

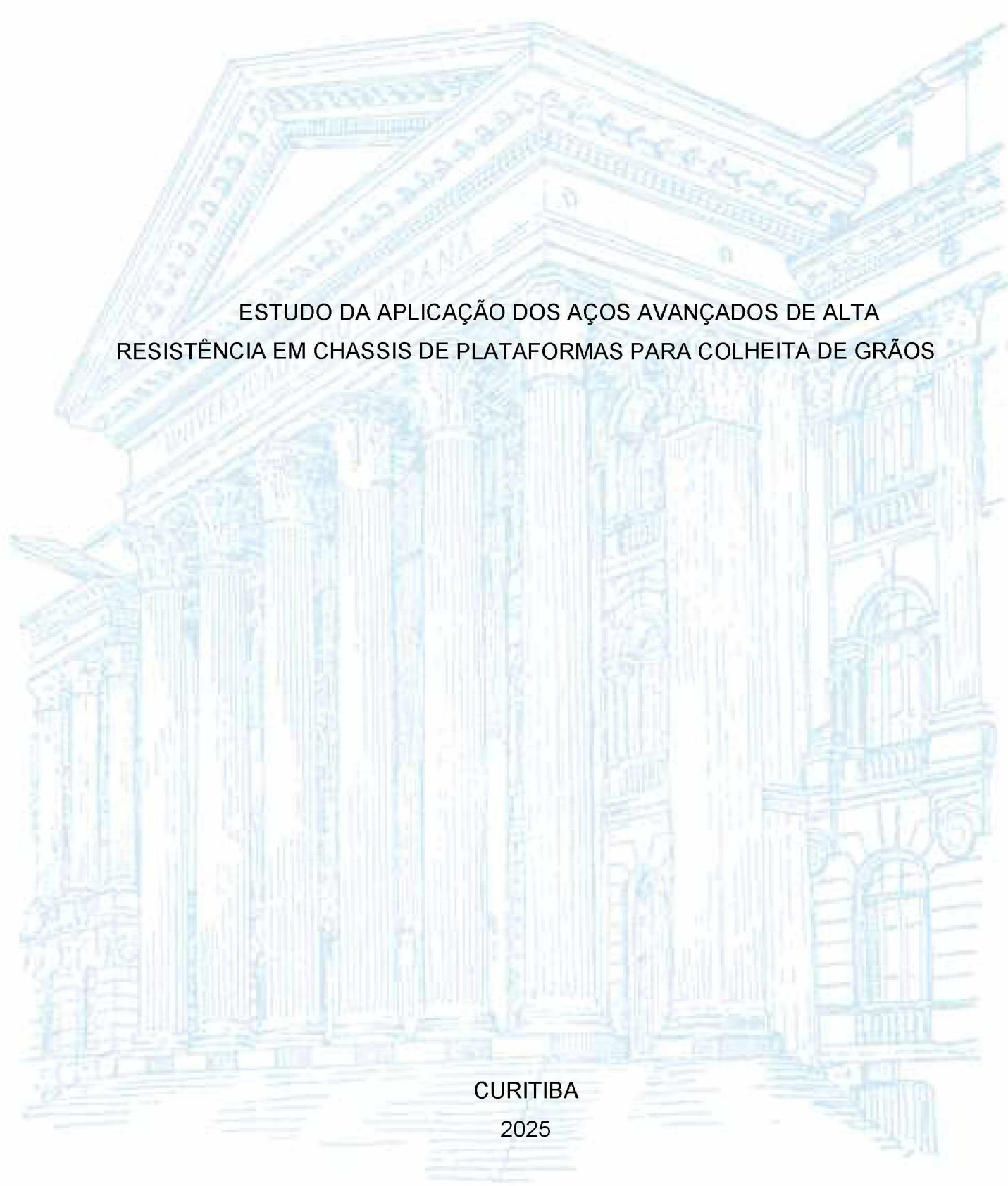
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOCEMAR LUIS SASS JUNIOR

ESTUDO DA APLICAÇÃO DOS AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA EM CHASSIS DE PLATAFORMAS PARA COLHEITA DE GRÃOS

CURITIBA

2025



JOCEMAR LUIS SASS JUNIOR

ESTUDO DA APLICAÇÃO DOS AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA EM CHASSIS DE PLATAFORMAS PARA COLHEITA DE GRÃOS

Dissertação apresentada como resultado parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de
Manufatura. Curso de Pós-graduação em
Engenharia Manufatura, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Giovana de Fatima
Menegotto

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sass Junior, Jocemar Luis

Estudo da aplicação dos aços avançados de alta resistência em chassis de plataformas para colheita de grãos / Jocemar Luis Sass Junior. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Giovana de Fatima Menegotto

1. Aço de alta resistência. 2. Grãos – Colheita. 3. Máquinas agrícolas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Menegotto, Giovana de Fatima. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOCEMAR LUIS SASS JUNIOR**, intitulada: **ESTUDO DA APLICAÇÃO DOS AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM CHASSIS DE PLATAFORMAS PARA COLHEITA DE GRÃOS**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação,

Curitiba, 30 de Julho de 2025.

Assinatura Eletrônica
05/09/2025 17:05:44,0
GIOVANA DE FATIMA MENEGOTTO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
05/09/2025 16:43:22,0
SERGIO LUIZ HENKE
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
10/09/2025 14:18:28,0
SERGIO FERNANDO LAJARIN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
07/09/2025 09:16:37,0
LEANDRO JOAO DA SILVA
Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE ENG. MECÂNICA UFPR)

A Deus pela vida.

À minha amada esposa pelo carinho e incentivo.

Ao meu tio Polan e minha irmã por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu irmão e meus pais que, mesmo não estando mais presentes entre nós, sempre acreditaram e torceram por mim.

Aos meus tios Cinthya e Ricardo por me ajudarem a compreender o valor do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o apoio e a contribuição de diversas pessoas e instituições, às quais registro aqui minha sincera gratidão.

A Deus, pela saúde, pela força e pela perseverança em cada etapa desta jornada.

À minha família, pelo amor incondicional, incentivo e compreensão diante das ausências e momentos de dedicação ao estudo.

À Prof^a. Dra. Giovana pela orientação, confiança depositada e pelo aprendizado transmitido.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura da UFPR, pelo compartilhamento de conhecimento, pelas discussões enriquecedoras e pelo convívio ao longo desta caminhada acadêmica.

À MethalC Máquinas e Peças e especialmente ao meu amigo e colega Oldemar, pelo suporte e pela infraestrutura disponibilizada, que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Enfim, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho fosse concretizado, deixo aqui meu profundo agradecimento.

“Deus é o dono de tudo. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade. Ele a deu para mim, não sei por quê. Só sei que não posso desperdiçá-la.”
(SENNA, 1994)

RESUMO

O estudo proposto teve como objetivo redimensionar o conjunto soldado de uma plataforma para colheita de grãos denominado chassi, visando a redução de peso com o aumento ou manutenção da resistência mecânica por meio da substituição de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) convencionais por Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS). Esta mudança não visou apenas melhorar as propriedades mecânicas dos componentes, mas também diminuir os impactos ambientais associados à produção do aço, emissão de poluentes pelo consumo de combustível das colheitadeiras e compactação do solo. A escassez de estudos específicos da aplicação do aço AHSS em plataformas agrícolas motivou a busca por informações relacionadas às diferentes formas de utilização desse material e suas limitações neste contexto. Para isso um chassi de plataforma foi redesenhado utilizando o software Solidworks 2022 e mantendo as dimensões essenciais de montagem do conjunto existente. Durante o desenvolvimento do projeto foi realizada uma análise por elementos finitos para otimizar o design e garantir a integridade estrutural do conjunto. Com o objetivo de compreender a aplicação desses materiais na indústria agrícola foram feitas a avaliação do comportamento dos materiais e processos de fabricação utilizados, a construção de protótipos e a análise de custos. Os protótipos deste chassi foram submetidos a condições reais de trabalho em campo para validação. Por fim, a análise de custos foi realizada, considerando o preço do material, quantidade de material e de consumíveis de solda. Os principais resultados incluem aproximadamente 9% de redução de peso no novo chassi soldado e 25% de redução individual nos componentes modificados, uma distribuição adequada de tensões, desempenho satisfatório dos materiais em condições reais de operação e equivalência de custos entre os materiais convencionais e os aços avançados de alta resistência.

Palavras-chave: Redução de peso; Plataformas agrícolas; Aços Avançados de Alta Resistência.

ABSTRACT

The proposed study aimed to redesign the welded assembly of a grain harvesting header, referred to as the chassis, with the objective of reducing weight while maintaining or increasing mechanical strength through the replacement of conventional High-Strength Low-Alloy (HSLA) steels with Advanced High-Strength Steels (AHSS). This change was intended not only to improve the mechanical properties of the components but also to reduce the environmental impacts associated with steel production, pollutant emissions from harvester fuel consumption, and soil compaction. The scarcity of specific studies regarding the application of AHSS in agricultural headers motivated the search for information related to different forms of use of this material and its limitations in this context. For this purpose, a header chassis was redesigned using SolidWorks 2022 while maintaining the essential mounting dimensions of the existing assembly. During the project development, a finite element analysis was carried out to optimize the design and ensure the structural integrity of the assembly. In order to understand the application of these materials in the agricultural industry, assessments of material behavior and manufacturing processes were conducted, as well as prototype construction and cost analysis. The chassis prototypes were subjected to real field working conditions for validation. Finally, the cost analysis considered material price, quantity of material, and welding consumables. The main results include approximately 9% weight reduction in the new welded chassis and 25% individual reduction in the modified components, an adequate stress distribution, satisfactory material performance under real operating conditions, and cost equivalence between conventional steels and advanced high-strength steels.

Key-words: Weight reduction; Agricultural headers; Advanced High-Strength Steels.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA GLOBAL DE FORMABILIDADE	21
FIGURA 2 – PROCESSO DE SOLDA FCAW.....	23
FIGURA 3 – CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM	24
FIGURA 4 – PRÉ-AQUECIMENTO DE SOLDAGEM	25
FIGURA 5 – INTERIOR CABINE COLHEITADEIRA DE ÚLTIMA GERAÇÃO	26
FIGURA 6 – COMPARAÇÃO PRESSÃO SOBRE O SOLO.....	27
FIGURA 7 – CRONOGRAMA MAR-1.....	29
FIGURA 8 – PRIMEIRA COLHEITADEIRA SLC65-A	30
FIGURA 9 – COLHEITADEIRA CLASSE 11.....	31
FIGURA 10 – SISTEMAS DE PROCESSAMENTO COLHEITADEIRA CONVENCIONAL	32
FIGURA 11 – SISTEMAS DE PROCESSAMENTO COLHEITADEIRA AXIAL.....	32
FIGURA 12 – PLATAFORMA PARA COLHEITA DE GRÃOS POR CORTE	33
FIGURA 13 – PLATAFORMA PARA COLHEITA DE GRÃOS POR DESTACAMENTO	34
FIGURA 14 – MODELOS DE PLATAFORMAS PARA ANÁLISE DIACRÔNICA.....	35
FIGURA 15 – ANÁLISE SINCRÔNICA DE SIMILARES	36
FIGURA 16 – CONJUNTO SOLDADO CHASSI PLATAFORMA DE MILHO	38
FIGURA 17 – SUPERFÍCIES DE CONTATO ENTRE A PLATAFORMA E O CANAL ALIMENTADOR.....	39
FIGURA 18 – DIFERENTES TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS.....	40
FIGURA 19 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	41
FIGURA 20 – GRAUS DE LIBERDADE DE UM CORPOS RÍGIDO	42
FIGURA 21 – FAMÍLIAS ELEMENTOS FINITOS ABAQUS.....	43
FIGURA 22 – NÚMERO DE NÓS ELEMENTO FINITO.....	43
FIGURA 23 – CORPO DE PROVA DE ÁREA COM SOLDA	46
FIGURA 24 – MALHA GERADA NO CHASSI.....	49
FIGURA 25 – SIMETRIA CHASSI	53

FIGURA 26 – ESPESSURAS DOS COMPONENTES ATUAIS E PROPOSTOS	54
FIGURA 27 – TENSÕES: VON MISSES	54
FIGURA 28 – PONTO DE MAIOR TENSÃO VERIFICADA	55
FIGURA 29 – TENSÃO DE VON MISSES E FATOR DE SEGURANÇA	56
FIGURA 30 – CHAPAS SOLDADAS PARA TESTE LNE 380.....	59
FIGURA 31 – CHAPAS SOLDADAS PARA TESTE AHSS 700.....	60
FIGURA 32 – LOCAL COLETA DADOS MICRODUREZA.....	61
FIGURA 33 – PERFIL MICRODUREZA LNE380.....	62
FIGURA 34 – PERFIL MICRODUREZA AHSS 700.....	63
FIGURA 35 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA DE AHSS 700 E LNE380	64
FIGURA 36 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA LNE380.....	64
FIGURA 37 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA AHSS 700	65
FIGURA 38 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA DOMEX 700.....	66
FIGURA 39 – MACROGRAFIA LNE380.....	66
FIGURA 40 – MICROGRAFIA MATERIAL BASE – LNE380	67
FIGURA 41 – MICROGRAFIA MATERIAL BASE – LNE 380	68
FIGURA 42 – MICROGRAFIA ZTA – LNE380.....	68
FIGURA 43 – MICROGRAFIA METAL BASE E ZTA – LNE380	69
FIGURA 44 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380.....	70
FIGURA 45 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380.....	71
FIGURA 46 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380.....	71
FIGURA 47 – MACROGRAFIA AHSS 700	72
FIGURA 48 – MICROGRAFIA METAL BASE – AHSS700.....	72
FIGURA 49 – MICROGRAFIA METAL BASE – AHSS700.....	74
FIGURA 50 – MICROGRAFIA ZTA – AHSS700	74
FIGURA 51 – MICROGRAFIA ZTA – AHSS700	75
FIGURA 52 – MICROGRAFIA METAL SOLDADO – AHSS700.....	76
FIGURA 53 – MICROGRAFIA METAL SOLDADO – AHSS700.....	77

FIGURA 54 – CONJUNTO CHASSIS E FERRAMENTAL DE SOLA	78
FIGURA 55 – CONJUNTO CHASSIS SOLDADO.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS ARBL.....	19
TABELA 2 – COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS AÇOS ARBL.....	20
TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AHSS 700	21
TABELA 4 – COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DO AÇO AHSS 700	21
TABELA 5 – LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO PARA MÁQUINAS AGRÍCOLAS E RODOVIÁRIAS.....	29
TABELA 6 – PROPRIEDADES NBR6656-LNE380 E AHSS 700.....	52
TABELA 7 – MASSA E CENTRO DE GRAVIDADE DA PLATAFORMA.....	52
TABELA 8 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRA CORPO DE PROVA.....	57
TABELA 9 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO ARBL LNE380 – NORMA.....	57
TABELA 10 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO AHSS AHSS 700 – AMOSTRA CORPO DE PROVA.....	57
TABELA 11 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO AHSS AHSS 700 – SSAB	57
TABELA 12 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – NORMA NBR6656	58
TABELA 13 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA.....	58
TABELA 14 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – SSAB	58
TABELA 15 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA.....	59
TABELA 16 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA COM SOLDA.....	60
TABELA 17 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA COM SOLDA.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AHSS	- Advanced High Strength Steels
ANFAVEA	- Associação Nacional do Fabricantes de Veículos Automotores
ARBL	- Alta Resistência e Baixa Liga
ASM	- American Society of Materials
AWS	- American Welding Society
CET	- Carbono Equivalente
CEV	- Carbono Equivalente de Valor
FEA	- Finite Elements Analysis
FCAW	- Flux-Cored Arc Welding
MB	- Material Base
NBR	- Norma Brasileira
SSAB	- SvensktStål AB
ZTA	- Zona Termicamente Afetada

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.3. JUSTIFICATIVA.....	17
1.4. OBJETIVO	18
1.4.1. Objetivo Geral.....	18
1.4.2. Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. AÇOS MICROLIGADOS - ARBL.....	19
2.2. AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA - AHSS	20
2.3. SOLDAGEM	22
2.3.1. Processo de Soldagem por Arame Tubular (FCAW)	22
2.3.2. Soldabilidade	23
2.3.3. Metal de Adição.....	23
2.3.4. Temperatura de Pré-Aquecimento– AHSS	24
2.4. COMPACTAÇÃO DO SOLO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	25
2.5. NÍVEIS DE EMISSÕES DE POLUENTES	28
2.6. FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS COLHEITADEIRAS.....	30
2.7. ANÁLISE DE SIMILARES.....	34
2.7.1. Análise Diacrônica de Similares	35
2.7.2. Análise Sincrônica de Similares.....	36
2.8. CHASSI DE PLATAFORMA PARA COLHEITA DE MILHO	37
2.9. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	39
2.10. PROGRAMA ABAQUS®.....	42
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.1. REQUISITOS DO PROJETO.....	45
3.2. ENSAIOS MECÂNICOS	45
3.2.1. Ensaio de tração	46
3.2.2. Metalografia.....	47
3.2.3. Microdureza.....	47
3.3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	47
3.4. CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS PARA VALIDAÇÃO.....	49
3.5. AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	50

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	52
4.2. AÇOS UTILIZADOS.....	56
4.2.1. Propriedades químicas.....	56
4.2.2. Propriedades mecânicas	57
4.3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	59
4.3.1. Propriedades mecânicas após processo de solda.....	60
4.3.2. Microdureza.....	61
4.3.3. Metalografia.....	66
4.4. CONTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS.....	77
4.5. AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	79
5. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Para a indústria metal-mecânica, uma das matérias-primas mais importantes é o aço. Com o passar dos anos, este material tem sofrido constantes alterações na sua composição química e estrutural, com a intenção de melhorar suas propriedades e diversificar suas aplicações. Uma das propriedades mecânicas mais importantes, servindo inclusive como critério de classificação dos aços, é o limite de escoamento (NBR 6656, 2008).

Juntamente com esta grande demanda surgem os problemas ambientais decorrentes das emissões de carbono, das quais 85% das emissões vêm da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia e materiais (BBC, 2023).

A indústria siderúrgica é atualmente uma das maiores emissoras de carbono, respondendo por cerca de 7% das emissões globais (SSAB, 2021). Nesse contexto, o desenvolvimento de aços mais resistentes pode contribuir de forma significativa para a redução do consumo de combustíveis fósseis. Isso porque, ao possibilitar a fabricação de elementos estruturais menos robustos, esses materiais reduzem o peso das estruturas e, conseqüentemente, as emissões de gases poluentes.

Neste contexto, surgiram os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). De uma maneira simples, os aços ARBL podem ser caracterizados como aços com baixo percentual de carbono e um limite de escoamento acima de 270 MPa (RODRIGUES, 2000).

O uso de aços de ARBL possibilitou a redução do peso dos veículos de transporte e de uso agrícola, acarretando um aumento da eficiência dos motores de combustão interna e gerando economia de combustível.

Indo além, empresas como a SSAB (SvensktStål AB) têm trabalhado com aços que apresentam limite mínimo de escoamento em torno de 700 MPa (AHSS 700) (SSAB, 2023), sendo estes o foco deste trabalho, pois permitem redução de massa em torno de 10% quando comparados aos aços estruturais convencionais como o NBR6656 – LNE380, por exemplo.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Os chassis de plataformas para colheita de grãos são fabricados atualmente em aços ARBL (NBR6656 – LNE380). Esses aços são estruturais, porém já não atendem à crescente demanda por equipamentos cada vez maiores e com limitações severas de massa impostas pelos fabricantes de colheitadeiras. A solução é a redução de espessura de chapas e tubos utilizados na fabricação dos componentes por meio do emprego de aços avançados de alta resistência (AHSS) que atingem Limite de Escoamento mínimo de 700 MPa.

1.3. JUSTIFICATIVA

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da soldagem de aços avançados de alta resistência (AHSS) utilizando os mesmos parâmetros atualmente empregados na indústria metal mecânica, bem como analisar tecnicamente seus efeitos sobre as propriedades do produto final. O objeto de estudo é um chassi de plataforma para colheita de grãos, componente submetido a elevados carregamentos durante a operação.

A aplicação desta família de aço em situações práticas, embora já presente no mercado agrícola, não tem registro de aplicação em plataformas para colheita de grãos especificamente, o que sugere a necessidade de verificação, em situação normal de trabalho, em campo, para validação. A escassez de informações específicas do aço avançado de alta resistência (AHSS) em plataformas agrícolas, motiva a busca por informações relacionadas às diferentes formas de utilização desse material, demonstrando características do processo de solda que possam ser consideradas pelas áreas de projeto e manufatura no momento da seleção dos parâmetros do processo. Isso tudo permite o entendimento sobre as limitações tanto do material quanto do produto final soldado.

1.4. OBJETIVO

1.4.1. Objetivo Geral

Avaliar a redução de massa em estruturas de plataformas para colheita de grãos por meio da substituição de aços ARBL convencionais por aço da família AHSS 700.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Realizar o projeto do chassi utilizando o Software Solidworks 2022;
2. Submeter a validação por meio de elementos finitos;
3. Avaliar o comportamento dos materiais quando expostos aos processos de fabricação;
4. Construir protótipos para a validação em campo;
5. Avaliar custos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AÇOS MICROLIGADOS - ARBL

Os aços microligados, também denominados aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), são compostos por um grupo específico de aços com composição química especificamente voltada para atingir excelentes propriedades mecânicas, especialmente altos limites de tensão de escoamento (WOOHEAD, 1985). De acordo com Rodrigues (2000), para se enquadrar nesta classe os aços devem possuir limites de escoamento acima de 270 MPa. Na tabela 1 são apresentadas as propriedades mecânicas de alguns aços microligados regidos pela norma NBR6656 de 2008.

TABELA 1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS ARBL

Grau	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento mínimo (%)
LNE200	200 a 330	280 a 410	35
LNE230	230 a 360	330 a 460	30
LNE260	260 a 390	370 a 500	30
LNE280	280 a 430	410 a 540	30
LNE380	380 a 530	460 a 600	23
LNE400	400 a 530	520 a 650	23
LNE420	420 a 540	520 a 650	22
LNE460	460 a 580	540 a 680	18
LNE500	500 a 620	560 a 700	18
LNE550	550 a 670	600 a 760	15
LNE600	600 a 720	680 a 810	14
LNE700	700 a 820	780 a 920	12

FONTE: Adaptado NBR6656 (2008).

Diferentemente dos aços de alta liga, os ARBL possuem baixos teores de elementos de liga em sua composição. Os elementos de liga geralmente adicionados a este tipo de aço são: Ni, Cr, Cu, Ti, Si, Mn (ASM, 2001). Estes aços possuem uma quantidade de elementos ligantes que geralmente não ultrapassam 2% e a concentração de carbono encontra-se abaixo de 0,25% (MATLOCK, 2009). Na tabela 2 são mostrados os percentuais destes elementos em alguns dos aços ARBL mais utilizados comercialmente.

TABELA 2 – COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS AÇOS ARBL

Grau	C máx	Mn máx	Si máx	P máx	S máx	Al máx	Nb máx	V máx	Ti máx	Mo máx	B máx
LNE200	0,12	0,6	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE230	0,12	0,8	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE260	0,16	1	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE280	0,16	1	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE380	0,12	1,2	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE400	0,15	1,4	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE420	0,12	1,6	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE460	0,12	1,6	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE500	0,12	1,7	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE550	0,12	1,9	0,35	0,025	0,012	0,012	0,12	0,12	0,2	-	-
LNE600	0,15	1,9	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	0,5	0,005
LNE700	0,18	2,1	0,55	0,03	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	0,5	0,005

FONTE: Adaptado NBR6656 (2008).

Para Chiaverini (2005) o principal elemento de liga que constitui os aços é o Carbono (C), o qual é responsável direto pelo acréscimo de resistência e dureza, e queda da ductilidade. O Manganês (Mn) é responsável pela diminuição das temperaturas de transformação e endurecimento por solução sólida proporcionando uma combinação de dureza, resistência mecânica e ductilidade. O Silício (Si) é capaz de aumentar a resistência mecânica e, assim como o Alumínio (Al), possui função desoxidante. Para Kou (2003), elementos como o Nióbio (Nb), Vanádio (V) e Titânio (Ti) contribuem para o refino de grão e para o endurecimento por precipitação, promovendo um elevado refino de grão ferrítico e precipitação de carbonetos, carbonitretos e/ou nitretos na ferrita.

2.2. AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA - AHSS

O aço avançado de alta resistência da marca sueca SSAB™ utilizado neste trabalho será referenciado como AHSS 700. Trata-se de um aço estrutural que possui uma tensão de escoamento mínima entre 650 e 700 MPa. Na tabela 3 são apresentadas as propriedades mecânicas em função da espessura da chapa (SSAB, 2024). Por sua vez, na tabela 4 é exibida a análise em cadinho da composição química fornecida pelo fabricante. A partir desta é possível inferir que o AHSS 700 não pode ser caracterizado como baixa liga, pois, de acordo com Matlock (2009), aços microligados possuem teores de carbono não superiores a 0,25% e elementos de liga que somados não ultrapassam os 2%. Ainda na tabela 4 é importante mencionar que os elementos químicos presentes que estão assinalados com “*”

são elementos de ligas colocados intencionalmente. Trata-se um aço que apresenta grãos refinados (SSAB, 2024).

Segundo Mazur e Ulewicz (2017), esse aço é fabricado através de laminação a quente, onde os processos de aquecimento, laminação e resfriamento são cuidadosamente supervisionados. Prochenka et al. (2018) afirma que, por causa de sua favorável razão entre resistência e deformação, o aço pode ser sujeito à conformação a frio, permitindo a fabricação de elementos estruturais leves caracterizados por uma grande resistência mecânica.

TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AHSS 700

Espessura (mm)	Tensão de Escoamento (mín. MPa)
4,0 - 53,0	700
53,1 - 100,0	650
100,1 - 160,0	650

FONTE: Adaptado SSAB (2024).

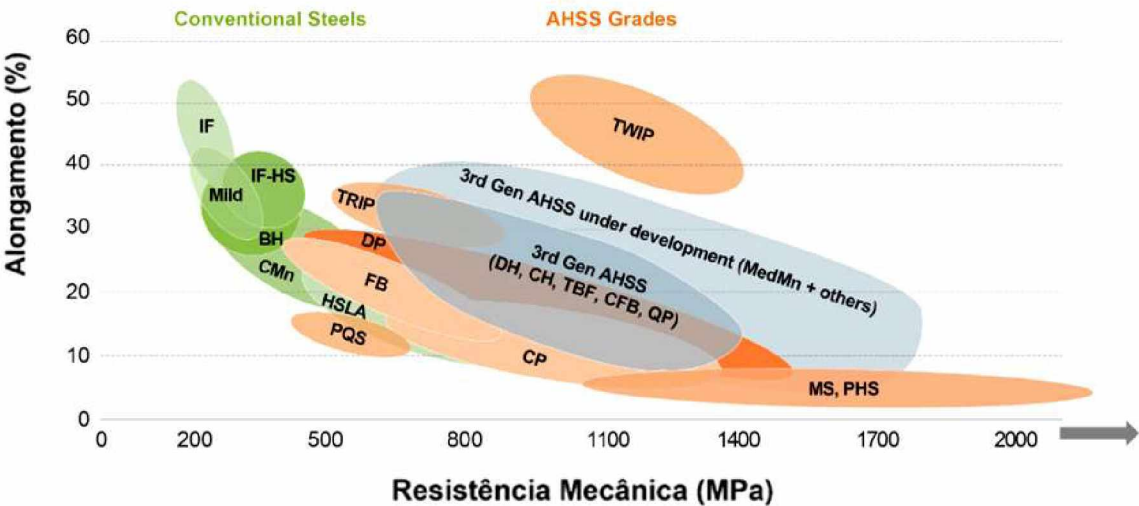
TABELA 4 – COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DO AÇO AHSS 700

C *) (máx %)	Si *) (máx %)	Mn *) (máx %)	P (máx %)	S (máx %)	Cr *) (máx %)	Cu *) (máx %)	Ni *) (máx %)	Mo *) (máx %)	B *) (máx %)
0,2	0,6	1,6	0,02	0,01	0,8	0,3	2	0,7	0,005

FONTE: Adaptado SSAB (2024).

A Figura 1 apresenta o Diagrama Global de Formabilidade, no qual se observa a posição do aço AHSS 700 (AHSS) e do aço ARBL380 (HSLA), ambos empregados neste estudo.

FIGURA 1 – DIAGRAMA GLOBAL DE FORMABILIDADE



FONTE: Adaptado WorldAutoSteel (2025).

2.3. SOLDAGEM

Para a *American Welding Society* (AWS) a soldagem pode ser definida como um processo de união de materiais usada para obter a coalescência localizada de metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e(ou) material de adição.

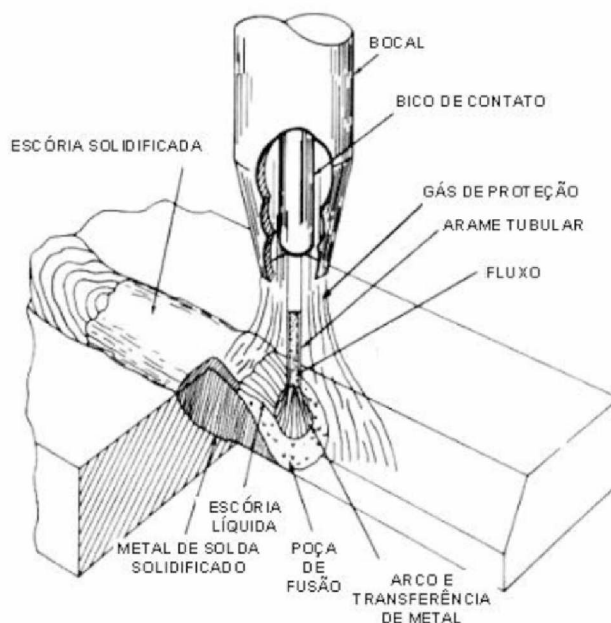
Na soldagem estão envolvidos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração no resfriamento, que irão definir o desempenho da junta soldada (ESAB, 2024).

2.3.1. Processo de Soldagem por Arame Tubular (FCAW)

O processo de soldagem FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) consiste em uma soldagem a arco que utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal (arame de solda) e a poça de fusão. Esse processo utiliza, em alguns casos, uma fonte externa de gás como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo e em alguns casos o próprio fluxo contido no arame tubular é suficiente para realizar esta proteção (FORTES, 2004).

O processo de soldagem funciona com corrente contínua, normalmente com o arame no pólo positivo (Figura 2). Essa configuração é conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada por causa da transferência deficiente do metal fundido do arame de solda para a peça (ESAB, 2024). Fortes (2004) ressalta também que a soldagem por meio de arame maciço ou tubular utiliza dos mesmos equipamentos, com raras exceções. De acordo com Gomes (2006), o aumento na utilização do processo de soldagem FCAW está relacionado às vantagens que ele proporciona, como a obtenção de soldas com boa qualidade metalúrgica, aspecto visual uniforme dos cordões e estabilidade do arco elétrico durante a operação.

FIGURA 2 – PROCESSO DE SOLDA FCAW



FONTE: FORTES (2004).

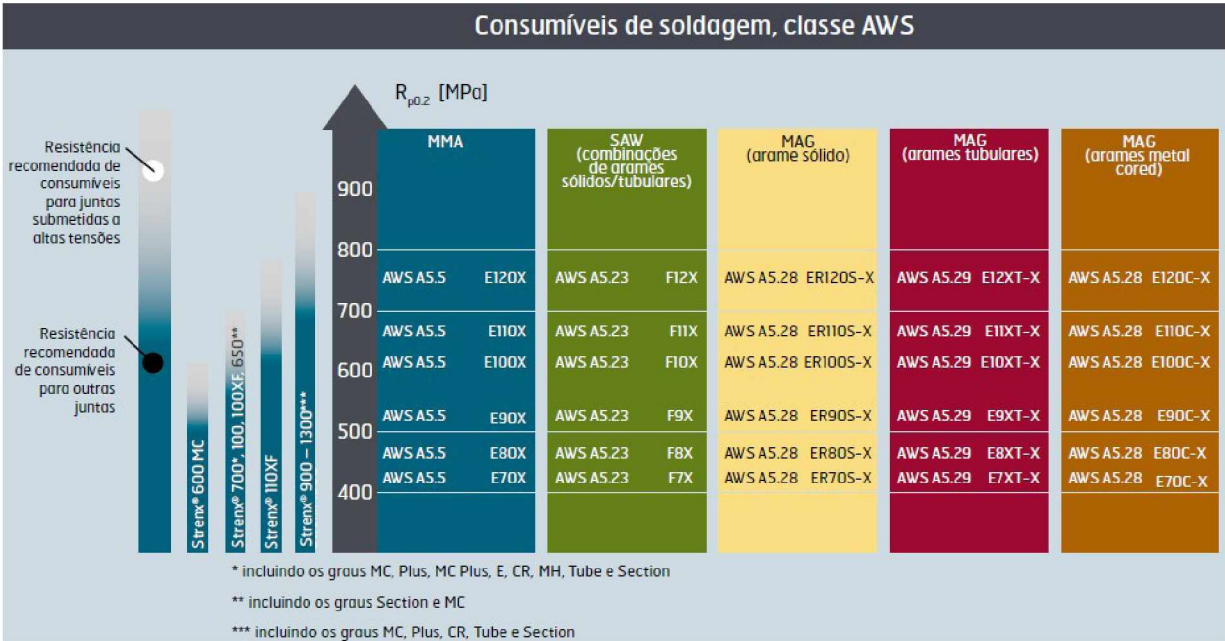
2.3.2. Soldabilidade

A soldabilidade é definida pela *American Welding Society* (AWS, 2010) como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”.

2.3.3. Metal de Adição

O consumível utilizado na fabricação dos chassis para plataformas de colheita de grãos é o arame tubular (AWS 5.36E71T1) com diâmetro de 1,2 mm. Trata-se de um dos mais utilizados nas indústrias metalúrgicas por possuir uma boa penetração e operar em todas as posições de soldagem (SSAB, 2024). É importante ressaltar que possui propriedades mecânicas inferiores à do aço AHSS 700 - como é mostrado na figura 3. Nela também estão relacionados os consumíveis, suas propriedades mecânicas e o uso combinado aos aços AHSS.

FIGURA 3 – CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM



FONTE: ADAPTADO SSAB (2024).

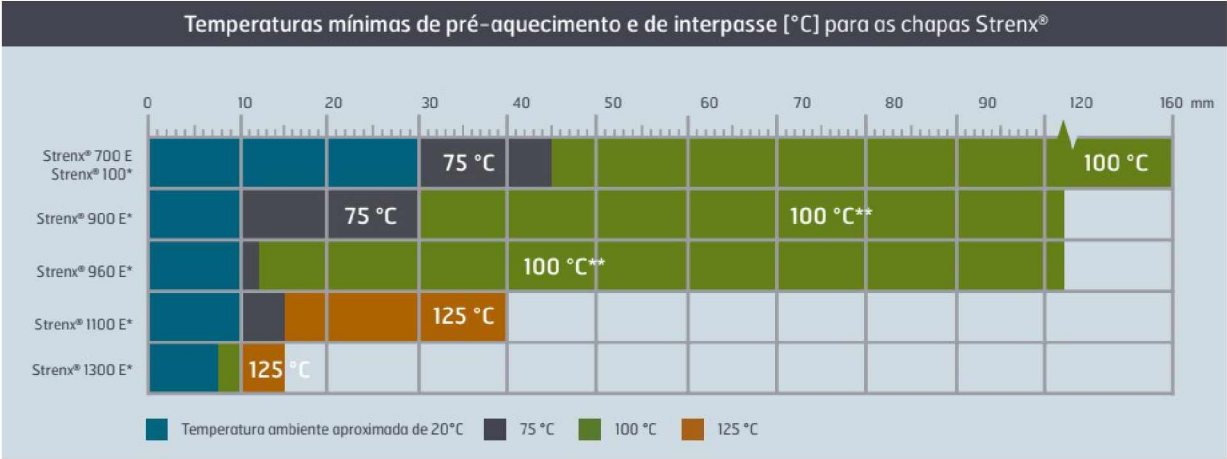
2.3.4. Temperatura de Pré-Aquecimento– AHSS

Durante o processo de soldagem o calor gerado pelo arco elétrico na poça de fusão é transferido para o metal base. Essa transferência ocorre de forma bastante rápida devido à boa condutividade térmica do aço. Além disso, a significativa diferença de temperatura entre o metal base e a poça de fusão faz com que haja um resfriamento rápido na junta soldada. Tal resfriamento acelerado pode comprometer as propriedades mecânicas desta junta. No caso dos aços ao carbono, uma taxa elevada de resfriamento pode promover a formação de fases duras e de baixa tenacidade (ESAB, 2024).

Para Fortes e Araújo (2005) o pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. O teor de carbono ou de elementos de liga existente no material de base e espessura do material são alguns dos fatores que influenciam no pré-aquecimento.

Por conta destes diversos fatores que afetam a necessidade ou não de pré-aquecimento, a SSAB (2024) divulgou a figura 4 que correlaciona alguns aços AHSS com a espessura e temperaturas mínimas de soldagem e de inter passe.

FIGURA 4 – PRÉ-AQUECIMENTO DE SOLDAGEM



FONTE: ADAPTADO SSAB (2024).

2.4. COMPACTAÇÃO DO SOLO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

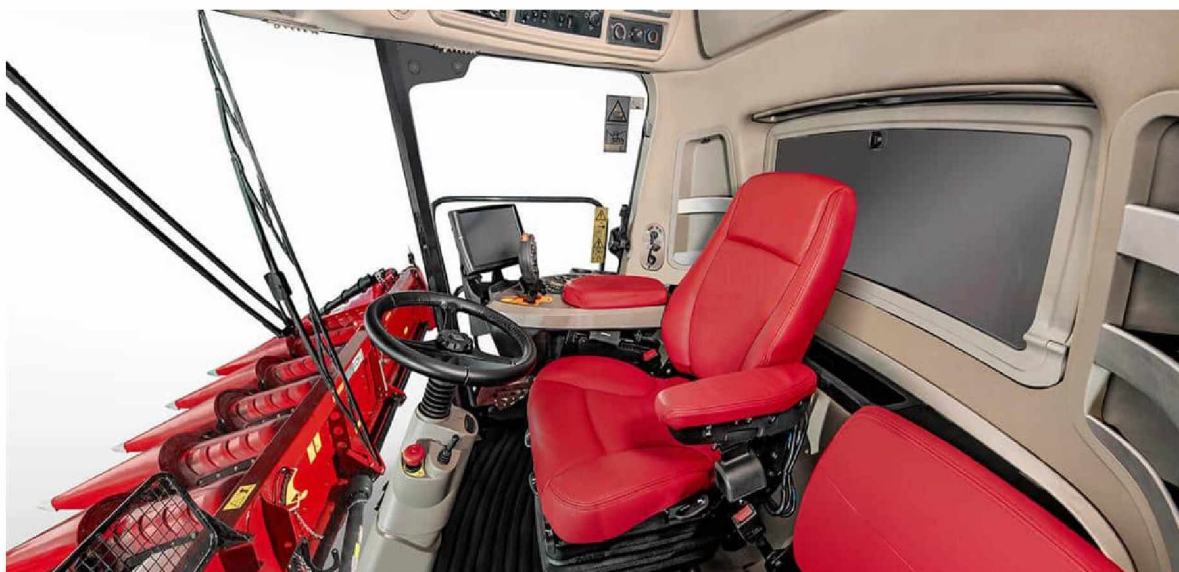
A oferta limitada de recursos como o petróleo e a ameaça cada vez mais presente de mudanças climáticas radicais provenientes do efeito estufa deixam evidente a necessidade de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Na área de veículos tal necessidade pode ser alcançada, por exemplo, trabalhando na redução de peso dos veículos. Isso pode ser obtido pelo uso de aços especiais mais leves, mas com maior ou igual nível de resistência mecânica do que os convencionais. Essa necessidade se torna ainda mais presente em função da crescente incorporação de itens de conforto e segurança nos veículos, que por sua vez tende a anular parte da redução de peso conseguida pelos novos materiais. Essa situação forçou as usinas siderúrgicas a aperfeiçoarem cada vez mais seus produtos, incluindo o desenvolvimento de novos aços com combinações inéditas de microestruturas que resultam em propriedades mecânicas mais favoráveis à manufatura e ao desempenho sob serviço, com redução de peso e baixo impacto no custo final (GORNI, 2007).

De acordo com Carpenedo (2014), a crescente demanda por alimentos tem levado as empresas do ramo agrícola a desenvolverem equipamentos cada vez mais sofisticados e produtivos, o que inevitavelmente acarreta um aumento de tamanho e capacidade de armazenamento de grãos ou insumos. Isso implica no

desenvolvimento de materiais que supram as necessidades mecânicas, mas que ao mesmo tempo tragam benefícios tanto para o consumo de combustível do produto quanto para sua manufaturabilidade. Segundo Gorni (2010) neste cenário, os aços de alta resistência entram como uma das alternativas a esta necessidade de eficiência energética. Sendo assim, "a busca por maior resistência visa permitir a redução da espessura dos componentes automotivos sem sacrifício de sua resistência mecânica".

Carpeneo (2014) destaca que a visão de que máquinas agrícolas possuem habitáculo rústico e grosseiro é ultrapassada e equivocada, pois a maioria das máquinas hoje possui cabines com recursos tecnológicos e de conforto que somente podem ser encontrados em automóveis de luxo e, em alguns casos, nem a indústria automobilística utiliza tais recursos. Recursos como piloto automático, navegação controlada por georreferenciamento, controle total dos implementos e da máquina em si, tudo à mão do operador, além de itens de conforto que afetam desde o assento do operador até a climatização do habitáculo, são itens que já fazem parte das configurações básicas de algumas máquinas. Na figura 5 é ilustrado o nível de equipamentos e conforto encontrado em uma colheitadeira de grãos atual.

FIGURA 5 – INTERIOR CABINE COLHEITADEIRA DE ÚLTIMA GERAÇÃO

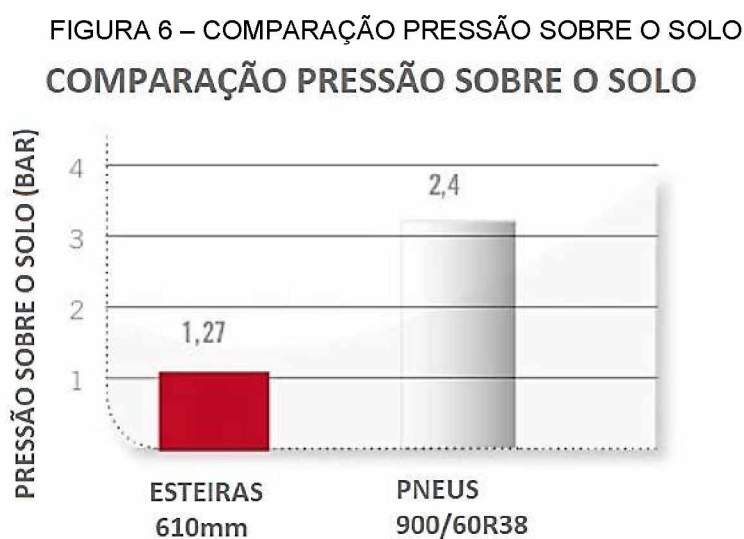


FONTE: CASEIH (2024).

Todo esse aumento de tecnologia, capacidade produtiva e de armazenagem acaba impactando profundamente em um aumento de peso e consequente aumento na possibilidade de haver compactação do solo.

Segundo Hamza e Anderson (2005), compactação é o processo pelo qual as partículas do solo e agregados são reorganizados, resultando na alteração de suas formas e tamanhos. Esse rearranjo leva à redução do espaço poroso e ao aumento da densidade. A compactação é geralmente causada pela intervenção humana inadequada no manejo do solo, utilizando máquinas e implementos de forma inadequada. Silva (2000) ressalta que há diversas pesquisas conduzidas no campo da compactação do solo, dado que isso impacta diversas características fisiológicas da cultura, como o crescimento e a evolução das raízes, além de elevar o consumo de combustível durante o processo de cultivo.

De acordo com Camargo (1983), diversas estratégias podem ser adotadas para prevenir a compactação do solo. Evitar o tráfego ou cultivo do solo em condições de umidade excessiva. Controlar o tráfego de tratores e equipamentos agrícolas, estabelecendo caminhos ou vias de deslocamento na lavoura, é uma prática eficaz para reduzir a compactação. A escolha de pneus mais largos, com baixa pressão, rodados duplos ou esteiras pode ajudar a distribuir melhor o peso e reduzir a pressão sobre o solo. Além disso, utilizar implementos adequados para cada tarefa é fundamental para evitar compactações desnecessárias. Essas medidas, quando combinadas, contribuem para preservar a estrutura do solo e promover condições ideais para o crescimento da cultura. Na figura 6 é mostrada a diferença de pressão exercida sobre o solo entre pneu convencional e esteira.



FONTE: Adaptado de CASEIH (2024).

2.5. NÍVEIS DE EMISSÕES DE POLUENTES

De acordo com Silva (2014), a poluição atmosférica surge quando ocorre uma alteração na composição ou nas propriedades do ar, resultando em uma condição que o torna inadequado ou prejudicial para a saúde humana, a vida animal e vegetal. Segundo Borillo (2015), a grande parcela dessas emissões é originária da queima de combustíveis fósseis em veículos automotores.

A determinação da qualidade do ar é regida por dois tipos de padrões: primários e secundários. Os poluentes primários são liberados diretamente na atmosfera, enquanto os poluentes secundários são formados na atmosfera por meio de reações químicas induzidas pela presença de substâncias químicas e condições físicas (LEMOS, 2010). No caso dos poluentes relacionados aos veículos automotores, estes são considerados primários quando as substâncias são emitidas diretamente pelo veículo e secundários quando se formam através de reações químicas a partir de poluentes primários. Os principais poluentes da emissão direta incluem monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), aldeídos (CHO), compostos de chumbo (Pb), compostos orgânicos voláteis (COVs) e material particulado (BORILLO, 2015).

Neste contexto, o PROCONVE MAR – I, seguindo as orientações definidas pela Resolução CONAMA nº 433/2011, determina os limites máximos de emissão de poluentes para os motores do ciclo diesel destinados a máquinas agrícolas e rodoviárias novas, tanto de fabricação nacional quanto estrangeira (IBAMA, 2011).

A partir de janeiro de 2015, entrou em vigor no Brasil o programa PROCONVE MAR-I (Máquinas Agrícolas e Rodoviárias - I) para controlar as emissões de poluentes (IBAMA, 2011). Por meio desta regulamentação, o Brasil tornou-se o primeiro país da América Latina a implementar um controle de emissões de poluentes para equipamentos pesados, alinhando-se aos padrões adotados nos Estados Unidos (Tier III) e na Europa (Stage IIIA). Os parâmetros de controle estabelecidos pelo programa são segmentados em classes de veículos, considerando seu Peso Bruto Total (PBT). Isso resulta em diferentes métodos de medição das emissões e, conseqüentemente, em limites distintos para cada classe (BORILLO, 2015). A implementação da fase MAR – I ocorreu de forma escalonada, como pode ser visto na Figura7.

FIGURA 7 – CRONOGRAMA MAR-1

Ano	Máquinas de construção
2015	Novos modelos introduzidos/lançados no mercado de potência igual ou superior a 37 kW (50 cv) até 560 kW (761 cv)
2017	Todos os modelos com potência igual ou superior a 19 kW (25 cv) até 560 kW (761 cv)

Ano	Máquinas agrícolas
2017	Todos os modelos com potência igual ou superior a 75 kW (101 cv) até 560 kW (761 cv)
2019	Todos os modelos com potência igual ou superior a 19 kW (25 cv) até 75 kW (101 cv)

FONTE: Adaptado de ANFAVEA (2016).

A partir de 1º de janeiro de 2017, conforme indicado na tabela 5, todos os motores do ciclo diesel destinados a máquinas rodoviárias em produção, tanto nacionais quanto importadas, assim como para as máquinas agrícolas identificadas pelo código Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM), devem cumprir os limites máximos de poluentes (IBAMA, 2011).

TABELA 5 – LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO PARA MÁQUINAS AGRÍCOLAS E RODOVIÁRIAS

Faixa de Potência (P em kW)	CO (g/kWh)	HC + NOx (g/kWh)	MP (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	3,5	4	0,2
$75 \leq P \leq 130$	5	4	0,3
$37 \leq P \leq 75$	5	4,7	0,4
$19 \leq P \leq 37$	5,5	7,5	0,6

FONTE: Adaptado IBAMA (2011).

Um ponto de bastante relevância do uso de aços AHSS é a questão ambiental, pois o fabricante deve comercializá-lo, já no ano de 2026, a partir de um processo de fabricação que não envolve combustíveis fósseis nem emissões de CO₂ (SSAB, 2024). Na fabricação do aço tradicional, a principal fonte de emissões de CO₂ vem do uso de carvão e coque para remover oxigênio do minério de ferro. A substituição por um processo de redução direta usando hidrogênio, o carvão é completamente removido da reação (SSAB, 2021).

2.6. FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS COLHEITADEIRAS

O princípio de funcionamento de uma colheitadeira de grãos é recolher o produto da lavoura e processá-lo, sendo o resultado final o grão limpo livre de sua proteção natural. Essas máquinas são classificadas de acordo com sua produtividade e capacidade, sendo diferenciadas por classes que vão desde a classe 1, que representa máquinas muito pequenas até as classes 10 ou 11, que representam máquinas de grande produtividade e tamanho (CARPENEDO, 2014). Na figura 8 é mostrada a primeira colheitadeira combinada fabricada no Brasil (trata-se de uma colheitadeira de classe 1) e na figura 9 é apresentada uma colheitadeira de classe 11 fabricada pela New Holland na Bélgica.

FIGURA 8 – PRIMEIRA COLHEITADEIRA SLC65-A



FONTE: OLIVEIRA (2015).

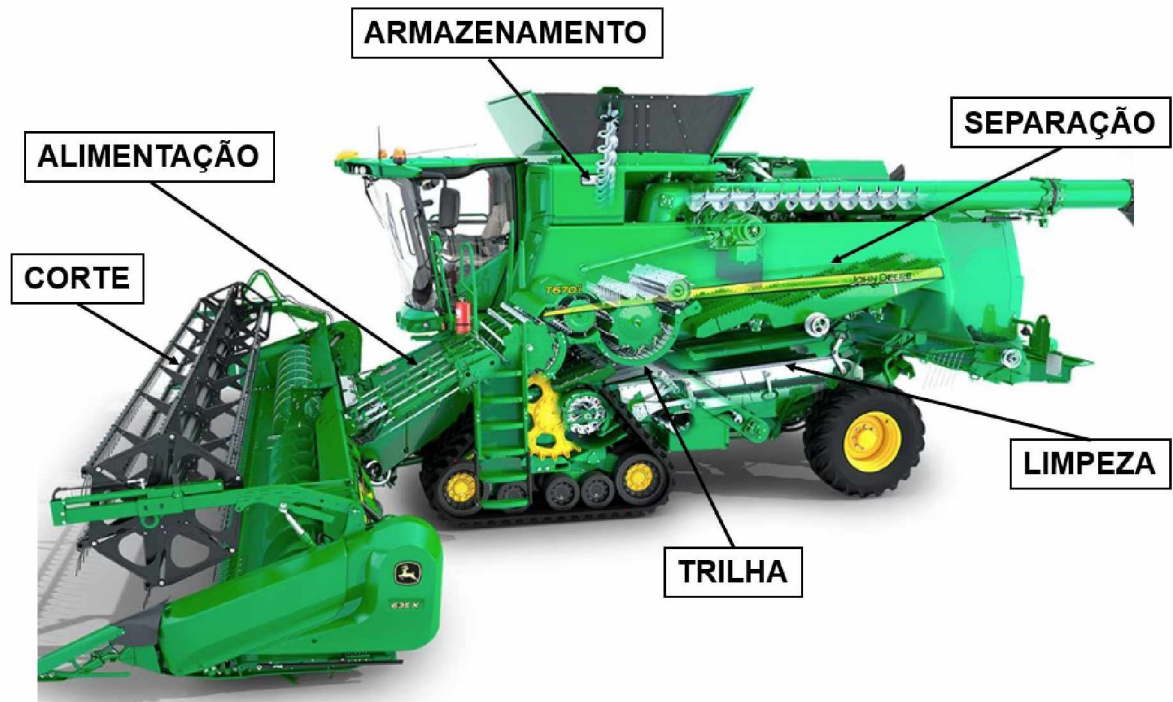
FIGURA 9 – COLHEITADEIRA CLASSE 11



FONTE: NEW HOLLAND / DIVULGAÇÃO (2023).

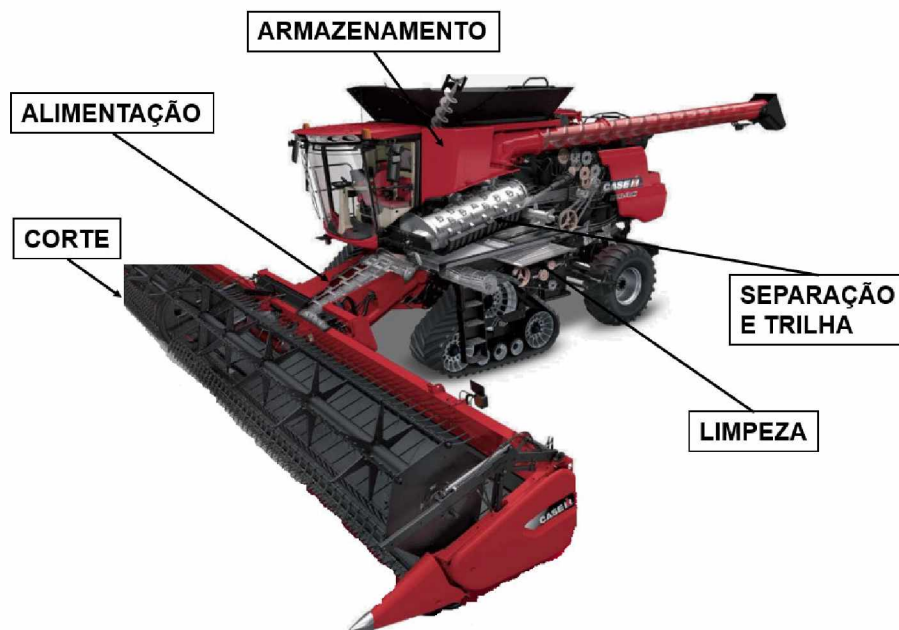
Para Quick e Buchele (1978) a colheitadeira pode ser compreendida por meio dos sistemas que a compõem, os quais incluem: o corte (ou despiga), a alimentação, a trilha, a separação, a limpeza e o transporte e armazenamento dos grãos. O sistema de corte é responsável por separar as plantas do solo na altura desejada, enquanto o sistema de alimentação prepara as plantas para a trilha. A trilha é onde ocorre a separação dos grãos das espigas, podendo adotar dois principais formatos: fluxo radial e fluxo axial. Na etapa de separação, os grãos são separados das espigas e de outros resíduos vegetais, seguida pela limpeza para remover impurezas como palha, folhas e detritos. Por fim, os grãos limpos são transportados e armazenados em um reservatório na própria colhedora. Estes sistemas podem ser observados nas figuras 10 e 11, sendo que a máquina da figura 10 apresenta trilha radial e a da figura 11 trilha axial.

FIGURA 10 – SISTEMAS DE PROCESSAMENTO COLHEITADEIRA CONVENCIONAL



FONTE: ADAPTADO JOHN DEERE (2024).

FIGURA 11 – SISTEMAS DE PROCESSAMENTO COLHEITADEIRA AXIAL



FONTE: ADAPTADO CASEIH (2024).

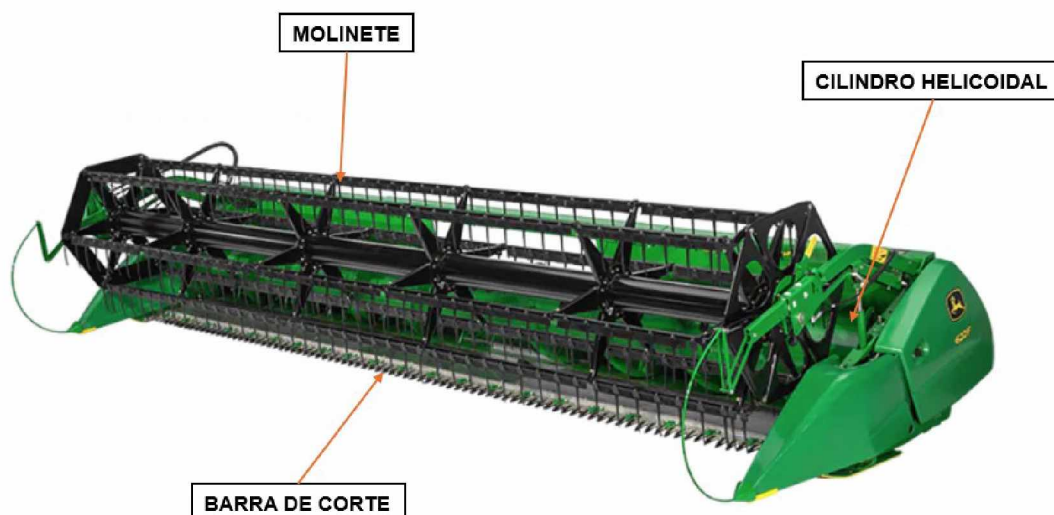
Quick e Buchele (1978) ressaltam que a diferença no sistema de trilha da máquina levou ao surgimento de duas grandes famílias de colhedoras combinadas no mercado atual, sistema de fluxo radial e axial.

A primeira etapa da colheita engloba o sistema de corte e o de alimentação que se complementam, sendo o primeiro responsável pelo recolhimento dos grãos e estão associados à plataforma.

Carpenedo (2014) divide as plataformas em dois grupos: as usadas para colher grãos na forma de vagens como a soja, por exemplo, e as usadas para grãos em espigas (milho) ou cabeças (girassol). Para o primeiro grupo é utilizada uma plataforma onde o molinete direciona a planta para um conjunto de facas e contra-facas cortando os caules e posteriormente conduzindo-os para o centro da plataforma pelo movimento de um cilindro helicoidal, ou por correias transportadoras (*drapers*). Este tipo de plataforma e suas estruturas é mostrado na figura 12.

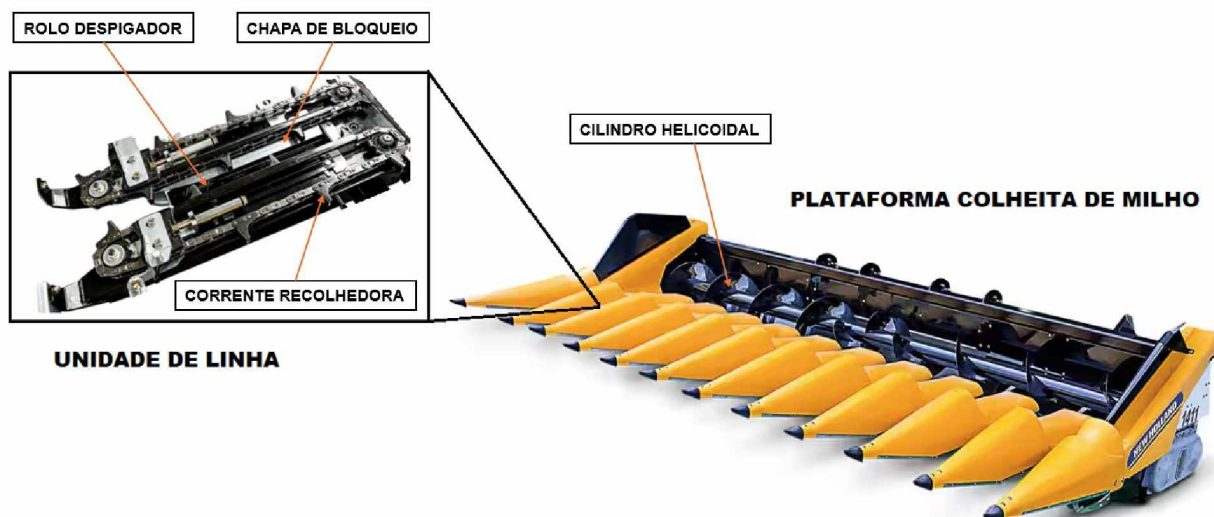
Para grãos como milho é utilizada uma plataforma que promove o destacamento da estrutura onde estão os grãos. Ela é composta por unidades de linhas que conduzem o caule até o seu centro e um conjunto de rolos o puxam para baixo, fazendo com que a espiga fique retida por uma chapa de restrição na parte superior da linha de destacamento. Esta, após ser destacada, é levada para o centro da plataforma por um cilindro helicoidal e conduzida ao sistema de trilha. Na figura 13 é exemplificada uma plataforma para colheita de milho.

FIGURA 12 – PLATAFORMA PARA COLHEITA DE GRÃOS POR CORTE



FONTE: ADAPTADO JOHN DEERE (2024).

FIGURA 13 – PLATAFORMA PARA COLHEITA DE GRÃOS POR DESTACAMENTO



FONTE: ADAPTADO NEW HOLLAND (2024).

Quick e Buchele (1978) explicam que o elevador de palhas é parte integrante da máquina e é onde a plataforma é acoplada à colheitadeira por meio de um engate rápido. O elevador é responsável por direcionar o produto para o sistema de trilha.

O material colhido vindo do canal alimentador é direcionado para o cilindro de trilha que realiza o processo de trilha, separando os grãos das partes da planta em que estão envolvidos (MORAES, 2005). O sistema de separação divide o fluxo na máquina em grão com palha, que segue para o sistema de limpeza e a palha é direcionada para a parte traseira da máquina. Na trilha de fluxo axial, a separação ocorre entre o rotor e o cilindro separador, enquanto na trilha de fluxo radial, a trilha é separada do sistema de separação e é composta pelo saca-palhas (Quick e Buchele, 1978).

Após o último processo de desagregação entre os grãos e a palha, a massa resultante é direcionada para o sistema de limpeza, composto pelas peneiras, que realizam a limpeza final do produto através de movimentos alternativos, auxiliados por um fluxo de ar fornecido pelo ventilador (CARPENEDO, 2014). Os grãos limpos são coletados e levados por um helicóide transportador até o tanque graneleiro, onde são armazenados temporariamente até serem descarregados.

2.7. ANÁLISE DE SIMILARES

Com o objetivo de comparar as principais vantagens e desvantagens dos modelos de plataformas para colheita de grãos mais relevantes, foi realizada a

análise de similares sincrônica e diacrônica. A sincrônica contando com os principais modelos vendidos atualmente, e a diacrônica com as plataformas que fizeram parte da história do campo no Brasil.

2.7.1. Análise Diacrônica de Similares

Dentre os diversos modelos de plataformas já fabricadas e vendidas no Brasil, foram escolhidos 3 modelos de períodos distintos e que de alguma forma foram significativas para este segmento no país (figura 14). A primeira trata-se da BM 5 uma plataforma do fabricante New Holland que ficou conhecido em sua época pela robustez e simplicidade do projeto. O segundo escolhido trata-se de uma plataforma do fabricante GTS que se destacou por empregar alumínio na construção dos chassis deste período. Por fim, o fabricante Vence Tudo que iniciou um novo segmento de equipamentos extremamente baratos e simples para atender ao público de propriedades com áreas de cultivo menores.

FIGURA 14 – MODELOS DE PLATAFORMAS PARA ANÁLISE DIACRÔNICA



FONTE: GTS (2024), TRATORES E COLHEITADEIRAS (2024) E VENCE TUDO (2024).

2.7.2. Análise Sincrônica de Similares

Esta foi utilizada com o intuito de conhecer as opções disponíveis no mercado atualmente, analisar possíveis concorrentes, opções diversas entre as mais habituais e também as pouco aplicáveis, a fim de enriquecer o acesso às informações durante o projeto do produto proposto.

O mercado brasileiro de plataformas agrícolas oferece diversas opções de modelos. Atualmente, apenas entre os quatro maiores fabricantes, estão disponíveis cerca de doze plataformas diferentes e suas variações, além de diversas opções de chassi para cada um. Para a análise sincrônica de similares foram selecionados 4 modelos de 4 fabricantes diferentes (figura 15). A matéria prima utilizada na fabricação dos chassis não foi adicionada à figura 15, porque todos os fabricantes já utilizam aços estruturais (ARBL). A exceção fica por conta do fabricante B que oferece construção em alumínio também para plataformas maiores.

FIGURA 15 – ANÁLISE SINCRÔNICA DE SIMILARES

CARACTERÍSTICA	FABRICANTE A	FABRICANTE B	FABRICANTE C	FABRICANTE D
CARENAGENS	Perfil baixo e alongado com chapa anti desgaste	Perfil alto e curto sem chapa anti desgaste	Perfil baixo e curto sem chapa anti desgaste	Perfil baixo e curto sem chapa anti desgaste
PONTEIRAS	Ferro fundido	Aluminio	Chapa soldada	Aluminio
SEM-FIM	Helicoide transportador alto e com piso em inox	Helicoide transportador baixo e com piso em inox	Helicoide transportador baixo e com piso pintado	Helicoide transportador baixo e com piso pintado
TRANSMISSÃO LATERAL	Tampa de Proteção em aluminio com lubrificação por graxa EP2	Tampa de Proteção em aluminio com lubrificação por óleo	Tampa de proteção em plastico com lubrificação por graxa	Tampa de proteção em plastico com lubrificação por gotejamento de óleo
ROLOS PUXADORES	Corpo único em ferro fundido com 6 aletas do tipo flutuante	Corpo dividido em 2 duas partes, sendo uma em aluminio e a outra em ferro fundido. Possui 6 aletas e é do tipo flutuante	Corpo dividido em 2 duas partes, sendo uma em aluminio e a outra em chapa de aço. Possui 6 aletas e é do tipo mancalizado	Corpo dividido em 2 duas partes, sendo uma em aluminio e a outra em ferro fundido. Possui 6 aletas e é do tipo mancalizado
UNIDADES DE LINHA	Caixa em ferro fundido com lubrificação por graxa	Caixa em ferro fundido com lubrificação por graxa	Caixa em ferro fundido com lubrificação por oleo	Caixa em aluminio com lubrificação por oleo
SISTEMA DE PROTEÇÃO	Limitador de torque individual de pinos radiais	Limitador de torque individual de pinos radiais	Limitador de torque geral com molas.	Limitador de torque geral com molas.
MANCAIS	Mancais dos rolamentos dos acionamentos em ferro fundido	Mancais dos rolamentos dos acionamentos em chapa de aço	Mancais dos rolamentos dos acionamentos em chapa de aço	Mancais dos rolamentos dos acionamentos em chapa de aço

FONTE: O AUTOR (2024)

Os pontos de interesse, para comparação, listados na figura 15 estão ligados diretamente ao desempenho do equipamento em campo. O design das carenagens plásticas, por exemplo, influencia no desempenho e na alimentação da plataforma,

principalmente em condições mais severas de colheita (cultura acamada ou cultura consorciada). A ponteira por sua vez, além de proteger o bico da carenagem, tem grande importância na estabilidade da carenagem e a mantém em contato com o solo, caso seja necessário colher mais rente ao chão. O sem-fim é responsável por transportar todo o material até o centro da plataforma para que a máquina colheitadeira possa processá-lo. Suas características determinam a capacidade de transporte e o quanto de dano é causado por ele nas espigas destacadas do pé.

A transmissão lateral é responsável por transferir o movimento do cardan, acoplado à colheitadeira, para o restante da plataforma, por isso é de extrema importância a sua robustez (tipo de mancal de rolamento utilizado, sistema de vedação contra poeira e capacidade de dissipação de calor).

Os rolos puxadores operam diretamente em contato com a planta e, algumas vezes, tem contato com material do solo, por esse motivo precisam ter a maior resistência possível juntamente com uma manutenção simples e com menor frequência possível.

As unidades de linhas fazem parte do comparativo devido ao seu alto valor financeiro e por representar um percentual alto do peso total do equipamento. Além disso, algumas plataformas chegam a utilizar 30 conjuntos de unidades de linha, o que significa que em qualquer custo/manutenção tem fator multiplicador de 30. Por isso da grande importância do sistema de proteção por limitadores de torque.

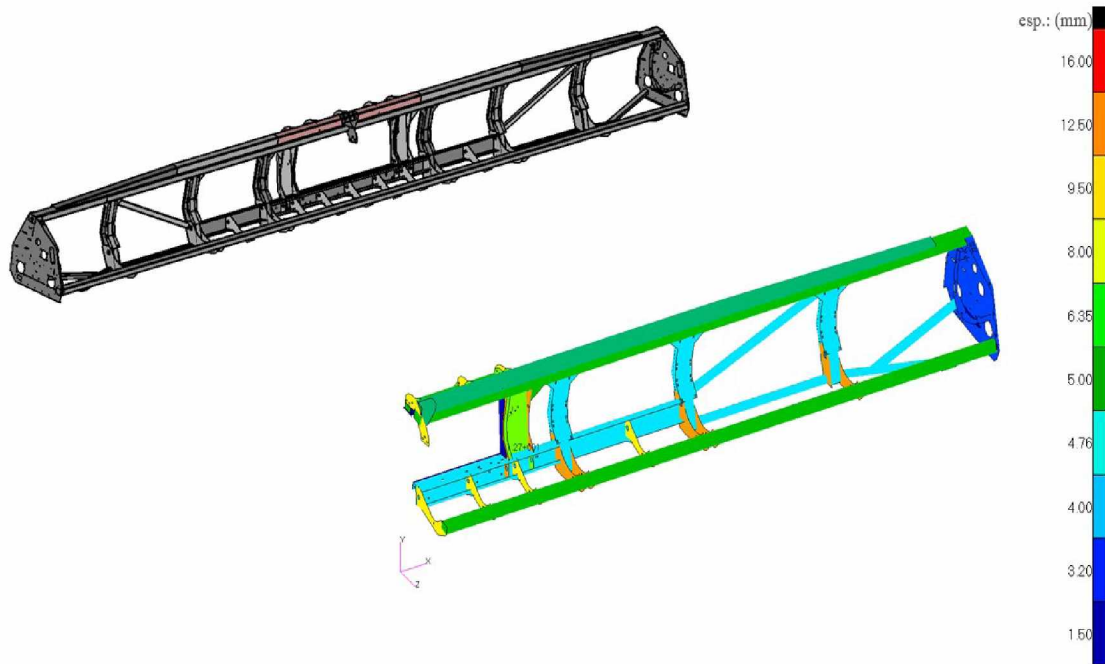
Esses são apenas alguns exemplos de sistemas que poderiam ser explorados em uma análise sincrônica das plataformas agrícolas. Esta análise das plataformas para colher milho envolve examinar as diferentes tecnologias, métodos e sistemas usados na agricultura contemporânea, sem levar em consideração a evolução temporal dessas tecnologias.

2.8. CHASSI DE PLATAFORMA PARA COLHEITA DE MILHO

A escolha do conjunto soldado chassis estudado neste trabalho se deu devido às características como o dimensional, função e tipo de esforços mecânicos a que é submetido. É um elemento que possibilitou a verificação da eficácia na redução de peso devido aos esforços que suporta durante o funcionamento e deslocamento

da máquina colheitadeira. A figura 16 ilustra o chassi, bem como as espessuras de chapas utilizadas no modelo produzido atualmente.

FIGURA 16 – CONJUNTO SOLDADO CHASSI PLATAFORMA DE MILHO

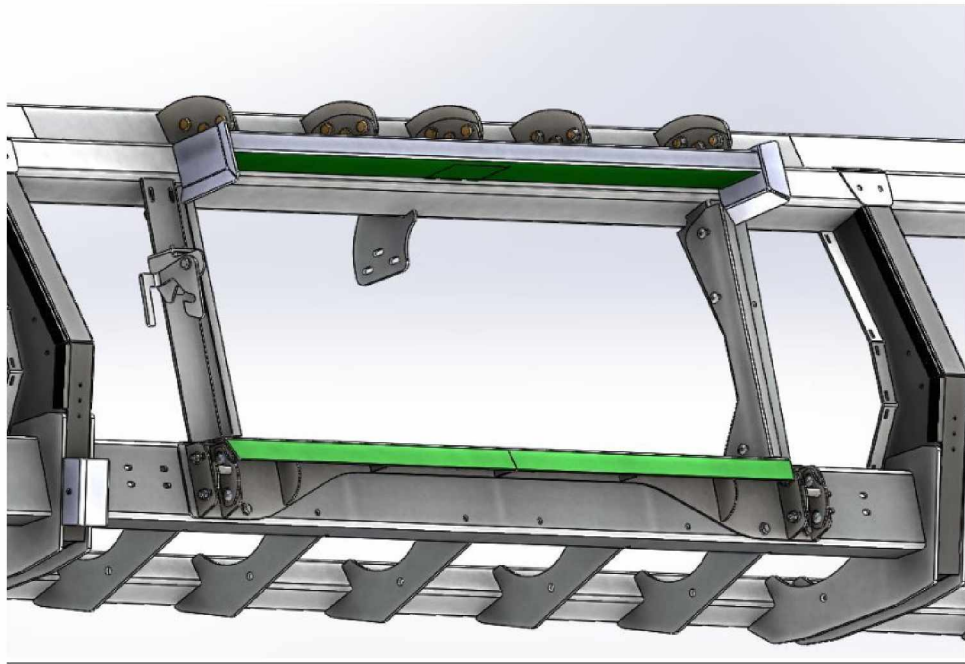


FONTE: O AUTOR (2024).

A primeira etapa para o dimensionamento do chassi foi o levantamento das forças atuantes sobre ele. Para se obter estas cargas foi tomada como base a situação mais crítica conhecida, ou seja, o transporte de uma plataforma composta por 26 linhas, com espaçamento de 45 centímetros e pesando cerca de 5800 kg. A imagem 17 demonstra as áreas (destacadas na cor verde) sobre as quais fica apoiado todo o peso da plataforma no canal alimentador.

Durante o transporte ela está sujeita às cargas de seu próprio peso somadas às cargas resultantes de acelerações como a de passar em um buraco ou depressão, por exemplo. Para encontrar estas últimas foram colocados acelerômetros e coletados dados ao operar com a plataforma combinada a colheitadeira em uma pista de testes simulando as condições mais críticas possíveis.

FIGURA 17 – SUPERFÍCIES DE CONTATO ENTRE A PLATAFORMA E O CANAL ALIMENTADOR



FONTE: O AUTOR (2024).

2.9. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

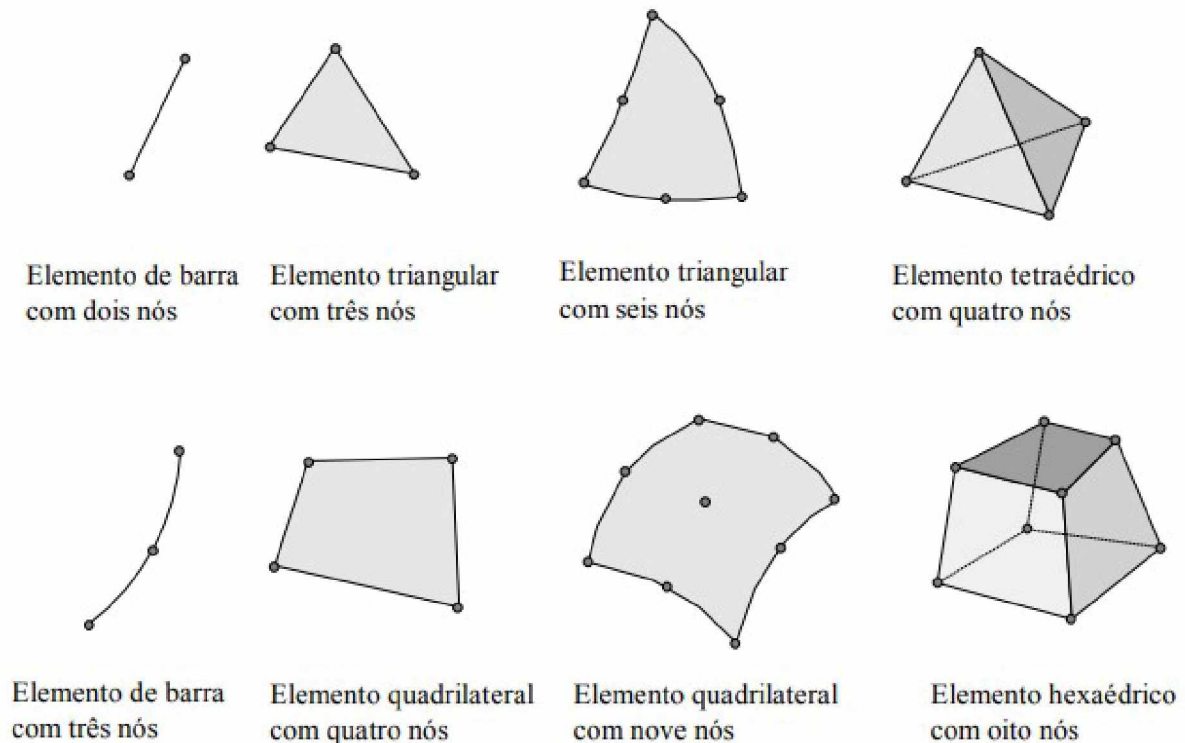
Avelino Filho (2013) destaca que o Método dos Elementos Finitos (MEF) possui uma aplicação bastante ampla na engenharia, pois pode produzir resultados satisfatórios por meio da aproximação do cálculo de tensão, deslocamento e deformação estrutural.

Para Molina (2010) diversos problemas das áreas de engenharia, física e matemática aplicada podem ser resolvidos com o uso do método dos elementos finitos, pois ele é um método numérico que faz uma aproximação algébrica para solucionar as equações diferenciais (ordinárias e parciais).

De forma geral, de acordo com Alves (2007), pode-se afirmar que o princípio básico do MEF é subdividir o domínio a ser analisado (contínuo) em subdomínios de dimensões finitas, chamados elementos, que são conectados entre si em pontos chamados nós. Cada elemento possui as mesmas propriedades de um meio contínuo e é analisado separadamente. A combinação dos seus resultados é usada para obter um resultado de domínio global.

Souza (2003) explica o conceito do MEF de forma mais direta e simplificada ao afirmar que o objetivo é dividir o domínio, ou seja, dividir um volume, uma peça em diversas partes, criando assim sub-regiões com geometrias simples. Estas podem conter formato de triângulo, quadriláteros, cúbicos, entre tantas outras assim como mostra a figura 18.

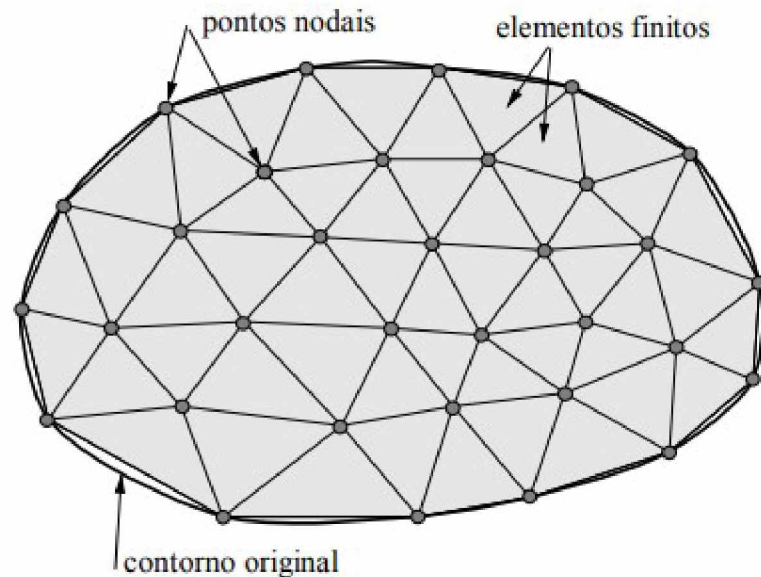
FIGURA 18 – DIFERENTES TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS



FONTE: SOUZA (2003).

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós, conforme ilustra a figura 19. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha de elementos finitos. Souza (2003) ainda ressalta que na engenharia é bastante comum usar a ideia de resolver problemas complexos subdividindo-o em diversos problemas mais simples de modo que se obtenha a solução do todo.

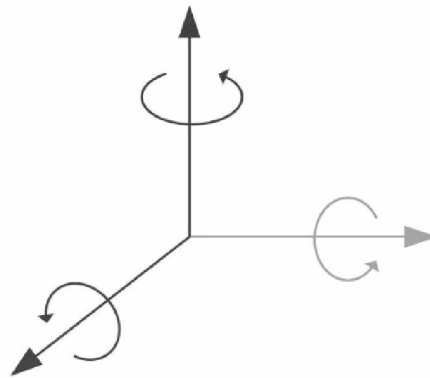
FIGURA 19 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS



FONTE: SOUZA (2003).

Ainda para Souza (2003) a ideia dos graus de liberdade em problemas de MEF tem origem nos problemas de mecânica. A figura 20 ilustra de forma genérica um corpo rígido e seus 6 possíveis graus de liberdade, sendo estes 3 possíveis de movimento de translação e 3 possíveis de movimento de rotação. Em problemas de análise de tensões, os graus de liberdade dos nós correspondem aos possíveis movimentos que estes podem sofrer. Quando se trabalha com problemas de condução de calor, potencial elétrico ou até pressão sonora nos quais não se estuda o movimento de partículas, acaba-se por utilizar o termo “grau de liberdade” para se referir à incógnita principal do problema.

FIGURA 20 – GRAUS DE LIBERDADE DE UM CORPOS RÍGIDO



FONTE: O AUTOR (2024).

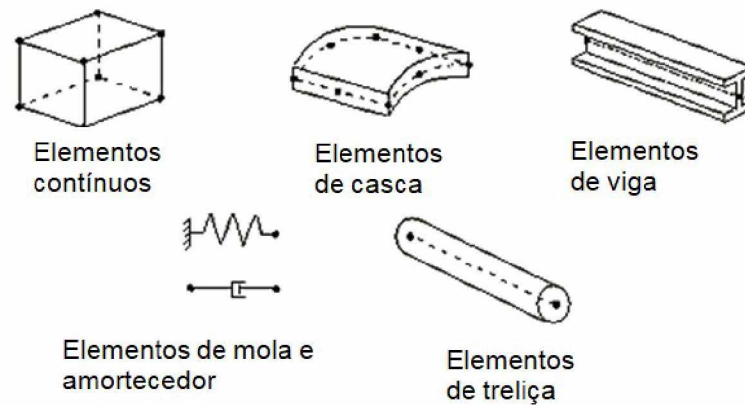
2.10. PROGRAMA ABAQUS®

ABAQUS, Manual do Usuário (2006) traz como cada elemento finito é caracterizado. Esta não foi modificada no software lançando em 2019 quando comparado ao 2006. Cada elemento recebe um nome único, o qual é caracterizado por: família; graus de liberdade; número de nós; formulação e integração.

A família do elemento depende da geometria e do comportamento físico do elemento dentro da análise. As principais famílias estão ilustradas pela figura 21 e são:

- Elementos contínuos (*ContinuumElements*): Modelam sólidos tridimensionais e bidimensionais (exemplo: C3D8, CAX4).
- Elementos de casca (*Shell Elements*): Usados para estruturas finas onde uma dimensão é muito menor que as outras (exemplo: S4).
- Elementos de viga (*Beam Elements*): Representam estruturas esbeltas que suportam carga axial, flexão e torção (exemplo: B31).
- Elementos de treliça (*Truss Elements*): Modelam estruturas compostas de barras conectadas por articulações (exemplo: T3D2).
- Elementos de mola e amortecedor (*Spring and Dashpot Elements*): Representam comportamentos elásticos e viscosos em conexões estruturais.

FIGURA 21 – FAMÍLIAS ELEMENTOS FINITOS ABAQUS



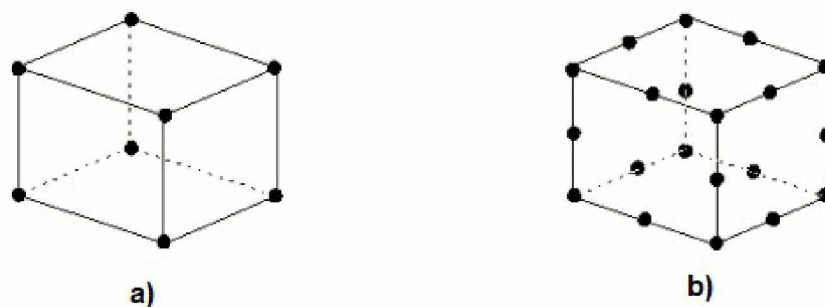
FONTE: ADAPTADO ABAQUS (2006).

Para análises estruturais, os principais graus de liberdade são a translação nas direções x , y e z , além da rotação em torno dos eixos x , y e z . Para outras análises, podem ser incluídos graus de liberdade adicionais, como temperatura em análises térmicas, potencial elétrico em análises eletromagnéticas, pressão sonora em análises acústicas, etc. O tipo de análise e a família do elemento determinam quais graus de liberdade serão utilizados (ABAQUS, 2006).

Os deslocamentos, rotações e outras variáveis são calculados nos nós do elemento, e, em qualquer outro ponto do elemento, os valores são obtidos por interpolação a partir dos nós. Os elementos podem ser classificados em lineares, quando são de primeira ordem, possuem nós apenas nos vértices e utilizam interpolação linear. Ao passo que são considerados quadráticos, quando são de segunda ordem, possuem nós adicionais nas faces e utilizam interpolação quadrática.

A figura 22.a mostra um elemento linear com 8 nós (C3D8) e a figura 22.b um quadrático com 20 nós (C3D20) (ABAQUS, 2006).

FIGURA 22 – NÚMERO DE NÓS ELEMENTO FINITO



FONTE: ADAPTADO ABAQUS (2006).

A formulação do elemento define o modelo matemático usado para calcular a resposta estrutural. O ABAQUS utiliza várias formulações, dependendo do tipo de análise. As mais comuns incluem a formulação Lagrangiana, na qual os nós do elemento permanecem fixos no material conforme ele se deforma; a formulação Euleriana, onde os nós do elemento permanecem fixos no espaço enquanto o material se move através da malha; e a formulação Arbitrária de Euler-Lagrange (ALE), que é uma abordagem híbrida, permitindo que a malha se mova independentemente do material.

O ABAQUS utiliza métodos numéricos para integrar equações dentro de cada elemento. A técnica mais comum é a quadratura de Gauss, usada para calcular as tensões e forças internas. Alguns elementos utilizam integração reduzida, identificada pela letra "R" no nome do elemento, como o CAX4R. A integração reduzida pode melhorar a eficiência computacional, mas também pode introduzir instabilidades (VERÍSSIMO, 2006).

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1. REQUISITOS DO PROJETO

A elaboração do projeto do novo chassi teve como premissa a redução de peso. O redimensionamento do novo conjunto soldado do chassi foi realizado com base no conjunto atualmente fabricado, sendo que algumas dimensões internas, externas e os pontos de montagem dos componentes foram mantidos em suas posições e dimensões originais. O objetivo desta consideração foi manter as configurações dos componentes envolvidos na montagem do conjunto final e também o local onde este é acoplado à colheitadeira.

A definição do conjunto a ser estudado se deu em função das solicitações aplicadas sobre a estrutura, bem como o potencial de redução de peso devido aos materiais atualmente utilizados. O material alvo do estudo foi selecionado devido à sua disponibilidade no mercado nacional e às suas propriedades mecânicas desejáveis.

3.2. ENSAIOS MECÂNICOS

Com o projeto conceitual estrutural definido, ensaios mecânicos foram necessários para verificar o comportamento dos materiais a serem utilizados, combinados com os processos de fabricação empregados na construção e união dos componentes. Neste trabalho foram realizados ensaios de tração, metalografia e microdureza.

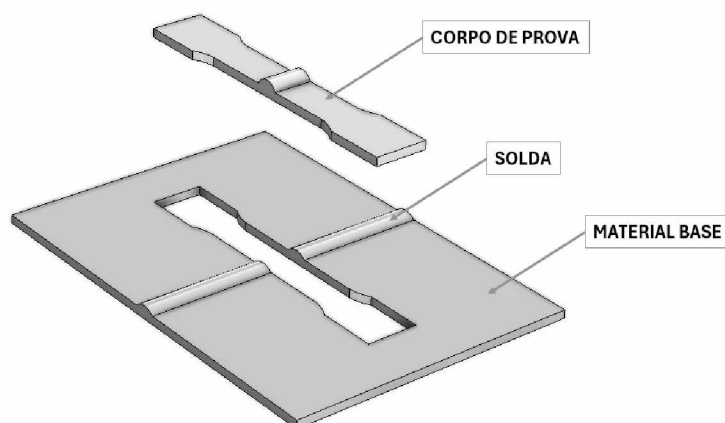
Cabe destacar, contudo, que não foi o foco deste trabalho realizar uma análise aprofundada dos materiais. Não se pretendeu, portanto, estudar detalhadamente as fases e os microconstituintes resultantes dos processos de fabricação. Os ensaios propostos tiveram como finalidade principal acompanhar o comportamento dos aços utilizados, a fim de verificar se os resultados obtidos estão coerentes com os normalmente encontrados na literatura. Dessa forma, buscou-se apenas garantir que não ocorram fragilizações inesperadas, que possam comprometer a integridade do material além do previsto.

3.2.1. Ensaio de tração

Para avaliar a qualidade dos materiais utilizados na fabricação dos protótipos e garantir sua integridade, foram realizados ensaios de tração por meio de uma Máquina Universal de Ensaio EMIC modelo DL100T. Este equipamento se encontra em laboratório de análise de materiais na cidade de Joinville – SC. Esses testes serviram de base para garantir a resistência dos materiais sob carga e identificar possíveis falhas estruturais.

Os ensaios seguiram a norma NBR 6673 de 1981, que define os procedimentos para ensaios de tração em corpos de prova. Foram utilizados 2 corpos de prova tanto com união por solda (com reforço removido), conforme especificado pela norma AWS D1.1 de 2010, quanto corpos de prova do material base, ou seja, sem solda. Na figura 23 é apresentado esquematicamente um corpo de prova retirado contendo a área soldada.

FIGURA 23 – CORPO DE PROVA DE ÁREA COM SOLDA



FONTE: O AUTOR (2024).

Após a preparação dos corpos de prova e a realização dos ensaios de tração, os resultados foram analisados comparativamente. Foram avaliados os valores de limite de escoamento e de resistência à tração entre os corpos de prova com solda e os sem solda. Essa comparação permitiu determinar o impacto da soldagem na resistência mecânica dos materiais.

Os materiais selecionados para os ensaios incluíram o aço NBR 6656 – LNE380 (utilizado atualmente) e o AHSS 700 (proposta para redução de massa).

3.2.2. Metalografia

O ensaio metalográfico foi utilizado para avaliar a macroestrutura e microestrutura dos aços LNE380 e AHSS700 e a correlação com o processo de fabricação e o desempenho do material.

No ensaio macrográfico, foi feita a observação com baixa ampliação (até 50X) da superfície do corpo de prova previamente polido e atacado pelo reagente Nital 3,5%. A partir dessa análise, foi possível obter uma visão geral da homogeneidade do material, da distribuição e natureza de falhas, impurezas, processo de fabricação e qualidade de soldagem. A macrografia proporcionou uma visão ampla e geral da estrutura do material, permitindo uma avaliação inicial de sua qualidade.

Já no ensaio micrográfico foi realizada a análise da microestrutura dos aços com auxílio de um microscópio. Essa abordagem permitiu uma observação das diferentes fases presentes no material, a identificação da granulação e a avaliação das inclusões.

3.2.3. Microdureza

Foi realizado o ensaio de microdureza em um Laboratório de Materiais localizado na cidade de Joinville-SC por meio de Durômetro Vickers ESEWAY, modelo SPLV-3P, com penetrador de diamante e carga de 10 kg. O objetivo foi analisar a influência da solda nos aços NBR6656 LNE380 e AHSS700. Com isso foi possível avaliar de forma detalhada como o processo de soldagem afetou a microestrutura e, conseqüentemente, a dureza do material soldado. A partir dos valores de dureza obtidos na superfície dos corpos de prova, foi possível identificar variações na microdureza entre a zona afetada pelo calor, o cordão de solda e o material base. Essa análise foi fundamental para entender a integridade e a performance do material após a soldagem.

3.3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos consistiu em uma etapa base no desenvolvimento do projeto do novo chassi, pois a partir dela foram feitas as avaliações de distribuição de tensões, verificando a necessidade de adicionar ou remover material dos elementos estruturais do conjunto.

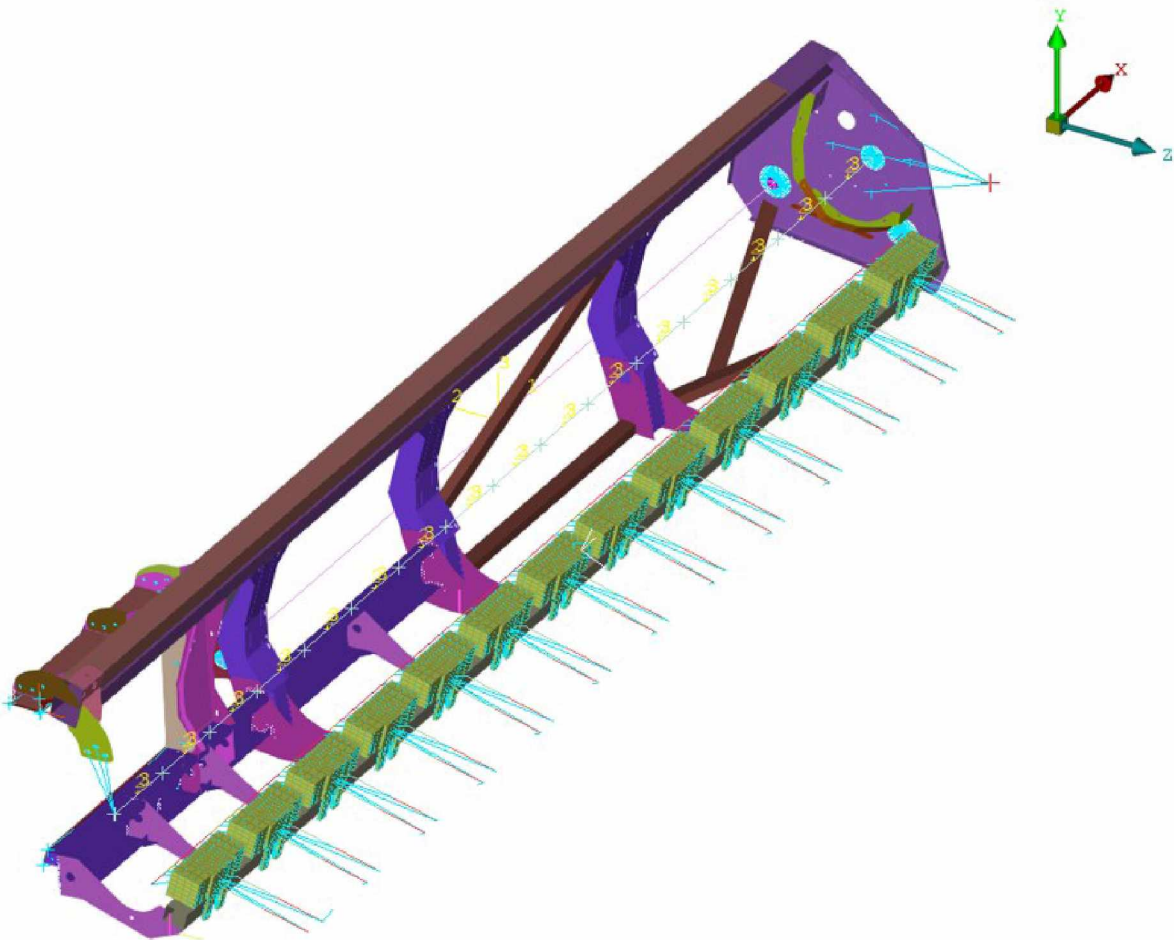
Inicialmente o modelo utilizado no projeto atual foi verificado e foi feita a conversão desse modelo da ferramenta Nastran® para Abaqus®. Após a conversão do modelo, foi realizada uma análise de referência, denominada "Análise Baseline", que serviu como ponto de partida para avaliar quaisquer mudanças subsequentes. Em seguida, foram propostas alterações no modelo, incluindo a redução de espessura e a mudança de matéria-prima, e foi conduzida uma análise para verificar o impacto dessas alterações.

As simulações foram realizadas utilizando análise estática gravitacional. A análise estática gravitacional foi útil para avaliar a distribuição de tensões e deformações sob carga.

Os carregamentos aplicados para o ensaio foram definidos em função do peso da plataforma de grãos acrescido de um coeficiente de segurança definido a partir de medições feito em campo das acelerações a que o conjunto é submetido durante o deslocamento da colheitadeira. Esta aquisição de dados foi feita por meio de acelerômetros colocados em uma plataforma de modelo similar ao mencionado neste estudo. Para a preparação do modelo matemático para a análise de FEA (*Finite Elements Analysis*) foi considerando que em todas as interfaces entre os componentes do conjunto não havia nenhum grau de liberdade, ou seja, todos os componentes estavam fixados uns aos outros, configurando um conjunto rigidamente soldado. Foi utilizada uma malha (figura 24) com as seguintes características:

- Elementos: primeira ordem (lineares) compostos por trias (2D), quads (2D) e hexaedro (3D);
- Famílias: Solid, shell e beans;
- Nomes dos elementos presentes: C3D4, S3 e S4
- Tamanho médio dos elementos de 10mm;
- Número total de elementos: 134000.

FIGURA 24 – MALHA GERADA NO CHASSI



FONTE: O AUTOR (2024).

3.4. CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS PARA VALIDAÇÃO

Após todas as verificações em relação aos materiais e processos de fabricação utilizados, a fabricação de chassis foi realizada com a finalidade de verificar na prática os estudos teóricos realizados. A plataforma para colheita de milho foi submetida ao uso em condições normais de trabalho em campo com o objetivo de analisar a interação mecânica entre todos os seus componentes soldados e montados no chassi.

A solda dos protótipos foi realizada pela empresa seguindo os mesmos processos utilizados nos produtos em linha atualmente. Ajustes foram feitos apenas nos locais de solda em que houve redução de espessura dos componentes. Os ferramentais de solda puderam ser usados sem alterações, pois dimensões de referência e posicionamento foram preservadas sem modificação.

A avaliação em campo foi escolhida devido à dificuldade de simular em laboratório, com precisão, o uso do equipamento durante a colheita. Esta dificuldade se deve principalmente porque as cargas aplicadas em uma plataforma para colheita de grãos podem variar dependendo de vários fatores, incluindo o tipo de grão sendo colhido, o tamanho da plataforma, as condições do terreno e a capacidade da máquina colhedora.

Algumas das principais cargas que o chassi da plataforma para colheita de grãos suporta envolve o peso dos grãos e da palhada durante a colheita em plena capacidade da máquina. Além disso, os dispositivos de destacamento da espiga de milho do seu caule, na frente da plataforma, precisam exercer uma força considerável para separar os grãos da planta. A operação em terrenos irregulares e a presença de detritos como pedras e galhos podem causar desgaste e impacto na plataforma e nos seus componentes. O movimento da plataforma durante a colheita, bem como a vibração das máquinas colhedoras, pode exercer cargas dinâmicas nos componentes da plataforma. Dependendo do tipo de cultivo e do estágio de maturação, pode haver resistência adicional ao movimento da plataforma devido à densidade e resistência dos talos das plantas. Manobrar a plataforma em curvas ou terrenos íngremes pode criar cargas adicionais na estrutura também.

Portanto, a fim de obter uma compreensão mais precisa do desempenho dos protótipos, optou-se por conduzir os testes em condições reais. Isso permitiu uma avaliação mais abrangente do comportamento dos materiais empregados e de sua resistência durante o uso prático. Ao final desta avaliação em campo, foi realizada uma inspeção visual detalhada para identificar possíveis falhas, como trincas, deformações e desgastes por exemplo.

3.5. AVALIAÇÃO DE CUSTOS

É natural que materiais como o AHSS 700, reconhecido por suas propriedades mecânicas superiores, tenham um custo unitário mais elevado devido à tecnologia avançada empregada em sua fabricação e à composição química refinada, em comparação com aços como o NBR 6656 LNE380. No entanto, ao optar pelo

AHSS 700, há a possibilidade de reduzir a quantidade de material necessário para a produção de componentes, além do valor agregado ao produto devido à sua resistência e durabilidade superiores.

A avaliação detalhada dos custos em geral não se limita apenas à quantidade de material utilizado em um projeto, mas abrange todos os recursos envolvidos no processo de desenvolvimento e fabricação. Uma análise abrangente dos custos pode considerar não apenas o preço do material em si, mas também todos os custos associados ao ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento até o descarte. Essa análise inclui custos de energia, custos de mão de obra, custos de equipamentos, custos de manutenção, custos de qualidade e até mesmo custos indiretos, como os impactos ambientais.

Neste estudo, porém, foram considerados apenas os gastos associados às quantidades de aço e consumíveis de solda utilizados, já que estes elementos representam a maior parte dos custos envolvidos em um conjunto soldado do chassi. Os custos relacionados à quantidade de aço incluem os tempos de corte, dobra e preparação para cada etapa do processo. Por outro lado, os custos relacionados à quantidade de consumíveis de solda abrangem os gastos com arame de solda, gases de proteção e tempo de operação de solda.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

As simulações foram realizadas com base em dados de entrada como o material, as massas do conjunto e as forças que agem sobre ele. A tabela 6 mostra as propriedades dos materiais utilizados, ao passo que na tabela 7 está a massa do conjunto e também as coordenadas do seu centro de gravidade.

TABELA 6 – PROPRIEDADES NBR6656-LNE380 E AHSS 700

Propriedades	LNE380 Baseline	AHSS 700 Update
Densidade [kg/m³]	7850	7850
Módulo de Young [MPa]	210000	210000
Coefficiente de Poisson []	0,3	0,3
Tensão de escoamento [MPa]	380	700

FONTE: O AUTOR (2024)

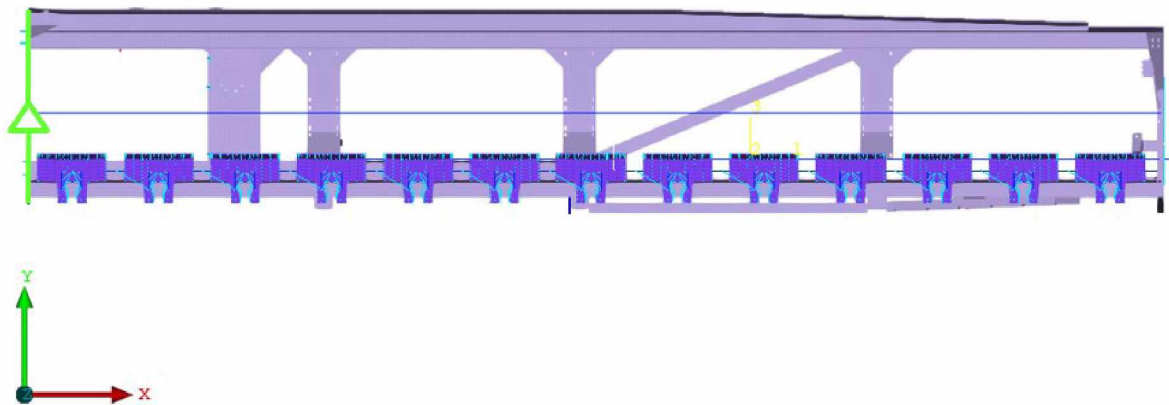
TABELA 7 – MASSA E CENTRO DE GRAVIDADE DA PLATAFORMA

CENTRO DE MASSA - CONDIÇÃO DE MODELAGEM			
MASSA [Kg]	CGx [mm]	CGy [mm]	CGz [mm]
5465,44	0	-605,37	672,82

FONTE: O AUTOR (2024)

A figura 25 mostra que o chassi é perfeitamente simétrico em relação ao plano indicado em verde, cuja seção é perpendicular ao eixo x e localizado no ponto médio do comprimento do chassi.

FIGURA 25 – SIMETRIA CHASSI



FONTE: O AUTOR (2024)

Dentre as forças que agem sobre o conjunto está a gravidade e a aceleração a que ele é submetido durante o transporte e uso em campo. Por isso foram colocados acelerômetros em um equipamento a fim de verificar os picos de aceleração a que ele está sujeito. Desta análise chegou-se a uma aceleração de $8,5 \text{ m/s}^2$ que, quando somado a gravidade, corresponde a uma aceleração total de $18,31 \text{ m/s}^2$.

As análises de aceleração foram conduzidas pelo LATA-UFPR (Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas da Universidade Federal do Paraná). Foram colocados 4 acelerômetros e a plataforma foi utilizada em uma pista de testes, variando-se a velocidade e os obstáculos. Esta pista de testes era em forma de rampa e os dados foram coletados tanto na subida quanto na descida. A situação mais crítica ocorreu ao passar por uma depressão na pista.

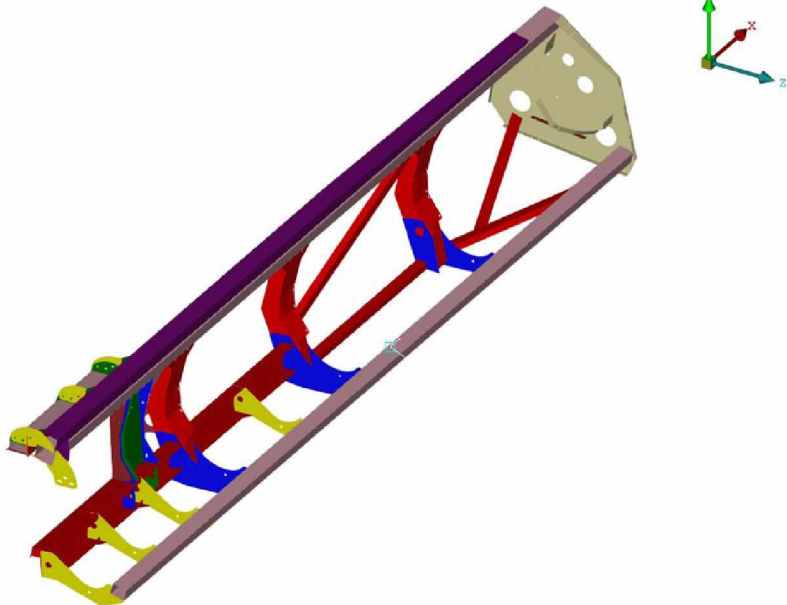
O critério de aprovação utilizado para o teste de rigidez foi o de que o componente deve suportar o carregamento de forma a não resultar em tensões (Von Misses) acima do limite de escoamento do material.

Na figura 26 são mostradas as espessuras utilizadas no projeto inicial, chamado “Baseline”, e as espessuras propostas com redução de espessura.

FIGURA 26 – ESPESSURAS DOS COMPONENTES ATUAIS E PROPOSTOS

Modelo

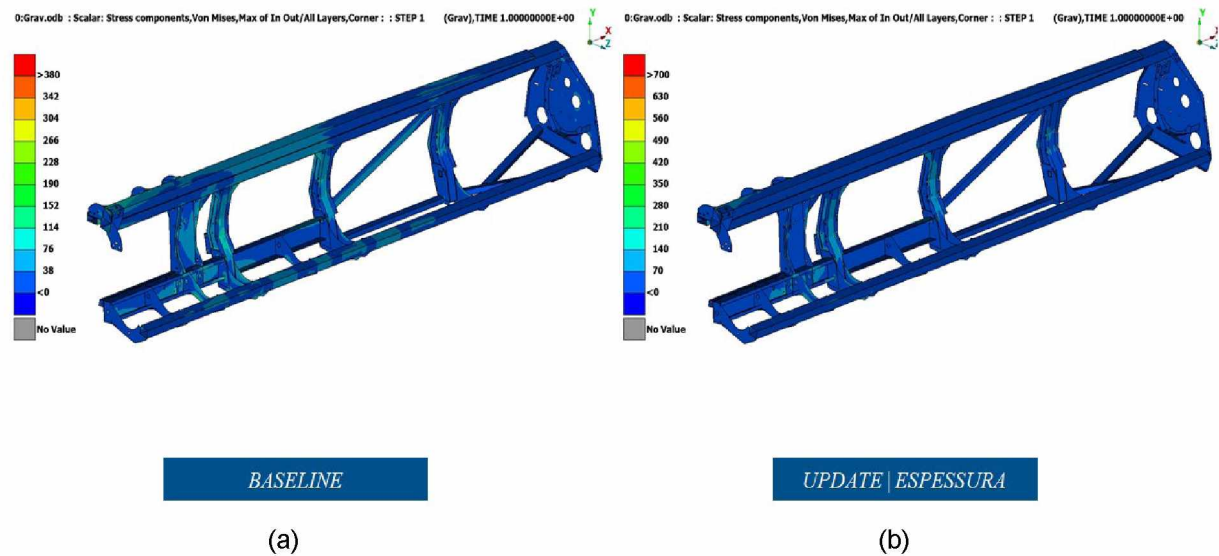
Baseline	Atualização
12,50 mm	→ 09,50 mm
09,50 mm	→ 06,35 mm
08,00 mm	→ 06,35 mm
06,35 mm	→ 04,75 mm
05,00 mm	
04,76 mm	→ 03,00 mm
04,00 mm	
03,20 mm	



FONTE: O AUTOR (2024).

Na figura 27 são mostradas as tensões a que os chassis estão submetidos. São mostrados o chassi com as espessuras originais figura 27 (a) e com as espessuras reduzidas figura 27 (b).

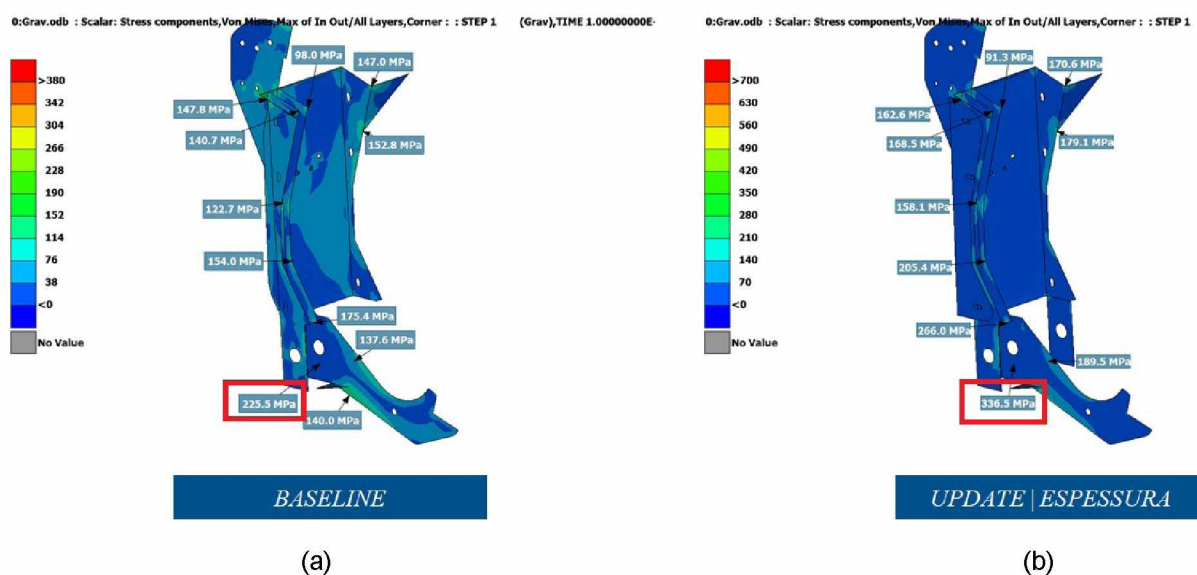
FIGURA 27 – TENSÕES: VON MISSES



FONTE: O AUTOR (2024).

A figura 28 mostra o ponto em que a maior tensão foi encontrada no chassi, sendo esta menor que o limite de escoamento dos materiais utilizados. Foi encontrado 225,5 MPa no chassi com as espessuras originais, figura 28 (a), e 336,5 MPa após redução de espessura no componente, Figura 28 (b).

FIGURA 28 – PONTO DE MAIOR TENSÃO VERIFICADA



FONTE: O AUTOR (2024).

Na figura 29 é mostrado de forma geral as tensões encontradas em diversos pontos da estrutura. Nela estão tanto as tensões encontradas no chassi com espessuras originais quanto as tensões encontradas após a atualização de espessuras e modificação do material LNE-380 para os AHSS 700.

Ainda na figura 29 estão expostos os fatores de segurança para ambas as condições de análise dos chassis. É importante ressaltar que na condição atual o menor fator de segurança encontrado foi de 1,69 (na região central do chassi) e este valor foi modificado para 2,08 no novo projeto.

Além disso, o maior valor de tensão — correspondente ao menor coeficiente de segurança — foi observado no corpo do componente (figura 28), e não nas regiões periféricas onde se localizam as soldas. Essa análise corrobora a ideia de que a redução do peso do chassi recai sobre a seleção do material, e não sobre as regiões soldadas.

Com isso é possível afirmar que os resultados dos casos analisados por elementos finitos indicam que a mudança de material (espessura e propriedades mecânicas) pode ser factível. No entanto, como o comportamento de fadiga não foi

TABELA 8 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRA CORPO DE PROVA

ELEMENTO DE LIGA	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Mo	B
TEOR % OBTIDO AMOSTRA	0,079	0,715	0,017	0,015	0,01	0,035	0,032	0,001	0,001		

FONTE: O AUTOR (2024).

TABELA 9 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO ARBL LNE380 – NORMA

ELEMENTO DE LIGA	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Mo	B
TEOR % MÁXIMO - NBR6656	0,12	1,2	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,2	---	---

FONTE: NBR6656 (2008).

É possível perceber que o teor dos elementos de liga é respeitado com exceção do Al que possui quantidade superior ao permitido pela norma.

A mesma análise comparativa foi realizada com o aço AHSS 700. Na tabela 10 estão apresentados os percentuais dos elementos de liga presentes na amostra do corpo de prova e na tabela 11 estão os valores de referência de acordo com a SSAB.

TABELA 10 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO AHSS AHSS 700 – AMOSTRA CORPO DE PROVA

ELEMENTO DE LIGA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
TEOR % OBTIDO AMOSTRA	0,055	0,036	1,789	0,009	0,007	0,033	0,017	0,02	0,101	0,0008

FONTE: AUTOR (2024).

TABELA 11 – PROPRIEDADES QUÍMICAS AÇO AHSS AHSS 700 – SSAB

ELEMENTO DE LIGA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
TEOR % MÁXIMO - SSAB	0,2	0,6	1,6	0,02	0,01	0,8	0,3	2	0,7	0,005

FONTE: SSAB (2024).

A partir da comparação das tabelas 10 e 11 é válido afirmar que apenas o teor do Mn possui quantidade superior ao estipulado pelo fabricante do aço.

4.2.2. Propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas foi feita pela comparação entre os valores presentes nas normas e os valores obtidos nos corpos de prova dos aços ARBL e AHSS.

Na tabela 12 estão os valores de referência para os limites de tensão de escoamento e de resistência para o aço ARBL LNE380 que constam na norma NBR6656 (2008). A tabela 13 por sua vez apresenta os valores obtidos por meio de ensaio de tração de corpos de prova retirados a partir da matéria prima utilizada nos protótipos. A tensão de escoamento apresentou valores de 453 MPa e 450 MPa para

CP1 e CP2, respectivamente, ambos dentro do intervalo normativo de 380 a 530 MPa. A resistência à tração dos corpos de prova foi de 547 MPa (CP1) e 544 MPa (CP2), também atendendo à faixa especificada de 460 a 600 MPa. O alongamento registrado foi de 32,8% para CP1 e 32,7% para CP2, significativamente superior ao mínimo exigido de 23%. Esses resultados indicam que o material analisado apresenta propriedades mecânicas compatíveis com a NBR6656.

TABELA 12 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – NORMA NBR6656

ESPESSURA (mm)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (min. %)
---	380 A 530	460 A 600	23

FONTE: NBR6656 (2008).

TABELA 13 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	ALONGAMENTO (%)
CP1	453	547	32,8
CP2	450	544	32,7

FONTE: AUTOR (2024).

Na tabela 14 estão os valores de referência para os limites de tensão de escoamento e de resistência para o aço AHSS700 que constam no site de seu fabricante SSAB (2024). A tabela 15 contém os valores obtidos por meio de ensaio de tração de corpos de prova retirados a partir da matéria prima utilizada nos protótipos. Os resultados obtidos mostram que a tensão de escoamento apresentou valores de 838 MPa para CP1 e 823 MPa para CP2, ambos acima do valor mínimo estabelecido de 700 MPa. A resistência à tração foi de 857 MPa para CP1 e 851 MPa para CP2, situando-se dentro do intervalo especificado de 780 a 930 MPa. O alongamento registrado foi de 22,9% para CP1 e 23,4% para CP2, significativamente superior ao mínimo exigido de 14%, o que evidencia uma excelente ductilidade do material. Esses resultados demonstram que o aço analisado atende os requisitos mecânicos estabelecidos pelo fabricante.

TABELA 14 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – SSAB

ESPESSURA (mm)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (mín. MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	ALONGAMENTO (min. %)
4,0 - 53,0	700	780 - 930	14

FONTE: SSAB (2024).

TABELA 15 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	ALONGAMENTO (%)
CP1	838	857	22,9
CP2	823	851	23,4

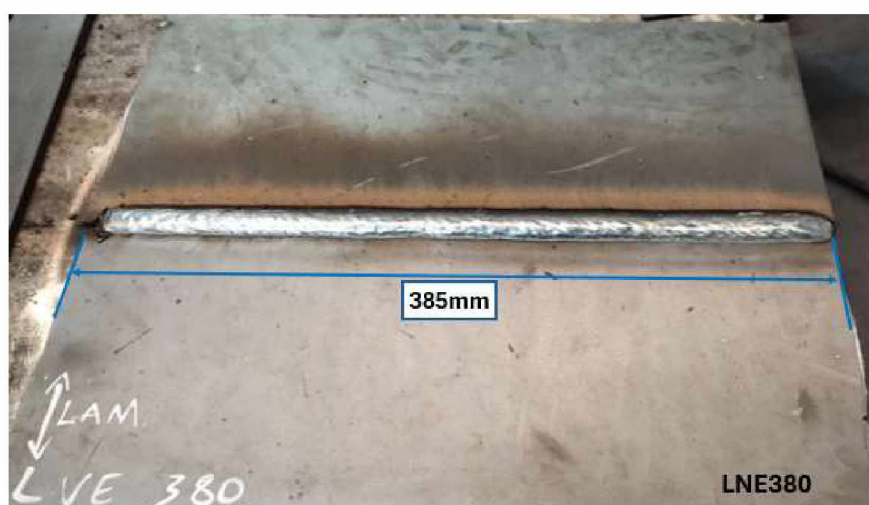
FONTE: AUTOR (2024).

4.3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Após verificar as propriedades dos materiais recebidos, o passo seguinte foi fazer a análise deles após passarem pelo processo de solda. A figura 30 mostra as chapas soldadas de topo do material LNE380 e a figura 31 mostra as chapas soldadas do aço AHSS 700, sendo ambas com espessura de 6,35mm. Os parâmetros de solda foram mantidos os mais próximos possíveis para ambos os materiais. Para o primeiro a tensão aferida foi de 30,8 V, corrente de 232 A e velocidade de deslocamento de 4,05mm/s e para o segundo 30,9 V, 247 A e 3,8mm/s.

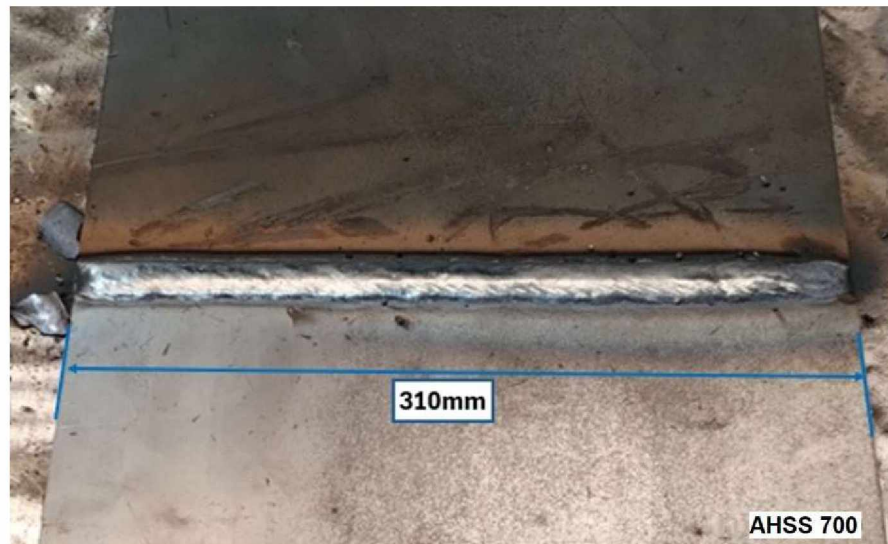
A análise destes corpos de prova consistiu em ensaios de tração, perfil de microdureza na região da solda e metalografia.

FIGURA 30 – CHAPAS SOLDADAS PARA TESTE LNE 380



FONTE: AUTOR (2024).

FIGURA 31 – CHAPAS SOLDADAS PARA TESTE AHSS 700



FONTE: AUTOR (2024).

4.3.1. Propriedades mecânicas após processo de solda

Nas tabelas 16 e 17 são apresentados os valores obtidos a partir do ensaio de tração de dois corpos de prova usinados do aço LNE380 e, AHSS 700, respectivamente.

TABELA 16 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO ARBL LNE380 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA COM SOLDA

CORPO DE PROVA	LIMITE TENSÃO DE ESCOAMENTO (Mpa)	LIMITE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	REGIÃO DE RUPTURA
CP1	447	472	SOLDA
CP2	443	461	SOLDA

FONTE: AUTOR (2024).

TABELA 17 – PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO AHSS 700 – AMOSTRAS CORPOS DE PROVA COM SOLDA

CORPO DE PROVA	LIMITE TENSÃO DE ESCOAMENTO (Mpa)	LIMITE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	REGIÃO DE RUPTURA
CP1	494	498	SOLDA
CP2	558	587	SOLDA

FONTE: AUTOR (2024).

Ao comparar os resultados das Tabelas 13 e 16, observa-se que o limite de tensão de escoamento do aço ARBL LNE380 sofreu uma leve redução, passando de 453 MPa (CP1) e 450 MPa (CP2) para 447 MPa e 443 MPa, respectivamente, nas

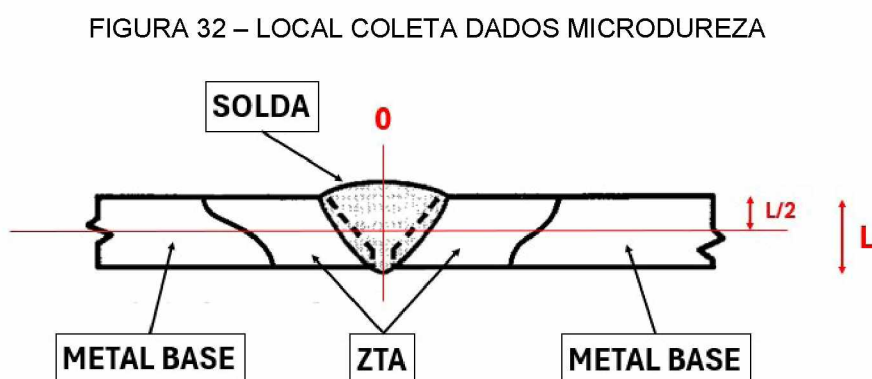
amostras com solda. Por outro lado, a resistência à tração apresentou uma redução mais significativa, passando de 547 MPa (CP1) e 544 MPa (CP2) para 472 MPa e 461 MPa, respectivamente. Essa redução corresponde a aproximadamente 13,7% para CP1 e 15,3% para CP2. Esta pequena redução já era esperada devido à boa soldabilidade dos aços ARBL e também porque o metal de adição utilizado na solda (arame AWS A5.36 – E71T-1) possui limite de resistência a tração que pode variar de 400 a 500 MPa.

Quando se compara as tabelas 15 e 17, observa-se que o limite de tensão de escoamento do aço AHSS 700 sofreu uma redução, passando de 838 MPa (CP1) e 823 MPa (CP2) para 494 MPa e 558 MPa, respectivamente, nas amostras com solda. Por sua vez, a resistência à tração apresentou uma redução similar, passando de 857 MPa (CP1) e 851 MPa (CP2) para 498 MPa e 587 MPa, respectivamente. Esta redução já era esperada porque o metal de adição utilizado na solda (arame AWS A5.36 – E71T-1) possui limite de resistência a tração que varia de 400 a 500 MPa.

Os aços ARBL e AHSS romperam na região da solda e com limites de resistência à tração muito similares, o que indica que a resistência da junta soldada e possível fragilização na zona termicamente afetada são muito próximas. Pode-se, portanto, afirmar que há possibilidade de a soldabilidade deles ser similar.

4.3.2. Microdureza

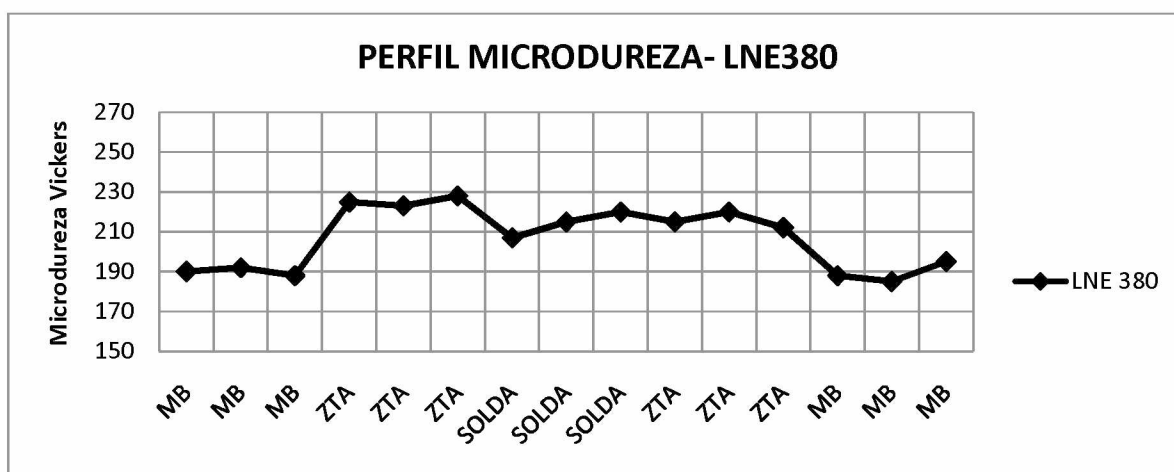
A análise de microdureza foi feita na junta soldada conforme mostra a figura 32. Nela o zero corresponde ao centro do cordão de solda e a linha vermelha na horizontal ilustra a linha ao longo da qual foram coletados os dados de microdureza Vickers. Foram usadas chapas de 6,35mm de espessura de ambos os aços.



FONTE: AUTOR (2024).

O perfil de microdureza do aço LNE 380 ao longo da seção soldada é mostrado na figura 33. No metal base as durezas encontradas apresentam pouca variação, refletindo sua condição original com uma estrutura refinada e homogênea. Na zona termicamente afetada (ZTA), observa-se um aumento da dureza. Apesar do crescimento de grãos esperado, alterações microestruturais podem justificar este resultado, Marques et al. (2009). Já na área da solda, a dureza oscila ligeiramente em relação à ZTA e tem sua dureza justificada pela resistência mecânica do consumível E71T1 (AWS 5.36).

FIGURA 33 – PERFIL MICRODUREZA LNE380



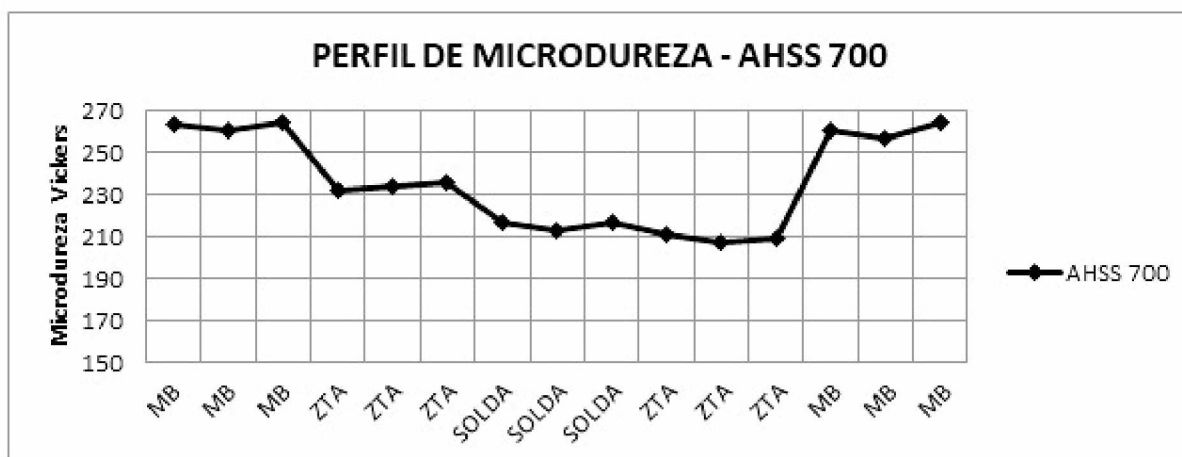
FONTE: AUTOR (2025).

Na sequência foi feita análise do aço AHSS 700. Verificou-se que a microdureza na zona termicamente afetada (ZTA) e na área da solda é consideravelmente menor do que no metal base (figura 34).

A variação de dureza observada na zona fundida pode ser atribuída à resistência mecânica do consumível E71T1 (AWS 5.36), que resulta uma junta soldada com limite de resistência à tração na faixa de 400 a 500 MPa (SSAB, 2024). A dureza e o limite de resistência mecânica estão interligados, o que justifica a redução de dureza na região analisada.

Por sua vez, as transformações microestruturais resultantes da exposição térmica justificam as diferenças de dureza na ZTA. Resultado similar foi obtido por Fratrik *et al.* (2023), que observou uma redução de dureza de 15% na ZTA quando comparada ao material base em um aço AHSS equivalente ao utilizado neste trabalho.

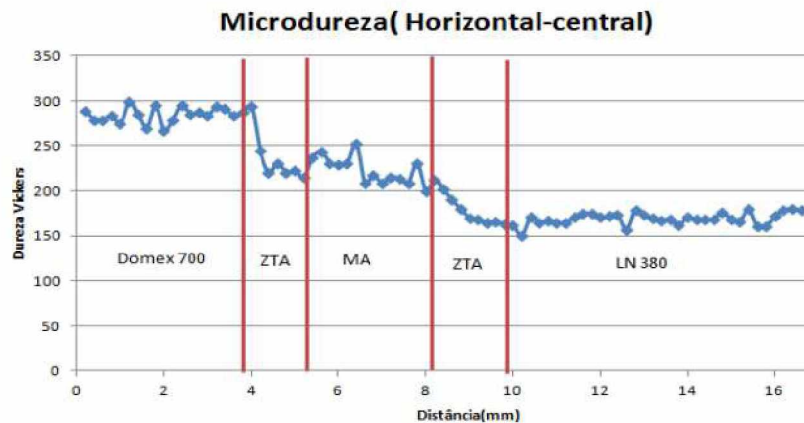
FIGURA 34 – PERFIL MICRODUREZA AHSS 700



FONTE: AUTOR (2024).

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os encontrados na literatura, mais especificamente apresentados por Costa et al. (2012), observa-se uma similaridade nos valores de microdureza ao longo das diferentes regiões da junta soldada. Destaca-se que tanto os metais base quanto o material de adição utilizados por esses autores apresentam características equivalentes aos empregados nesta pesquisa. A figura 35 ilustra, à esquerda, os valores de dureza do aço Domex 700 — material com propriedades comparáveis ao AHSS 700 — e, à direita, a microdureza do aço ARBL LNE380. No centro do gráfico, são apresentados os valores de microdureza correspondentes ao material fundido (arame ER70S-6) e às zonas termicamente afetadas (ZTA) entre o cordão de solda e cada um dos metais de base analisados, conforme descrito por Costa et al. (2012). A similaridade mencionada ocorre devido ao comportamento do perfil de microdureza nos dois materiais. No caso do LNE380, observa-se um aumento gradual da microdureza à medida que os dados são coletados no metal de base, passando pela zona termicamente afetada (ZTA) até a zona fundida. Já no AHSS 700, a tendência é oposta: a microdureza diminui progressivamente ao longo da mesma trajetória. Apesar dessas diferenças, é importante destacar que os valores de dureza na região da solda são bastante semelhantes em ambos os materiais.

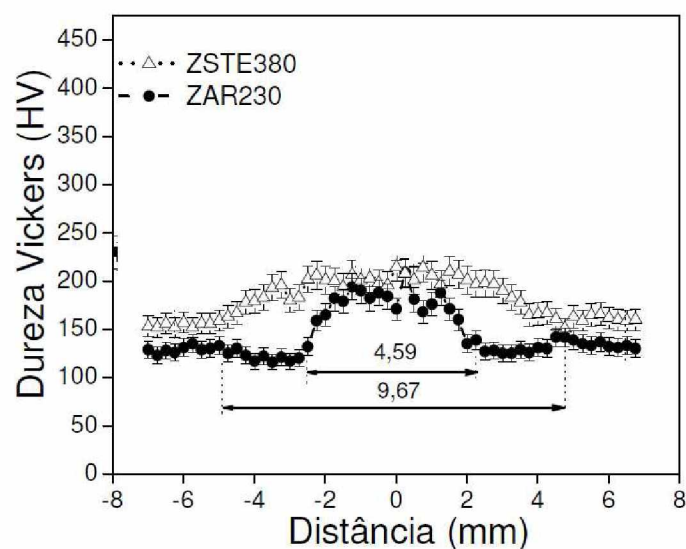
FIGURA 35 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA DE AHSS 700 E LNE380



FONTE: COSTA (2011).

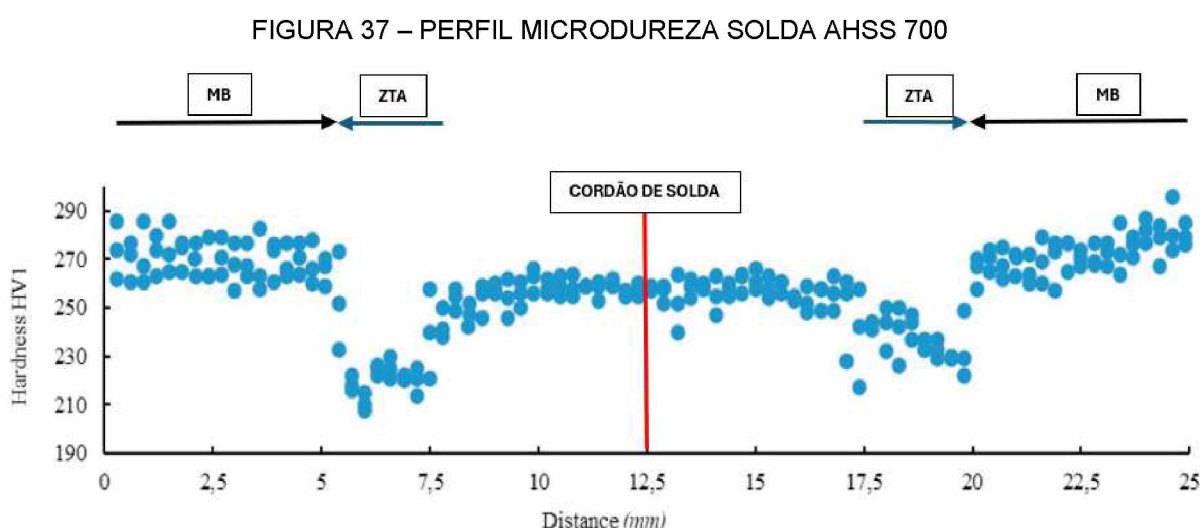
Mais especificamente sobre os aços ARBL LNE 380, Perini (2009) apresentou um estudo que trata da dureza na região da solda. É importante ressaltar que o autor utilizou um material base equivalente ao empregado neste trabalho, bem como um arame de solda com propriedades semelhantes. Os resultados obtidos por Perini também revelam um comportamento similar ao observado neste estudo, com aumento da dureza à medida que os dados são coletados do metal de base, passando pela zona termicamente afetada (ZTA) até a zona fundida. Essa similaridade está representada na figura 36 na curva formada pelo material ZSTE380.

FIGURA 36 – PERFIL MICRODUREZA SOLDA LNE380



FONTE: Adaptado PERINI (2009).

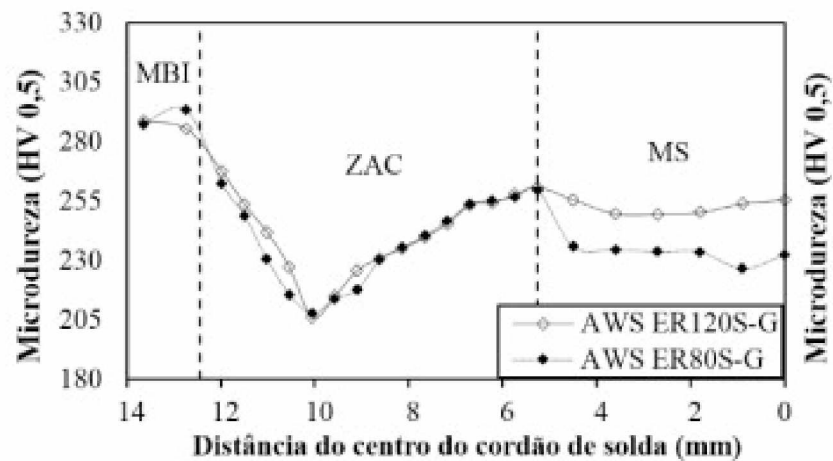
Com relação aos aços AHSS, Denisa et al. (2021) apresentou um estudo cujo perfil de microdureza (figura 37) no material base (MB) e na zona termicamente afetada (ZTA) se assemelham aos resultados encontrados neste trabalho. Essa similaridade é percebida pelo fato de o material base apresentar maior dureza, enquanto há uma queda significativa na ZTA em ambos os estudos. No entanto, a dureza na zona fundida (região em torno da posição 12,5mm na figura 37) apresenta-se distinta, o que pode ser justificado pelo uso de metais de adição com limites de resistência diferentes. Considerando que a dureza e o limite de resistência estão diretamente relacionados, tal diferença é justificável.



FONTE: Adaptado DENISA et al. (2021).

A influência das propriedades do arame de solda na dureza da zona fundida é evidenciada no estudo de Dalcin (2016), conforme ilustrado na figura 38. Nesse trabalho, o autor compara os perfis de dureza resultantes da utilização de dois consumíveis distintos. Um deles é o arame ER80S-G, cujas propriedades mecânicas são similares às do consumível empregado no presente estudo. O outro consumível avaliado foi o ER120S-G, de propriedades mecânicas superiores. Observa-se que a curva de dureza na região da solda, quando utilizado o arame ER80S-G de características semelhantes ao utilizado neste trabalho, apresenta comportamento similar de dureza. Já o perfil de dureza obtido com o arame ER120S-G, de maior resistência, apresenta tendência semelhante àquela relatada por Denisa et al. (2021).

FIGURA 38 – PERFIL MICRODUREZA SOLDADA DOMEX 700



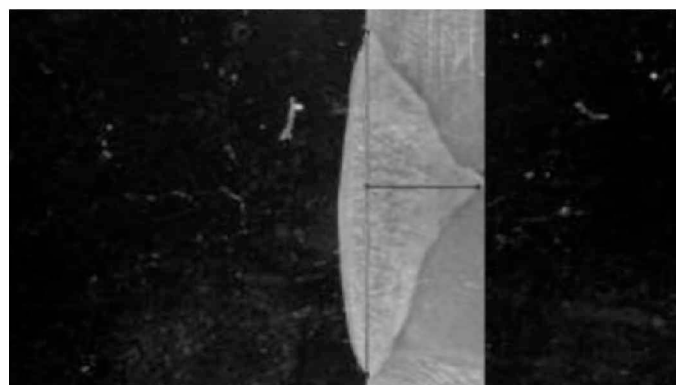
FONTE: Adaptado DALCIN (2016).

4.3.3. Metalografia

Primeiramente foram analisados corpos de prova feitos a partir do aço ARBL LNE380 que está em uso atualmente. Para metalografia os corpos de prova foram cortados, lixados, polidos e atacados com Nital 3,5%.

A macrografia foi realizada na solda, e os resultados mostraram ausência de defeitos visíveis, como trincas, porosidade ou inclusões (figura 39). Além disso, foi confirmada a penetração adequada da solda com boa distribuição entre os metais base. A análise revelou que os parâmetros usados no processo foram adequados sem comprometimento dos corpos de prova.

FIGURA 39 – MACROGRAFIA LNE380



FONTE: AUTOR (2024).

A micrografia foi realizada com aumento de 100x, 500x e 1000x, como ilustram as figuras 40 (a), 40 (b) e 40 (c), respectivamente. A partir dela sugere-se que o metal base (LNE 380) é formado em sua grande maioria por ferrita poligonal (região clara) e por algumas regiões de perlita (áreas escuras).

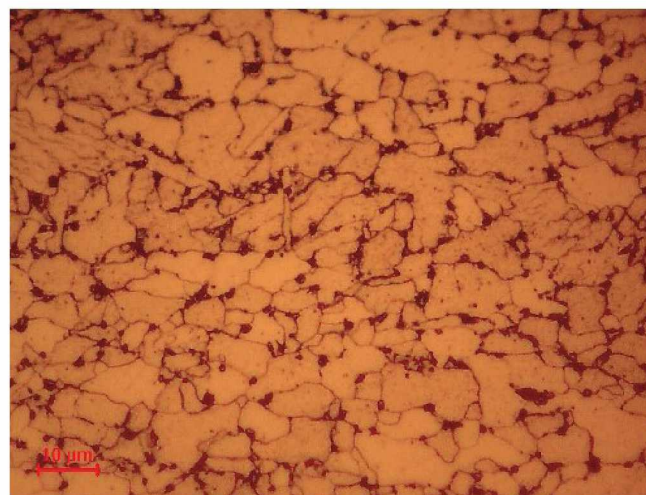
FIGURA 40 – MICROGRAFIA MATERIAL BASE – LNE380



(a)



(b)

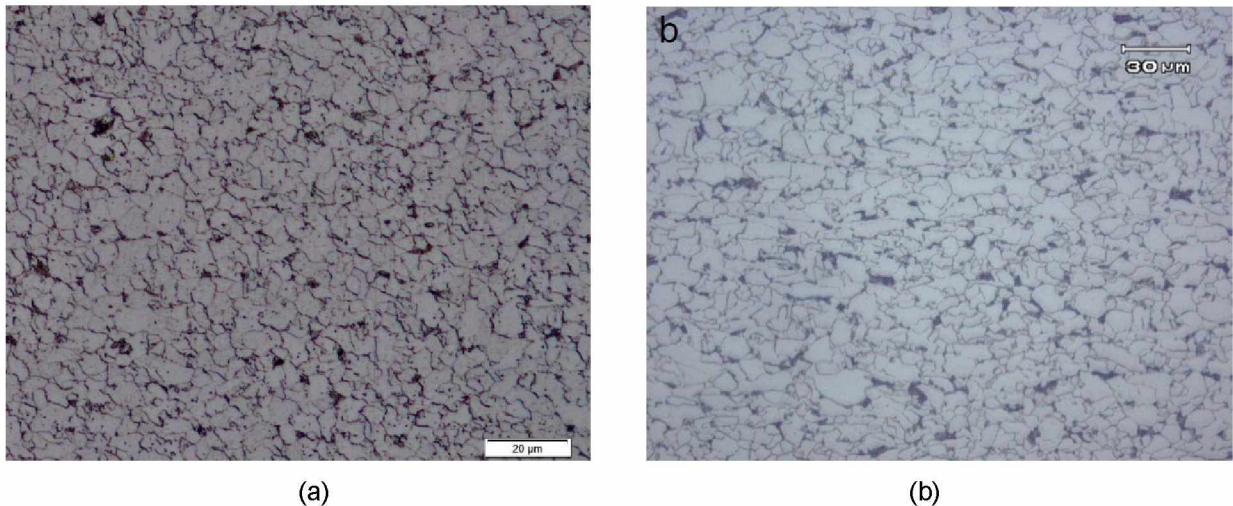


(c)

FONTE: AUTOR (2024).

As fases identificadas no material base estão de acordo com aquelas descritas na literatura. Estudos anteriores, como os de Costa et al. (2012) e Notz (2023), também observaram a presença das mesmas fases no aço NBR 6656 LNE 380, ferrita e perlita. As Figuras 41 (a) e 41 (b) apresentam as micrografias reportadas por esses autores, evidenciando a semelhança morfológica com as obtidas neste trabalho.

FIGURA 41 – MICROGRAFIA MATERIAL BASE – LNE 380



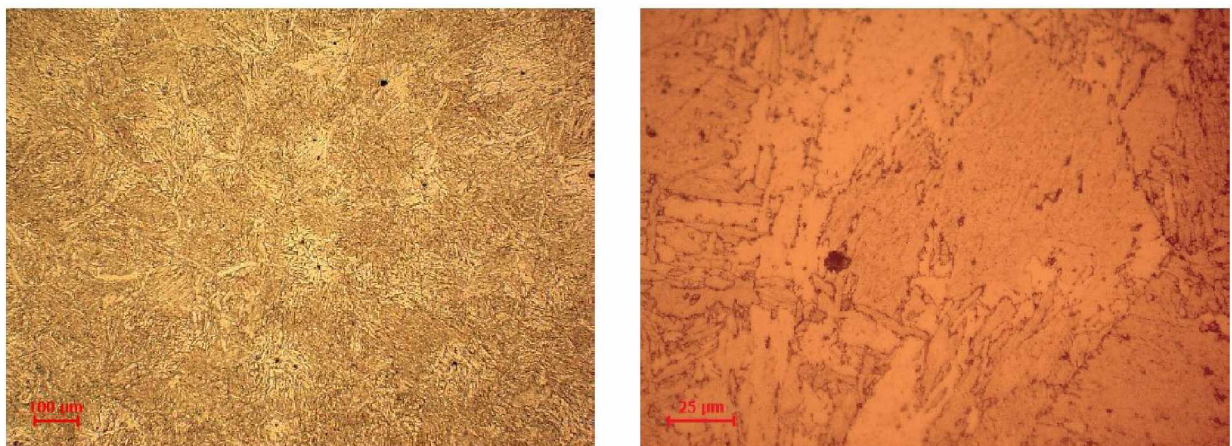
(a)

(b)

FONTE: (a) NOTZ (2023) e (b) COSTA et al. (2012).

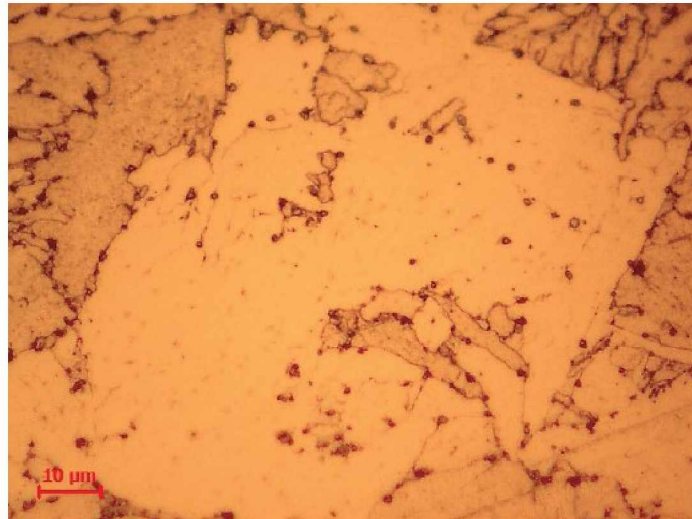
A figura 42 mostra a zona termicamente afetada, na qual é possível perceber um aumento no tamanho dos grãos devido ao aquecimento durante a soldagem e uma microestrutura mais heterogênea. É importante ressaltar que este aporte térmico pode gerar a formação de ferrita acicular, como observado por Monteiro (2020), pois, como é complementado por Oliveira (2007), a formação deste tipo de ferrita ocorre em maior percentual em regiões de grãos mais grosseiros. A figura 42 (a) possui 100x de aumento, 42 (b) 500x e a 42 (c) 1000x. A ferrita e perlita possivelmente continuam sendo os microconstituintes nesta região do material.

FIGURA 42 – MICROGRAFIA ZTA – LNE380



(a)

(b)



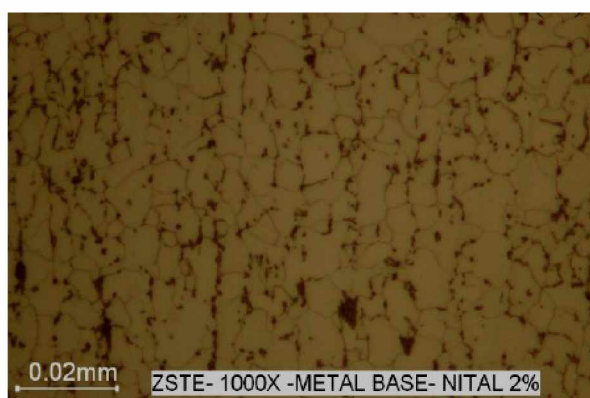
(c)

FONTE: AUTOR (2024).

Perini (2009) investigou o comportamento do aço LNE 380 quando submetido ao processo de soldagem, com foco nas transformações ocorridas na zona termicamente afetada (ZTA). A Figura 43 apresenta os resultados obtidos por esse autor, em que se observa, na imagem 43(a) (metal de base), a presença de grãos mais refinados em comparação àqueles mostrados na imagem 43 (b) (ZTA). Esses resultados são similares aos obtidos neste trabalho, evidenciando o crescimento de grão na ZTA, porém com poucas chances de alteração nas fases presentes.

Deve-se destacar, contudo, que o crescimento de grão observado por Perini foi menos acentuado do que o verificado neste trabalho. Além disso, há diferenças visuais entre as micrografias de Perini e as aqui apresentadas, provavelmente em função das diferentes regiões da ZTA de onde foram extraídas as amostras.

FIGURA 43 – MICROGRAFIA METAL BASE E ZTA – LNE380



(a)

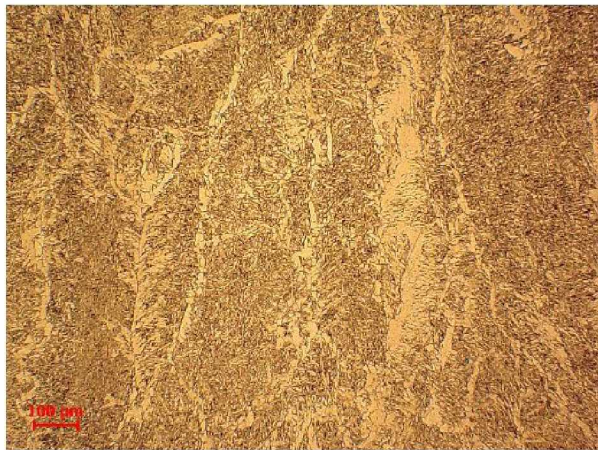


(b)

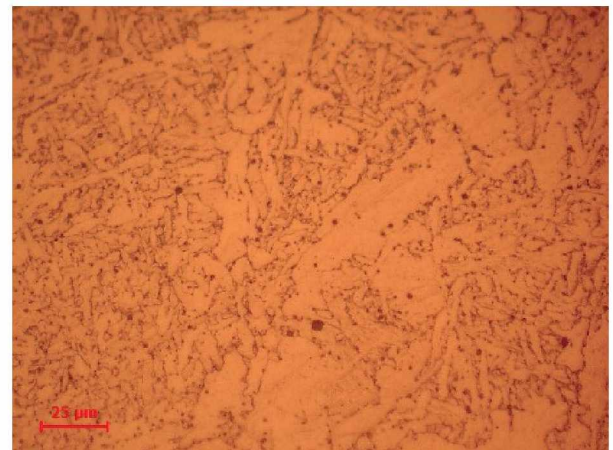
FONTE: PERINI (2009).

A figura 44 mostra o metal de solda, no qual sugere-se a existência de grãos colunares com a presença de colônias de perlita e a matriz ferrítica, inclusive a possível formação de ferrita acicular. É importante ressaltar que esta última microestrutura do metal de solda é importante na definição das propriedades mecânicas e dureza, sendo um microconstituente capaz de conferir à solda maior resistência mecânica e maior dureza (GALLEGO et al, 2014). A figura 44 (a) possui 100x, 44 (b) de 500x de aumento e a 44 (c) 1000x.

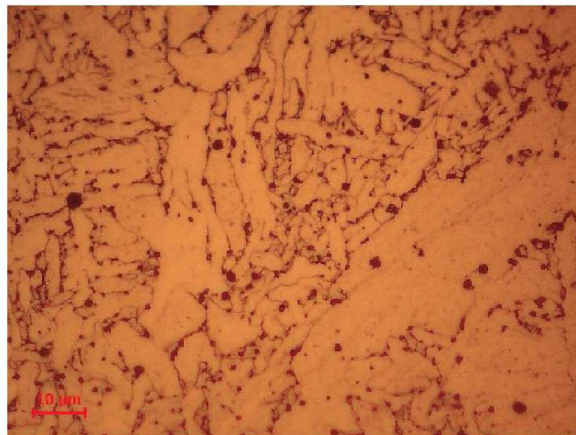
FIGURA 44 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380



(a)



(b)



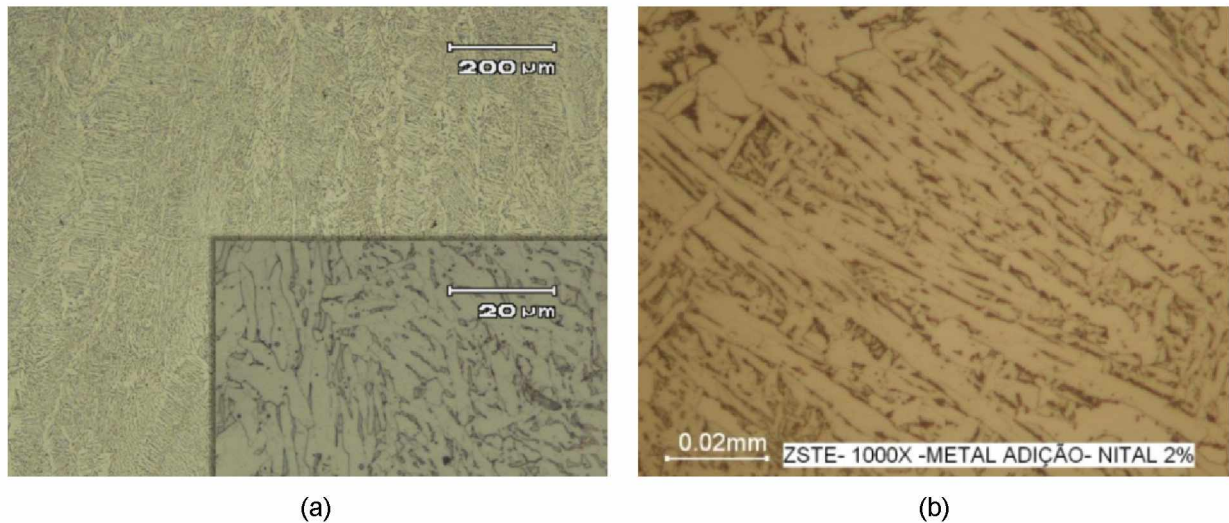
(c)

FONTE: AUTOR (2024).

A microestrutura da zona fundida, composta por fases semelhantes às observadas neste trabalho, também foi identificada em estudos anteriores realizados por Carpenedo (2014) e Perini (2009). Ambos os autores descrevem que a zona fundida apresenta uma matriz predominantemente ferrítica, com a presença de

porções de perlita. As micrografias obtidas por eles encontram-se representadas nas figuras 45(a) e 45(b), evidenciando a similaridade estrutural com os resultados deste estudo.

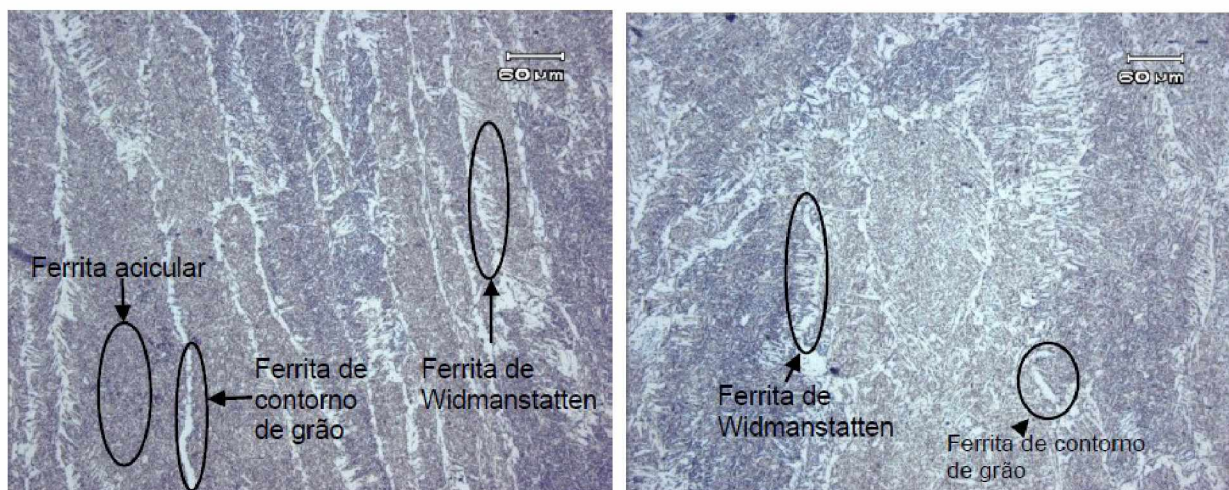
FIGURA 45 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380



FONTE: (a) CARPENEDO (2014) e (b) PERINI (2009).

Complementarmente, Costa et al. (2012) realizaram uma subdivisão das formas de ferrita identificadas em seu estudo. Estas foram divididas em três tipos distintos: ferrita acicular, ferrita de segunda fase alinhada (também conhecida como ferrita de Widmanstätten) e ferrita de contorno de grão. Ao comparar a micrografia apresentada por esses autores (figura 46) com a micrografia obtida no presente trabalho (figura 44 (a)), observa-se similaridade entre as fases presentes

FIGURA 46 – MICROGRAFIA METAL DE SOLDA – LNE380

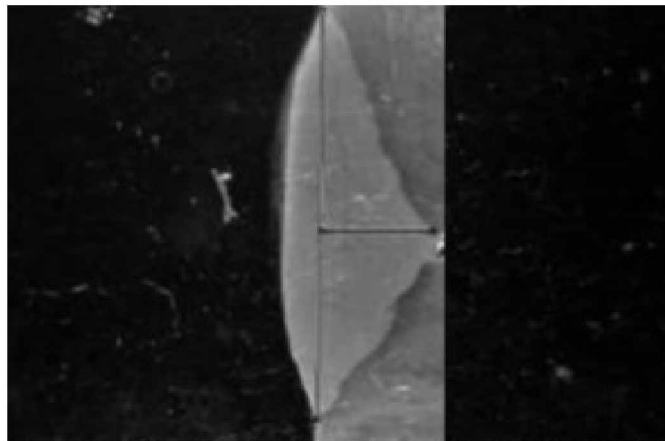


FONTE: COSTA et al. (2012).

Na sequência foram analisados corpos de prova feitos a partir do aço AHSS700. Para essa metalografia os corpos de prova foram cortados, lixados, polidos e atacados com Nital 3,5%.

A macrografia foi realizada na solda, e os resultados mostraram ausência de defeitos visíveis, como trincas, porosidade ou inclusões (figura 47). Além disso, foi confirmada a penetração adequada da solda com boa distribuição entre os metais base. A análise revelou que os parâmetros usados no processo foram adequados sem comprometimento dos corpos de prova.

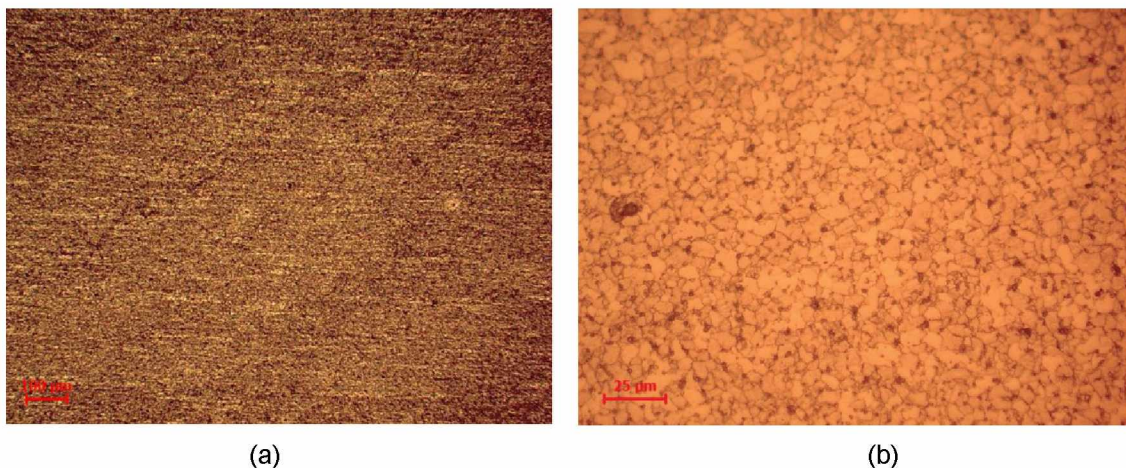
FIGURA 47 – MACROGRAFIA AHSS 700

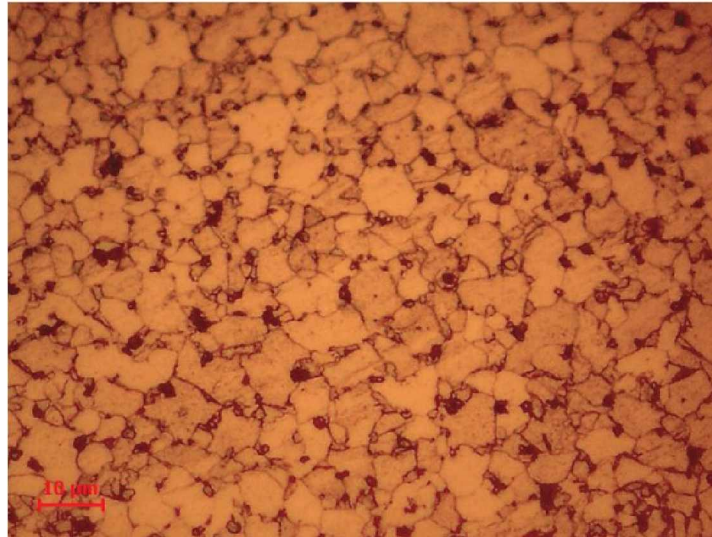


FONTE: AUTOR (2024).

A figura 48 ilustra a microestrutura do metal base (AHSS700), onde pode ser observado um material com grãos refinados e estrutura homogênea. Sugere-se a presença de uma fase principal composta por ferrita (área clara) e pouca perlita (região escura). A figura 48 (a) possui 100x de aumento, 48 (b) 500x e a 48 (c) 1000x.

FIGURA 48 – MICROGRAFIA METAL BASE – AHSS700





(c)

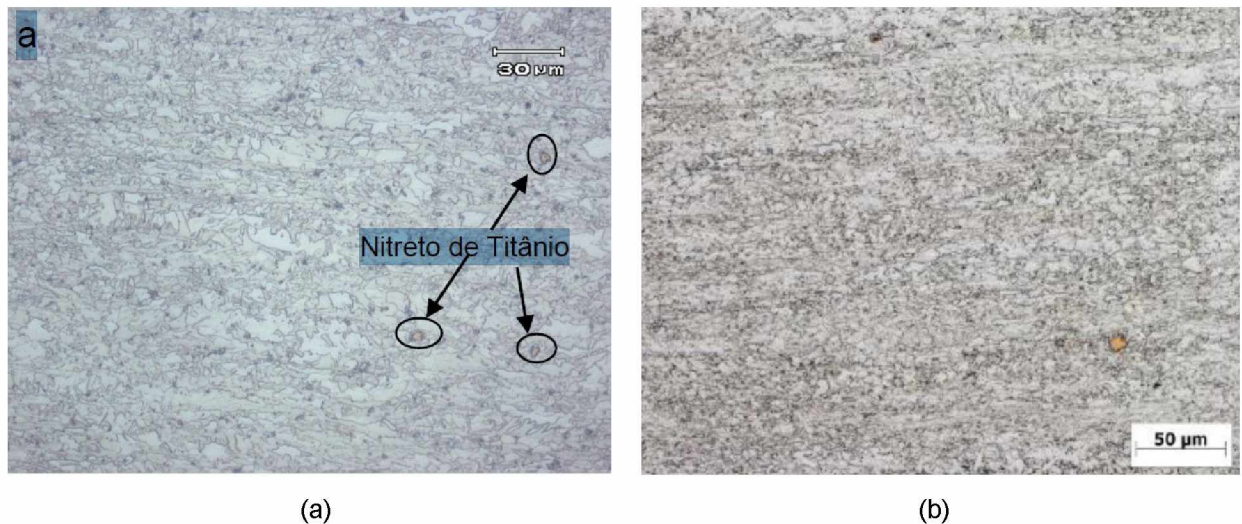
FONTE: AUTOR (2024).

Os resultados obtidos neste trabalho estão em linha com o que é descrito na literatura. Vuorinen (2020), por exemplo, relata que as fases predominantes em aços deste tipo são compostas majoritariamente por ferrita, com pequenas frações de perlita distribuídas de forma esparsa.

De maneira semelhante, Costa et al. (2012) e Trško et al. (2020) também identificaram estruturas com predominância ferrítica e presença de perlita em seus respectivos estudos (figura 49 (a) e 49(b)). Além disso, esses autores descrevem a possível presença de carbonetos de Ti, Nb e V, cuja formação é prevista com base na composição química do aço e nos diagramas de equilíbrio de fases. No entanto, devido ao seu tamanho reduzido, esses precipitados são de difícil detecção por meio da metalografia óptica convencional.

Costa et al. (2012) ainda indica, em sua análise metalográfica, a presença de nitretos de titânio. Trško et al. (2020), por sua vez, destaca que a função principal desses precipitados é contribuir para o refinamento de grão durante o processo de fabricação do aço AHSS700.

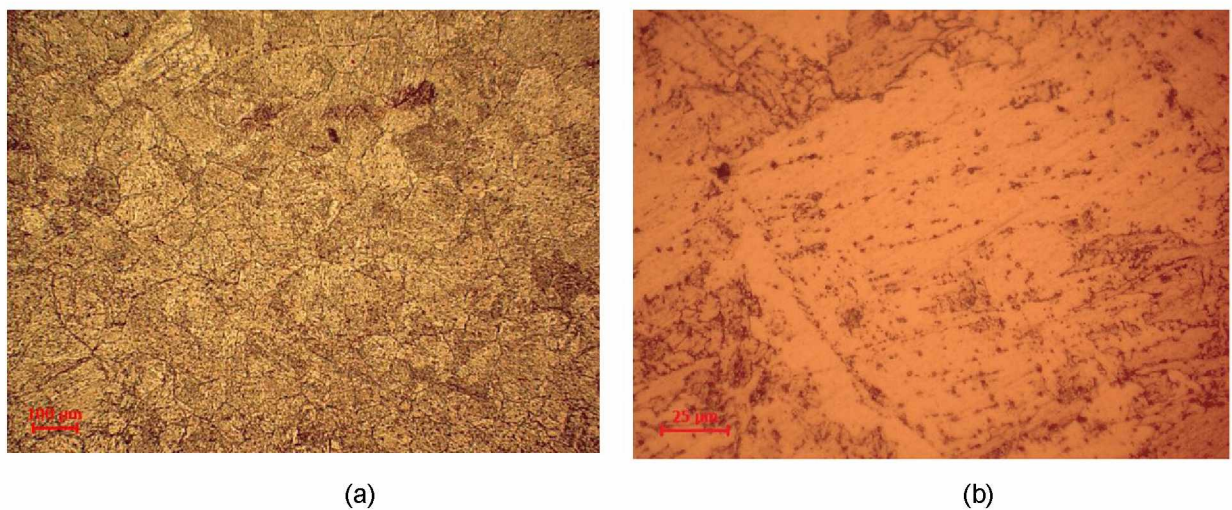
FIGURA 49 – MICROGRAFIA METAL BASE – AHSS700



FONTE: (a) COSTA ET AL. (2012) e (b) TRŠKO ET AL. (2020).

A figura 50 por sua vez mostra a zona termicamente afetada, na qual é possível perceber um aumento no tamanho dos grãos devido ao aquecimento durante a soldagem e uma microestrutura mais heterogênea. Possivelmente a microestrutura passou a ser constituída por grãos grosseiros de ferrita poliédrica com precipitados de carbonetos de Ti, Nb e V e perlita, porém existe uma grande dificuldade de identificação sem a realização de imagens complementares. A figura 50 (a) possui 100x de aumento, a 50 (b) 500x e a 50 (c) 1000x.

FIGURA 50 – MICROGRAFIA ZTA – AHSS700





(c)

FONTE: AUTOR (2024).

De forma semelhante ao verificado no presente trabalho, Trško et al. (2020) destaca em seu estudo a ocorrência de um crescimento significativo dos grãos na zona termicamente afetada (ZTA). Esse crescimento é tão acentuado que o tamanho dos grãos nessa região pode ser até dez vezes maior do que aquele observado no material de base na amostra observada pelo autor. Neste estudo os autores identificaram (figura 51) que a microestrutura da ZTA é predominantemente composta por ferrita, além de precipitados de carbonetos de titânio (Ti), nióbio (Nb) e vanádio (V).

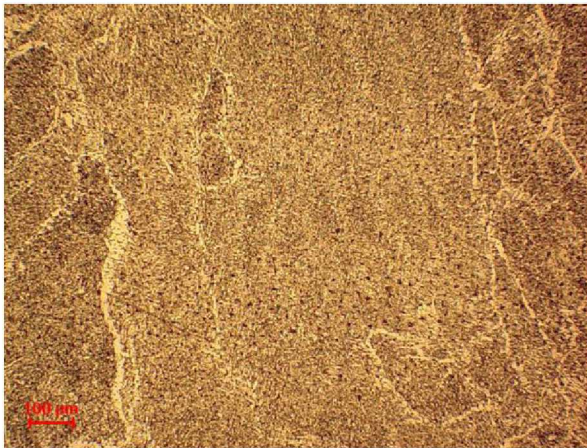
FIGURA 51 – MICROGRAFIA ZTA – AHSS700



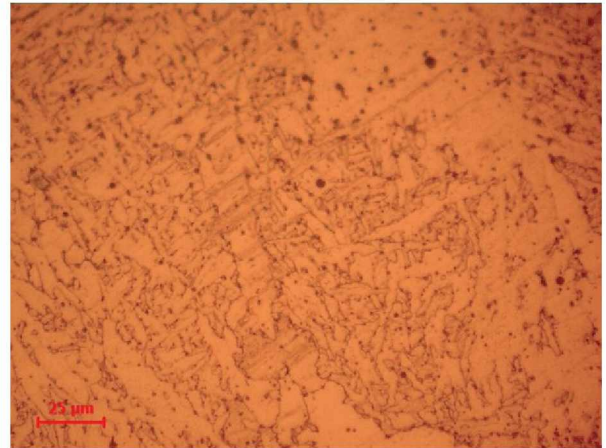
FONTE: TRŠKO ET AL. (2020).

A figura 52 mostra o metal de solda, no qual é possível perceber grãos colunares com a presença de colônias de perlita e a matriz ferrítica. A literatura aponta para a possibilidade de que estejam presentes três tipos diferentes de formação de ferrita na microestrutura: ferrita acicular, ferrita de segunda fase alinhada (ou ferrita de *Widmanstatten*) e ferrita de contorno de grão, porém seriam necessárias imagens com maior aumento para realizar a identificação destas. A figura 52 (a) possui 100x de aumento, 52 (b) 500x e a 52 (c) 1000x.

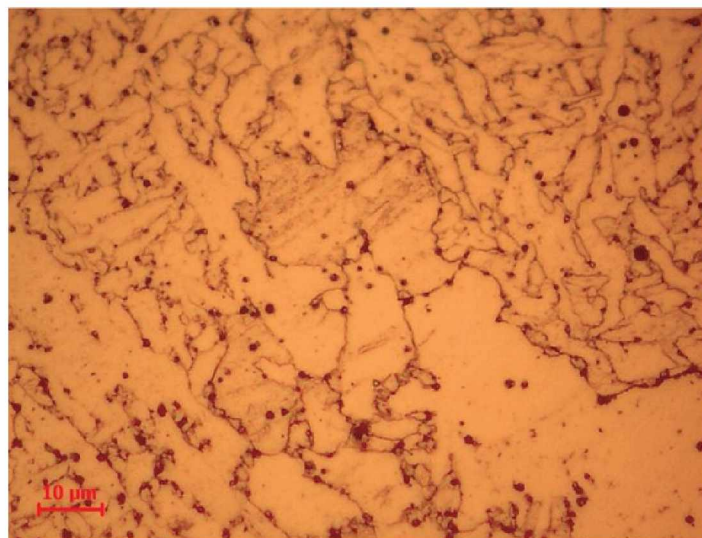
FIGURA 52 – MICROGRAFIA METAL SOLDADO – AHSS700



(a)



(b)



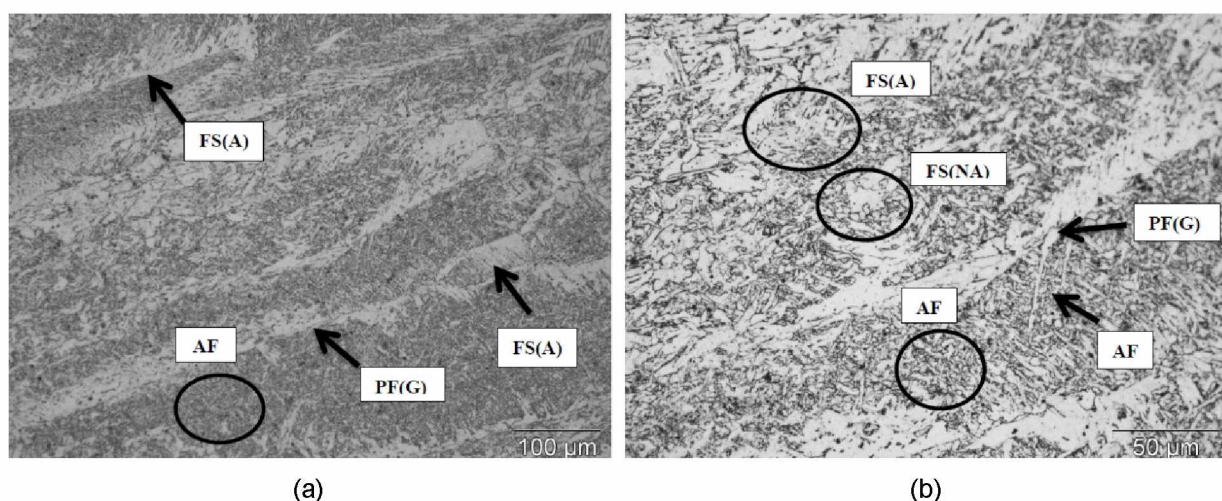
(c)

FONTE: AUTOR (2024).

Esses resultados estão em concordância com os dados apresentados por Lima Júnior (2020), que também identificou essas fases na zona fundida em condições de soldagem semelhantes, utilizando o mesmo tipo de consumível.

As Figuras 53 (a) e 53 (b) apresentam as microestruturas observadas na zona fundida do corpo de prova, obtidas com o mesmo arame utilizado nesta dissertação (E71T-1). Nessas imagens, observa-se que a microestrutura da zona fundida é composta por ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e regiões contendo ferrita com segunda fase (FS).

FIGURA 53 – MICROGRAFIA METAL SOLDADO – AHSS700



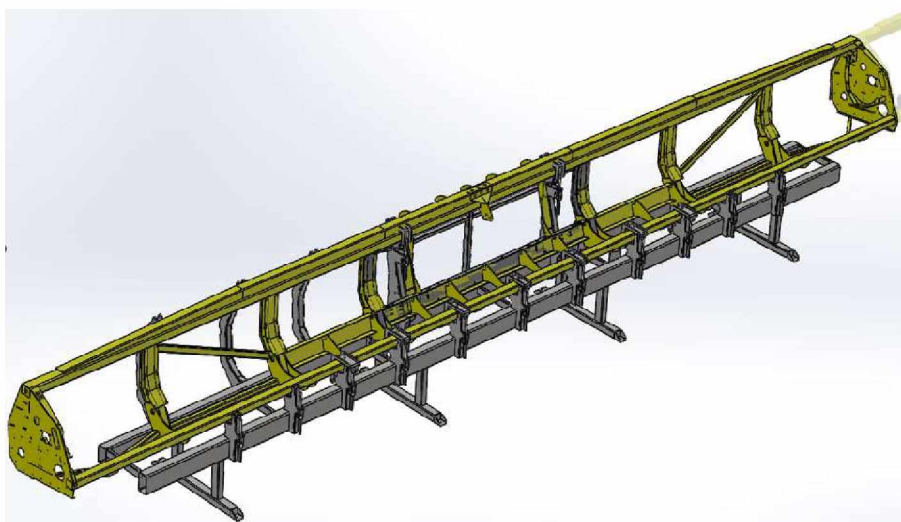
FONTE: LIMA JÚNIOR (2020).

4.4. CONTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS

Levando em consideração a dificuldade de simular em laboratório as condições reais de trabalho a que uma plataforma para a colheita de milho está sujeita, optou-se por construir protótipos e realizar a avaliação em campo.

O posicionamento e posterior solda dos componentes do conjunto soldado dos chassis é feito com auxílio de ferramental de solda que assegura que as dimensões do conjunto e posição dos componentes ocorra de forma correta. A figura 54 mostra o gabarito de solda na cor cinza e o conjunto chassi na cor amarela.

FIGURA 54 – CONJUNTO CHASSIS E FERRAMENTAL DE SOLA



FONTE: AUTOR (2024).

A figura 55 mostra o conjunto chassi após a solda. Ele está acondicionado em um rack de movimentação para que seja transportado para pintura.

FIGURA 55 – CONJUNTO CHASSIS SOLDADO



FONTE: AUTOR (2024).

Os protótipos foram construídos e estão em campo há mais de 2 safras. A análise destes chassis ocorreu após eles serem lavados para que fosse possível visualizar com nitidez qualquer tipo de falha. Uma análise mais detalhada da integridade do chassi destes equipamentos mostrou ausência de trincas, deformações ou qualquer sinal de falha.

Nos cordões de solda e na zona termicamente afetada também não foram encontrados quaisquer sinais de falhas.

É importante ressaltar que 2 dois dos protótipos foram construídos em tamanhos superiores ao usado no calculado por meio de elementos finitos. Essa

decisão teve como objetivo acelerar possíveis falhas e também verificar a consequência de cargas acima do previsto para uso normal.

A ideia de utilizar cargas superiores ao projeto também tem como objetivo identificar qualquer possibilidade de falha prematura por fadiga ou por outro meio que ocorra abaixo do limite de resistência do material utilizado. O peso destes dois equipamentos de protótipo é cerca de 15% maior do que a dos protótipos fiéis ao projeto utilizado no cálculo por elementos finitos. Deve-se levar em conta que o menor coeficiente de segurança encontrado foi de 2,08 e, por isso, esse peso extra não implica risco de segurança.

Todos os protótipos estão operando na região do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul por conta da grande janela para a colheita da safra. Isto permite que eles enfrentem várias condições de temperatura, várias fases de umidade e variedade de cultivares do milho.

Desta forma, é possível dizer que a redução de espessura de alguns componentes do conjunto soldado do chassi, juntamente com a troca da matéria prima por uma de propriedades mecânicas superiores, não resultou em falhas durante seu uso em condições normais de trabalho.

4.5. AVALIAÇÃO DE CUSTOS

A avaliação de custos apresentada neste estudo não tem como objetivo detalhar e calcular todos os custos envolvidos na produção do novo conjunto soldado do chassi para a plataforma agrícola, como os tempos de operação das máquinas, gastos com energia elétrica, mão de obra etc. O foco é demonstrar, por meio de uma análise comparativa, a viabilidade econômica do uso do aço proposto.

Para isso, foram selecionadas duas variáveis principais de custo de produção, que são influenciadas por outros elementos que compõem o custo do produto. Essas variáveis são: as quantidades de chapas de aço e de arame de solda, em kg, necessárias para fabricar o conjunto soldado do chassi. A escolha desses itens se deve ao fato de estarem associados a diversos outros custos. A quantidade de chapas de aço engloba custos com os processos de corte, dobra, preparação das peças, transporte, mão de obra e consumo de energia. Já o arame de solda está

relacionado, além da mão de obra e da energia, ao tempo dedicado à soldagem e à preparação das peças para esse processo.

Em relação às quantidades de arame de solda, o chassi atualmente produzido utiliza 26,8% mais material, em kg, do que o chassi proposto neste estudo. No entanto, considerou-se uma margem de tolerância de 10%, tanto para mais quanto para menos, nas medições devido ao fato de a solda ser realizada manualmente (variações nas dimensões do cordão de solda). Dessa forma, a quantidade de arame de solda necessária para a nova estrutura é aproximadamente 16,8% menor em comparação com a estrutura atual, resultando em uma redução considerável nos custos do produto.

Em relação à quantidade, kg, de chapas de aço utilizadas no conjunto soldado chassi proposto neste estudo, observou-se uma redução média de 9% em comparação com o modelo atual. É importante salientar que esta redução é referente ao chassi como um todo e que existem componentes (alguns tubos, por exemplo) que não sofreram modificação de material. Se compararmos as quantidades de chapas (kg) apenas nos componentes em que houve troca de material, chega-se a uma redução em massa de 25,1%. No entanto, o custo do aço AHSS700 é cerca de 27% superior ao do aço LNE380, o que resulta em um aumento no custo total de fabricação do novo chassi em relação ao modelo existente.

Ao comparar os custos principais das chapas de aço e do arame de solda, verifica-se que os custos dos dois conjuntos podem ser considerados aproximadamente equivalentes. No entanto, como os benefícios relacionados aos processos de fabricação e à mão-de-obra não serão abordados neste estudo, pode-se afirmar que o novo conjunto trará vantagens em relação ao modelo atual na redução de massa e maior eficiência em campo.

5. CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados, verificou-se que o aço AHSS 700 apresentou um desempenho adequado para o estudo proposto. Além de possuir propriedades mecânicas bastante superiores fora das áreas afetadas pelo calor proveniente da solda, possui resistência similar aos aços ARBL LNE380 nas uniões soldadas. As análises feitas por meio de elementos finitos mostraram que as maiores tensões encontradas no projeto do conjunto soldado dos chassis estão todas localizadas fora das áreas afetadas pela solda, ou seja, a aplicação de aços AHSS se mostrou vantajosa na redução de peso deste equipamento agrícola.

Os testes de campo mostraram que a redução de espessura de alguns componentes do chassi, devido à substituição do material por um de maior resistência mecânica, não comprometeu sua integridade estrutural. Após duas safras de uso, não foram identificadas falhas, trincas ou deformações nos chassis ou nas soldas. Além disso, protótipos com peso 15% superior ao previsto no projeto demonstraram robustez estrutural, coerentes com um coeficiente de segurança mínimo previsto de 2,08, validando o projeto. A operação contínua em diferentes condições de trabalho reforça a confiabilidade das modificações realizadas.

A análise comparativa realizada neste estudo demonstrou que a adoção do aço AHSS 700 no novo conjunto soldado do chassi para a plataforma agrícola resulta em uma redução significativa na quantidade de materiais utilizados. Foi observada uma redução de 25,1% em termos de chapas de aço nos componentes modificados e 26,8% de arame de solda. Apesar do custo unitário mais elevado do novo material (cerca de 27%), a economia gerada pela menor necessidade de insumos equilibra os custos totais de produção. Além disso, a redução de massa do chassi, especialmente nos componentes modificados, proporciona benefícios operacionais, como maior eficiência em campo.

É válido afirmar que este estudo teve seu objetivo principal atingido, demonstrando que a redução de peso em máquinas agrícolas, por meio da utilização de aços avançados de alta resistência, é viável e oferece um amplo campo de pesquisa para futuras aplicações. Esse conceito, já comumente utilizado na indústria automobilística, também pode ser explorado na indústria agrícola. A introdução de elementos ligantes e o controle rigoroso durante o processo de fabricação do aço

resultam em materiais com alta resistência mecânica, boa ductilidade e boa soldabilidade. Esses avanços permitem que o aço seja soldado com relativa facilidade, mesmo considerando a redução de resistência mecânica imposta pelo aporte de calor do processo de solda.

Assim como o chassi da plataforma de colheita de grãos, há diversos componentes que fazem parte do conjunto colheitadeira/plataforma que utilizam aço para sua fabricação, principalmente a partir de tubos e chapas. Isso expõe a grande oportunidade de redução de peso nesses equipamentos. Considerando que os menores deles possuem peso acima de dez toneladas esse aspecto é importante tanto para diminuir o consumo de combustível quanto para evitar a compactação do solo.

Dessa forma, a viabilidade econômica do novo conjunto deve ser analisada considerando não apenas os custos diretos de fabricação, mas também os ganhos em desempenho e eficiência do equipamento em campo.

A compactação do solo impacta diretamente a produtividade da lavoura, sendo necessários maiores gastos com energia e insumos para compensar estas perdas. Estas podem parecer insignificantes, mas se considerar o gasto extra com combustível e degradação do solo a longo prazo teremos uma leitura clara do impacto negativo que pode ser minimizado com a redução de peso dos equipamentos.

O setor de máquinas e implementos agrícolas possui diversas oportunidades, considerando a variedade de produtos disponíveis e o uso predominante de aços ARBL e ainda de aços baixo carbono com baixa resistência mecânica.

Este trabalho colabora para expandir o conceito de que a otimização de estruturas e redução de peso em equipamentos agrícolas é viável técnico e economicamente. Há uma grande variedade de matérias primas e variações nos processos de fabricação que podem ser usados neste contexto.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. **Analysis Software's Manuals**, (2006), "Software Suite for Finite Element Analysis and Computer-Aided Engineering", Version 6.6.

ABNT. Associação brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6656**. Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6673**. Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ALVES, L. M. **Métodos dos Elementos Finitos**. 2007. 438 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007. Disponível em: <https://www.academia.edu/15457512/M%C3%A9todo_dos_Elementos_Finitos>. Acesso em 20 de janeiro de 2025.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME IX**: Boiler and Pressure Vessel Code. 2011

American Welding Society. **AWS D1.1/D1.1M:2010**. Structural Welding Code-Steel. Miami. 2004

AVELINO FILHO, A. **Elementos finitos - a base da tecnologia CAE**. 6a. ed. São Paulo: Érica, 2013.

BBC. **De Onde Vêm as Emissões**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em 07 de setembro de 2023.

BORILLO, Guilherme Cardoso. **HPAs e Nitro-HPAs na emissão de material particulado de um motor euro V utilizando diesel e biodiesel em diferentes proporções**. Curitiba, 2015. 107 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2015.

CALLISTER, William D., Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44 p

CARPENEDO, Marcelo. **Utilização de Aços De Alta Resistência e Baixa Liga na Redução de Peso de Máquinas Agrícolas e Colheitadeiras de Grãos**. Porto Alegre, 2014. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalurgia e Materiais, 2014.

CASEIH. Disponível em: <<https://www.caseih.com/emea/fr-Benelux/produits/harvesting/axial-flow-250-series>>. Acessado em: 15 de fevereiro de 2024.

CHIAVERINI, Vicente. **“Aços e Ferros Fundidos”** – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª edição, 2005.

COMPRES RURAL. **Nova colheitadeira futurista é apresentada pela New Holland** Disponível em: < <https://www.comprerural.com/nova-colheitadeira-futurista-e-apresentada-pela-new-holland-video/>> Acesso em: 20. Fev. 2024

COSTA, V. M.; HAAG, J.; SANTOS, B. P.; COGO, G.; LESSA, C. R. L.; STROHAECKER, T. T. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de metais alta resistência e baixa liga**. In: 67º Congresso ABM – Internacional. Rio de Janeiro, 2012. p. 1432-1441.

COTA, André Barros; RODRIGUES, Paulo César M.; BARBOSA, Ronaldo A. N. M.; SANTOS, Dagoberto B. **Influência da deformação na região de não recristalização da austenita sobre a transformação em resfriamento contínuo em um aço bainítico de baixo carbono**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 58, n. 2, p. 155–160, abr./jun. 2005. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/971c5025-1cf4-4a41-bd88-e351017753ef/content>> Acesso em: 3 jun. 2025.

DALCIN, Rafael Luciano. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares**. 2016. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DENISA, M.; MICHALI, J.; TIBOR, V.; LÚDIA, F.D.; FRANTISEK, N. **Examination of Fatigue Life of HSLA Domex 700 MC Welded Joints**. Transp. Res. Procedia 2021, 55, 533–537. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521004142>> Acesso em: 31. Mai. 2025

ESAB. **Metalurgia da Soldagem**. Disponível em: <https://esab.com/index.cfm/_api/render/file/?method=inline&fileID=3D94A94F-29AB-4A06-935BBD5F0EB15D5A> Acesso em: 19. Ago. 2024

ESAB. **Tratamentos térmicos de pré-aquecimento e pós-solda**. Disponível em: <https://esab.com/br/sam_pt/esab-university/articles/preheating-and-post-weld-heat-treatments/> Acesso em: 19. Ago. 2024

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila de metalurgia da soldagem**. Apostila ESAB. Revisado em 25 jan 2005.

FORTES, C.. **Apostila de Arames Tubulares - ESAB. 2004**. Disponível em: <https://esab.com/br/sam_pt/esab-university/search/handbooks/>. Acesso em: 29 maio 2025.

FRATRIK, Martin; MICIAN, Milos; KASENCÁK, Martin. **Characterization of the heat-affected zones in the laser welded joints of quenched and thermo-mechanically processed high-strength steels**. Transportation Research Procedia, Volume 74, 632-639, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652300488X>> Acesso em: 18 de Maio de 2025.

GALLEGO, Juno; VENTRELLA, Vicente Afonso. **Inclusões na formação da ferrita acicular: caracterização por microscopia eletrônica de transmissão**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, 69., 2014, São Paulo. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/abm2014b.pdf>> Acesso em: 3 jun. 2025.

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**, 2006. 119 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GORNI, Antonio A. **Novos Aços Ferríticos Garantem Alta Resistência e Conformabilidade a Chapas Finas Laminadas a Frio**. Corte & Conformação de Metais, São Paulo, 6, 65, 28-45, setembro de 2010.

GORNI, Antonio A. et al, **Desenvolvimento de Aços Microligados com Alta Resistência Mecânica e Boa Ductilidade** In: 62º Congresso Anual da ABM, 62nd ABM International Annual Congress, 62., 2007, Vitória, ES. Arquivo Eletrônicos. Vitória, ES, 2007. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_TuboCia_Set2009.pdf> Acesso em: 17 de fevereiro de 2024.

GTS. Disponível em: <<https://gtsdobrasil.ind.br/br/produto/28/x10>>. Acessado em: 18 de março de 2024.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – Proconve/Promot**. 3. ed. Brasília: Ibama, 2011. 584 p. (Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental, n.º 3).

JOHN DEERE. Disponível em: <<https://www.deere.es/es/cosechadoras/serie-t/t670/>>. Acessado em: 18 de março de 2024.

MOLINA, Jaime G. **Fundamentos del método de elemento finito**. 1ª Edição. U.M.S.A, 2010.

NEW HOLLAND. Disponível em: <<https://agriculture.newholland.com/lar/pt-br/equipamento/produtos/plataformas/plataforma-de-milho>>. Acessado em: 18 de março de 2024.

KOU, S., **Welding Metallurgy**. John Wiley e Sons, 2nd ed. Nova Jérícia, Estados Unidos, 2003.

L. KERÄNEN, O. NOUSIAINEN, E. KURVINEN, **Mechanical properties of welded ultrahigh-strength S960 steel at low and elevated temperatures**, Journal of Constructional Steel Research 5 September 2022 Volume 198 (Cover date: November 2022) Article 107517, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X22003893>>

LIMA JÚNIOR, Diniz Ramos de. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW**. 2020. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q.; **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2009.

MATLOCK, D.; Speer, J. Microalloying concepts and application in long products. **Materials Science and Technology**, 2009.

MONTEIRO, Danilo Cesar de Azevedo. **Estudo do efeito das vibrações mecânicas na redução das tensões residuais em juntas soldadas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Niterói, 2020. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/22729/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Danilo%20Cesar%20de%20Azevedo%20Monteiro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 3 jun. 2025.

MAZUR, M.; ULEWICZ, R. **Analysis of strength and fatigue properties of construction materials for manufacturing the parts of semi-trailers**. Czestochowa University of Technology, Poland, 2017.

MORAES, Manoel L. B. de; Reis, Â. V. dos; Machado, A. L. T. **Máquinas Para Colheita e Processamento dos Grãos**. 2a ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 2005.

NOTZ, Fábio Cavassani. **Investigação da influência do processo de soldagem GMAW na vida em fadiga do aço ARBL LNE 380**. 170p, 2023. Dissertação Mestrado – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.

OLIVEIRA, Adriano. **Nova colheitadeira faz em meia hora o que antecessora levava um dia inteiro**. 2015. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/agrishow/2015/noticia/2015/05/novacolheitadeira-faz-em-meia-hora-o-que-antecessora-levava-um-dia-inteiro.html>> Acesso em: 20. Fev. 2024

OLIVEIRA, Natalino de Paula. **Propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com estrutura ferrita acicular**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/dea8690e-dffa-496f-9cc5-8219b11c1010/content>. Acesso em: 3 jun. 2025.

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 97p, 2009. Dissertação Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

PROCHENKA, P.; MAKOWSKA, K.; JANISZEWSKI, J. **Assessment of Mechanical Properties of Laser Beam Welded Joints Made of Steel Strenx S700MC Subjected to High Impact Load**. Iuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2018.

QUICK, G.; BUCHELE, W. **The grain harvesters**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 269p, 1978.

RODRIGUES, P. C. M.; PERELOMA, E. V.; SANTOS, D. R. **Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling**. Materials Science and Engineering A283, 2000.

SILVA, Vanderlei R. da; Reinert, Dalvan J; Reichert, José M. **Resistência Mecânica do Solo à Penetração Influenciada Pelo Tráfego Controlado de uma Colhedora em Dois Sistemas de manejo do Solo**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 30, n° 5, setembro/ outubro de 2000.

SILVA, Thiago de Oliveira Brandão. **Inventário da emissão do material particulado proveniente de diesel e biodiesel brasileiro: estudo em um banco de provas de motores**. Curitiba, 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, 2014.

SSAB. **Aço de Emissão Zero Carbono**. Disponível em: <<https://www.ssab.com/pt-br/not%C3%ADcias/2023/03/ssab-launches-new-zeroemission-steel--ssab-zero>>. Acesso em 08 setembro 2023.

SSAB. STRENGTH® 700. **Data sheet. Sweden**. Disponível em: <<https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/strenx>> Acesso em 07 de setembro de 2023.

SOUZA, R. M. O. **Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Belém. Maio 2003. 39 f. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>> Acesso em 10 de janeiro de 2025.

TRATORES E COLHEITADEIRAS. Disponível em: <<https://www.tratoresecolheitadeiras.com.br/veiculo/toledo/pr/plataforma-colheitadeira/new-holland/milho-5-linhas/2003/16-pes/espigadeira/05-linhas/terra-mais-implementos-agr%C3%ADcolas/1149292>>. Acessado em: 18 de março de 2024.

TRŠKO, L.; LAGO, J.; JAMBOR, M.; NOVÝ, F.; BOKŮVKA, O.; FLORKOVÁ, Z. **Microstructure and residual stress analysis of Strenx 700 MC welded joint**. Production Engineering Archives, v. 26, n. 2, p. 41–44, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342855398_Microstructure_and_residual_stress_analysis_of_Strenx_700_MC_welded_joint> Acesso em: 01 de junho de 2025.

V. VORKOV, A. GARCÍA, J. R. DUFLOU, **Bending Parameters in Heat Assisted Air Bending of High Strength Steels**, Procedia Manufacturing 26 April 2020 Volume 47 (Cover date: 2020) Pages 1314-1318, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920313160>>

VENCE TUDO. Disponível em: <<https://vencetudo.ind.br/pt-br/produtos/49/bocuda-serie-08#lg=1&slide=0>>. Acessado em: 18 de março de 2024.

VERISSIMO, G. S. **ABAQUS Conceitos Básicos**. Belo Horizonte. 2006. 234 f. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/704481508/Apostila-ABAQUS>> Acesso em 21 de junho de 2025.

VUORINEN, E.; HOSSEINI, N.; HEDAYATI, A.; KORNACKER, E.; FERNANDEZ, M.T.; Sanz, J.; Gonzalez, M.I.; Canibalo, E. **Mechanical and microstructural evaluation of high performance steel (S700MC) for road restraint systems**. *Eng. Fail. Anal.* 2020, 108, 104251.

WORLD AUTO STEEL. **The Global Formability Diagram**. AHSS Insights Blog. Novembro 2021. Disponível em: <<https://ahssinsights.org/blog/a-new-global-formability-diagram/>> Acesso em: 23 ago. 2025.

WOODHEAD, J. H. e KEOWN, S. R.; **HSLA Steels: Metallurgy and Applications**; ASM International, Beijing; China; p. 15; 1985.