100 a 1400 HV

Fonte: O autor (2025).

As amostras 1 e 2 foram produzidas com aço AISI A36 e submetidas à carbonitreção com diferentes profundidades de camada. As amostras 3 e 4 utilizaram aço SAE 15B30 temperado e revenido, variando a dureza final. Já a amostra 5 corresponde ao modelo atualmente em uso na produção, feito em aço SAE 1045 com aplicação de revestimento superficial por carboneto de tungstênio.

3.4.1 Processo de fabricação comum às amostras

Todas as amostras foram fabricadas respeitando as dimensões e tolerâncias definidas em projeto, garantindo a representatividade das condições reais de operação em campo. O processo de fabricação seguiu um roteiro padronizado, composto pelas seguintes etapas:

- **Corte:** As chapas dos respectivos materiais foram cortadas em guilhotina hidráulica conforme dimensões pré-estabelecidas.
- **Dobra:** As peças foram conformadas por dobra em prensa hidráulica, formando duas abas laterais conforme a geometria funcional da peça.
- **Usinagem:** As regiões das abas, onde se localiza o fio funcional da peça, foram usinadas em torno horizontal. Esta etapa garantiu o acabamento e a padronização da superfície crítica que entra em contato com o material vegetal durante a colheita.

A partir da usinagem, cada grupo de amostras seguiu um tipo distinto de tratamento, conforme descrito nas seções a seguir.

3.4.2 Tratamento Térmico: Têmpera e Revenido

As amostras fabricadas com o aço SAE 15B30 foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera e revenido. A têmpera consistiu no aquecimento do material até a temperatura de austenitização, seguida de resfriamento rápido em meio apropriado para a formação da estrutura martensítica. Em sequência, foi realizado o revenido, com controle de tempo e temperatura, visando aliviar as tensões internas geradas no processo anterior e ajustar a dureza final da peça conforme os requisitos do estudo.

Ambos os tratamentos foram realizados por empresa especializada, com controle rigoroso dos parâmetros térmicos e garantia de rastreabilidade do processo.

3.4.3 Tratamento Termoquímico: Carbonitreção

As amostras produzidas com aço AISI A36 foram submetidas ao tratamento termoquímico de carbonitreção, realizado após a usinagem, com o objetivo de endurecer a superfície de um material estrutural de baixo teor de carbono. Esse processo visa aumentar a resistência ao desgaste e à fadiga superficial por meio da difusão de carbono e nitrogênio na camada externa do material.

O processo foi conduzido por empresa especializada, com controle de temperatura, tempo de permanência e composição da atmosfera.

3.4.4 Revestimento Superficial: Carbetto de Tungstênio

As amostras fabricadas em aço SAE 1045 correspondem ao modelo originalmente utilizado na produção. Com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste abrasivo, foi aplicado um revestimento superficial de carbetto de tungstênio por meio do processo de aspersão térmica hipersônica (HVOF – *High Velocity Oxy-Fuel*).

O revestimento foi depositado sobre a superfície funcional oposta à região usinada, respeitando as áreas críticas previamente definidas em projeto. Após a aplicação, as peças passaram por acabamento superficial, com controle da espessura, da aderência e da uniformidade do depósito, assegurando o desempenho da camada protetora durante o funcionamento em campo.

3.5 TESTES DE CAMPO

Com base na estratégia experimental estabelecida, foram conduzidos testes de campo para avaliar o desempenho das cinco condições distintas desenvolvidas. Os testes foram realizados com foco na resistência ao desgaste das aletas submetidas às diferentes rotas de processamento e materiais.

As amostras foram inicialmente instaladas simultaneamente em uma plataforma de colheita de milho com 20 linhas, acoplada a uma colhedora automotriz. A distribuição foi feita de forma que cada tipo de amostra ocupasse quatro linhas da plataforma, garantindo exposição igualitária às condições operacionais.

Durante os testes, foi realizado um acompanhamento periódico com medições dimensionais e inspeções visuais, a fim de monitorar a evolução do desgaste ao longo da operação. Ao atingir a marca de 1.000 hectares colhidos, foi feita uma análise comparativa de desempenho entre os modelos avaliados, com base nos registros de perda dimensional e estabilidade geométrica.

A partir dessa avaliação, foi selecionado o modelo que apresentou melhor comportamento para continuidade dos testes. A plataforma foi então completamente remontada com peças novas desse modelo, permitindo a realização de testes adicionais até o encerramento da safra, totalizando aproximadamente 4.000 hectares sob monitoramento contínuo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve detalhadamente os materiais utilizados na confecção das amostras, os processos de fabricação adotados, os tratamentos térmicos e termoquímicos aplicados e os métodos empregados para caracterização e avaliação do desempenho dos componentes. As informações aqui apresentadas são fundamentais para garantir a rastreabilidade dos procedimentos executados e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste estudo, foram utilizadas amostras confeccionadas em três tipos distintos de aços: SAE 15B30, AISI A36 e SAE 1045. A escolha desses materiais foi fundamentada em critérios como resistência ao desgaste, compatibilidade com os processos de fabricação, como conformabilidade e boa usinabilidade além de boa resposta a tratamentos térmicos e termoquímicos, assim como a disponibilidade no mercado nacional.

As amostras em SAE 15B30 e AISI A36 foram submetidas a diferentes rotas de tratamento térmico e superficial com o objetivo de avaliar seus desempenhos comparativos frente ao desgaste. Já o aço SAE 1045, com revestimento de carbeto de tungstênio, representou o modelo originalmente utilizado na produção em série do componente agrícola analisado, sendo considerado como referência técnica nos testes de campo.

A seguir, apresenta-se uma visão geral das propriedades dos aços selecionados, bem como suas características metalúrgicas e o comportamento esperado frente aos tratamentos empregados.

4.1.1 Propriedades gerais dos aços selecionados

A seleção dos materiais deve considerar o ambiente operacional a que o componente será submetido. Em aplicações agrícolas, fatores como abrasão por partículas minerais, impacto intermitente e variações térmicas intensificam o desgaste dos elementos mecânicos. Para essas condições, os aços se destacam por sua versatilidade e possibilidade de modificação microestrutural (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Segundo Costa e Silva e Mei (2008), os aços carbono e ligados são amplamente utilizados em componentes de desgaste, sendo a classificação mais comum baseada no teor de carbono:

- **Aço AISI A36:** aço de baixo carbono (até 0,25%), com excelente soldabilidade e conformabilidade. Possui resistência ao desgaste limitada em sua forma original, mas pode ser beneficiado por tratamentos superficiais como a carbonitretação.
- **Aço SAE 1045:** aço médio carbono (~0,45%), com boa resposta à têmpera e revenido, apresentando maior dureza e resistência mecânica em comparação ao A36. É amplamente utilizado em eixos, engrenagens e peças submetidas a esforços moderados.
- **Aço SAE 15B30:** aço de baixo carbono (~0,30%) micro ligado com adição de boro. Esse elemento de liga confere alta temperabilidade ao material, permitindo endurecimento efetivo em toda a seção transversal após a têmpera. É indicado para aplicações que exigem elevada dureza superficial e boa resistência ao desgaste.

A escolha correta entre esses materiais depende de fatores como viabilidade econômica, complexidade da geometria da peça a ser produzida, disponibilidade comercial e compatibilidade com os processos industriais existentes.

4.1.2 Aços para tratamentos térmicos e termoquímicos

A modificação das propriedades mecânicas dos aços por meio de tratamentos térmicos ou termoquímicos é amplamente empregada na indústria, sobretudo quando se deseja melhorar dureza, resistência ao desgaste e à fadiga. Conforme Callister e Rethwisch (2012), a composição química do aço define sua capacidade de resposta a esses tratamentos, sendo a temperabilidade uma propriedade fundamental a ser considerada.

Segundo Costa e Silva e Mei (2008), a temperabilidade representa a capacidade de um aço endurecer até uma determinada profundidade após a têmpera. Ela é influenciada principalmente pelo teor de carbono e pela presença de elementos de liga como manganês, cromo, molibdênio e boro. Este último, mesmo em baixas concentrações (< 0,01%), exerce efeito significativo, aumentando a profundidade da zona martensítica, como ocorre no aço SAE 15B30.

- O AISI A36, por ser um aço de baixo carbono, possui temperabilidade muito limitada e não é indicado para têmpera convencional. No entanto, pode ser tratado por carbonitreção, processo termoquímico que enriquece a superfície com carbono e nitrogênio, formando uma camada endurecida com núcleo dúctil (NUNES; KREISCHER, 2013).
- O SAE 1045 apresenta temperabilidade intermediária, permitindo tratamentos como têmpera e revenido para aumentar a resistência à abrasão, com controle adequado da distorção.
- O SAE 15B30, por sua composição balanceada e presença de boro, é altamente eficiente na formação de martensita profunda e homogênea, mesmo em seções espessas, sendo ideal para componentes que operam sob desgaste severo.

A correta seleção do aço e do tratamento térmico ou termoquímico aplicado é fundamental para garantir que o componente atenda às exigências de desempenho em campo, com vida útil prolongada e resistência compatível com o esforço solicitado.

4.1.3 Descrição dos materiais ensaiados

Nesta etapa do estudo, cada material foi caracterizado individualmente, com base em sua composição química, propriedades mecânicas e comportamento frente aos processos aplicados. A Tabela 2 apresenta a composição química típica dos aços analisados, enquanto a Tabela 3 resume suas principais propriedades mecânicas.

Tabela 2 - Composição química dos aços selecionados.

Elemento	SAE 1045 (SAE J403)	SAE 15B30 (SAE J404)	AISI A36 (ASTM A36/A36M)
Carbono (C)	0,43 – 0,50	0,27 – 0,33	≤ 0,26
Manganês (Mn)	0,60 – 0,90	0,40 – 0,70	0,60 – 0,90
Silício (Si)	0,15 – 0,35	0,15 – 0,35	≤ 0,40
Fósforo (P)	máx. 0,040	máx. 0,035	máx. 0,040
Enxofre (S)	máx. 0,050	máx. 0,040	máx. 0,050
Boro (B)	—	0,0005 – 0,003	—

Fonte: Adaptado normas SAE J403 – J404 e ASTM A36.

A tabela acima, apresentam-se as especificações técnicas de cada aço utilizado nas amostras.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos aços selecionados.

Propriedade	SAE 1045 (SAE J403)	SAE 15B30 (SAE J404)	AISI A36 (ASTM A36/A36M)
Limite de resistência à tração (MPa) – Sem tratamento	570 – 620	600 – 700	400 – 480
Limite de resistência à tração (MPa) – Com tratamento	650 – 700	750 – 950	480 – 550
Limite de escoamento (MPa) – Sem tratamento	410 – 450	450 – 550	≥ 250
Limite de escoamento (MPa) – Com tratamento	500 – 560	600 – 700	280 – 350
Alongamento (%) – Sem tratamento	16 – 18	16 – 18	≥ 20
Alongamento (%) – Com tratamento	12 – 14	12 – 14	16 – 18
Dureza Brinell (HB)	170 – 210	200 – 280	120 – 180
Dureza Rockwell (HRC) – Sem tratamento	até 22	20 – 25	≤ 20
Dureza Rockwell (HRC) – Com tratamento	35 – 45	40 – 52	até 45

Fonte: Adaptado normas SAE J403 – J404 e ASTM A36.

4.1.3.1 Aço AISI A36

O aço AISI A36 é um aço de baixo carbono, amplamente utilizado em aplicações estruturais devido ao seu baixo custo, facilidade de soldagem e conformação. No entanto, sua resistência ao desgaste em estado bruto é limitada. Para torná-lo viável neste estudo, foi aplicada a carbonitretação, tratamento termoquímico que promove o endurecimento superficial.

4.1.3.1.1 Características principais:

- **Baixo teor de carbono:** Garante boa soldabilidade, boa usinabilidade e boa conformabilidade, mas requer tratamento para obter dureza superficial.
- **Manganês (Mn):** Melhora a resistência à tração e ao desgaste.
- **Silício (Si):** Contribui para resistência à oxidação.

4.1.3.1.2 Justificativa para a escolha:

A adoção do AISI A36 foi baseada em sua viabilidade econômica e versatilidade de processamento, permitindo a aplicação de camadas endurecidas por carbonitretação que elevam sua resistência ao desgaste superficial, sem comprometer a tenacidade do núcleo.

4.1.3.2 Aço SAE 1045

O aço SAE 1045 é um aço médio carbono, com ampla aplicação em peças mecânicas que exigem resistência moderada, boa usinabilidade e capacidade de receber tratamentos térmicos. Neste estudo, ele foi utilizado como material base das peças originalmente produzidas, recebendo um revestimento superficial de carbeto de tungstênio, com o objetivo de aumentar sua resistência ao desgaste.

4.1.3.2.1 Características principais:

- **Carbono (C):** Eleva a dureza e a resistência mecânica.
- **Manganês (Mn):** Aumenta a resistência à tração e à dureza, contribuindo também para a tenacidade.
- **Fósforo (P) e Enxofre (S):** Presentes em baixos teores, garantem usinabilidade sem comprometer resistência.

4.1.3.2.2 Justificativa para a escolha:

O SAE 1045 foi utilizado como referência técnica, pois representa o material já aplicado na produção da peça estudada. Apesar de não apresentar alta resistência ao desgaste em sua forma original, o revestimento por carbeto de tungstênio aumentou sua durabilidade, tornando-se um parâmetro de comparação para os novos materiais testados.

4.1.3.3 Aço SAE 15B30

O aço SAE 15B30 é classificado como um aço de baixo carbono, micro ligado com adição de boro, o que confere excelente temperabilidade. O boro atua aumentando significativamente a profundidade de endurecimento durante a têmpera, tornando o material adequado para componentes sujeitos a desgaste abrasivo intenso. Além disso, esse aço possui boa resistência à fadiga e capacidade de formar microestrutura martensítica após tratamento térmico.

4.1.3.3.1 Características principais:

- **Boro (B):** Promove aumento da profundidade de endurecimento durante a têmpera.
- **Manganês (Mn):** Contribui para a resistência à tração e à fadiga, auxiliando na formação de martensita.
- **Cromo (Cr):** Eleva a resistência ao desgaste e à corrosão.

4.1.3.3.2 Justificativa para a escolha:

A seleção do SAE 15B30 foi fundamentada em sua combinação de resistência mecânica e resposta à têmpera, permitindo dureza superficial elevada com núcleo tenaz. Essas características são estratégicas para componentes agrícolas sujeitos a esforços repetitivos e abrasão constante.

4.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação das amostras envolveu uma série de etapas bem definidas, desde o corte das chapas de aço até a usinagem final das peças, visando garantir que as amostras representassem com precisão as condições reais de operação e apresentassem as propriedades desejadas para os testes de campo. Cada uma das etapas foi projetada para assegurar o controle dimensional e geométrico adequado, além de garantir a padronização necessária para as comparações entre os diferentes tratamentos.

4.2.1 Corte das chapas

O processo de corte das peças foi realizado utilizando uma guilhotina hidráulica da marca Durmazlar modelo SB 3013 NT, uma escolha estratégica para o projeto devido à sua capacidade de gerar uma peça bruta com sobre metal, o que se mostrou essencial para garantir as dimensões finais das peças após a usinagem. Embora a guilhotina, comparada a outros métodos de corte como os processos térmicos (corte a laser ou plasma), apresente uma precisão inferior, sua vantagem reside na criação do sobre metal, que proporciona maior flexibilidade no ajuste das dimensões finais. A escolha desse equipamento foi uma decisão prática, levando em consideração o custo e a necessidade de uma solução viável para o processo produtivo, principalmente devido ao sobre metal presente nas peças cortadas.

O sobre metal gerado na peça bruta varia entre 1,8 mm em uma das abas e 3,8 mm na outra. Esse sobre metal serve como margem para a usinagem subsequente, que visa eliminar as variações geradas pelo processo de corte e garantir as dimensões finais com precisão. A tolerância de corte da guilhotina utilizada é de $\pm 0,8$ mm, o que é suficiente para proporcionar uma base inicial, mas não garante precisão suficiente para as dimensões finais sem a utilização do sobre metal. Esse recurso é essencial para compensar as pequenas variações que ocorrem devido à precisão limitada da guilhotina.

Além disso, o processo de dobra subsequente às operações de corte gera uma variação geométrica de até $\pm 1^\circ$ no ângulo das peças. Esta distorção ocorre durante a deformação do material, sendo que o sobre metal foi especificado de forma a compensar essa variação de ângulo e garantir que, ao final, as peças possuam a geometria desejada, atendendo aos requisitos de usinagem e montagem.

Para garantir a rastreabilidade e a qualidade do processo, a guilhotina foi ajustada para operar dentro dos parâmetros definidos, e as peças cortadas passaram por inspeção dimensional para verificar se estavam de acordo com as especificações de sobre metal. Além disso, amostras foram selecionadas aleatoriamente para medições e verificação das tolerâncias de corte. A Figura 18 mostra a guilhotina utilizada no processo de corte.

Figura 18 - Guilhotina Hidráulica Durmazlar, modelo SB 3013 NT.



Fonte: O autor (2025).

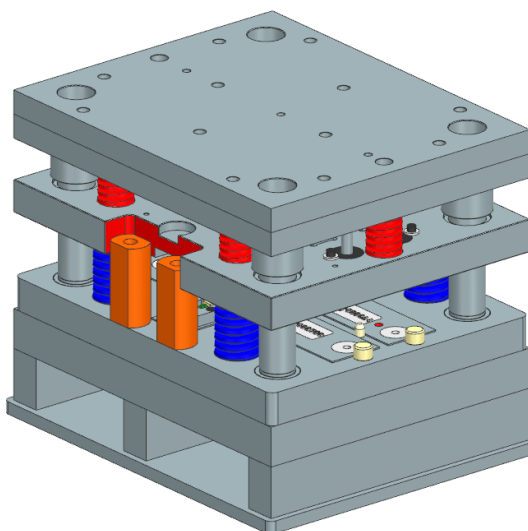
4.2.1.1 Os parâmetros de corte são:

- Dimensões da peça cortada: 465 mm x 71 mm;
- Espessura da chapa: 4,75 mm;
- Força de corte necessária para efetuar o corte: 300 Toneladas;
- Tolerância de corte: $\pm 0,8$ mm;
- Tempo de processo: 40 segundos por peça.

4.2.2 Conformação das peças

Após o corte das peças com sobre metal, conforme descrito anteriormente, foi realizado o processo de conformação em duas etapas distintas, utilizando ferramentas específicas para cada operação. A primeira etapa consistiu na furação e marcação da peça, utilizando uma ferramenta específica para este processo (Figura 19), sendo este processo realizado em uma prensa hidráulica da marca Menegotto, modelo tipo H monobloco, com capacidade de 450 toneladas (Figura 20). Nesta operação, foram executadas simultaneamente a perfuração dos furos de fixação e a gravação do código da peça, do código do lote e da logomarca da empresa diretamente na superfície da chapa. Essa marcação é fundamental para garantir a rastreabilidade do componente ao longo do processo produtivo, no pós-venda e no monitoramento de desempenho em campo.

Figura 19 - Ferramenta de estampo.



Fonte: O autor (2025).

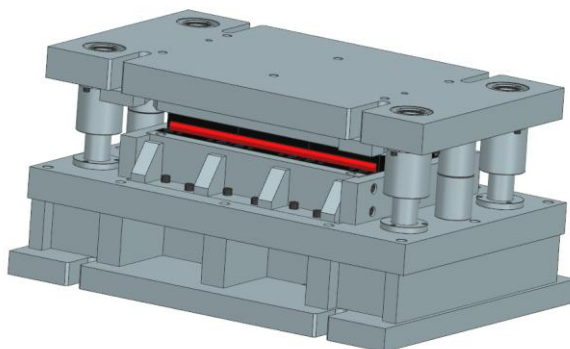
Figura 20 - Prensa Hidráulica Menegotto, modelo tipo H, 450 T.



Fonte: Menegotto.

Concluída a primeira etapa, as peças foram direcionadas para a segunda ferramenta (Figura 21), também montada no mesmo modelo de prensa hidráulica, destinada à realização da dobra das abas. Essa operação conferiu à peça a sua geometria final característica, conforme especificações de projeto. O resultado da conformação, com a peça já dobrada, pode ser observado na Figura 22.

Figura 21 - ferramenta de dobra.



Fonte: O autor (2025).

Figura 22 - Peça conformada.



Fonte: O autor (2025).

O processo de dobra apresenta uma variação angular de até $\pm 1^\circ$, como mencionado anteriormente, que é posteriormente compensada na usinagem graças à presença de sobre metal nas extremidades. A separação das etapas de furação/estampagem e dobra em ferramentas específicas possibilita maior controle dimensional e qualidade geométrica nas peças produzidas.

4.2.2.1 Os parâmetros de conformação são:

- Dimensão das abas dobradas: 23 mm cada uma;
- Ângulo de dobra: 81° cada uma;
- Tolerância de ângulo em cada dobra: $\pm 1^\circ$;
- Tolerância dimensional nas abas dobradas: $\pm 0,2$ mm;
- Força necessária para efetuar a conformação das amostras de aço SAE 15B30 e AISI A36: 270 Toneladas;
- Força necessária para efetuar a conformação das amostras de aço SAE 1045: 340 Toneladas;
- Tempo de processo de estampagem: 10 segundos cada peça;
- Tempo de processo de dobra: 10 segundos cada peça.

4.2.3 Usinagem das peças

Após o processo de conformação por dobra, as peças foram encaminhadas para a etapa de usinagem, realizada em um centro de usinagem horizontal de alta produtividade da marca Okuma, modelo MB-5000HII (Figura 23). Esta operação teve como principal objetivo a confecção do fio usinado nas extremidades das abas, região crítica da peça, sujeita a desgaste severo durante o trabalho em campo.

Figura 23 - Centro de Usinagem Horizontal marca Okuma, modelo MB-5000HII.



Fonte: O autor (2025).

As peças foram fixadas em um dispositivo específico, desenvolvido para acomodar quatro unidades simultaneamente durante a usinagem (Figura 24). Essa fixação estável e padronizada foi fundamental para garantir repetibilidade e precisão no processo.

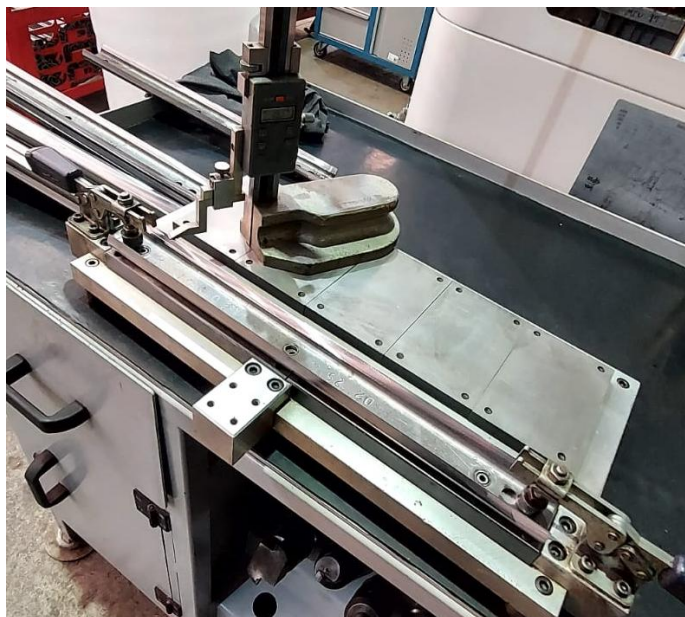
Figura 24 - Dispositivo de usinagem.



Fonte: O autor (2025).

A usinagem foi realizada com cabeçote de fresamento, e os parâmetros utilizados são detalhados no subtítulo a seguir. Após a usinagem, foi realizado um controle de qualidade com inspeções periódicas a cada 20 peças, a fim de assegurar o atendimento às tolerâncias dimensionais e padronização das superfícies usinadas (Figura 25), esta inspeção foi realizada com um traçador de altura da marca Mitutoyo modelo Absolute com resolução de 0,01mm. A usinagem da lâmina é uma etapa crítica para o funcionamento do conjunto, influenciando diretamente no desempenho e na durabilidade das peças em operação.

Figura 25 - Inspeção de usinagem.



Fonte: O autor (2025).

4.2.3.1 Parâmetros de usinagem

- Dispositivo de fixação: Capacidade para 4 peças simultâneas;
- Ferramenta de corte: Cabeçote de fresamento com inserto intercambiável;
- Velocidade de rotação: 2100 rpm;
- Avanço da ferramenta: 3100 mm/min;
- Tempo total do ciclo: 3 minutos e 35 segundos;
- Tempo médio por peça: aproximadamente 54 segundos;
- Frequência de inspeção dimensional: a cada 20 peças.

4.2.4 Tratamentos térmicos

Com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste e adequar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, as amostras fabricadas neste estudo foram submetidas a diferentes processos de tratamento térmico e termoquímico. Esses tratamentos foram aplicados de acordo com o tipo de material e a função da peça em campo, buscando atender às especificações de dureza, tenacidade e durabilidade necessárias para o bom desempenho durante os testes de colheita.

Os tratamentos foram realizados em ambiente industrial por uma empresa especializada do setor: a Grefortec Fornos Industriais e Tratamento Térmico Ltda, localizada em São Leopoldo/RS. A empresa é reconhecida pela qualidade e rastreabilidade dos seus processos, contando com equipamentos modernos e equipe técnica qualificada (GREFORTEC,2025).

Os tratamentos aplicados foram divididos em dois grupos principais: o processo de têmpera e revenido, voltado para as amostras produzidas em aço SAE 15B30, e o processo termoquímico de Carbonitretação, aplicado às amostras fabricadas com aço AISI A36. Ambos os processos visam aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste abrasivo, porém atuam de formas distintas quanto à profundidade de endurecimento e à estrutura metalúrgica obtida.

As descrições detalhadas de cada tipo de tratamento estão apresentadas nos subtópicos a seguir.

4.2.4.1 Têmpera e revenido

O tratamento térmico de têmpera e revenido foi aplicado às amostras fabricadas com aço SAE 15B30, com o objetivo principal de elevar a dureza e a resistência ao desgaste abrasivo por meio da transformação microestrutural do material. Este aço, por conter boro em sua composição, apresenta excelente temperabilidade, sendo particularmente adequado para esse tipo de processo.

A têmpera foi realizada em forno com atmosfera controlada, garantindo uniformidade térmica e minimização de oxidações superficiais. Inicialmente, as peças passaram por um pré-aquecimento a 450 °C, seguido de um aquecimento gradual até a temperatura de austenitização de 880 °C, na qual permaneceram por um tempo de encharcamento de 2 horas. Esse tempo foi necessário para assegurar a completa transformação da estrutura para austenita e homogeneidade térmica ao longo de toda a seção da peça.

Após a austenitização, as peças foram resfriadas em óleo, sob condições controladas de temperatura e viscosidade, promovendo uma transformação estrutural para martensita refinada, resultando em elevadas durezas. Após o resfriamento, os componentes foram limpos e submetidos à inspeção visual e ao controle de dureza.

A etapa final do processo consistiu no revenido, realizado em forno com controle preciso de temperatura, variando entre 300 °C e 400 °C, conforme a dureza desejada para

cada condição experimental. O revenido teve como finalidade a redução das tensões internas geradas durante a têmpera e o ajuste da dureza final.

4.2.4.2 *Tratamento termoquímico (Carbonitreção)*

As amostras fabricadas em aço AISI A36, por se tratar de um material estrutural com baixo teor de carbono e baixa temperabilidade, foram submetidas a um tratamento termoquímico de Carbonitreção. O objetivo foi modificar as propriedades superficiais do material, promovendo um aumento significativo da dureza na camada externa sem comprometer a tenacidade e a ductilidade do núcleo.

O processo foi conduzido, em ambiente controlado, utilizando fornos projetados especificamente para tratamentos termoquímicos. A carbonitreção consiste na difusão simultânea de carbono e nitrogênio para o interior da superfície da peça, realizada em temperaturas próximas de 850 °C, sob atmosfera rica em gases carburantes e nitrogenantes.

Durante o tratamento, as amostras foram mantidas na temperatura de trabalho por tempos distintos, conforme a profundidade de camada desejada. Para a obtenção de uma camada superficial de aproximadamente 0,5 mm e dureza de 55 a 60 HRC, o tempo de tratamento foi de cerca de 3 horas. Já para a obtenção de uma camada com 1,0 mm de profundidade e dureza de 60 a 65 HRC, o tempo de permanência no forno foi de aproximadamente 6 horas. Em ambos os casos, o resfriamento posterior foi feito de forma controlada, permitindo a formação de uma camada rica em carbonetos e martensita.

4.2.5 **Aplicação de carbeto de Tungstênio**

As amostras fabricadas em aço SAE 1045 foram submetidas a um processo de aplicação de revestimento superficial com carbeto de tungstênio, com o objetivo de aumentar significativamente a resistência ao desgaste nas regiões funcionais da peça. Esse procedimento foi adotado como estratégia para compensar as limitações do material base em ambientes com alta exigência mecânica, mantendo a tenacidade do núcleo.

O processo foi realizado por uma empresa terceirizada especializada: a Rijeza Revestimentos Especiais Ltda, sediada no município de Sapucaia do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. A Rijeza é reconhecida no setor metalúrgico pela sua atuação em serviços de proteção e recuperação de superfícies metálicas, com foco na aplicação de

revestimentos técnicos como carbetos, óxidos cerâmicos e ligas metálicas (RIJEZA,2025).

A técnica empregada para a aplicação do revestimento consistiu na deposição por aspensão térmica hipersônica de partículas de carbetos de tungstênio sobre a superfície metálica da peça, especificamente na região funcional oposta à superfície usinada. Essa área foi previamente definida no projeto como crítica, por sofrer desgaste contínuo durante a operação de colheita, em função do atrito com os caules e partes da planta de milho.

Durante a aplicação, foram controlados parâmetros como temperatura, velocidade de avanço e alimentação de material, garantindo boa aderência da camada, uniformidade e ausência de defeitos superficiais. Em seguida, foi realizado o acabamento mecânico da superfície revestida, de modo a manter o perfil geométrico compatível com as exigências de encaixe e desempenho da peça.

As peças revestidas foram inspecionadas e, após aprovadas, seguiram para as etapas de pintura e montagem. Essa configuração, originalmente utilizada na linha de produção, serviu como condição de referência nos testes de campo, permitindo comparações com as demais soluções desenvolvidas neste estudo.

4.2.6 Pintura e acabamento superficial

Após a realização dos processos de tratamentos térmicos e termoquímicos, além do processo de aplicação de carbetos de tungstênio, as peças passaram por um processo de acabamento superficial com o objetivo de garantir proteção contra corrosão, padronização visual e durabilidade em campo. Este processo foi realizado em uma linha de pintura automática, onde as peças foram fixadas em suportes específicos que estão presos a uma esteira que as movimenta por todas as etapas do processo, a Figura 26 apresenta a linha de pintura automática.

Figura 26 - Linha de pintura.



Fonte: O autor (2025).

Inicialmente, as peças foram submetidas a uma etapa de jateamento abrasivo com granalha metálica, com exceção das amostras fabricadas em aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio. Este procedimento teve como objetivo preparar a superfície metálica, removendo oxidação e impurezas, além de promover uma rugosidade controlada que favorece a aderência da tinta. No entanto, as amostras com revestimento duro foram excluídas desta etapa, uma vez que o impacto da granalha poderia danificar a camada de carbeto de tungstênio. Por esse motivo, essas amostras seguiram diretamente para a etapa de limpeza.

Após o jateamento, as peças seguiram para um banho de desengraxe, com a finalidade de remover resíduos de óleo, fuligem e outras impurezas. Em seguida, foi realizada a fosfatização, processo que forma uma camada protetiva sobre o metal, aumentando a resistência à corrosão e promovendo melhor aderência da tinta.

Posteriormente, foi feito um enxágue para eliminar resíduos da fosfatização, e as peças foram levadas a uma estufa de secagem, garantindo a completa remoção da umidade antes da pintura. O revestimento final foi aplicado por meio de pintura eletrostática a pó, utilizando pistolas eletrostáticas que conferem à tinta cargas elétricas, fazendo-a aderir uniformemente à superfície. Por fim, as peças passaram por cura térmica em estufa, onde a tinta foi polimerizada, formando uma película protetiva resistente. O aspecto final das peças pintadas é ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Peça pintada.



Fonte: O autor (2025).

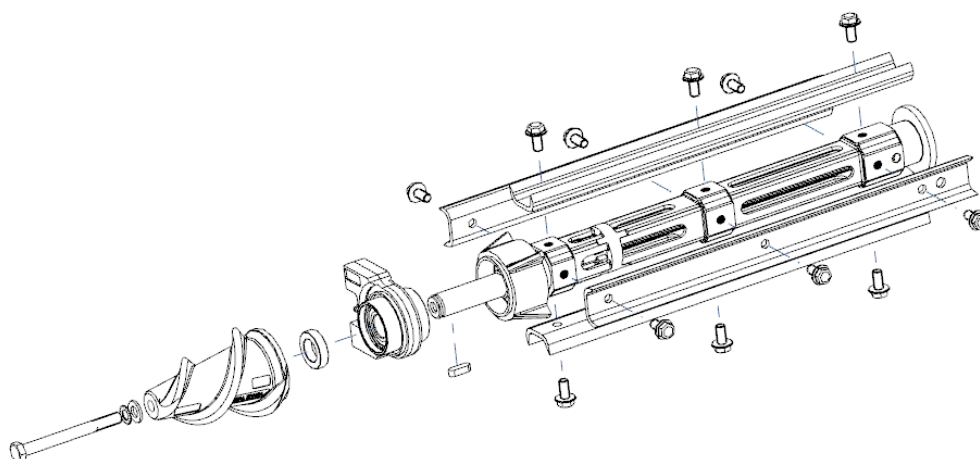
4.2.6.1 *Os parâmetros no processo de pintura são:*

- Tipo da tinta: Politheama 46 WF R LI vermelho BR;
- Temperatura de desengraxe e fosfatização: 60°C;
- Temperatura de secagem: 120°C;
- Temperatura de cura: 240°C;
- Tempo de cura: 1 hora;
- Espessura da camada: 90 a 150 μm

4.2.7 **Montagem das peças**

Após o término dos processos de fabricação e acabamento, as aletas foram montadas nos rolos recolhedores direito e esquerdo, componentes fundamentais da unidade recolhedora da linha de colheita. Antes da instalação final dos rolos na unidade, são também montados os demais elementos que compõem o conjunto funcional dos rolos, assegurando o correto desempenho mecânico e a integridade estrutural do sistema durante a operação, a Figura 28 apresenta uma vista explodida com os componentes do conjunto de montagem.

Figura 28 - Conjunto montado rolo recolhedor.



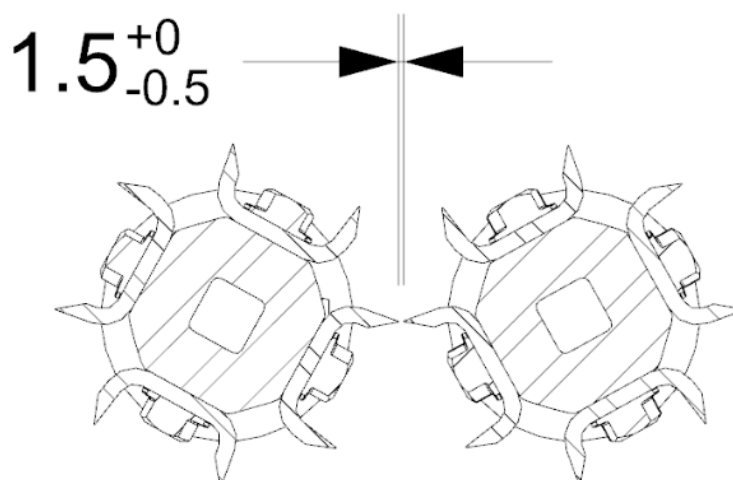
Fonte: O autor (2025).

A fixação das aletas nos rolos é realizada por meio de parafusos métricos M10x1,5x20, de classe de resistência 12.9, em eixos de apoio fundidos e usinados. A aplicação do torque de fixação é feita com controle, utilizando um valor de 80 Nm, assegurando firmeza na montagem e estabilidade dimensional durante o funcionamento em campo.

Após a fixação das aletas e a conclusão da montagem dos rolos, estes são instalados na unidade recolhedora, sendo posicionados de forma sincronizada. A Figura 14 mostra os rolos já montados no interior da unidade. O alinhamento correto das aletas é essencial para o funcionamento adequado do sistema, pois, durante o movimento rotacional, as extremidades usinadas (ou “lâminas”) das aletas de um rolo devem permanecer alinhadas com as do rolo oposto, mantendo uma distância controlada de 1,5 mm entre as pontas.

A Figura 29 apresenta uma vista ilustrando o posicionamento e o alinhamento entre as aletas opostas. Essa distância entre as lâminas é crítica para o desempenho do sistema, devendo respeitar a tolerância estabelecida de $-0,5 \text{ mm} +0 \text{ mm}$, o que garante que as aletas operem próximas, mas sem contato direto, prevenindo interferências mecânicas e reduzindo o risco de desgaste prematuro por atrito.

Figura 29 - Distância entre "fios".



Fonte: O autor (2025).

Com a unidade recolhadora devidamente montada e ajustada, ela é então integrada à plataforma para colheita de milho, completando a montagem final do sistema.

4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A caracterização de materiais é fundamental para avaliar propriedades mecânicas, químicas e estruturais que influenciam diretamente no desempenho de componentes submetidos a condições severas de trabalho. Em estudos comparativos, como o realizado neste trabalho, a aplicação de diferentes técnicas permite entender os efeitos de tratamentos térmicos e superficiais nos diversos materiais utilizados.

Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), a escolha correta dos ensaios depende do tipo de solicitação ao qual a peça será submetida e da natureza das modificações esperadas após os processos de fabricação ou tratamento.

Os ensaios de micro dureza, metalografia e flexão foram realizados nas dependências do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá, enquanto os ensaios de dureza Rockwell C (HRC) e de composição química foram conduzidos nas instalações da empresa Vence Tudo Importação e Exportação LTDA, também localizada no município de Ibirubá – RS.

4.3.1 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza consiste na determinação da resistência de um material à penetração de um penetrador padronizado, sob carga controlada. Para peças tratadas termicamente, esse ensaio permite verificar se os níveis de dureza obtidos estão compatíveis com os valores esperados. Conforme Callister (2002), os métodos mais utilizados são os ensaios Rockwell, Brinell e Vickers.

- **Rockwell:** Utiliza diferentes escalas (A, B, C etc.) dependendo do material e da aplicação. A norma que rege este ensaio é a ASTM E18 (ASTM, 2020).
- **Brinell:** Emprega uma esfera de aço ou carbeto de tungstênio como penetrador, sendo regido pela norma ASTM E10 (ASTM, 2022).
- **Vickers:** Utiliza um penetrador em forma de pirâmide de base quadrada, conforme especificado na norma ASTM E92 (ASTM, 2022).

No presente trabalho, o ensaio de dureza foi realizado pelo método Rockwell C (HRC), utilizando o equipamento Mitutoyo HR-100 (Figura 30), com aplicação de carga de 150 kgf, conforme os parâmetros estabelecidos na norma ASTM E18 (ASTM, 2020). O procedimento foi conduzido com inspeção em 100% das peças produzidas, assegurando o controle de qualidade de cada uma das amostras testadas.

Figura 30 -Durômetro Mitutoyo, modelo HR-100.



Fonte: O autor (2025).

4.3.2 Micro dureza Vickers

Para a avaliação do perfil de endurecimento superficial, especialmente em componentes submetidos a tratamentos termoquímicos como a carbonitreção, emprega-se o ensaio de micro dureza Vickers. Utilizando cargas reduzidas, geralmente entre 10 gf e 1000 gf, essa técnica permite medir a variação de dureza em diferentes profundidades, desde a superfície até o núcleo do material. Essa metodologia é essencial para determinar a espessura efetiva da camada endurecida e avaliar a eficácia do tratamento aplicado. De acordo com Garcia, Spim e Santos (2012), o ensaio de micro dureza é amplamente utilizado para caracterizar zonas tratadas superficialmente, fornecendo dados importantes para a validação de processos termoquímicos. Os procedimentos para a realização desse ensaio estão descritos na norma ASTM E384 (ASTM, 2023).

Para a obtenção do perfil de dureza nas amostras, foi utilizado um microdurômetro Vickers da marca Digimes, modelo 400.310 (Figura 31).

Figura 31 - Microdurômetro Vickers Digimess, modelo 400.310.



Fonte: O autor (2025).

O equipamento opera com sistema de aplicação de carga por massas calibradas e possui objetiva de aumento 40x, além de ocular com micrômetro de leitura analógica, permitindo a medição precisa das diagonais das impressões geradas pelo penetrador piramidal.

Para este trabalho, foi aplicado a carga de 1 kgf com tempo de aplicação de 10 segundos, conforme recomendado pela norma ASTM E384 (ASTM, 2023), visando a análise do gradiente de dureza entre a superfície tratada e a região do núcleo das amostras.

Como pode-se ver na Figura 32, os ensaios foram realizados com a primeira medição posicionada a 0,05 mm da superfície. A cada etapa, a próxima medida era deslocada 1,0 mm lateralmente e 0,05 mm em profundidade, repetindo-se esse procedimento até que a dureza registrada estivesse dentro de uma faixa de até 15% acima da dureza do núcleo da mesma peça, valor previamente determinado antes do início das medições na camada superficial. A profundidade correspondente à última medição fora desse limite foi considerada como a espessura efetiva da camada endurecida resultante do tratamento térmico ou termoquímico.

Figura 32 - Perfil de dureza.



Fonte: O autor (2025).

4.3.3 Análise de composição química

A análise química tem como finalidade verificar se o material empregado está em conformidade com as especificações das normas técnicas correspondentes, como as normas AISI ou SAE. Para essa verificação, utilizam-se amplamente técnicas como a espectrometria de emissão óptica (OES) e a espectrometria por fluorescência de raios X (XRF), as quais possibilitam a identificação e quantificação precisa dos elementos químicos presentes na liga. Neste trabalho, foi utilizado o equipamento SPECTROMAXx (Figura 33), que opera por espectrometria de emissão óptica (OES) com excitação por arco/faísca, sendo amplamente empregado para análise de metais ferrosos e não ferrosos em controle de qualidade industrial. Esses métodos garantem a rastreabilidade da matéria-prima e a conformidade com os requisitos químicos estabelecidos em normas como a ASTM E415 e a ASTM E1086 (ASTM, 2022).

Figura 33 – Espectrômetro SPECTROMAXx.



Fonte: O autor (2025).

4.3.4 Metalografia

A preparação metalográfica foi realizada seguindo os princípios gerais da norma ASTM E3 (ASTM, 2017), com algumas adaptações adotadas em função da experiência prática para melhor qualidade da superfície revelada.

O corte das amostras foi realizado na cortadora metalográfica CM 40 da Teclago (Figura 34), um equipamento de bancada dotado de disco abrasivo refrigerado por sistema de recirculação de fluido, ideal para seccionamento preciso de metais sem causar alterações térmicas significativas na microestrutura.

Figura 34 - Cortadora metalográfica Teclago, modelo CM 40.



Fonte: O autor (2025).

As amostras foram embutidas em baquelite preta usando a embutidora EM30D da Teclago (Figura 35), por meio de embutimento termo pressurizado, assegurando a uniformidade e preservação das bordas para a preparação superficial.

Figura 35 - Embutidora metalográfica Teclago, modelo EM30D.



Fonte: O autor (2025).

O lixamento plano foi realizado com lixas de carbeto de silício nas granulações 120, 320, 400, 600 e 1200. Apesar da recomendação da norma ASTM E3 quanto à mudança de direção e uso de água, optou-se por manter o sentido e realizar o processo a seco, o que apresentou melhores resultados para os materiais analisados (Figura 36).

Figura 36 - Suporte para lixamento.



Fonte: O autor (2025).

O polimento foi realizado na lixadeira e politriz modelo PLF da Fortel (Figura 37), com platô de feltro e uso de pasta de diamante, visando eliminar totalmente os riscos do lixamento e expor com clareza os contornos microestruturais.

Figura 37 - Lixadeira e politriz Fortel, modelo PLF.



Fonte: O autor (2025).

Após o polimento, foi realizado o ataque químico com solução de Nital 3% (mistura de ácido nítrico em álcool etílico), seguido de lavagem em água corrente e secagem rápida com soprador térmico, para evitar oxidação superficial, a Figura 38 apresenta as amostras prontas para a análise metalográfica.

Figura 38 - Amostras prontas.



Fonte: O autor (2025).

As amostras preparadas foram analisadas por meio do microscópio óptico Olympus BX51 (Figura 39), um equipamento de alta resolução, com objetivas plana cromáticas, sistema de iluminação por luz refletida e transmissão, além de câmera digital acoplada para captura de imagens. Esse microscópio é adequado para análises metalográficas de microestruturas em diferentes materiais e tratamentos.

Figura 39 – Microscópio Olympus, modelo BX51.



Fonte: O autor (2025).

4.3.5 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é empregado para avaliar o comportamento mecânico dos materiais quando submetidos simultaneamente a tensões de tração e compressão. Esse tipo de ensaio é amplamente utilizado para caracterizar propriedades como resistência à flexão, ductilidade e integridade estrutural superficial, sendo eficaz na detecção de trincas, descontinuidades internas e fragilidades decorrentes de tratamentos térmicos ou processos de conformação mecânica.

Os testes foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 10000, com capacidade máxima de 10000 kgf (100 kN). O equipamento, representado na Figura 40, está equipado com sensor óptico de deslocamento com resolução de 0,01

mm e sistema de medição de força por célula de carga. A faixa de velocidade de aplicação da carga varia entre 0,01 e 500 mm/min, permitindo a execução de ensaios com elevada precisão e controle dos parâmetros de deformação. A aquisição dos dados foi realizada por meio de *software* dedicado, garantindo rastreabilidade e confiabilidade durante todas as etapas do procedimento.

Figura 40 - Equipamento de ensaios mecânicos.

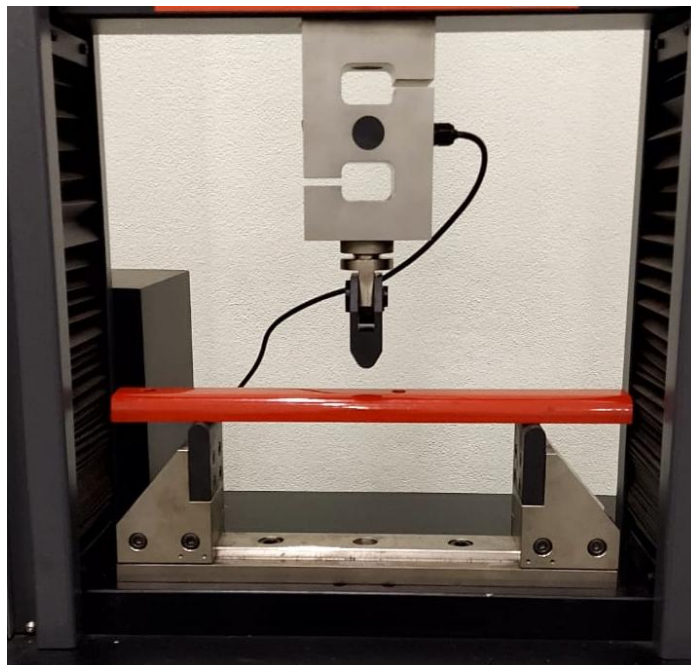


Fonte: O autor (2025).

O ensaio foi conduzido conforme o método de flexão em três pontos, no qual a amostra é apoiada em dois suportes e submetida à aplicação de uma carga concentrada em seu centro até a ocorrência de deformação plástica ou ruptura, com velocidade de 5 mm/min. A configuração adotada para o ensaio está ilustrada na Figura 41. As condições de teste, como geometria da amostra, velocidade de carregamento e critérios de falha,

foram estabelecidas com base nas recomendações das normas técnicas ASTM E855 e NBR 6671 (ASTM,2021; ABNT, 1994).

Figura 41 - Flexão em três pontos.



Fonte: O autor (2025).

Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), o ensaio de flexão é amplamente aplicado na análise de metais e ligas metálicas, permitindo avaliar a influência de tratamentos térmicos e deformações anteriores sobre o comportamento estrutural dos materiais.

4.3.6 Inspeções visuais e dimensionais

As inspeções visuais são fundamentais para a identificação de falhas aparentes, como trincas, oxidações, delaminações ou perda de material, sem a necessidade de equipamentos sofisticados. Já as medições dimensionais permitem avaliar variações de forma e desgaste acumulado em regiões específicas da peça após o uso. As inspeções são indispensáveis para garantir a conformidade funcional de componentes submetidos a esforços mecânicos e abrasivos, especialmente após longos períodos de operação.

Para a realização das medições dimensionais das aletas no campo, foi utilizado um paquímetro digital Mitutoyo modelo ABSOLUTE, com capacidade de medição de até 200 mm e resolução de 0,01 mm. Trata-se de um instrumento amplamente empregado em

medições de precisão na indústria, adequado para verificar comprimentos externos, internos e profundidades com confiabilidade. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 42.

Figura 42 - Paquímetro digital Mitutoyo, modelo ABSOLUTE.



Fonte: Mitutoyo (2025).

4.4 TESTES DE CAMPO

Os testes de campo foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho das diferentes amostras aplicadas nas aletas da unidade recolhadora da plataforma para colheita de milho, sob condições reais de operação. Utilizou-se uma plataforma com 20 linhas de colheita, acoplada à uma colhedora automotriz, com cinco condições distintas de amostras, distribuídas em quatro linhas para cada tipo.

O trabalho foi conduzido em duas etapas. A primeira, com 1.000 hectares colhidos, teve caráter comparativo, com todas as amostras instaladas simultaneamente. Foi iniciada no Rio Grande do Sul (800 ha) e concluída no Mato Grosso (200 ha). A análise dimensional ao final indicou o melhor desempenho de uma das amostras, selecionada para continuidade.

Na segunda etapa, a plataforma foi remontada com 20 linhas novas do modelo escolhido, totalizando mais 4.013 hectares colhidos nas seguintes regiões:

- Mato Grosso: 1.000 ha (excluindo os 200 iniciais);
- Goiás: 830 ha;
- Mato Grosso do Sul: 580 ha;
- Paraná: 678 ha;
- Bahia: 925 ha.

Durante essa fase, a colheita foi realizada em cenários variados quanto a:

- Tipos de milho e umidade das plantas;
- Produtividade das lavouras;
- Turnos de operação (manhã, tarde e noite);
- Clima e variações operacionais naturais.

As medições dimensionais foram feitas a cada 1.000 hectares, com paquímetro digital, considerando a distância entre os fios cortantes das aletas. A medida nominal era de 1,5 mm, com tolerância de +0,5 mm; valores acima de 2,0 mm foram considerados desgaste crítico.

A produtividade média obtida está apresentada na Tabela 4, totalizando cerca de 449.456 sacas de milho, representando fielmente as condições enfrentadas nas diferentes regiões agrícolas do país.

Tabela 4 - Produtividade de milho.

Região	Área Colhida (ha)	Produtividade (sc/ha)
Mato Grosso	1000	113
Goiás	830	105
Mato Grosso do Sul	580	110
Paraná	678	135
Bahia	925	98
Total	4013	112
Média		112,2

Fonte: O autor (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DADOS DO PROBLEMA

A análise do problema de desgaste prematuro das aletas da plataforma para colheita de milho teve início com relatos do setor de garantia. Foi identificado que a quantidade de peças solicitadas para garantia apresentava um número muito elevado, o que evidenciou um problema recorrente. A Tabela 5 apresenta os dados relativos à quantidade de peças produzidas e montadas nas máquinas, a quantidade de peças enviadas em garantia e as peças vendidas após o período de garantia.

Tabela 5 - Dados quantitativos de garantia.

Total de peças produzidas	Total de peças montadas em máquinas novas	Total de peças enviadas em garantia	Total de peças vendidas pela central de peças
78781	56526	12451	9804

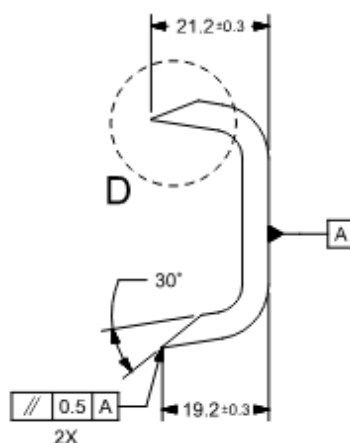
Fonte: O autor (2025).

Além dos relatos do setor de garantia, outro ponto que destacou a relevância do problema foram os resultados das pesquisas de satisfação dos clientes. Quando questionados sobre o desempenho da máquina, 97% das respostas estavam entre "bom" e "ótimo". No entanto, ao solicitarem comentários adicionais, 91% das observações estavam relacionadas à durabilidade das aletas e ao custo de reposição, reforçando a necessidade urgente de uma solução para o problema.

O primeiro passo da investigação consistiu na realização de visitas a 10 clientes distribuídos pelas regiões Sul, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Essas visitas foram fundamentais para descartar a hipótese de que o desgaste observado estivesse vinculado a variáveis específicas de uma única região, como o tipo de solo ou práticas agrícolas locais.

Durante as visitas, foram realizadas medições nas aletas das máquinas, com foco nas cotas de 19,2 mm (aleta esquerda) e 21,2 mm (aleta direita), conforme especificado em projeto. Essas dimensões podem ser visualizadas na Figura 43, que apresenta um recorte do desenho técnico da aleta (ANEXO A deste trabalho). A distância entre os fios das aletas, estipulada como máxima de 1,5 mm (Figura 29), é uma consequência direta dessas cotas.

Figura 43 - Cotas inspecionadas.



Fonte: O autor (2025).

Quando ocorre redução nas medidas de 19,2 mm e 21,2 mm devido ao desgaste, a distância entre as aletas em operação aumenta, ultrapassando o limite de 1,5 mm. Isso compromete a eficiência do recolhimento, pois as abas das aletas, que se encontram durante a rotação, deixam de operar com a proximidade ideal.

A média de desgaste observada nas aletas, obtida a partir dos dados coletados durante as inspeções, está apresentada na Tabela 5.

Tabela 6 - Avaliações das condições das aletas . Dados coletados em campo (10 clientes).

CLIENTE	\bar{x} Cota 19,2 mm	\bar{x} Cota 21,2 mm	Distância entre aletas	QUANTIDADE DE HECTARES COLHIDOS
1	18,50	20,53	2,87	982
2	18,48	20,51	2,91	1120
3	18,40	20,40	3,10	1280
4	18,50	20,48	2,92	1150
5	18,50	20,44	2,96	1380
6	18,48	20,48	2,94	1257
7	18,52	20,50	2,88	975
8	18,52	20,52	2,86	900
9	18,36	20,40	3,14	1532
10	18,40	20,44	3,06	1420

Fonte: O autor (2025).

Após a coleta dos dados, foi realizada uma análise interna na empresa, com a caracterização de 10 peças de campo que apresentaram desgaste e de 10 peças novas. As

análises realizadas incluíram a medição de dureza do aço e do revestimento e ainda a composição química do aço das peças.

A média de durezas encontradas nas aletas que apresentaram desgaste foi exatamente igual a média de durezas encontradas nas peças novas, sendo o valor de 20 HRC, e a média de durezas encontradas no revestimento foi de 1180 HV. Já as composições químicas das peças analisadas estão apresentadas na Tabela 7 e quando comparadas a sua respectiva norma, confirmam que as composições químicas estão dentro dos critérios constantes nas normas SAE J403 (SAE, 2023).

Tabela 7 - Composição química (Amostras novas e usadas).

Elemento	SAE 1045 (PEÇAS DE CAMPO)	SAE 1045 (PEÇAS NOVAS)
Carbono (C)	0,47	0,47
Manganês (Mn)	0,62	0,63
Silício (Si)	0,18	0,17
Fósforo (P)	0,018	0,021
Enxofre (S)	0,003	0,003
Alumínio (Al)	0,044	0,045
Cromo (Cr)	0,02	0,02
Cobre (Cu)	0,01	0,01
Vanádio (V)	0,001	0,001
Nitrogênio (N)	0,0033	0,0032
Nióbio (Nb)	0,001	0,001
Titânio (Ti)	0,002	0,002
Cálcio (Ca)	0,0015	0,0018
Boro (B)	0,0003	0,0003

Fonte: O autor (2025).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Conforme apresentado na seção 3.3.2, foram realizadas diferentes análises laboratoriais para caracterizar as propriedades físico-químicas e mecânicas das amostras submetidas aos ensaios comparativos. Esta seção detalha os resultados obtidos nas avaliações de composição química, dureza, micro dureza, microestrutura metalográfica e resistência à flexão. Cada método empregado foi escolhido com base nas particularidades dos materiais e tratamentos aplicados, visando validar tecnicamente as propostas de melhoria em relação ao modelo atualmente utilizado em produção.

5.2.1 Composição química

A análise da composição química foi realizada com o objetivo de verificar a conformidade dos materiais utilizados com os padrões estabelecidos pelas respectivas normas técnicas. Essa verificação é fundamental para assegurar que os aços empregados apresentem as características esperadas de temperabilidade, resistência mecânica e resposta aos tratamentos térmicos e termoquímicos aplicados.

As amostras foram submetidas à espectrometria de emissão óptica com leitura por plasma (OES), e os resultados obtidos foram comparados com os limites especificados nas normas SAE J403 (para o aço SAE 1045), SAE J404 (para o aço SAE 15B30) e ASTM A36/A36M (para o aço AISI A36). A Tabela 8 apresenta os resultados da análise química das amostras em comparação com os valores normativos.

Tabela 8 - Comparativo das composições químicas.

Elemento	SAE 1045 (SAE J403)	SAE 1045 (AMOSTRA)	SAE 15B30 (SAE J404)	SAE 15B30 (AMOSTRA)	AISI A36 (ASTM A36/A36M)	AISI A36 (AMOSTRA)
Carbono (C)	0,43 – 0,50	0,47	0,27 – 0,33	0,29	≤ 0,26	0,17
Manganês (Mn)	0,60 – 0,90	0,62	0,40 – 0,70	0,62	0,60 – 0,90	0,65
Silício (Si)	0,15 – 0,35	0,18	0,15 – 0,35	0,20	≤ 0,40	0,020
Fósforo (P)	máx. 0,040	0,018	máx. 0,035	0,016	máx. 0,040	0,014
Enxofre (S)	máx. 0,050	0,003	máx. 0,040	0,003	máx. 0,050	0,005
Boro (B)	—	0,0003	0,0005 – 0,003	0,0026	—	0,0001

Fonte: O autor (2025).

Os resultados demonstram que todas as amostras analisadas atendem aos requisitos químicos definidos pelas normas correspondentes, confirmando a adequação dos materiais selecionados para os testes experimentais.

5.2.2 Dureza superficial

Com o objetivo de avaliar a dureza superficial resultante dos tratamentos aplicados, foram realizados ensaios utilizando um durômetro convencional na escala Rockwell C. As medições foram feitas diretamente na superfície das peças após a aplicação dos respectivos tratamentos térmicos ou termoquímicos, mas antes das etapas finais de pintura e montagem, a Tabela 9 apresenta as médias das durezas encontradas.

Essa abordagem permitiu aferir a dureza superficial real das amostras em sua forma funcional, refletindo o efeito direto dos tratamentos realizados. Os valores obtidos serviram como base para comparar as diferentes rotas de processamento aplicadas aos materiais testados, permitindo identificar variações significativas de dureza entre as condições avaliadas.

Tabela 9 - Média de durezas superficiais.

NUMERAÇÃO DA AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	MÉDIA DE DUREZAS ENCONTRADAS (HRC)
1	AISI A36 (CARBONITRETADO COM 0,5 MM DE CAMADA - 55 A 60 HRC)	58
2	AISI A36 (CARBONITRETADO COM 1,0 MM DE CAMADA - 60 A 65 HRC)	63
3	SAE 15B30 (DUREZA SOLICITADA 45 HRC)	45
4	SAE 15B30 (DUREZA SOLICITADA 50 HRC)	51

Fonte: O autor (2025).

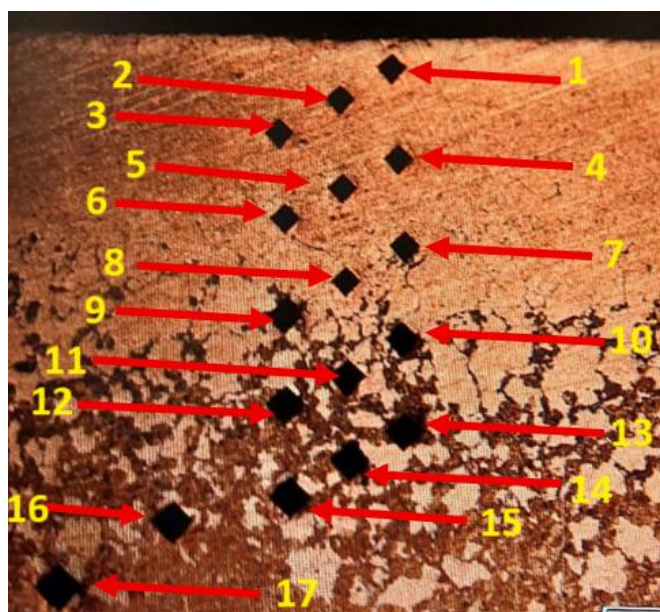
5.2.3 Micro dureza

O ensaio de micro dureza Vickers foi realizado com o objetivo de avaliar a variação da dureza em função da profundidade, a partir da superfície tratada das amostras. Essa técnica é especialmente importante para caracterizar o perfil de endurecimento superficial promovido pelos tratamentos térmicos e termoquímicos, permitindo analisar a espessura efetiva da camada endurecida e a transição até a região de núcleo.

Em todas as amostras foram realizadas 17 medições sequenciais, espaçadas de forma equidistante até atingir uma profundidade total de 0,85 mm. Esse valor foi definido com base na profundidade máxima de desgaste funcional esperada no componente analisado, estimada em até 0,25 mm durante a operação em campo. A escolha por extrapolar as medições até 0,85 mm garante uma margem adicional de 0,6 mm, permitindo uma avaliação mais abrangente do gradiente de dureza em regiões além da zona crítica de desgaste.

Para facilitar a visualização da sequência dos pontos de medição, a Figura 44 apresenta a imagem metalográfica utilizada nos ensaios, com a indicação numérica 1 ao 17 de cada ponto de indentação. Essa numeração é correspondente àquela apresentada nas tabelas de resultados que seguem Tabelas 10 a 13.

Figura 44 - Numeração dos pontos de indentação.



Fonte: O autor (2025).

Os dados obtidos foram organizados em quatro tabelas (Tabelas 10 a 13), cada uma correspondente a uma das condições avaliadas, contendo:

- O número da medição (indentação),
- A distância da superfície em milímetros,
- A dureza obtida em HV,
- A dureza convertida para a escala HRC (quando disponível escala de conversão).

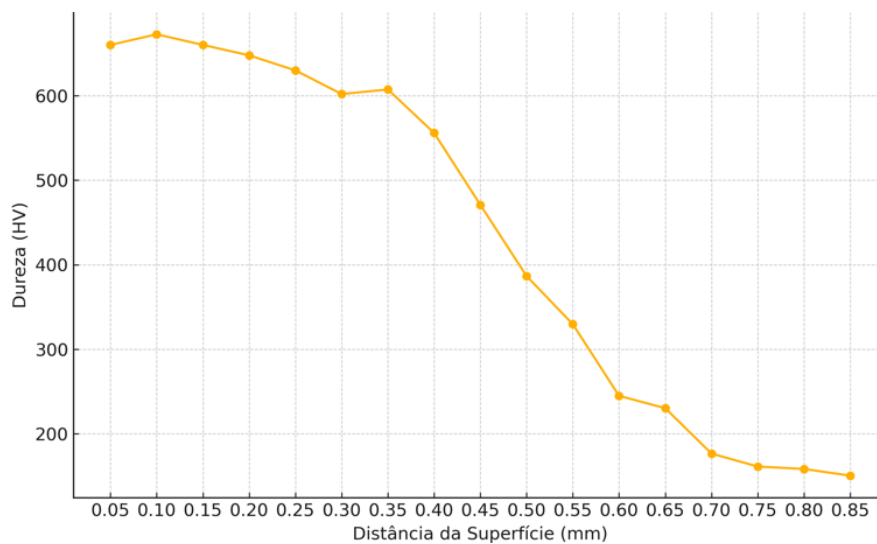
Após cada tabela, foi inserido um gráfico individual que mostra a evolução do perfil de dureza ao longo da profundidade para cada amostra exemplo da Figura 45.

Tabela 10 - Durezas amostra 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC.

NUMERAÇÃO DA INDENTAÇÃO	DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE	DUREZA ENCONTRADA (HV)	DUREZA ENCONTRADA (HRC)
1	0,05	660,10	57,51
2	0,10	672,70	59,09
3	0,15	660,10	57,51
4	0,20	647,80	55,97
5	0,25	630,00	53,75
6	0,30	602,00	50,25
7	0,35	607,40	50,93
8	0,40	556,00	44,50
9	0,45	470,90	33,86
10	0,50	386,60	
11	0,55	329,60	
12	0,60	244,90	
13	0,65	230,20	
14	0,70	176,50	
15	0,75	161,20	
16	0,80	158,30	
17	0,85	150,40	

Fonte: O autor (2025).

Figura 45 – Perfil de durezas amostra 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC.



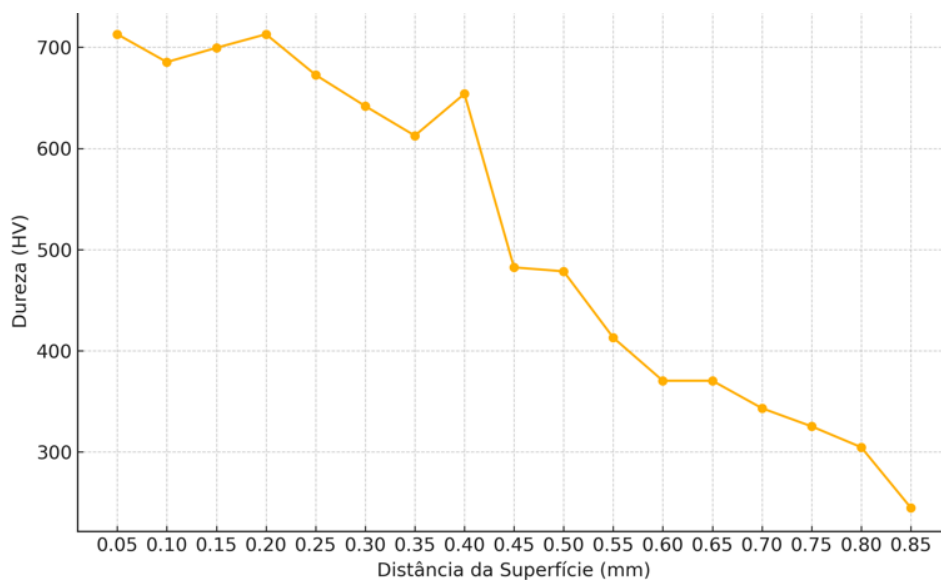
Fonte: O autor (2025).

Tabela 11 - Durezas amostra 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC.

NUMERAÇÃO DA INDENTAÇÃO	DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE	DUREZA ENCONTRADA (HV)	DUREZA ENCONTRADA (HRC)
1	0,05	712,80	64,10
2	0,10	685,30	60,66
3	0,15	699,40	62,43
4	0,20	712,80	64,10
5	0,25	672,60	59,08
6	0,30	641,80	55,22
7	0,35	612,60	51,58
8	0,40	653,90	56,74
9	0,45	482,40	35,30
10	0,50	478,50	34,81
11	0,55	413,00	26,63
12	0,60	370,40	
13	0,65	370,40	
14	0,70	343,20	
15	0,75	325,30	
16	0,80	304,70	
17		244,90	

Fonte: O autor (2025).

Figura 46 – Perfil de durezas amostra 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC.



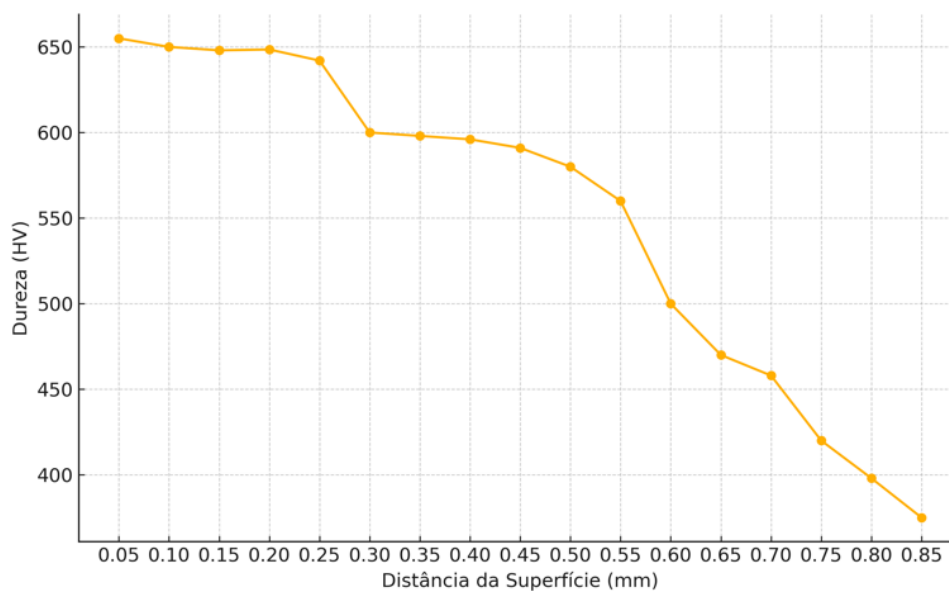
Fonte: O autor (2025).

Tabela 12 - Durezas amostra 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.

NUMERAÇÃO DA INDENTAÇÃO	DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE	DUREZA ENCONTRADA (HV)	DUREZA ENCONTRADA (HRC)
1	0,05	655,00	45,50
2	0,10	650,00	45,00
3	0,15	648,00	44,80
4	0,20	648,50	44,85
5	0,25	642,00	44,20
6	0,30	600,00	40,00
7	0,35	598,00	39,80
8	0,40	596,00	39,60
9	0,45	591,00	39,10
10	0,50	580,00	38,00
11	0,55	560,00	36,00
12	0,60	500,00	30,00
13	0,65	470,00	27,00
14	0,70	458,00	25,80
15	0,75	420,00	
16	0,80	398,00	
17	0,85	375,00	

Fonte: O autor (2025).

Figura 47 – Perfil de durezas amostra 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.



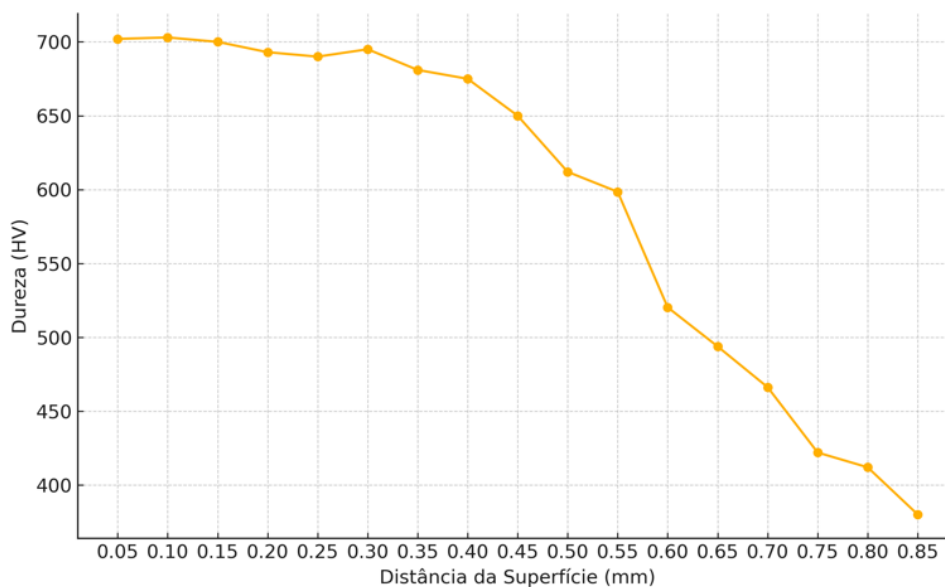
Fonte: O autor (2025).

Tabela 13 - Durezas amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.

NUMERAÇÃO DA INDENTAÇÃO	DISTÂNCIA DA SUPERFÍCIE	DUREZA ENCONTRADA (HV)	DUREZA ENCONTRADA (HRC)
1	0,05	702,00	50,20
2	0,10	703,00	50,30
3	0,15	700,00	50,00
4	0,20	693,00	49,30
5	0,25	690,00	49,00
6	0,30	695,00	49,50
7	0,35	681,00	48,10
8	0,40	675,00	47,50
9	0,45	650,00	45,00
10	0,50	612,00	41,20
11	0,55	598,50	39,80
12	0,60	520,30	32,00
13	0,65	493,80	29,30
14	0,70	466,20	26,60
15	0,75	422,00	
16	0,80	412,00	
17	0,85	380,10	

Fonte: O autor (2025).

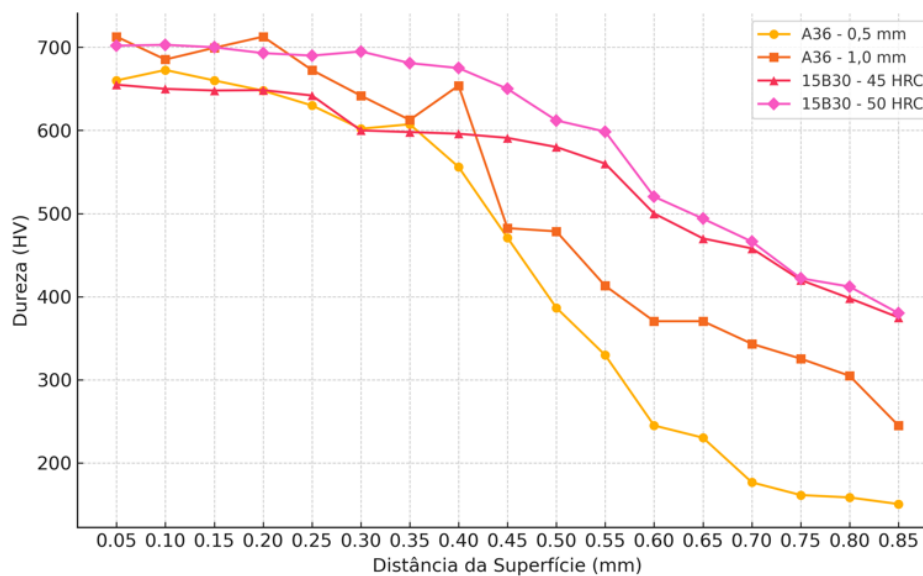
Figura 48 – Perfil de durezas amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.



Fonte: O autor (2025).

Por fim, a Figura 49 apresenta um gráfico comparativo, reunindo os quatro perfis de dureza obtidos, o que permite uma análise conjunta do desempenho de cada material/tratamento quanto à penetração da camada endurecida e resistência superficial.

Figura 49 - Comparativo de perfis de durezas.



Fonte: O autor (2025).

As durezas médias obtidas nas regiões de núcleo foram:

- Aço SAE 15B30 (50 HRC): 322,8 HV
- Aço SAE 15B30 (45 HRC): 318,1 HV
- Aço AISI A36 carbonitretado (1,0 mm): 191,1 HV
- Aço AISI A36 carbonitretado (0,5 mm): 138,2 HV
- Aço SAE 1045: 219 HV
- Camada de carbeto de tungstênio (revestimento): 1125 HV

5.2.4 Metalografia

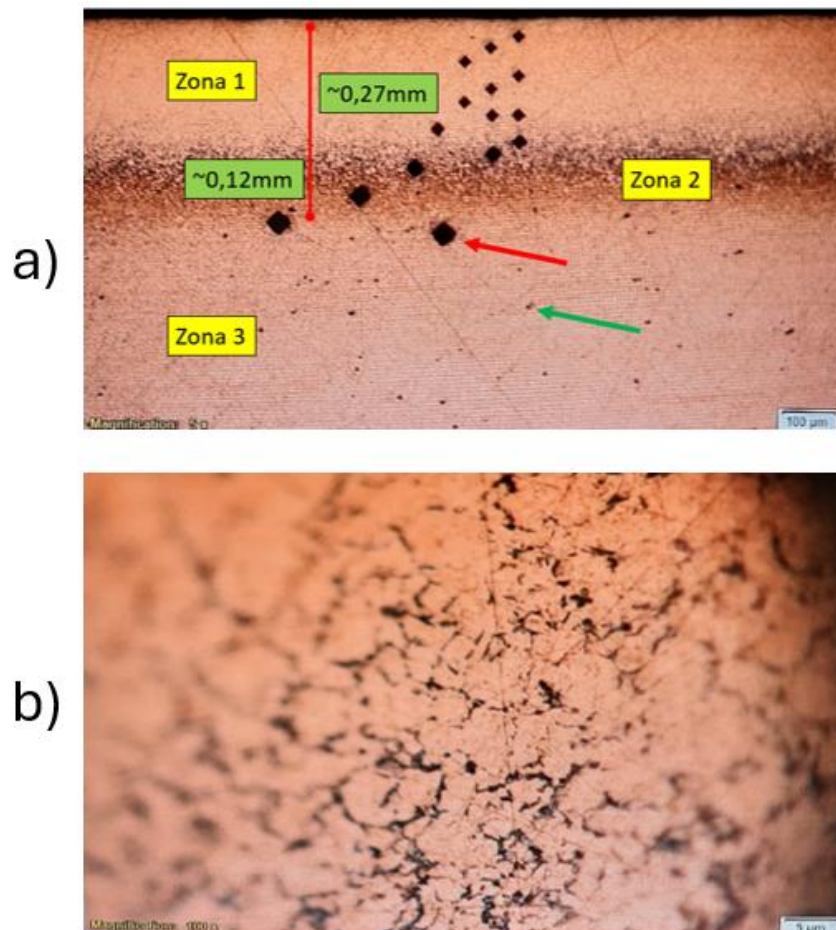
A seguir são apresentadas as micrografias obtidas das amostras após os respectivos tratamentos térmicos ou termoquímicos, com o objetivo de verificar a conformidade da camada endurecida, a presença de zonas de transição e a microestrutura do núcleo. As imagens foram obtidas por microscopia óptica após preparo metalográfico adequado para cada condição de análise.

5.2.4.1 Amostras 1, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 0,5 mm e dureza superficial de 55 a 60 HRC .

As Figura 50 A e B apresentam micrografias da seção transversal da amostra de aço AISI A36 submetida ao processo de carbonitreção, obtidas em duas ampliações distintas para detalhamento da camada tratada.

A Figura 50 A, permite a visualização global da profundidade do tratamento termoquímico. Observam-se claramente três zonas distintas resultantes da difusão de carbono e nitrogênio:

Figura 50 - Micrografia (amostra 1).



Fonte: O autor (2025).

- **Zona 1:** corresponde à camada superficial carbonitretada, com espessura aproximada de 0,27 mm. É composta por uma estrutura predominantemente martensítica, resultando em alta dureza e resistência ao desgaste.

- **Zona 2:** camada de transição com espessura estimada de 0,12 mm, onde ocorre a diminuição progressiva da dureza. Essa região apresenta uma microestrutura formada por mistura de martensita com perlita fina, além de possíveis precipitações de carbonetos e nitretos.
- **Zona 3:** representa o núcleo do material, livre da influência do tratamento, com microestrutura característica de ferrita e perlita, típica do aço A36 em condição bruta.

A espessura total da camada tratada (Zonas 1 + 2) foi de aproximadamente 0,39 mm, valor próximo ao especificado para o tratamento de 0,5 mm. Pequenas variações podem ser atribuídas a fatores como temperatura de processo, tempo de permanência e taxa de resfriamento.

A Figura 50 A também destaca as marcas de indentação (setas vermelhas), correspondentes ao ensaio de micro dureza, posicionadas sequencialmente da superfície ao núcleo. Já os pontos pretos menores (setas verdes), visíveis predominantemente na Zona 3, são atribuídos a inclusões de cromo formadas durante o processo de fabricação do aço.

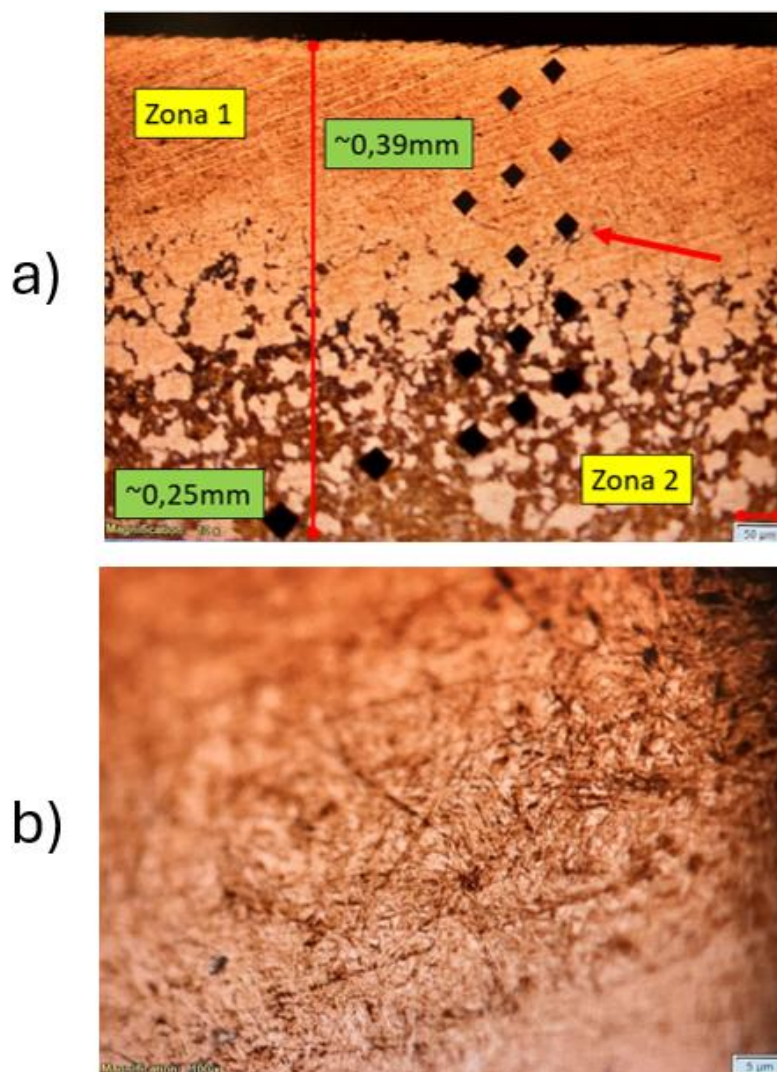
A Figura 50 B, foca a análise da zona superficial (Zona 1), permitindo observar com maior definição a morfologia da microestrutura carbonitretada. Nessa imagem, nota-se uma estrutura martensítica refinada, com contraste típico da presença de carbonetos e nitretos dispersos, além de grãos finos resultantes do resfriamento acelerado. A ausência de fases como perlita ou ferrita na superfície confirma a eficácia do tratamento na obtenção de uma camada dura e uniforme.

5.2.4.2 Amostras 2, aço AISI A36, carbonitretado, camada de 1,0 mm e dureza superficial de 60 a 65 HRC .

As Figura 51 A e B apresentam micrografias da seção transversal da amostra de aço AISI A36 submetida à carbonitreção com espessura nominal de 1,0 mm, obtidas por microscopia óptica em duas ampliações distintas para detalhamento microestrutural da camada tratada.

A Figura 51 A, evidencia duas zonas principais ao longo da profundidade da amostra:

Figura 51 - Micrografia (amostra 2).



Fonte: O autor (2025).

- **Zona 1:** camada superficial com microestrutura martensítica, responsável pela elevada dureza da região.
- **Zona 2:** zona de transição, composta por martensita revenida e perlita fina, com leve redução de dureza em relação à camada superficial.

A composição microestrutural dessas zonas é semelhante à observada nas amostras do grupo 1 (camada de 0,5 mm). A principal diferença está na espessura total da camada tratada, que nesta condição foi medida em aproximadamente 0,64 mm, inferior ao valor teórico de 1,0 mm. Essa diferença é esperada, visto que o aumento da profundidade da camada implica maior complexidade no processo termoquímico,

especialmente quanto à uniformidade de temperatura, difusão dos gases e controle da taxa de resfriamento.

As marcas de indentação utilizadas no ensaio de micro dureza estão indicadas por setas vermelhas e seguem a direção perpendicular à superfície, da camada externa ao interior da peça.

A Figura 51 B, permite observar em maior detalhe a microestrutura da zona superficial (Zona 1). Nessa região, é evidente a presença de martensita fina e dispersa, com morfologia característica de resfriamento acelerado e elevado teor de carbono e nitrogênio. A ausência de fases dúcteis como ferrita ou perlita nessa região confirma a eficácia do tratamento termoquímico na obtenção de uma camada endurecida uniforme e contínua.

5.2.4.3 Amostras 3, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 45 HRC.

A Figura 52 apresenta uma micrografia obtida por microscopia correspondente à amostra de aço SAE 15B30 submetida a tratamento térmico de têmpera e revenido, com dureza final de 45 HRC. A imagem revela a presença de uma microestrutura com presença de martensita (regiões mais claras).

Figura 52 - Micrografia (amostra 3).



Fonte: O autor (2025).

Essa combinação de fases é compatível com o tipo de tratamento térmico aplicado. A têmpera promove a formação da martensita, que confere alta dureza ao material, enquanto o revenido, realizado em temperaturas moderadas, permite o alívio das tensões internas.

Durante a análise do perfil de micro dureza observou-se que os primeiros 0,25 mm a partir da superfície apresentaram dureza significativamente maior em relação ao núcleo. Após essa profundidade, a dureza passou a cair de forma gradual. Esse comportamento não era esperado para um tratamento térmico convencional como têmpera e revenido, o que sugere a possibilidade da ocorrência de algum enriquecimento superficial não informado pela empresa responsável pelo processo.

Embora não haja confirmação por parte do fornecedor, esse aumento localizado de dureza superficial pode ter sido causado por um efeito de carburação superficial acidental. Esse fenômeno pode ocorrer em fornos convencionais, especialmente se houver presença de gases carbonetos residuais na atmosfera de aquecimento (como CO ou CH₄), ou até mesmo pelo uso de placas de sustentação grafitadas. Em tais condições, pode ocorrer a difusão limitada de carbono na superfície, formando uma fina camada enriquecida, semelhante a um tratamento superficial leve como carburação ou carbonitretação espontânea.

Essa camada superficial endurecida atua como um reforço mecânico adicional e pode ser vantajosa em termos de resistência ao desgaste, mas é importante que seja caracterizada com precisão para evitar interpretações incorretas sobre a origem do comportamento do material.

A microestrutura mista observada está em concordância com o intervalo de dureza obtido e sugere um bom equilíbrio entre resistência ao desgaste e tenacidade, adequado para componentes submetidos a solicitações abrasivas moderadas.

5.2.4.4 Amostra 4, aço SAE 15B30, temperado e revenido com dureza de 50 HRC.

A Figura 53 apresenta a micrografia da seção transversal da amostra de aço SAE 15B30 submetida ao tratamento térmico de têmpera e revenido, com dureza final de 50 HRC.

Figura 53 - Micrografia (amostra 4).



Fonte: O autor (2025).

A microestrutura observada é composta por martensita (regiões claras), o que confirma a predominância de uma estrutura de alta dureza. Em comparação com a condição de 45 HRC, nota-se um volume maior de martensita, justificado pelo ajuste nos parâmetros do tratamento térmico, como menor tempo de revenido ou temperatura reduzida.

Nas medições de micro dureza realizadas, foi identificada uma camada superficial de aproximadamente 0,4 mm com durezas mais elevadas. Após essa profundidade, os valores passaram a cair de forma gradual até atingirem a dureza do núcleo. Esse comportamento reforça a hipótese de enriquecimento superficial localizado, possivelmente oriundo de efeitos térmicos não controlados, como a presença de gases carbonetados residuais durante a têmpera, ou mesmo fenômenos de carbonetação superficial espontânea.

Após a detecção desta camada superficial endurecida, com o enriquecimento de carbono as amostras 3 e 4, passaram a ser chamadas a partir deste momento de amostra 3 aço SAE 15B30, temperado e revenido com enriquecimento de carbono, com dureza de 45 HRC e amostra 4 aço SAE 15B30, temperado e revenido com enriquecimento de carbono, com dureza de 50 HRC

5.2.4.5 Amostra 5, aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio.

A Figura 54 apresenta a micrografia da seção transversal do aço SAE 1045. A imagem revela uma microestrutura típica desse tipo de aço, composta por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras), características de aços médios-carbono não tratados termicamente. Essa condição estrutural fornece resistência mecânica moderada, porém limitada resistência ao desgaste, justificando a necessidade da aplicação de um revestimento superficial.

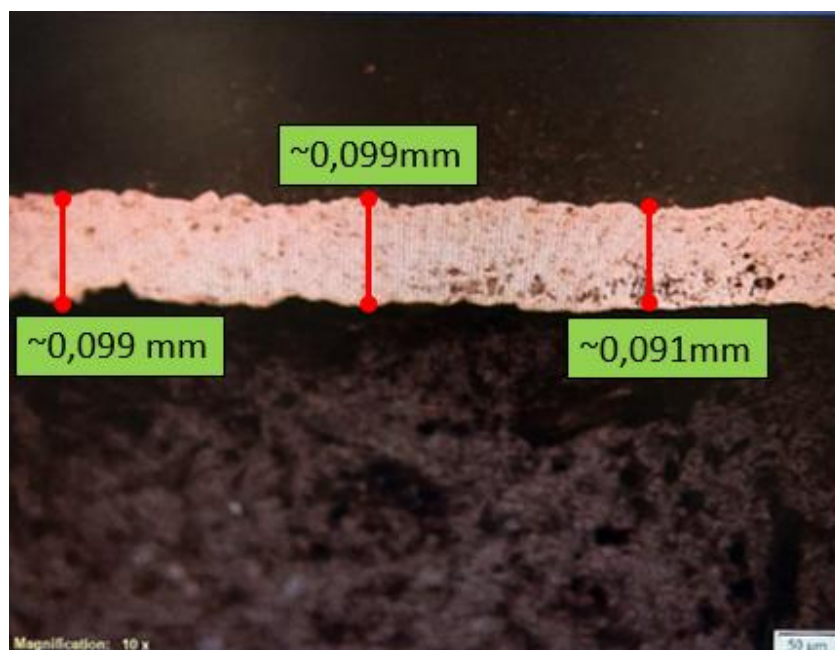
Figura 54 - Micrografia (amostra 5).



Fonte: O autor (2025).

A Figura 55 mostra a micrografia do mesmo material, agora com destaque para a camada de carbeto de tungstênio. A camada clara na parte superior corresponde ao revestimento, enquanto a região escura inferior representa o aço SAE 1045. Três medições distintas ao longo da amostra indicam espessuras de $\sim 0,099$ mm, $\sim 0,099$ mm e $\sim 0,091$ mm, resultando em uma espessura média de $0,096$ mm, o que demonstra boa uniformidade do depósito. A transição entre o revestimento e o substrato é nítida, e não há evidência de falhas de aderência ou descontinuidades visíveis na interface, indicando a eficácia do processo de aplicação.

Figura 55 - Micrografia (Carbeto de Tungstênio).



Fonte: O autor (2025).

5.2.5 Ensaio de flexão

Os resultados obtidos no ensaio de flexão para as cinco amostras avaliadas estão consolidados na Tabela 14, que apresenta os valores médios de força aplicada (N), deslocamento (mm) e ângulo de flexão ($^{\circ}$) registrados durante os testes. A análise dos dados revela diferenças significativas no comportamento mecânico entre os materiais e tratamentos aplicados.

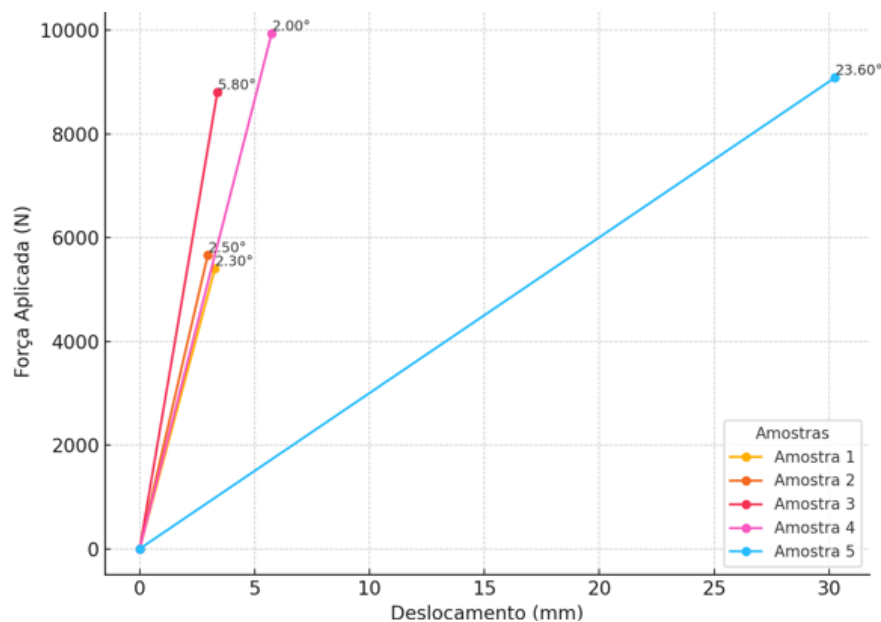
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de flexão.

AMOSTRA	MÉDIA DE FORÇA APLICADA (N)	MÉDIA DE DESLOCAMENTO (MM)	MÉDIA DO ÂNGULO ($^{\circ}$)
1	5397,25	3,27	2,3
2	5659,83	2,96	2,5
3	8799,75	3,38	5,8
4	9934,70	5,74	2,0
5	9081,58	30,24	23,6

Fonte: O autor (2025).

A amostra 4 apresentou a maior força média aplicada (9934,70 N), associada a um deslocamento moderado (5,74 mm) e ângulo de flexão reduzido ($2,0^\circ$), o que sugere alta rigidez e resistência à flexão, com pouca deformação. Em contraste, a amostra 5 destacou-se pelo maior deslocamento (30,24 mm) e ângulo ($23,6^\circ$), indicando elevada ductilidade, mas possível redução da resistência sob carga. Já as amostras 1, 2 e 3 apresentaram comportamentos intermediários, com forças entre 5397,25 N e 8799,75 N, e ângulos de flexão de $2,3^\circ$ a $5,8^\circ$, sugerindo um equilíbrio entre resistência e capacidade de deformação, conforme a aplicação final. A Figura 56 ilustra comparativamente os parâmetros analisados.

Figura 56 - Comparativo de flexão das 5 amostras.



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 57, pode-se ver o comportamento de deformação e o tipo da fratura ocorrido nas amostras 1, 2, 3 e 4, sendo que nos quatro tipos de amostras o comportamento foi praticamente o mesmo. Já a Figura 58, apresenta o resultado da amostra 5, que apresentou um comportamento distinto, com maior curvatura e fratura mais tardia, compatível com o alto deslocamento registrado.

Figura 57 - Deformação e fratura das amostras (1,2,3 e 4).



Fonte: O autor (2025).

Figura 58 - Deformação e fratura da amostra 5.



Fonte: O autor (2025).

5.3 TESTES DE CAMPO

5.3.1 Primeira etapa – Avaliação até 1000 hectares

A primeira fase dos testes de campo foi conduzida com o objetivo de avaliar comparativamente o desempenho de cinco diferentes condições de aletas, produzidas a partir de distintas rotas de processamento e materiais. Essa etapa inicial abrangeu 1.000 hectares de colheita, sendo 800 hectares realizados no estado do Rio Grande do Sul e os 200 hectares finais no estado do Mato Grosso.

As inspeções dimensionais foram realizadas após os 800 hectares e novamente ao completar os 1.000 hectares. As medições foram efetuadas por meio de paquímetro digital, focando-se nas cotas funcionais das aletas (19,2 mm e 21,2 mm) e na distância entre os fios opostos das aletas, parâmetro essencial para a eficiência de tração e

destacamento do caule. Além das medições, foram observados sinais de falhas visuais nas peças.

Os resultados demonstraram diferenças significativas de desempenho entre as amostras. As amostras 1 (Figura 59) e amostras 2 (Figura 60), (A36 carbonitretado com 0,5 mm e 1,0 mm, respectivamente) apresentaram trincas visíveis localizadas na região do fio, além de desgaste moderado. Embora as distâncias entre aletas tenham permanecido dentro da tolerância (inferiores a 2,0 mm), a presença de trincas foi considerada crítica, comprometendo a integridade estrutural das peças.

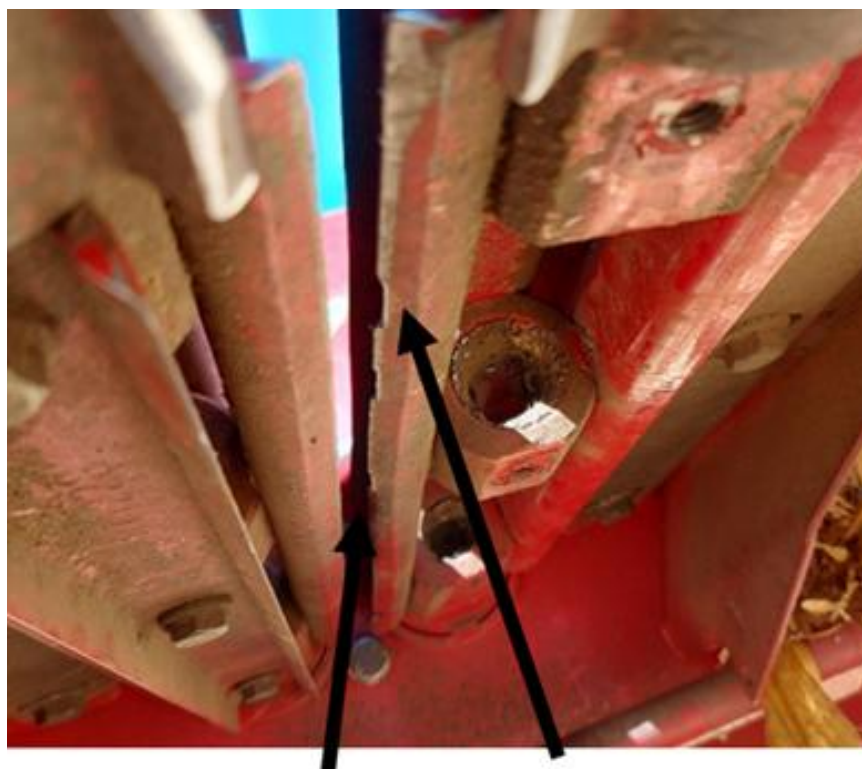
Figura 59 - Amostra 1 (1000 ha).



Trincas nos “fios”

Fonte: O autor (2025).

Figura 60 – Amostra 2 (1000 ha).

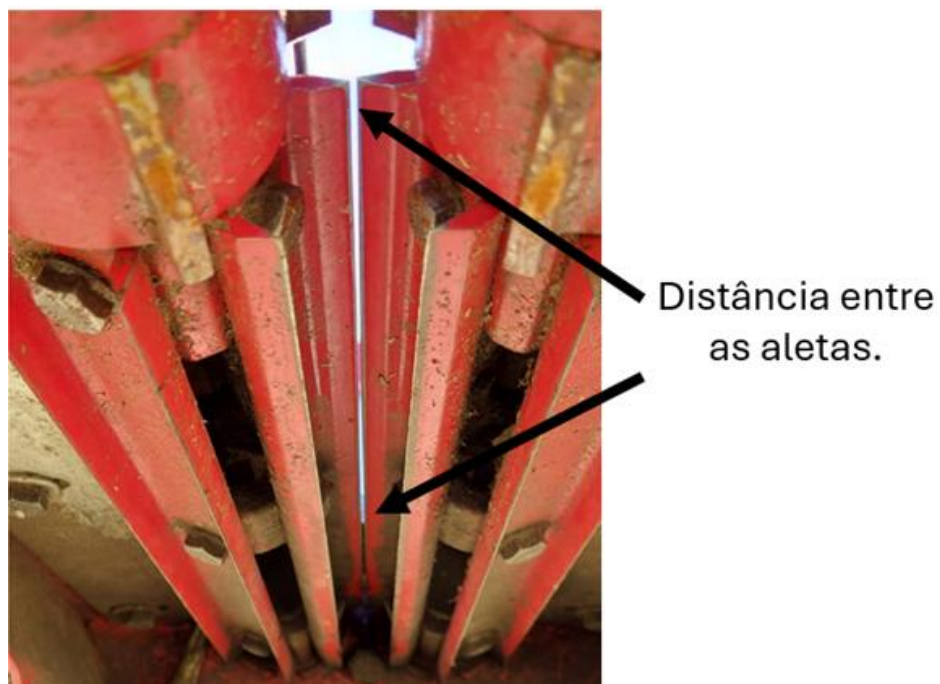


Trincas nos “fios”

Fonte: O autor (2025).

A amostra 3 (Figura 61), (SAE 15B30 com 45 HRC) demonstrou o melhor desempenho global. Apresentou os menores níveis de desgaste entre todos os modelos e não apresentou nenhum sinal de trinca ou falha estrutural, mantendo a distância entre aletas dentro do intervalo ideal. Esses resultados indicaram que essa condição de tratamento térmico promoveu um equilíbrio adequado entre dureza e resistência ao dano mecânico.

Figura 61 - Amostra 3 (1000 ha).



Fonte: O autor (2025).

A amostra 4 (Figura 62), (SAE 15B30 com 50 HRC), embora com bom desempenho dimensional, também apresentou trincas na região do fio, conforme Figura 62 indicando que a maior dureza obtida com o tratamento térmico comprometeu a tenacidade do componente.

Figura 62 - Amostra 4 (1000 ha).

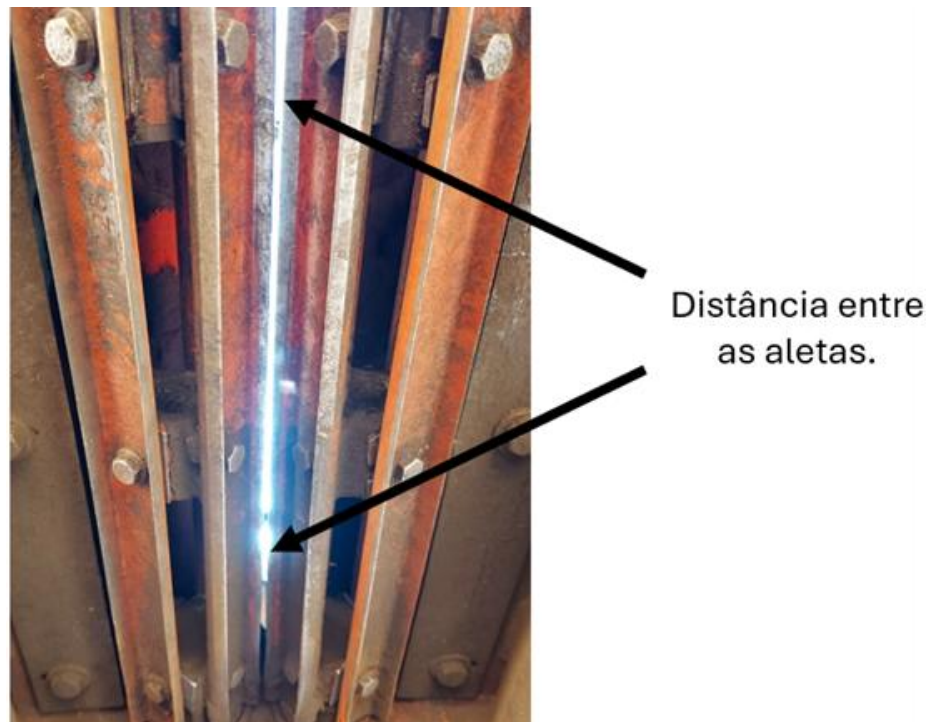


Fonte: O autor (2025).

A amostra 5 (SAE 1045 com carbeto de tungstênio) apresentou o maior desgaste, ultrapassando os 3,78 mm de distância entre fios após os 1.000 hectares, valor muito acima do limite aceitável de 2,0 mm, o que justifica sua substituição na produção. Esse desgaste excessivo compromete a ação de tração dos rolos recolhedores, prejudicando o destacamento adequado da espiga e aumentando a entrada de material indesejado na colhedora automotriz.

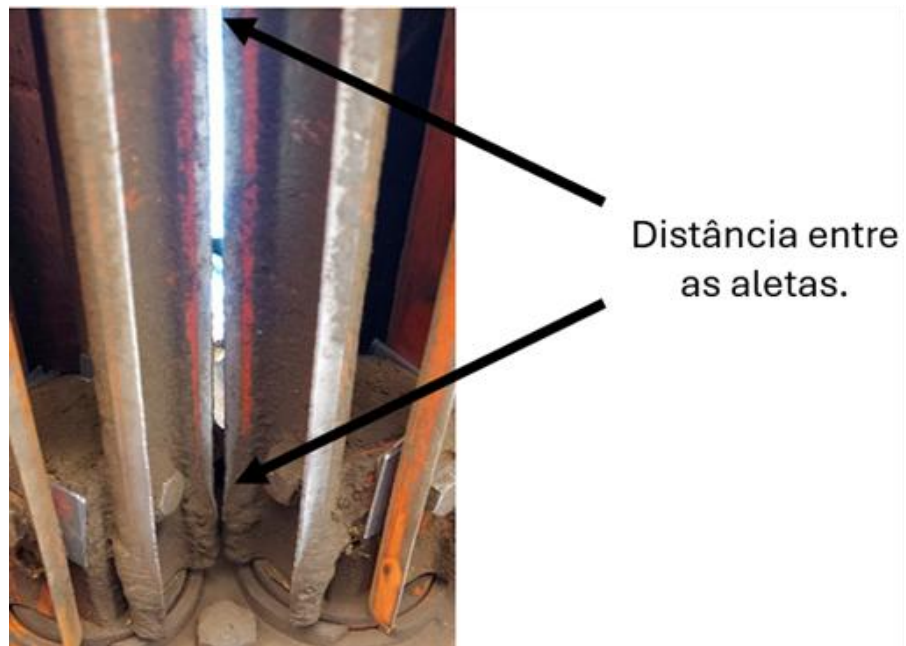
A Figura 63 apresenta as amostras de aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio, após a avaliação realizada com 1000 hectares de colheita. Observa-se nas imagens uma diferença considerável na distância medida na extremidade final da aleta. No entanto, na Figura 64 essa região específica do componente não apresenta evidências claras de desgaste, pois não possui função ativa durante o trabalho, ou seja, não entra em contato direto com os caules de milho que estão sendo tracionados para baixo.

Figura 63 - Amostra 5 (1000 ha).



Fonte: O autor (2025).

Figura 64 - Parte traseira da amostra 5 (1000 ha).



Fonte: O autor (2025).

A Tabela 15 apresenta os valores médios obtidos nas medições dimensionais realizadas após 800 ha e 1.000 ha de colheita, além da presença ou ausência de trincas observadas visualmente nas amostras.

Tabela 15 - Avaliação dimensional (1000 ha).

Tipo de amostra	\bar{x} (800 ha) Cota 19,2 mm	\bar{x} (800 ha) Cota 21,2 mm	\bar{x} (1000 ha) Cota 19,2 mm	\bar{x} (1000 ha) Cota 21,2 mm	Distância entre aletas (800 ha)	Distância entre aletas (1000 ha)	Presença de trincas
1	18,93	21,11	19,07	21,07	1,86	1,76	SIM
2	19,14	21,13	19,07	21,08	1,63	1,75	SIM
3	19,15	21,15	19,12	21,12	1,59	1,66	NÃO
4	19,16	21,16	19,12	21,12	1,58	1,66	SIM
5	18,53	20,53	18,10	20,01	2,84	3,79	NÃO

Fonte: O autor (2025).

Com base nesses resultados, foi definida a eliminação das quatro amostras com desempenho inferior ao final da primeira etapa, e a continuidade dos testes apenas com a amostra 3 (SAE 15B30 com dureza de 45 HRC). A plataforma foi então completamente remontada com 20 linhas de novas aletas desse modelo, dando início à segunda etapa dos testes de campo.

5.3.2 Segunda etapa – Avaliação até 4013 hectares

Com base no desempenho superior observado na primeira etapa dos testes, a segunda fase foi conduzida com a plataforma totalmente equipada com aletas fabricadas em aço SAE 15B30 temperado e revenido, com enriquecimento de carbono, com dureza final de 45 HRC. O objetivo desta fase foi avaliar a resistência ao desgaste ao longo de uma colheita prolongada, sob condições reais de operação e em diferentes regiões do país.

Durante essa etapa, foram realizadas medições dimensionais a cada 1.000 hectares, abrangendo as 20 linhas da plataforma. O parâmetro avaliado foi a distância entre os fios cortantes das aletas, cuja medida nominal de montagem é de 1,5 mm, com tolerância de +0,5 mm, estabelecendo um limite máximo funcional de 2,0 mm.

A Tabela 16 apresenta a evolução média da distância entre os fios ao longo do uso:

Tabela 16 - Avaliações de 1000 ha até 4013 ha.

Tipo de amostra	\bar{x} Cota 19,2 mm	\bar{x} Cota 21,2 mm	Distância entre aletas	Hectares de uso	Presença de trincas
Amostra tipo 3 - novo lote	19,12	21,12	1,66	1000 ha	NÃO
Amostra tipo 3 - novo lote	19,06	21,05	1,79	2000 ha	NÃO
Amostra tipo 3 - novo lote	19,01	21,00	1,89	3000 ha	NÃO
Amostra tipo 3 - novo lote	18,94	20,93	2,03	4013 ha	NÃO

Fonte: O autor (2025).

Os resultados demonstram uma evolução progressiva do desgaste ao longo da operação, com os valores permanecendo dentro da tolerância funcional até os 3.000 hectares. Somente ao final dos 4.013 hectares, a média registrada ultrapassou discretamente o limite de 2,0 mm, sinalizando o início da perda de desempenho das peças.

Apesar disso, não foram observadas trincas, quebras ou falhas estruturais nas aletas durante toda a segunda etapa, indicando boa tenacidade e integridade do material mesmo após longo período de uso. O comportamento do desgaste também foi relativamente uniforme entre as diferentes linhas da plataforma, o que evidencia consistência no tratamento térmico e na fabricação das peças.

Com base nesses resultados, conclui-se que a configuração testada oferece durabilidade funcional até aproximadamente 4.000 hectares de colheita, com bom desempenho técnico e resistência estrutural satisfatória, superando a condição originalmente utilizada na produção em termos de estabilidade e vida útil.

5.4 ANÁLISE DE CUSTOS

A substituição das aletas produzidas com aço SAE 1045 e revestimento de carbetto de tungstênio pelo novo modelo fabricado em aço SAE 15B30 com tratamento térmico de têmpera e revenido e enriquecimento de carbono, com 45 HRC, resultou em uma redução significativa nos custos de fabricação do produto.

A nova configuração se mostrou economicamente mais viável tanto na aquisição da matéria-prima quanto nos processos térmicos aplicados, sem a necessidade de revestimentos adicionais. Comparando os dois modelos, a redução no custo de produção por peça foi superior a 60%, o que representa um ganho expressivo na fabricação em larga escala.

Para o cliente final, essa mudança também impactou diretamente no preço de mercado. O modelo anterior, comercializado a R\$ 378,00 por unidade, passou a custar R\$ 119,00 no novo formato, representando uma redução de aproximadamente 68% no valor de venda.

É importante destacar que os demais processos de fabricação, como corte, estampagem, conformação, usinagem, pintura, montagem e as logísticas internas e externas até o fornecedor de tratamento térmico, permaneceram inalterados em ambas as configurações. A análise apresentada leva em conta apenas os principais diferenciais entre os modelos, ou seja, tipo de aço utilizado e o respectivo processo térmico ou superficial aplicado.

Além disso, vale mencionar que esta avaliação não considera os custos associados a perdas por sucatas ou despesas relacionadas a garantias, que historicamente eram mais elevados no modelo anterior. Embora não detalhados nesta seção, esses fatores reforçam ainda mais a viabilidade econômica da nova configuração, como será discutido na próxima seção.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise integrada dos resultados obtidos nas diferentes etapas deste trabalho permitiu uma avaliação abrangente do desempenho dos materiais testados em condições reais de operação e em ensaios laboratoriais padronizados. O foco esteve em identificar a combinação ótima entre resistência ao desgaste, integridade estrutural e viabilidade econômica para aplicação nas aletas da plataforma de colheita de milho.

Inicialmente, os dados de garantia e satisfação dos clientes indicaram que o modelo originalmente utilizado (aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio) apresentava elevado índice de desgaste e custo de reposição, comprometendo a eficiência do sistema recolhedor e gerando insatisfação no pós-venda. Essa percepção foi confirmada pelas medições de campo, nas quais a amostra 5 apresentou o maior desgaste após 1.000 hectares, com distâncias entre fios superiores ao limite funcional, além de apresentar o comportamento mais dúctil nos ensaios de flexão, sugerindo menor rigidez estrutural.

As amostras de aço AISI A36 carbonitretado (amostras 1 e 2) mostraram desempenho razoável em termos de desgaste, mas foram desclassificadas devido à presença de trincas na região do fio, um fator crítico para componentes submetidos a esforços cíclicos e impacto durante a operação.

A amostra 4 (SAE 15B30 com dureza de 50 HRC) também apresentou trincas, sugerindo que níveis elevados de dureza, embora benéficos para a resistência ao desgaste, podem comprometer a tenacidade do componente quando não acompanhados de controle rigoroso das tensões internas.

A amostra 3 (SAE 15B30 com dureza de 45 HRC) foi a única a combinar desgaste reduzido, ausência de trincas e estabilidade dimensional, tanto nos ensaios de flexão quanto nos testes de campo. Os resultados de micro dureza revelaram uma distribuição gradual e controlada de dureza ao longo da profundidade, com núcleo estável e transição suave, indicando eficiência do tratamento térmico e uniformidade entre as peças fabricadas. A análise metalográfica confirmou a presença de martensita com frações de bainita, estrutura típica de têmpera e revenido, garantindo boa combinação de dureza e tenacidade.

Nos testes de campo de longa duração (até 4.013 hectares), a amostra 3 manteve desempenho funcional adequado até aproximadamente 4.000 hectares, ultrapassando discretamente o limite de 2,0 mm ao final da vida útil, sem apresentar falhas estruturais. Isso representa um ganho significativo em relação ao modelo anterior, que excedia esse limite em menos de 1.000 hectares.

Do ponto de vista econômico, a substituição do modelo original pelo aço SAE 15B30 temperado e revenido implicou em redução de mais de 60% no custo de fabricação e cerca de 68% no preço de venda ao cliente final. Tal economia, aliada à superior durabilidade e confiabilidade do novo modelo, justifica plenamente a adoção desta configuração como solução técnica e comercialmente viável.

Portanto, os resultados convergem para a conclusão de que o aço SAE 15B30 com têmpera e revenido, com enriquecimento de carbono, com 45 HRC representa a melhor alternativa técnica entre as opções avaliadas, conciliando desempenho mecânico, resistência ao desgaste, segurança estrutural e custo competitivo para aplicação em aletas recolhedoras de plataformas de colheita de milho.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar a substituição do aço e a reestruturação dos roteiros de fabricação de aletas utilizadas em plataformas para colheita de milho, com foco na resistência ao desgaste abrasivo. Através de uma abordagem prática e experimental, foram comparadas cinco configurações distintas de materiais e tratamentos, com base em testes laboratoriais, ensaios mecânicos e validações em campo.

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- O modelo anteriormente utilizado, composto por aço SAE 1045 com revestimento de carbeto de tungstênio, apresentou desgaste precoce em campo, superando os limites dimensionais funcionais antes de 1.000 hectares de operação. Apesar da alta dureza do revestimento, a ausência de endurecimento no substrato e a baixa rigidez global comprometeram sua durabilidade.
- As amostras fabricadas em aço AISI A36 submetidas à carbonitretação (com camadas de 0,5 mm e 1,0 mm) obtiveram ganhos significativos de dureza superficial. No entanto, apresentaram trincas visíveis na região do fio após os testes de campo, o que comprometeu a integridade estrutural e inviabilizou sua aplicação.
- As amostras de aço SAE 15B30 submetidas à têmpera e revenido se destacaram pelo bom desempenho. A amostra com dureza de 50 HRC apresentou elevada resistência ao desgaste, mas também evidenciou trincas superficiais após a colheita de 1.000 hectares, indicando que a dureza excessiva comprometeu sua tenacidade.
- Já a condição das amostras de aço SAE 15B30 com dureza final de 45 HRC demonstrou o melhor desempenho global, com baixos índices de desgaste, ausência de falhas estruturais e estabilidade dimensional até cerca de 4.000 hectares, superando amplamente a vida útil do modelo anterior.
- A análise de custos evidenciou que a substituição do modelo revestido por aletas em aço SAE 15B30 com tratamento térmico resulta em uma redução superior a 60% no custo de fabricação e aproximadamente 68% no preço de venda ao cliente final. Essa economia, aliada ao ganho de desempenho, torna a solução altamente atrativa sob os aspectos técnico e comercial.

- A síntese dos dados laboratoriais (dureza, micro dureza, metalografia, flexão) com os resultados obtidos em campo foi essencial para validar a proposta de substituição de material e reestruturação dos processos de fabricação, confirmando a eficácia da abordagem adotada.

Dessa forma, conclui-se que a utilização do aço SAE 15B30 com têmpera e revenido, com enriquecimento de carbono, com 45 HRC representa a alternativa mais adequada entre as opções avaliadas. Essa solução oferece maior durabilidade, menor custo, maior confiabilidade em operação e contribui significativamente para o desempenho e a competitividade do equipamento agrícola em estudo.

REFERÊNCIAS

ABIMAQ. Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos. São Paulo: ABIMAQ, 2025. Disponível em: <https://www.abimaq.org.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

ABTS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE. Eletrodeposição: o que é e como funciona o processo de revestimento metálico. Disponível em: <https://abts.org.br/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ANSI/ASTM. E18: Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Methods. E3, E10, E18, E92, E855.

ASTM. E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ASTM. E10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ASTM. E92: Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ASTM. E855: Standard Practice for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

BRASIL ESCOLA. A evolução das máquinas agrícolas. Brasil Escola, p. 1, 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2002.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CELESTINO, R.; FELIPE, J.; MACHADO, J. Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação) realizado em aço 1040. Revista Científica da FATEC, p. 1–8, 2007/2008.

CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986. v. 3.

CONAB. Perspectivas para a Agropecuária – Safra 2022/23. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

COSTA E SILVA, A.; MEI, P. R. Diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Aços e ligas metálicas, p. 45–60, 2008.

DAVIS, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. ASM International, 2001.

EMBRAPA. A Revolução Verde e seus desdobramentos no Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011.

EMBRAPA. A Revolução Verde e seus desdobramentos no Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2014.

FUKS, M. Agricultura e Revolução Industrial: as máquinas que transformaram o campo. São Paulo: Editora Contexto, 2016.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. Ensaaios dos materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

GREFORTEC – SERVIÇOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS. Disponível em: <https://www.grefortec.com.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

IFRS – INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL – Campus Ibirubá. Página institucional. Disponível em: <https://ifrs.edu.br/ibiruba>. Acesso em: 17 jun. 2025.

INTERTEK. Mangini Risk through Quilite Control Field Testing. 2022. Disponível em: <https://www.intertek.com/blog/2022/10-25-field-testing/>. Acesso em: 18 maio 2025.

LA WEB DE INGENIOSOS. Diagramas CCT: Transformaciones en enfriamiento continuo. Disponível em: <https://lawebdeingeniosos.com/diagramas-cct/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. História das agriculturas do mundo: do neolítico à crise contemporânea. São Paulo: Editora UNESP, 2010.

MILAN, M.; CORTEZ, J. W.; MILAN, L. A. M. Avaliação de desempenho de plataformas de colheita de milho. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 597–606, 2006.

MITUTOYO. Manual técnico: Durômetro Rockwell HR-100. São Paulo: Mitutoyo Sul Americana, [s.d.]. Disponível em: <https://www.mitutoyo.com.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

NOVIKOV, I. I. Tratamentos térmicos dos metais. 4. ed. Lisboa: Mir, 1981.

NUNES, E. C.; KREISCHER, P. H. Avaliação da resistência ao desgaste de aços tratados por cementação e carbonitreção. Revista Científica Eletrônica de Engenharia, p. 1–10, 2013.

PÉREZ, J. Desgaste em Ferramentas de Máquinas Agrícolas. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/bitstream/1/12318/2/LD_COEME_2019_2_05.pdf. Acesso em: 18 maio 2025.

PENA, R. A. Evolução da agricultura e suas técnicas. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/evolucao-agricultura-suas-tecnicas.htm>. Acesso em: 04 maio 2025.

PENA, R. F. Transformações tecnológicas na agricultura e a questão da sustentabilidade. Revista de Agricultura e Desenvolvimento, v. 20, n. 2, p. 45–58, 2023.

QUANTEQ INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO. Catálogo técnico: Máquina universal de ensaio modelo DL10000. [S.l.]: Quanteq, [s.d.]. Disponível em: <https://www.quanteq.com.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

REED-HILL, R. E. Ciência dos materiais: princípios e aplicações. São Paulo: Bookman, 2009.

REED-HILL, R. E. Física da Ciência dos Materiais. Bookman, 2009.

RIJEZA REVESTIMENTOS METÁLICOS. Aplicação de carbetos de tungstênio por aspensão térmica. Disponível em: <https://www.rijeza.com.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SILVA, A. L. V. da. Tratamentos Térmicos dos Aços. Ed. Blücher, 2007.

SILVA, R.; OLIVEIRA, J.; SANTOS, L. Aplicações da aspersão térmica na recuperação de componentes industriais. *Revista Brasileira de Engenharia de Superfícies*, p. 35–42, 2011.

SILVA, V. I. da C. Desenvolvimento de procedimentos de revestimento por soldagem com tecimento em alta frequência usando o processo de arame tubular. 2022.

SKONIESKI, A. F. O. Desenvolvimento de superfícies com filmes DLC-like, adesão melhorada e baixo coeficiente de atrito aplicáveis em conformação mecânica. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

TECLAGO EQUIPAMENTOS METALOGRAFICOS. Catálogo técnico – Cortadora CM 40 e embutidora EM30D. [S.l.]: Teclago, [s.d.]. Disponível em: <https://www.teclago.com.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

TOTTEN, G. E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. 2. ed. CRC Press, 2006.

TWI. What is Mechanical Testing? Cambridge, 2022. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-testing>. Acesso em: 18 maio 2025.

UFOb – UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA. Análise das propriedades de aços aplicados em componentes de máquinas agrícolas. Disponível em: <https://repositorio.ufob.edu.br/bitstreams/6ece74bc-b9ff-47ab-9dce-f7663badc7c0/download>. Acesso em: 02 maio 2025.

VENCE TUDO. Página institucional. Ibirubá: Vence Tudo Máquinas Agrícolas, 2025. Disponível em: <https://vencetudo.ind.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

ZUM GAHR, K.-H. *Microstructure and Wear of Materials*. Amsterdam: Elsevier, 1987.

ANEXOS

Anexo A – Desenho técnico da aleta.

