

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE-PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS - PPGE3M

*MARCELO CARPENEDO*

UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA NA REDUÇÃO DE  
PESO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS COLHEITADEIRAS DE GRÃOS

Porto Alegre  
2014

*MARCELO CARPENEDO*  
Engenheiro Mecânico

UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA NA REDUÇÃO  
DE PESO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS COLHEITADEIRAS DE GRÃOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Ciência e tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre  
2014

*MARCELO CARPENEDO*

UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA NA REDUÇÃO  
DE PESO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS COLHEITADEIRAS DE GRÃOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela Banca examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora

Dr. Ruben Manoel de Braga – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima – Fundação de Apoio à UFRGS

Prof. Dr. Antônio Fernando Burkert Bueno - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho à minha família, que me apoiou e me apóia sempre, meus pais, meu irmão e minha esposa, sem os quais jamais teria chegado até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Pela conclusão deste trabalho agradeço primeiramente a Deus, pela força concedida a mim na busca pelo conhecimento.

Agradeço a todos os profissionais, colegas e amigos da AGCO e do Laboratório de Metalurgia Física - LAMEF - da UFRGS, que me apoiaram e contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Um agradecimento especial ao meu orientador Telmo, o qual me apoiou integralmente no desenvolvimento deste trabalho.

A todos um sincero "Muito obrigado", por tudo, pela força, pelo apoio técnico e científico e pessoal, pela parceria, pois venci apenas um degrau, e para todos os outros que ainda irei transpor deixo a certeza da lembrança e reconhecimento por tudo o que fizeram por mim.

*"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê."*

Arthur Schopenhauer

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo redimensionar o conjunto soldado de uma máquina colheitadeira denominado canal embocador, buscando a redução de peso com a manutenção ou aumento da resistência aos esforços mecânicos mediante a utilização de um aço microligado de baixo carbono e média resistência mecânica. Para isso, durante a etapa de projeto, foram realizadas análises de elementos finitos como forma de otimizar a distribuição de carregamentos e matérias primas. Após a fabricação do protótipo foram feitos ensaios mecânicos para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais e processos de fabricação utilizados. Os mesmos apresentaram bons resultados em relação aos métodos e parâmetros aplicados, visto as boas propriedades mecânicas obtidas nos corpos de prova ensaiados. A última etapa das análises consistiu em submeter o conjunto proposto e o conjunto atualmente produzido a um ensaio de fadiga, comparando-os mecanicamente, sendo que os resultados mostraram a superioridade do conjunto proposto em relação ao atual nos quesitos resistência à fadiga e resistência à deformação. Com os resultados obtidos constatou-se a viabilidade da substituição dos materiais atualmente utilizados por materiais de melhores propriedades mecânicas, sendo possível a manutenção de aspectos como boa soldabilidade, alta resistência mecânica e custos equivalentes. Embora o aço escolhido possua preços até 30% superiores ao aço comercial atualmente empregado, o mesmo possibilitou a redução de peso em 16,6%, além da redução no uso de consumíveis e recursos envolvidos no processo de fabricação. Este estudo mostra a viabilidade no emprego de aços microligados em máquinas agrícolas visando a redução de peso, sendo esta uma tendência na indústria de máquinas e implementos agrícolas.

Palavras-chave: Redução de peso. Máquinas agrícolas. Aço microligado.

## ABSTRACT

This current study has as aim resize the welded assembly of a combine harvester called feeder housing, searching for weight reduction with maintenance or increase of the mechanic resistance using a low carbon and medium strength microalloyed steel. To this, during the project step, were made finite elements analysis as way to improve the loads distribution and raw materials. After the prototype production were made mechanical tests to evaluate mechanical properties of the materials and fabrication process used. Them shown good results for the methods and parameters used, due the good mechanical properties got on the specimens during the tests. The last analysis step consisted to submit the new weldment and the current weldment produced to a fatigue analysis, comparing mechanically both, where the results showed the better quality of the new weldment in comparison to the current as fatigue resistance and deformation resistance. With the results was verified the feasibility of the current materials replacement to materials with better mechanical properties, keeping the good weldability, high strength and costs. Although the new steel used has prices up to 30% higher than comercial steel current used, its enabled 16,6% of weight reduction in addition to the materials and resources involved on the fabrication process. This study show the feasibility of the use of microalloyed steels in agricultural machinery aiming the weight reduction, being this a trend in the agricultural machinery and implements.

Key-words: Weight reduction. Agriculture machinery. Microalloyed steel.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de emissões de gases poluentes atualmente praticados. ....	18
Figura 2 - Programação dos níveis de emissões para a regulamentação TIER. ....	18
Figura 3 - Programação dos níveis de emissões para a regulamentação STAGE.....	19
Figura 4 - Máquina colheitadeira de classe 1. ....	25
Figura 5 - Máquina colheitadeira de classe 8. ....	25
Figura 6 - Principais sistemas de uma máquina colheitadeira de grãos. ....	27
Figura 7 - Sistema de recolhimento de uma colheitadeira de grãos. ....	27
Figura 8 - Sistema de trilha de uma máquina colheitadeira de grãos. ....	29
Figura 9 - Sistema de separação de uma máquina colheitadeira de grãos.....	29
Figura 10 - Sistema de separação de uma máquina colheitadeira de grãos. ....	30
Figura 11 - Sistema de armazenamento de uma máquina colheitadeira de grãos. ....	31
Figura 12 - Habitáculo de um trator de última geração.....	32
Figura 13 - Relação entre a resistência mecânica dos aços e a redução de peso. ....	34
Figura 14 - Relação entre o consumo de combustível por quilômetro e o peso do automóvel. ....	35
Figura 15 - Evolução do uso de componentes não metálicos na indústria automotiva. ....	36
Figura 16 - Influência percentual dos mecanismos de aumento da resistência mecânica ativados pela ação de elementos microligantes. ....	39
Figura 17 - Movimentação atômica durante o processo de solda. ....	42
Figura 18 - (a) Força de atração atômica em função do raio atômico; (b) Energia de atração interatômica em função da distância interatômica.....	43
Figura 19 - Distribuição das forças atuantes sobre uma junta soldada paralela simétrica.....	44
Figura 20 - Distribuição das forças atuantes sobre uma junta soldada paralela assimétrica .....	44
Figura 21 - Características geométricas de uma união soldada: a - solda de topo; b - solda em ângulo.....	45
Figura 22 - Distribuição da temperatura de soldagem para chapas de aço de: (a) 5mm; (b) 10mm; (c) 20mm. ....	48
Figura 23 - Resistência mecânica em função da velocidade de resfriamento. ....	49

Figura 24 - Localização dos principais tipos de trincas em juntas soldadas.....	50
Figura 25 - Influência do tamanho do defeito em relação à resistência mecânica da junta soldada. .....	51
Figura 26 - Carbono equivalente em relação à temperatura de pré-aquecimento mínima. ....	54
Figura 27 - Relação entre as regiões de uma junta soldada e suas respectivas temperaturas de origem. ....	56
Figura 28 - Caracterização morfológica das regiões de uma junta soldada em função das temperaturas de origem. ....	56
Figura 29 – Influência da velocidade de resfriamento na microestrutura final da junta zona fundida. ....	58
Figura 30 - Etapas e características do processo de solidificação de uma junta soldada. ....	58
Figura 31 - Influência da altura do reforço da solda na resistência à fadiga da junta. ....	59
Figura 32 - Zona fundida e metal de base de uma junta soldada.....	61
Figura 33 - Ciclo volumétrico da distorção em função do tempo.....	62
Figura 34 - Principais tipos de distorções.....	63
Figura 35 - Etapas da falha por fadiga.....	65
Figura 36 - Distribuição de tensões para três configurações de juntas em ângulo. ....	66
Figura 37 - Distribuição de tensões para três configurações de juntas de topo. ....	66
Figura 38 - Pontos de montagem do canal embocador na máquina colheitadeira e na plataforma de corte. ....	69
Figura 39 - Vista isométrica dos pontos de ação de tensões sobre o canal embocador. ....	69
Figura 40 - Movimento rotacional da plataforma. ....	70
Figura 41 - Espessuras de chapas utilizadas no canal embocador atual.....	71
Figura 42 - Percentual, em peso, de cada espessura de chapa utilizada no canal embocador atual. .....	72
Figura 43 - Dimensões dos corpos de prova para: a) dobramento e b) tração.....	79
Figura 44 - Vista isométrica do projeto da bancada para o ensaio de fadiga. ....	81
Figura 45 - Vista isométrica da bancada de fadiga com o canal embocador. ....	81
Figura 46 - Instalação da bancada de fadiga para o conjunto proposto.....	82
Figura 47 - Posicionamento dos strain gauges no embocador proposto.....	83

Figura 48 - Instalação da bancada de fadiga para o conjunto produzido atualmente. ....	83
(a).....	87
(b).....	88
(c).....	88
Figura 49 - Simulação de elementos finitos tendo como referência a tensão de escoamento mínima do aço LNE 380.....	88
(a).....	89
(b).....	89
Figura 50 - Simulação de elementos finitos tendo como referência 90% da tensão máxima de escoamento do aço LNE 380. ....	89
Figura 51 - Espessuras de chapas utilizadas no canal embocador proposto .....	91
Figura 52 - Percentual, em peso, de cada espessura de chapa utilizada no canal embocador proposto.....	92
Figura 53 - Projeto estrutural do novo canal embocador.....	93
Figura 54 - Macrografia de uma junta soldada em ângulo mostrando o tamanho do reforço da solda e sua penetração. ....	95
Figura 55 - Macrografia de uma junta soldada de topo mostrando o tamanho do reforço da solda e sua penetração. ....	95
Figura 56 - Micrografia do metal de base com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes.....	96
Figura 57 - Micrografia da ZAC com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes. ....	96
Figura 58 - Micrografia do MS com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes. ....	97
Figura 59 - Corpo de prova ensaiado para dobramento.....	99
Figura 60 - Sequência dos perfis de microdureza realizados. ....	100
Figura 61 - Resultados da microdureza realizada no sentido horizontal para: a) perfil 1; b) perfil 2; c) perfil 3 e d) perfil 4. Microdureza Vickers HV <sub>0,3</sub> .....	101
Figura 62 - Perfil de microdureza no sentido vertical da amostra, no centro do cordão de solda. Microdureza Vickers HV <sub>0,3</sub> .....	101
Figura 62 - Região de ocorrência da trinca no embocador atualmente fabricado.....	103
Figura 63 - Patamares de carregamentos versus número de ciclos. ....	104

<i>(a)</i> .....	104
<i>(b)</i> .....	105
<i>(c)</i> .....	105
Figura 64 - Simulação de elementos finitos utilizando o carregamento para o ensaio de fadiga..	105

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de aços carbono estabelecidas pela norma NBR 6656. ....	42
Tabela 2 - Limites de porcentagem de elementos químicos presentes no aço para classificá-lo em relação à soldabilidade.....	52
Tabela 3 - Temperatura de pré-aquecimento em função do carbono equivalente. ....	54
Tabela 4 - Temperatura de pré-aquecimento em função da espessura da chapa e de sua classificação quanto à composição química.....	55
Tabela 5 - Tamanho mínimo recomendado para o filete de solda.....	68
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e químicas do arame de solda utilizado no projeto. ....	80
Tabela 8 - Acelerações verticais da plataforma da máquina colheitadeira em campo. ....	86
Tabela 9 : Composição química e propriedades mecânicas do aço LNE 380 de acordo com o certificado de matéria-prima.....	90
Tabela 10 - Composição química obtida pelo ensaio de espectroscopia do aço LNE 380.....	90
Tabela 11 - Propriedades mecânicas de aços carbono estabelecidas pela norma NBR 6656.....	91
Tabela 12: Valores médios dos resultados dos ensaios mecânicos de tração. ....	97
Tabela 13 - Tensões obtidas nos strain gauges no ensaio de fadiga do novo canal embocador. ...	106
Tabela 14 - Tensões obtidas nos ensaios de fadiga e de elementos finitos, para uma mesma carga aplicada. ....	106
Tabela 15 - Tensões obtidas nos strain gauges no ensaio de fadiga no embocador atual. ....	107

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANFAVEA - Associação Nacional do Fabricantes de Veículos Automotores

ANSI - American National Standards Institute

ARBL - Alta Resistência e Baixa Liga

ASM - American Society of Materials

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS - American Welding Society

CS – Commercial Steel

FEA - Finite Elements Analysis

HSS - High Strength Steels

IIW - International Institute of Welding

MAG - Metal Active Gas

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MB - Metal de Base

MS - Metal de Solda

NBR - Norma Brasileira

ULSAB - Ultra Light Steel Auto Body

USEPA - United States Environmental Protection Agency

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
2	OBJETIVOS.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
3.1	MÁQUINAS COLHEITADEIRAS DE GRÃOS .....	22
3.1.1	Mecanização Agrícola Brasileira e Produção de Alimentos.....	22
3.1.2	Funcionamento das Máquinas Colheitadeiras.....	24
3.2	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E COMPACTAÇÃO DO SOLO .....	31
3.3	MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA.....	38
3.4	CLASSIFICAÇÃO DO AÇO UTILIZADO NO PROJETO .....	40
3.5	SOLDAGEM.....	42
3.5.1	Juntas Soldadas.....	42
3.5.2	Processo de Soldagem MAG .....	45
3.5.3	Soldabilidade dos Aços .....	46
3.5.4	Energia de Soldagem .....	60
3.5.5	Distorções .....	61
3.6	FADIGA.....	64
3.7	CONJUNTO SOLDADO DO CANAL EMBOCADOR.....	67
3.8	ENSAIOS MECÂNICOS .....	72
3.8.1	Ensaio de Tração.....	73
3.8.2	Ensaio de Dobramento .....	73
3.8.3	Perfil de Microdureza .....	73
3.8.4	Ensaio de Fadiga.....	74
4	METODOLOGIA .....	75
4.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO UTILIZADOS.....	75

4.2	DESENVOLVIMENTO DO NOVO CANAL EMBOCADOR .....	77
4.3	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS .....	77
4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS .....	78
4.5	BANCADA PARA ENSAIOS DE FADIGA .....	81
4.6	AVALIAÇÃO DE CUSTOS .....	84
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
5.1	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS .....	86
5.2	APLICAÇÃO DO AÇO LNE 380.....	90
5.3	SOLDABILIDADE DO AÇO LNE 380.....	94
5.4	ENSAIOS MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA.....	97
5.5	ENSAIO DE FADIGA.....	102
5.6	CUSTOS DO NOVO CANAL EMBOCADOR.....	107
6	CONCLUSÕES.....	109
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

## 1 INTRODUÇÃO

A redução de peso em componentes e estruturas é uma prática cada vez mais utilizada na indústria automobilística e está se tornando uma tendência para os demais setores, como o de máquinas e implementos agrícolas. Além de reduzir a quantidade de matéria-prima aplicada para a fabricação de determinado produto, geralmente vem acompanhada de uma otimização dos seus componentes, propiciando além da redução de peso, muitas vezes, a redução de custos.

A preocupação com a massa estrutural não está somente relacionada com os custos de produção, mas também com os impactos ambientais. Menores quantidades de matérias-primas significam menor demanda de minérios e a redução de peso em máquinas e equipamentos está diretamente relacionada com o consumo de combustível. O conceito de redução de peso é largamente aplicado na indústria de veículos de passeio. Entretanto, nos últimos anos, a indústria de máquinas e implementos agrícolas, embora de forma lenta, vem demonstrando interesse neste conceito, devido à crescente demanda por produtividade e desempenho em seus produtos.

Nas atividades relacionadas ao trabalho no campo, no cultivo da terra, há um paradoxo que, de certa forma, persistirá em existir por muito tempo: o peso das máquinas agrícolas.

Há basicamente dois tipos de equipamentos: os que tracionam e os que são tracionados.

Em máquinas que tem a finalidade de tracionar outros equipamentos o fator peso é um requisito importante, pois garante que ocorra a aderência dos pneus ao solo e, conseqüentemente, resulte em um tracionamento eficiente, embora exista uma relação ideal entre peso versus capacidade de tração da máquina, acima ou abaixo da qual não ocorre tracionamento ou há desperdício de energia. Nas máquinas que têm a função de recolher o produto ocorre o inverso, pois a tração é usada apenas para deslocamento do equipamento. Assim, quanto menor for o seu peso, menor será a compactação do solo, favorecendo, entre outros aspectos, a sulcagem do solo no momento da semeadura, a absorção de água e nutrientes e o desenvolvimento vegetal, sendo que neste caso o peso do próprio equipamento é suficiente para garantir a aderência dos pneus ao solo.

Inúmeros estudos são realizados na área da compactação do solo, pois este afeta algumas características fisiológicas da cultura, como o crescimento e o desenvolvimento radicular, além de aumentar o consumo de combustível durante o seu cultivo (SILVA, 2000). As máquinas colheitadeiras de grãos são um bom exemplo de necessidade de redução de peso. Por si próprias já possuem pesos que variam de 8 a 18 toneladas, aproximadamente, aumentando significativamente à medida que o compartimento de armazenamento de grãos vai sendo abastecido com a colheita, sendo que este varia de 4000 a mais de 12000 litros nas máquinas atuais. Há de se considerar, também, que em alguns equipamentos o tanque de combustível chega a armazenar mais de 1000 litros de combustível.

O peso específico da soja, por exemplo, é de 800 kilogramas por metro cúbico, em média, sendo que este valor pode variar de acordo com a variedade do grão e sua umidade. Assim, um tanque de 5000 litros, quando cheio, representa um acréscimo de 4000 kg ao peso do equipamento, o que em números representa aproximadamente 40% do peso de uma máquina de pequeno porte.

Uma medida muito adotada para minimizar o efeito da compactação é a utilização de pneus de alta flutuação, rodados duplos e até mesmo esteiras. Recentemente materiais poliméricos estão sendo usados em substituição a partes metálicas, como uma alternativa tanto de redução de peso como custos, além da possibilidade de se projetar geometrias mais complexas, que contemplem o *design* do equipamento. No entanto a aplicação de partes plásticas é limitada pelo custo de produção das ferramentas para obtenção dessas peças, o qual se torna inviável devido ao relativo baixo volume de produção. Em alguns casos específicos a substituição de partes metálicas por plásticas é viável em função da necessidade, devido a fatores relacionados com os sentidos humanos, como estética e tato.

O consumo de combustível está diretamente ligado, entre outros fatores, com o peso do equipamento, sendo um quesito muito discutido devido às reservas finitas de combustíveis fósseis. No cenário econômico atual existem normas que estabelecem a quantidade máxima de emissões que um motor agrícola pode emitir, que são as regulamentações *TIER* para América no Norte e *Stage* para a Europa, sendo este um pré-requisito para exportações de máquinas a determinadas regiões.

A figura 1 mostra os níveis de emissões aceitos atualmente. A adoção de uma ou outra regulamentação deve-se a adequações ao modelo econômico local, a qual envolve questões políticas bem como o tipo de combustível a ser utilizado, sendo que ambas as

regulamentações possuem metas e padrões semelhantes. Alguns países não adotaram esta regulamentação e outros possuem regulamentações semelhantes, entretanto este aspecto não será discutido neste trabalho.

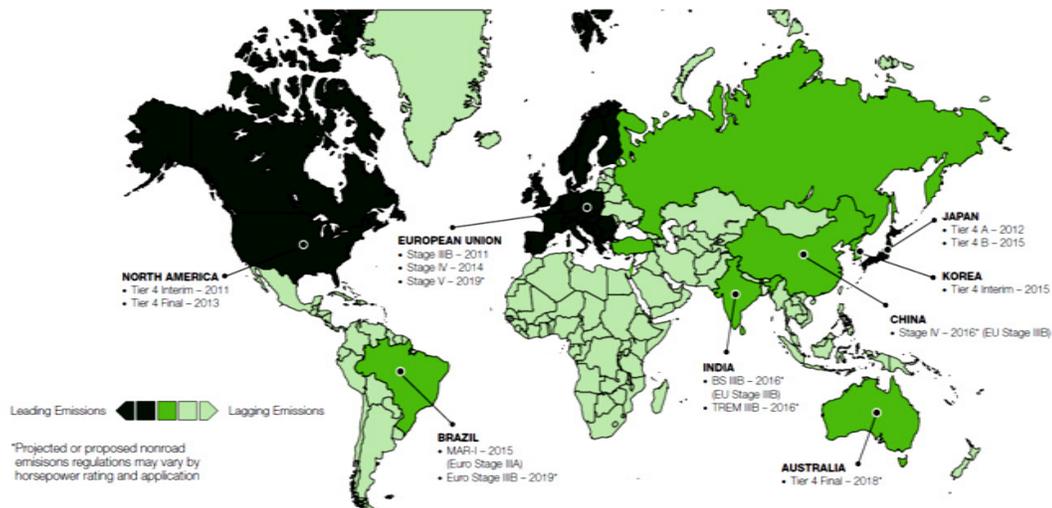


Figura 1 - Níveis de emissões de gases poluentes atualmente praticados.

Fonte: CUMMINS, 2012.

As figuras 2 e 3 mostram a programação das regulamentações TIER para os Estados Unidos, regulamentado pela *United States Environmental Protection Agency - US EPA*, e Stage para a Europa, respectivamente, para os níveis de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP), de acordo com a potência dos motores e o ano em que a regulamentação entra em vigência.

kW	(HP)	Tier 2 Tier 3 Tier 4 Interim Tier 4 Final									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
0-18	(0-24)	7.5 / 6.6 / 0.40									
19-36	(25-48)	7.5 / 5.5 / 0.30									
37-55	(49-74)	4.7 / 5.0 / 0.03									
56-129	(75-173)	4.0 / 5.0 / 0.30									
130-560	(174-751)	4.0 / 5.0 / 0.20									
>560	(>751)	6.4 / 3.5 / 0.20									

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
2010	7.5 / 6.6 / 0.40								
2011		7.5 / 5.5 / 0.30							
2012			4.7 / 5.0 / 0.03						
2013				4.0 / 5.0 / 0.30					
2014					4.0 / 5.0 / 0.20				
2015						6.4 / 3.5 / 0.20			
2016							3.5 / 0.40 / 3.5 / 0.10		
2017								3.5 / 0.19 / 3.5 / 0.04	
2018									0.67 / 0.19 / 3.5 / 0.03 (b)

NOx/HC/CO/PM (g/kW-hr)  
 (NOx+NMHC)/CO/PM (g/kW-hr)  
 [Conversion: (g/kW-hr) x 0.7457 = g/bhp-hr]

a. Applies to portable power generation > 900 kW (> 1207 hp).  
 b. Applies to portable power generation > 560 kW (> 751 hp).

Figura 2 - Programação dos níveis de emissões para a regulamentação TIER.

Fonte: CUMMINS, 2012.

kW	(HP)	<span style="color: blue;">■</span> Stage IIIA <span style="color: orange;">■</span> Stage IIIB <span style="color: yellow;">■</span> Stage IV								
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
18-36	(24-48)	(7.5) / 5.5 / 0.60					*			
37-55	(49-74)	(4.7) / 5.0 / 0.40			(4.7) / 5.0 / 0.025					
56-129	(75-173)	(4.0) / 5.0 / 0.30		3.3 / 0.19 / 5.0 / 0.025			0.4 / 0.19 / 5.0 / 0.025			
130-560	(174-751)	(4.0) / 3.5 / 0.20	2.0 / 0.19 / 3.4 / 0.025			0.40 / 0.19 / 3.5 / 0.025				
>560	(>751)						*			

NOx/HC2/CO/PM (g/kW-hr)  
 (NOx+NMHC)/CO/PM (g/kW-hr)  
 [Conversion: (g/kW-hr) x 0.7457 = g/bhp-hr]

Figura 3 - Programação dos níveis de emissões para a regulamentação STAGE.

Fonte: CUMMINS, 2012.

Podem ser observados os níveis de exigências aplicados em cada país, ou continente, bem como as melhorias alcançadas e o patamar de emissões permitido no estágio final da regulamentação, em gramas por kilowatt hora. Tanto na figura 2 quanto na figura 3 a cor amarela representa o estágio final da regulamentação, sendo atingidos neste ponto os níveis de emissões classificados como desejáveis para a data em que se encontra. As emissões são classificadas por categoria de potência dos motores, sendo que à medida que a potência aumenta os níveis de emissões são restringidos.

É evidente a preocupação mundial com os níveis de emissões por veículos automotores, sendo a redução de peso uma das alternativas que, em conjunto com avanços tecnológicos em motores e dinâmica veicular, irão auxiliar na busca deste objetivo.

Em meio a todos esses desafios está a utilização de materiais avançados que combinam alta resistência mecânica e boa manufaturabilidade, permitindo que componentes fabricados com materiais tradicionalmente utilizados, como aços de baixo carbono e baixa resistência mecânica, possam ser reprojatados e otimizados, utilizando materiais que permitam redução de peso, manutenção ou aumento da resistência mecânica e até mesmo redução de custos.

Em máquinas e implementos de grande porte, como os utilizados no meio agrícola, a predominância na utilização do aço é evidente. É neste contexto que surgem aplicações dos aços de alta resistência, conhecidos do inglês por *High Strength Low-Alloy Steels – HSLA*.

Este trabalho se propõe a estudar a redução de peso em um conjunto soldado denominado canal embocador, parte de uma máquina colheitadeira de grãos, o qual é atualmente fabricado a partir de chapas de aço de baixo carbono e baixa resistência mecânica, reprojatando o mesmo para a utilização de um aço de alta resistência e baixa

liga, mostrando através de estudos detalhados as propriedades mecânicas deste material quando processado através de métodos e processos de fabricação específicos, largamente empregados dentro da indústria de máquinas e implementos agrícolas.

A caracterização do material e dos processos de fabricação dar-se-ão por meio de ensaios mecânicos, avaliando os aspectos relacionados com as características mecânicas esperadas para a aplicação do produto final em trabalho de campo.

O conjunto a ser estudado consiste em um quadro estrutural que tem por função sustentar o implemento denominado plataforma de corte/recolhimento na parte frontal da máquina colheitadeira. Por este implemento possuir um peso elevado em comparação com a máquina colheitadeira como um todo, representando em média 20% do peso da máquina, o canal embocador é altamente solicitado, suportando cargas que, combinadas com as acelerações provenientes do deslocamento da máquina, submetem o conjunto a uma situação de carregamentos ideais para a prática de redução de peso visando a validação da estrutura em relação à resistência mecânica.

O conceito de redução de peso ainda é pouco explorado no meio agrícola, porém é extremamente benéfico, pois acarreta na melhoria da eficiência e produtividade das máquinas e implementos que fazem o processamento primário dos produtos agrícolas.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal o redimensionamento da estrutura soldada que constitui o conjunto do canal embocador de uma máquina colheitadeira, utilizando um aço microligado de média resistência mecânica e baixo carbono, mostrando o potencial de redução de peso existente nas máquinas colheitadeiras de grãos.

A utilização de aços microligados permite otimizar a forma construtiva das estruturas metálicas, fato que será abordado neste trabalho. O projeto do novo canal embocador será estruturalmente diferenciado do atualmente fabricado, com alterações nos conceitos estruturais, dando ênfase nos elementos estruturais que efetivamente atuam na absorção dos carregamentos mecânicos impostos pela utilização do conjunto.

Com o redimensionamento do conjunto soldado, este trabalho visa mostrar também a viabilidade de redução de peso em máquinas agrícolas, em função das crescentes exigências de aumento de produtividade das lavouras e diminuição da emissão de poluentes.

Atualmente o assunto redução de peso em máquinas agrícolas possui uma literatura criticamente escassa, sendo que a elaboração deste trabalho contribuirá para que futuros estudos possam ser concebidos, fornecendo informações e referências orientativas a diversos aspectos abordados em estudos de redução de peso em estruturas metálicas, além de caracterizar as propriedades mecânicas relativas ao processo de solda do aço LNE 380, como a soldabilidade e características relativas aos processos de corte e dobra.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 MÁQUINAS COLHEITADEIRAS DE GRÃOS**

##### **3.1.1 Mecanização Agrícola Brasileira e Produção de Alimentos**

A produção mundial de grãos vem crescendo ininterruptamente, batendo recordes ano após ano. No Brasil, em comparação com a década de 90, a produção de grãos saltou de 58,3 milhões de toneladas na safra 1989/90 para mais de 157 milhões de toneladas em 2010/11. No mesmo período, a produtividade média saltou de 1,5 toneladas por hectare para 3,2 toneladas por hectare (ANFAVEA, 2011).

Este crescente aumento na produção anual deve-se não somente pelo aumento da área cultivada, que aumentou de 38,9 milhões de hectares na safra de 1989/90 para 49,3 milhões em 2010/11 (MAPA, 2012), mas também pela tecnologia empregada no trabalho do campo, tanto em biotecnologia como em mecanização, sendo que esta última "contribuiu diretamente para boa parte da evolução na produção agrícola brasileira e, segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, respondeu por nada menos que 30% dos ganhos de produtividade obtidos nos últimos anos" (MAPA, 2012). Observa-se que enquanto a produtividade média por hectare aumentou cerca 269,3%, a área cultivada aumentou cerca de 26.7%.

O desenvolvimento do setor de máquinas agrícolas acompanha o desenvolvimento do agronegócio brasileiro e mundial, sendo a grande alavanca dos bons resultados obtidos na produção de alimentos no mundo. Embora com a presença do desemprego rural, sem a mecanização a produção agrícola estaria estagnada, limitada pela eficiência do trabalho manual e disponibilidade de mão de obra.

Especificamente no estado do Rio Grande do Sul, o agronegócio corresponde a cerca de 37,8% do produto interno bruto - PIB estadual, 47,5% dos empregos gerados e 69% das exportações do estado. A nível nacional, tomando como base outros setores representativos na economia, os números são proporcionalmente ainda maiores,

representando cerca 33% do PIB, 42% das exportações e 37% dos empregos brasileiros (GARCIA, 2008). Segundo o MAPA, em estudo de projeção para a produção nacional de grãos entre as safras de 2011/2012 a 2021/2022, os produtos agrícolas soja, milho, trigo, arroz e feijão deverão ter acréscimo na produção em 25,1%, 18,1%, 22,1%, 15,4% e 12,8%, respectivamente (MAPA, 2012).

Estes valores mostram a importância no agronegócio, devendo-se ter em mente que é no setor primário, entre eles a produção de grãos, que está a fonte de riquezas de uma nação.

Diferentemente de tratores de rodas, máquinas colheitadeiras de grãos possuem um volume de vendas moderado. Isso se deve ao fato de serem equipamentos de elevado custo e elevado rendimento operacional, onde apenas uma máquina pode ser responsável pela colheita de centenas de hectares.

A partir dos primeiros registros de vendas de máquinas colheitadeiras no Brasil, não houve incrementos significativos no número de unidades vendidas por ano, mantendo um volume constante de, em média, 5 mil máquinas por ano, aproximadamente (ANFAVEA, 2013). Uma das prováveis causas desta estabilização no número de vendas é o aumento da capacidade de processamento das máquinas. Para uma mesma classe de máquina, considerando os melhoramentos nos sistemas de trilha, separação e limpeza, os aumentos de produtividade variam de 20 a 50%, aproximadamente. Este número não pode ser generalizado, pois há inúmeros fatores que o afetam, como características da cultura a ser colhida e configuração do sistema de processamento da máquina colheitadeira.

Segundo FILHO, "os modelos econômicos e de exploração agrícola que dominam o cenário mundial provavelmente seriam inaplicáveis em seus moldes atuais sem a colhedora autopropelida de grãos" (FILHO, 2002, p. 7). Isso se deve ao fato deste equipamento realizar diversas tarefas do processo de colheita simultaneamente, cabendo ao produtor apenas operar a máquina e transportar os grãos colhidos, tarefa que antes demandava um processo manual para cada etapa, como o corte, recolhimento, alimentação nos equipamentos de trilha disponíveis, recolhimento dos grãos trilhados e posterior armazenamento destes. "A colhedora substitui com vantagens o trabalhador no campo, fazendo com que os produtos sejam obtidos mais facilmente, limpos e classificados, podendo ser mais rapidamente entregues ao consumidor" (SILVEIRA, 2001, p. 16).

A colheita manual de grãos ainda é realizada em algumas condições específicas, entretanto a saúde do trabalhador é fortemente afetada devido às condições severas que o

trabalho no campo o impõe. A necessidade de colher o mais rápido possível, somado à elementos como incidência de raios solares, atmosfera impregnada de pó e graves problemas relacionados à postura física do trabalhador fazem com que seja impraticável e inadmissível submetê-lo a condições tão insalubres.

O Brasil, com exceção do continente Africano, possui as maiores reservas de áreas agricultáveis do mundo, excluindo neste montante as áreas demarcadas, como reservas indígenas, ecológicas e florestas. Seguindo as tendências dos últimos anos a produção agrícola brasileira, e mundial, crescerá ainda mais, fato que remeterá à necessidade de uma maior quantidade de máquinas e maior produtividade por parte destas.

### **3.1.2 Funcionamento das Máquinas Colheitadeiras**

As máquinas colheitadeiras de grãos são elementos fundamentais ao agronegócio mundial no que tange a produção de grãos. Todas as etapas de produção de grãos possuem sua parcela de tecnologia, que vão desde a produção de sementes de qualidade, passando pela preparação e plantio, chegando finalmente ao processo de colheita. Entretanto, considerando que cada etapa possui altos níveis de tecnologia, tanto em nível vegetal quanto mecânico, o processo de colheita engloba simultaneamente tantas tarefas que jamais seria possível obter os atuais níveis de produção de grãos, como os alcançados nos últimos anos, sem a utilização de máquinas com as capacidades e produtividades atuais.

A função básica da máquina colheitadeira de grãos é recolher o produto da lavoura e processá-lo, sendo que o produto final é o grão limpo, separado 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, como a mostrada na figura 4, até as classe 9 ou 10, que representam máquinas de grande produtividade e tamanho. A figura 4 mostra uma colheitadeira de classe 1 e a figura 5 mostra uma colheitadeira de classe 8.



Figura 4 - Máquina colheitadeira de classe 1.

Fonte: Made-in-China.com



Figura 5 - Máquina colheitadeira de classe 8.

Fonte: Masseur, 2013.

As diferenças entre classes fazem com que seja possível atingir mercados específicos, sendo que cada classe está dentro de uma faixa de preços, assim como sua produtividade. No Brasil são atualmente comercializadas colheitadeiras de classe 4 a 9,

sendo que classes 3 deixaram de ser comercializadas a alguns anos (ANFAVEA, 2013) e classes superiores a 9 certamente serão desenvolvidas para suprir as demandas na produção de grãos.

Em relação ao sistema de processamento dos grãos, as máquinas colheitadeiras podem ser classificadas em convencionais, também conhecidas como tangenciais, axiais e híbridas, sendo que esta última é uma mescla dos sistemas convencional e axial. Em relação aos sistemas convencional e axial, a distinção básica entre eles é o posicionamento do sistema de trilha e separação. Enquanto no sistema convencional a alimentação do cilindro de trilha é feita de forma transversal ao deslocamento da máquina, sendo que o material processado segue caminho por um sistema de separação com movimentos alternativos, no sistema axial tanto a alimentação, trilha e separação, são realizadas por um conjunto único e contínuo, composto por um rotor posicionado do sentido longitudinal da máquina.

A etapa de limpeza dos grãos processados é feita da mesma forma tanto para o sistema convencional como axial, onde um conjunto de peneiras com movimentos alternativos separam os grãos e a palha remanescentes da etapa de separação.

As máquinas colheitadeiras são divididas basicamente em cinco sistemas: recolhimento, trilha, separação, limpeza e armazenamento, os quais serão descritos na sequência de seu funcionamento. Obviamente outros subsistemas integram o equipamento, como os sistemas hidráulico, elétrico, motor, transmissão, além de subdivisões dentro dos cinco sistemas principais descritos acima, os quais efetivamente realizam o processo de colheita. Os demais possuem a função de auxiliar os sistemas principais. A figura 6 mostra todos os cinco sistemas, descritos na sequência do processo de colheita.



Figura 6 - Principais sistemas de uma máquina colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

Cada um dos cinco sistemas consiste em uma etapa no processo de colheita. A fase de corte e/ou recolhimento consiste no corte/recolhimento e transporte do produto a ser processado para o interior da máquina.

A figura 7 mostra o fluxo do material e os elementos que compõem o sistema de recolhimento.

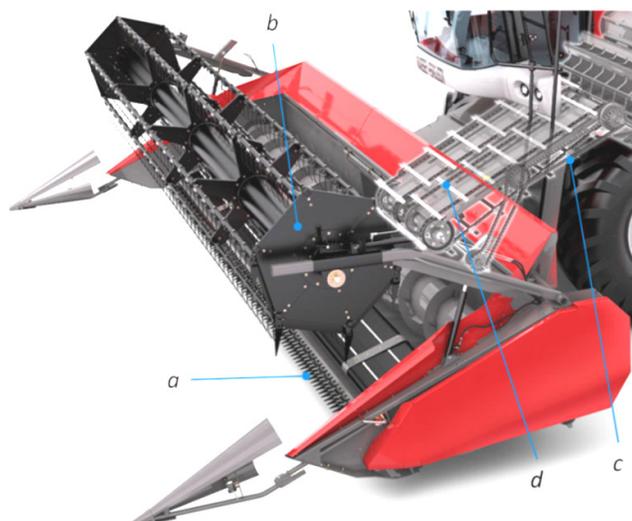


Figura 7 - Sistema de recolhimento de uma colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

A plataforma de corte/recolhimento *a*, posicionada na parte inferior frontal, auxiliada pelo molinete *b*, que tem a função de impedir que o caule se incline para frente ou para fora da plataforma, retira da lavoura o material a ser processado *c*, conduzindo-o através do canal embocador *d*, sendo posteriormente iniciado o processo de trilha.

No presente trabalho, o canal embocador *d* será o foco do estudo de redução de peso. É o elemento responsável por “transportar o material da plataforma de corte até a unidade de trilha e suportar, fisicamente, a plataforma” (PORTELLA, 2000, p. 32).

Para grãos que são colhidos na forma de vagens, ou pequenas espigas, como soja, trigo e aveia, esta tarefa é realizada por uma plataforma onde um conjunto de facas e contra-facas atua no sentido transversal do deslocamento do equipamento, cisalhando os caules e posteriormente conduzindo-os para o centro da plataforma pelo movimento de um cilindro helicoidal, ou por correias transportadoras.

Para grãos que são gerados na forma de espigas relativamente grandes, como milho e milho pipoca, ou em forma de cabeças, como o girassol, a plataforma de corte é substituída por uma plataforma de destacamento, onde existem 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 restrição na parte superior da linha de destacamento. Esta, após ser destacada, é levada para o centro da plataforma e conduzida ao sistema de trilha.

Com a passagem por esta primeira etapa, o produto é direcionado para o sistema de trilha, onde ocorre a separação entre os grãos e suas proteções naturais, sejam elas vagens ou espigas.

A figura 8 mostra o sistema de trilha, onde os grãos são separados de seu invólucro natural.

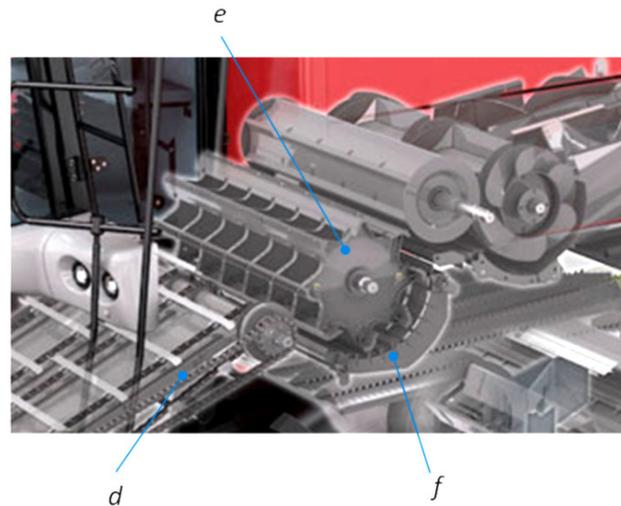


Figura 8 - Sistema de trilha de uma máquina colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

Esta é a etapa mais agressiva do processo de colheita de grãos, pois forças puramente mecânicas, e de grande intensidade, são aplicadas sobre o material vegetal para separar os grãos da palha. O material colhido oriundo do embocador *d* é direcionado para o cilindro de trilha *e* que, em conjunto com o côncavo *f*, realiza o processo de trilha, separando os grãos das partes da planta em que estão envolvidos (MORAES, 2005).

Após o processo de trilha toda a massa resultante, composta de grãos e palha, é transportada para o sistema de separação onde os rotores *g* e as grelhas *h*, ou côncavos, mostrados na figura 9, desagregam definitivamente os grãos de suas proteções naturais. A figura 9 ilustra o sistema de separação, composto basicamente de rotores e grelhas.

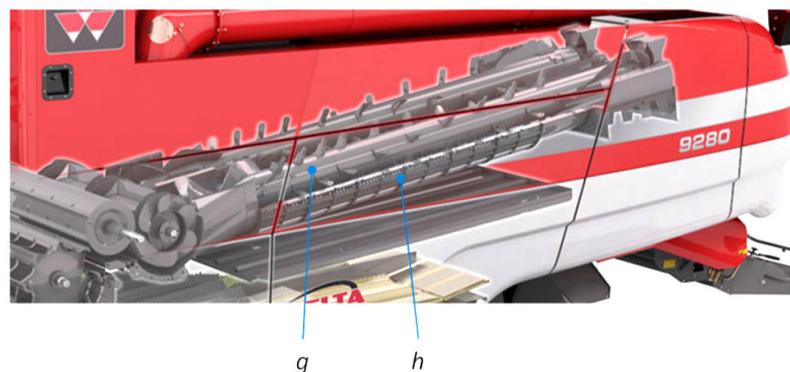


Figura 9 - Sistema de separação de uma máquina colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

Na figura 9 o mecanismo de separação é constituído por elementos denominados rotores, os quais possuem movimentos rotativos, sendo este o sistema de maior eficiência e produtividade. O sistema de separação pode ser concebido também por um mecanismo que realiza movimentos alternativos, sendo que neste caso um ou mais elementos, denominados saca-palhas, fazem a separação do material através movimentos alternados.

Após a última etapa de desagregação entre os grãos e a palha que os envolvia, a massa resultante é derivada para o sistema de limpeza, composto pelas peneiras *i*, as quais realizam a limpeza final do produto através de movimentos alternativos, auxiliados por um fluxo de ar fornecido pelo ventilador *j*.

A figura 10 mostra o sistema de limpeza e seus principais componentes.



Figura 10 - Sistema de separação de uma máquina colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

O material resultante deste processo são os grãos limpos *k* e a palha *l*, sendo esta última devolvida progressivamente ao solo à medida que a máquina colheitadeira efetua seu trabalho e se desloca pela lavoura.

Posteriormente, como mostrado na figura 11, os grãos limpos *k*, mostrados na figura 10, são captados em sua fase final *m* e conduzidos para o local de armazenamento *n*, consistindo no recolhimento dos grãos limpos e seu transporte até o tanque graneleiro, utilizando transportadores helicoidais e de correntes.

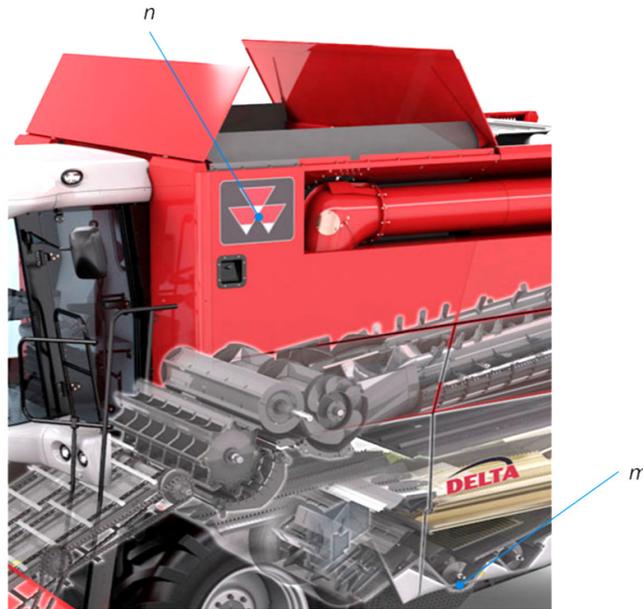


Figura 11 - Sistema de armazenamento de uma máquina colheitadeira de grãos.

Fonte: Adaptado de MASSEY , 2013

O processo de colheita de grãos é um dos mais complexos processos mecânicos de produção atuantes no campo, sendo que qualquer alteração nas características tanto no sistema mecânico da máquina quanto do material a ser colhido altera drasticamente os resultados da colheita, resultando em perdas, quebra de grãos ou danos mecânicos ao equipamento.

### 3.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E COMPACTAÇÃO DO SOLO

O consumo de energia é um fator preocupante em tempos onde a crescente demanda por recursos naturais necessita de meios de transporte cada vez mais eficientes, mas ao mesmo tempo mais seguros. A necessidade da melhora na eficiência dos veículos, em função das reservas finitas de combustíveis fósseis, tem levado as indústrias a uma corrida para o desenvolvimento de estruturas mais leves e ao mesmo tempo mais resistentes, o que impacta diretamente no consumo de energia para movimentá-las, bem como a redução das quantidades de material utilizado na fabricação do produto.

Essa necessidade se torna ainda mais premente em função da crescente incorporação de itens de conforto e recursos eletrônicos (GORNI, 2007), tanto na indústria automobilística como de máquinas e implementos agrícolas.

A idéia de que máquinas agrícolas possuem habitáculo rústico e grosseiro é notavelmente errônea, pois na maioria das máquinas dotadas de cabina o nível de recursos tecnológicos e de conforto pode ser encontrado somente em automóveis de luxo e, em alguns casos, nem a indústria automobilística utiliza tais recursos. Avançados recursos tecnológicos são utilizados em outras partes da máquina, como transmissão automática, piloto automático e georeferenciamento.

A figura 12 ilustra um habitáculo presente em máquinas agrícolas modernas.



Figura 12 - Habitáculo de um trator de última geração.

Fonte: TREKKERMIX, 2013.

Recursos como piloto automático, navegação controlada por georeferenciamento, 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, notavelmente as com maior capacidade, até o momento.

A crescente demanda por alimentos têm levado as empresas a desenvolverem equipamentos cada vez mais sofisticados e produtivos, o que inevitavelmente acarreta no aumento de tamanho e capacidade de armazenamento. Isso leva ao 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. 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” (GORNI, 2010).

No início do desenvolvimento de estruturas automotivas mais leves, devido à falta de opções em relação a matérias primas na forma de chapas planas de aço, materiais com uma relativa menor disponibilidade eram empregados, sendo que em décadas passadas o uso de materiais mais leves, como o alumínio, foi uma das alternativas às primeiras idéias de redução de peso em veículos.

Neste contexto a indústria aeroespacial, seguida pela automotiva, são as que atualmente dominam as pesquisas em redução de peso e, conseqüentemente, no consumo de energia. Em 2004 um grupo de empresas financiou o desenvolvimento do projeto *ULSAB - Ultralight Steel Auto Body*, visando desenvolver uma carroceria automotiva resistente e leve com a utilização de aços de alta e ultra-alta resistência. Ao término do projeto verificou-se que “a mesma estrutura pesava 25% menos que os similares, além de apresentar aumento de resistência de 80% no ensaio de torção estrutural e 52% no ensaio de flexão” (SILVEIRA, 2011). Este projeto demonstrou o potencial de desenvolvimento dos aços ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga.

Como o exemplo do ULSAB, KORCHYNSKY coloca que a substituição de materiais tradicionalmente utilizados por outros, com melhores características mecânicas, traz benefícios não só econômicos, mas também de desempenho e uma maneira de difundir a utilização desses materiais é através de projetos de demonstração, como foi o caso do ULSAB.

Entretanto a redução de peso realizada através desta substituição não depende somente da diferença na resistência mecânica, mas também no modo de carregamento (KORCHYNSKY). Assim, a substituição de aços de baixa resistência por aços de média ou alta resistência não leva a uma redução de peso proporcional ao aumento da resistência mecânica. A figura 13 mostra esta relação.

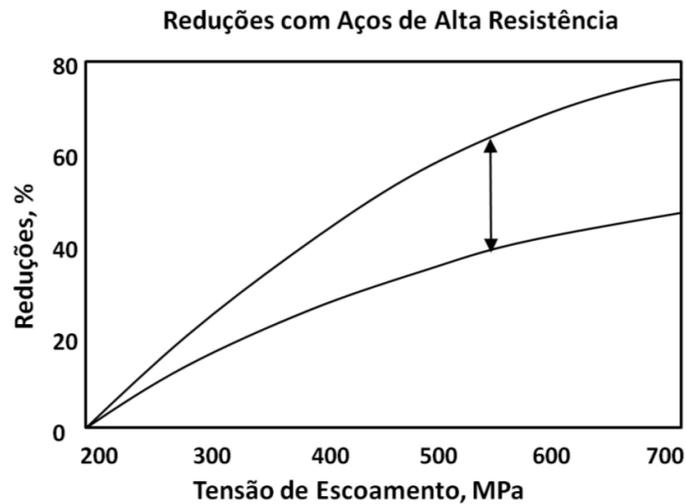


Figura 13 - Relação entre a resistência mecânica dos aços e a redução de peso.

Fonte: Adaptado de KORCHYNSKY, 2011.

Verifica-se pela figura 13 que a redução de peso pelo acréscimo da tensão de escoamento dos materiais tende a um limite, conhecido como índice de esbeltez. A curva superior do gráfico mostra o limite de redução de peso mediante o acréscimo da resistência mecânica do aço, sendo que a figura não especifica para qual tipo de material a relação é válida, sendo aplicado de forma genérica em função do limite de escoamento.

Isso é explicado pela forma com que o carregamento é aplicado sobre um elemento. Para carregamentos diretos, uniaxiais, a redução de peso é proporcional à diferença de resistência mecânica. Para outros tipos de carregamento, os quais ocasionam flexão do componente, um aumento de duas vezes na resistência mecânica pode contribuir para uma redução de peso de 34% ou mais (KORCHYNSKY).

Alguns estudos realizados para a indústria automobilística evidenciam as vantagens da redução de peso em veículos. FUKISAWA apud SENUMA (2001) relaciona o consumo de combustível de um veículo de acordo com seu peso, conforme ilustra a figura 14.

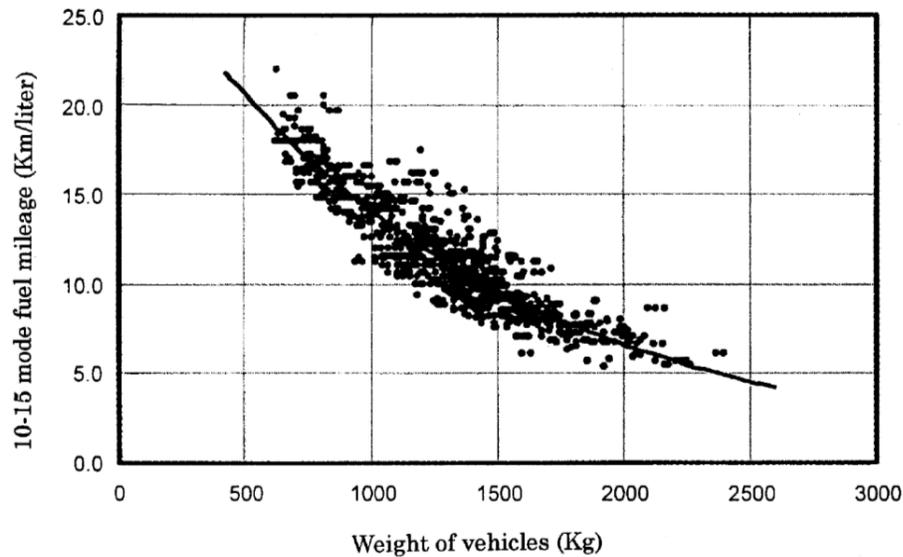


Figura 14 - Relação entre o consumo de combustível por quilômetro e o peso do automóvel.

Fonte: SENUMA, 2001

Pela análise da figura 14 observa-se que, apesar da dispersão nos resultados, a curva média apresenta uma tendência bem clara, ocorrendo algo semelhante ao que ocorre com o índice de esbeltez, sendo que neste caso o consumo específico de combustível tende a um limite, havendo um mínimo necessário para o fornecimento de energia necessária para deslocar uma determinada massa. Não são especificadas as condições de contorno para a obtenção do gráfico, porém é possível identificar a tendência à redução de consumo de combustível à medida que o peso veicular diminui.

Segundo estudos realizados por DeCICCO (2011), a redução de 1% no peso de um veículo representa um ganho de 0,66% em economia de combustível. Outra comparação mostra que “a cada 100 kg reduzidos no peso total do veículo, 0,3 litros de combustível são economizados em uma distância de 100 km”, o que representa “uma redução de 0,6 a 0,7 kg de CO<sub>2</sub> liberados na atmosfera” (MOURA, 2011).

A crescente demanda por maiores produtividades e consequentemente maiores máquinas, puxada pelo aumento no consumo de alimentos, evidencia a necessidade na redução do consumo de combustível e nas emissões de gases tóxicos na atmosfera.

Em máquinas colheitadeiras o percentual de aços de alta resistência é muito inferior em relação à indústria automotiva, devido principalmente aos custos, além do volume de produção. Outra alternativa para a redução de peso é a utilização de materiais não metálicos, como polímeros e compósitos. Assim como ocorre na indústria automotiva, as

máquinas agrícolas também estão migrando para a utilização desses materiais, embora o percentual de itens onde o aço foi substituído ainda seja relativamente pequeno.

Segundo WALLENTOWITZ (2003), na década de 70 a estrutura e componentes mecânicos dos automóveis eram fabricados 100% com materiais ferrosos. No ano 2000 este percentual caiu para cerca de 63%, sendo que em 2010 este percentual caiu para 53%, conforme pode ser verificado na figura 15.

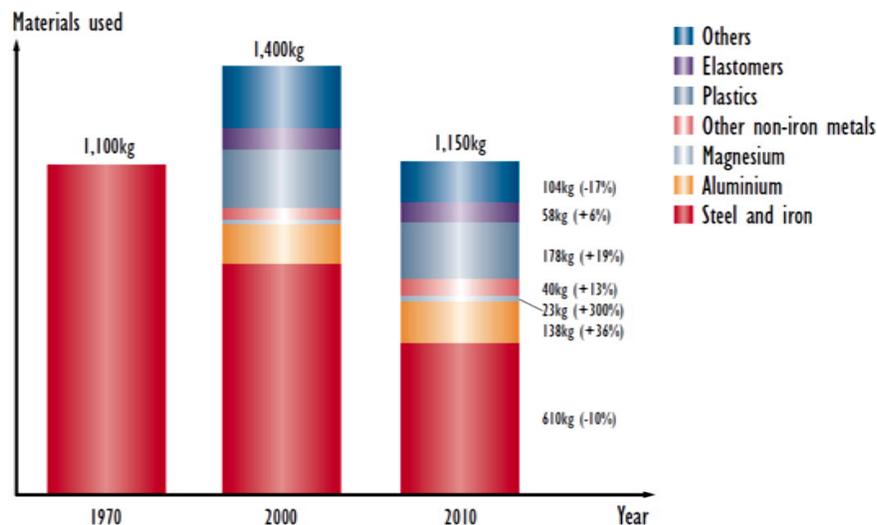


Figura 15 - Evolução do uso de componentes não metálicos na indústria automotiva.

Fonte: WALLENTOWITZ, 2003

Para máquinas colheitadeiras de grãos ainda não há estudos realizados no âmbito de se conhecer a porcentagem de materiais não-ferrosos utilizados na sua fabricação. Entretanto, pode-se afirmar que até o final da década de 1990 a grande maioria das máquinas colheitadeiras de grãos eram predominantemente fabricadas a partir de aço ou ferro fundido. Neste cenário alguns elementos, em aplicações específicas, como mancais e componentes com função de reduzir atrito, eram fabricados em madeira. Atualmente a grande disponibilidade e facilidade de obtenção de componentes em materiais poliméricos sintéticos vem ganhando espaço.

A partir de então, seguindo a tendência da indústria automobilística, se iniciou a busca de alternativas para substituir peças metálicas por componentes poliméricos, onde os principais motivos são a redução de peso, custo e possibilidade de obtenção de geometrias mais complexas, puxadas pelo *design*.

No entanto a utilização de aços planos ainda é indispensável às máquinas e implementos agrícolas, pois suas propriedades ainda não puderam ser reproduzidas em

outros materiais, mantendo uma boa relação entre suas características mecânicas e custos competitivos. A utilização de aços de alta resistência é ainda quase uma exclusividade da indústria automobilística, devido às suas altas demandas e investimentos pesados em desempenho e segurança.

Para demandas com volumes relativamente baixos, como é o caso do setor de máquinas agrícolas, o fator custo se torna um obstáculo que, muitas vezes, define a continuidade da produção utilizando materiais com menos tecnologia.

No mercado agrícola, principalmente de máquinas de grande porte como é o caso das colheitadeiras, o volume de produção é relativamente baixo em virtude da capacidade desses equipamentos, sendo que apenas uma máquina pode atender a demanda de uma propriedade de médio ou até grande porte. Os aços de alta resistência são usados geralmente em casos especiais, onde fatores como temperabilidade, resistência ao desgaste ou grandes solicitações mecânicas exigem sua aplicação.

É pouco provável que a substituição de materiais de baixa resistência mecânica por outros mais resistentes, tendo em vista a relação demanda versus preço, apresente benefícios econômicos em curto prazo, devido aos volumes de produção. Por se tratar de um conceito relativamente novo, muitos estudos e experimentos devem ser realizados para comprovar a sua aplicabilidade e seus benefícios. Este fato destaca a gama de possibilidades para redução de peso neste segmento da indústria. A redução de peso mais do que compensa o leve aumento no custo unitário dos aços microligados, agregando valor econômico tanto para os produtores do aço quanto para os consumidores (KORCHYNSKY).

A utilização dos aços ARBL confere um desafio ao projeto devido às suas limitações em relação ao seu processamento na peça final. Algumas características como soldabilidade e conformabilidade são os aspectos mais afetados, elevando a resistência mecânica devido aos elementos de liga que aumentam a temperabilidade, tornando necessária a utilização de técnicas e cuidados especiais durante a manufatura.

### 3.3 MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

A utilização de chapas metálicas permite a manufaturabilidade da grande maioria dos produtos metálicos fabricados atualmente, sendo que este produto siderúrgico é um dos mais utilizados na indústria metal mecânica.

O desenvolvimento dos materiais de média, alta e ultra-alta resistência segue historicamente as necessidades da indústria metal-mecânica, liderado pela automobilística, tendo seu principal impulso em meados da década de 70, devido à primeira crise do petróleo,

Esta crise forçou as indústrias siderúrgicas a desenvolverem produtos que permitissem melhorar as propriedades mecânicas dos componentes finais e, ao mesmo passo, diminuir o volume de material envolvida para sua fabricação (GORNI, 2008b).

A grande maioria dos métodos para aumento da resistência mecânica dos aços consiste na restrição do movimento das discordâncias. Nos aços carbono a resistência mecânica é obtida principalmente através da adição de carbono, o qual aumenta significativamente a tensão de escoamento do aço.

Nos aços de alta resistência e baixa liga, onde se encontram os aços microligados, o aumento da resistência mecânica é obtido através do emprego de elementos químicos que atuam microestruturalmente de forma diferente do carbono. É o caso do nióbio, vanádio e titânio. Estes elementos, apesar da baixa quantidade necessária para a atuação efetiva, atuam na formação de nitretos e carbonitretos, os quais agem no refino de grão e no endurecimento por precipitação (GLADMANN, 1997).

A figura 16 mostra a influência percentual de cada mecanismo de endurecimento sobre a resistência mecânica em aços laminados a quente.

## AÇOS LAMINADOS A QUENTE

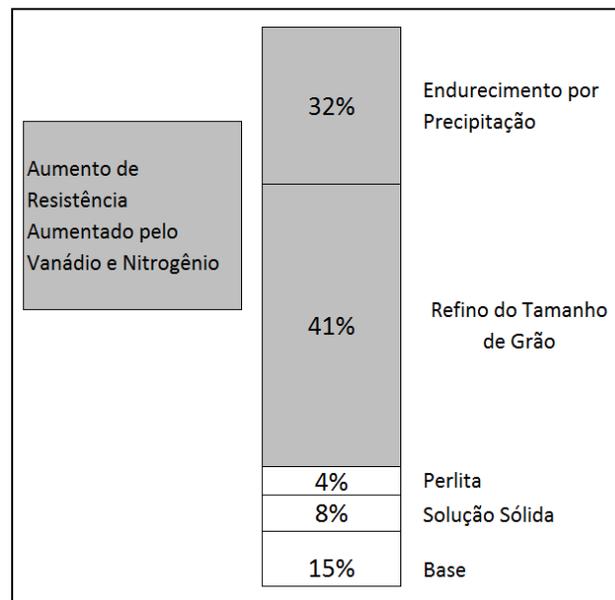


Figura 16 - Influência percentual dos mecanismos de aumento da resistência mecânica ativados pela ação de elementos microligantes.

Fonte: Adaptado de KORCHYNSKY, 2011

Como pode ser visto, a combinação do endurecimento por precipitação e por refino de grão contribui para mais de 70% da resistência mecânica em um aço microligado, embora com o aumento da resistência mecânica pelo endurecimento por precipitação ocorra uma queda da tenacidade do material.

É evidente a eficiência superior dos mecanismos de endurecimento pela ação dos elementos microligantes perante o endurecimento provido pela adição de carbono, bem como os microconstituintes que este gera, sendo que o endurecimento pelo refino de grão "é o único mecanismo de endurecimento que aumenta tanto a resistência mecânica como a tenacidade dos metais" (GORNI, 2008c).

O endurecimento pelo refino do grão é quantificado pela equação 1, a qual define que o endurecimento pelo refino no tamanho de grão é uma relação proporcional ao inverso da raiz quadrada do diâmetro médio dos grãos (GORNI, 2008c).

$$\Delta\sigma_{tg} = \frac{k_{tg}}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

onde  $k_{tg}$  é uma constante que depende da liga e  $d$  é seu tamanho de grão. (GORNI, 2008c)

Com os resultados obtidos em casos de substituição de materiais onde houve ganhos de redução de peso e aumento da resistência mecânica, as crescentes demandas por redução no consumo de matérias-primas e redução nos níveis de emissões de gases poluentes tornam esta prática uma tendência, a qual deve ser aprimorada e difundida na indústria de forma geral.

### **3.4 CLASSIFICAÇÃO DO AÇO UTILIZADO NO PROJETO**

A diversidade de aços disponíveis no mercado, em termos de propriedades mecânicas, faz com que a seleção do material adequado se torne uma tarefa que exige uma extensa pesquisa. Com o advento dos aços microligados, propriedades no mesmo material que antes somente eram possíveis de serem obtidas através do sacrifício de outras, como a soldabilidade e a resistência mecânica, podem ser alcançadas utilizando elementos que agem na formação de microestruturas com elevado refino de grão. Esta característica permite "reduzir os teores de carbono e demais elementos de liga sem que haja prejuízo para as propriedades mecânicas da chapa, o que contribui para aumentar sua soldabilidade" (GORNÍ, 2009).

Quanto à resistência mecânica, os aços que possuem resistência mecânica entre 170 e 450MPa são classificados como baixa ou média resistência mecânica. Os aços que possuem resistência entre 500MPa a 1.7 GPa são classificados como de alta resistência e os que possuem resistência acima de 1.7 GPa são considerados como de ultra alta resistência mecânica (ASM, 1997, p. 881).

No presente trabalho o material selecionado para substituir os elementos estruturais foi o aço LNE 380, sob a norma NBR 6656, em função de sua disponibilidade no mercado, características mecânicas apreciáveis e pelo carbono equivalente relativamente baixo. Atualmente os componentes a serem estudados são fabricados em aço CS tipo B pela ASTM A1008 para chapas de até 2,65mm de espessura e CS tipo B pela ASTM A1011 para chapas com espessuras superiores a 3,17mm. Esta diferenciação de normas em função da espessura se deve ao processo de laminação especificado em cada norma, sendo laminado a frio para a ASTM A1008 (ASTM, 2012) e laminado a quente para o ASTM A1011 (ASTM, 2012).

Ambos os materiais citados acima são utilizados pela manufatura da AGCO e o aço LNE 380, dentro das características desejadas para a aplicação em estudo, apresentou as melhores características relativas à resistência mecânica, disponibilidade no mercado e facilidade de processamento, tanto em processos de dobra quanto corte e solda.

A maior espessura utilizada foi de 8 mm em função dos elevados níveis de carregamentos aplicados sobre os ferramentais de dobra. Para o processo de solda não estão previstas alterações nos parâmetros em função do aumento da resistência ao escoamento, pois os fatores que afetam este processo são minimamente alterados com uso do aço LNE 380, em relação aos aços atualmente utilizados, visto o baixo percentual de carbono em sua composição.

De acordo com a norma NBR6656, o aço LNE 380 é um material apto ao processo de soldagem (NBR6656, 2008), além de possuir elementos microligantes em sua composição, como o vanádio, o nióbio e o titânio. Estes elementos viabilizam a obtenção de aços apresentando microestrutura com alto refino de grão (GORNI, 2008a). É um material que pode ser empregado em aplicações “onde requisitos especiais de propriedades mecânicas e de soldabilidade são fundamentais” (NBR6656, 2008). Entretanto, serão realizados testes para avaliar as características mecânicas da junta soldada utilizando os parâmetros de soldagem aplicados pela manufatura da AGCO.

O processo de corte laser, principal meio de obtenção dos componentes, pode apresentar restrições para materiais de resistência mecânica elevada em função das tensões residuais presentes tanto internamente quanto externamente no material oriundo da usina. Como este processo utiliza uma fonte de calor localizada e de alta intensidade, este meio pode liberar possíveis tensões no material resultando no empenamento das peças, o que em muitos casos se torna um impeditivo para o corte de certos materiais.

No caso do LNE 380 a prática mostra que as tensões internas não são afetadas pelo calor do corte laser, tornando o material apto a este processo de corte, permitindo uma elevada liberdade para obtenção de componentes com geometrias complexas, além de possibilitar o uso de recursos como encaixes, geometrias de referência para alinhamento entre peças, além de marcações geométricas que auxiliam o processamento do componente após o processo de corte.

Sua composição química é mostrada na tabela 1, juntamente com outros aços de sua família com propriedades mecânicas semelhantes.

Tabela 1 - Composição química de aços carbono estabelecidas pela norma NBR 6656.

	C	Mn	Si	P	S	Al metálico	Nb	V	Ti	Mo	B
Grau	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	máx	máx	máx	máx	máx	mín	máx	máx	máx	máx	máx
LNE280	0,15	1,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE380	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE400	0,15	1,40	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE500	0,12	1,50	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-

Fonte: Adaptado de NBR 6656, 2008.

Os teores de nióbio, titânio e vanádio, para os aços mostrados na tabela 1 e os demais que fazem parte desta família, devem possuir um somatório de, no máximo, 0,20 % (NBR 6656, 2008). Eventualmente este percentual pode ser obtido com um ou dois dos componentes citados.

### 3.5 SOLDAGEM

#### 3.5.1 Juntas Soldadas

A união por solda nada mais é do que a atração entre átomos de dois materiais que antes encontravam-se separados. Em um processo ideal a soldagem seria realizada mediante a aproximação de duas superfícies perfeitamente planas e isentas de impurezas, onde apenas a energia de ligação interatômica seria necessária para a união das partes (MACHADO, 1996).

A figura 17 esquematiza uma solda teórica e ideal, onde os átomos de duas peças se aproximam e, devido à energia livre presente na superfície das peças, unem-se dando origem à solda, porém sem a adição de energia térmica.

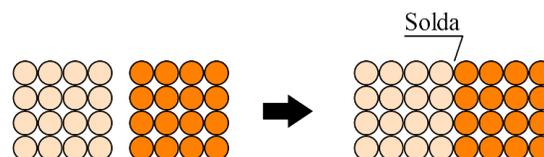


Figura 17 - Movimentação atômica durante o processo de solda.

Fonte: MODONESI, 2012.

Este tipo de atração é explicado pela figura 18, que mostra a relação existente entre a energia interatômica e a distância interatômica.

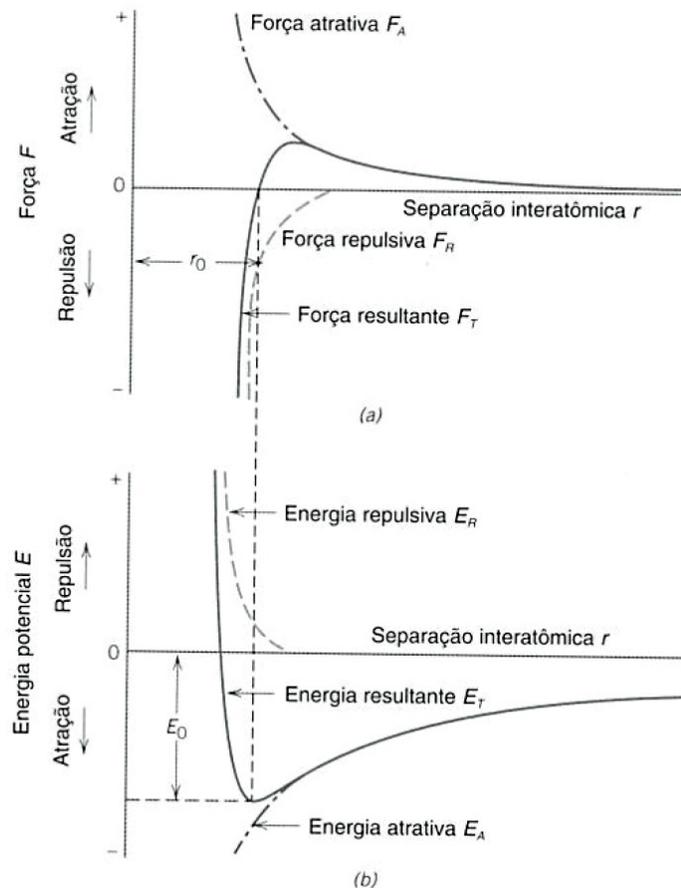


Figura 18 - (a) Força de atração atômica em função do raio atômico; (b) Energia de atração interatômica em função da distância interatômica

Fonte: CALLISTER, 2008.

O processo ideal, ilustrado pela figura 17, não é impossível, porém os processos de fabricação atualmente disponíveis na indústria metal mecânica não possuem a capacidade de realizar tal operação, embora trabalhos a nível atômico já sejam possíveis.

Para contornar estes problemas são utilizados artifícios que forçam a união atômica entre duas ou mais superfícies, podendo esta ser realizada por pressão ou através do fornecimento de energia térmica, forçando a união das superfícies através de difusão, onde um aporte de energia ativa a mobilidade atômica nos metais a serem soldados.

Apesar de possuírem uma aparência relativamente simples, as juntas soldadas possuem complexos “sistemas internos de tensões através dos quais há transferência das cargas entre os membros” (MACHADO, 2011, p. 190). A figura 19 esquematiza o fluxo

das tensões atuantes em uma junta soldada do tipo sobreposta. Pode ser observado que neste caso, devido à simetria entre os componentes da junta, ocorre uma sollicitação regular no sentido longitudinal do elemento central.

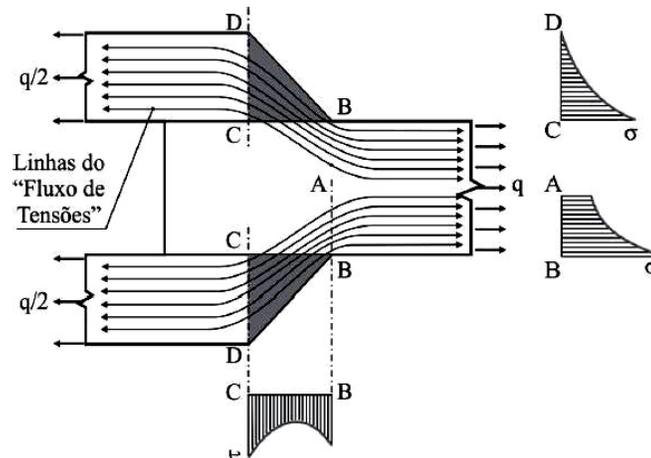


Figura 19 - Distribuição das forças atuantes sobre uma junta soldada paralela simétrica.

Fonte: MACHADO, 2011

Os três carregamentos aplicados estão paralelos uns aos outros, porém em planos diferentes. Entretanto há um equilíbrio de momentos fazendo com que todos os elementos constituintes da junta sejam sollicitados em direções paralelas à direção do carregamento. Neste caso haverá uma zona de compressão nos pontos C e uma zona de tração atuando sobre a direção D-B.

Na prática há outra configuração de junta sobreposta, comumente empregada, em que apenas dois elementos estão presentes, resultando em um carregamento excêntrico, como pode ser visto na figura 20.

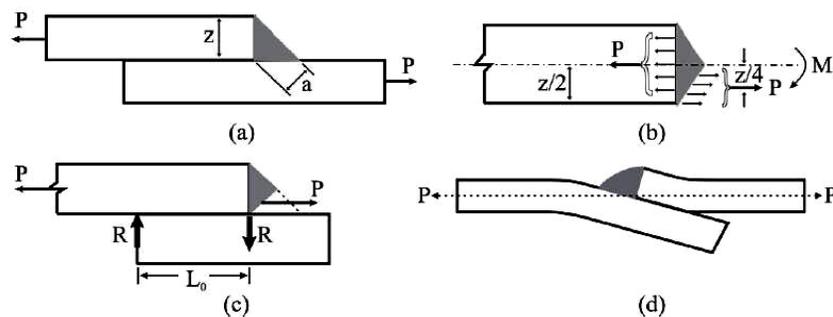


Figura 20 - Distribuição das forças atuantes sobre uma junta soldada paralela assimétrica

Fonte: MACHADO, 2011

Neste caso as linhas que representam os carregamentos, apesar de estarem em planos paralelos, não estão em equilíbrio de momentos, resultando em uma deformação torcional dos elementos e uma região de altas concentrações de tensões, como mostrado na figura 20b (MACHADO, 2011).

Reações semelhantes ocorrem em juntas soldadas em ângulo onde, embora a forma de atuação dos carregamentos externos seja diferente de uma junta de topo, os esforços atuantes sobre os filetes são similares.

O formato do cordão de solda, bem como sua penetração, tem grande influência na resistência mecânica da união. A figura 21 mostra as características geométricas que definem uma união soldada em topo e em ângulo.

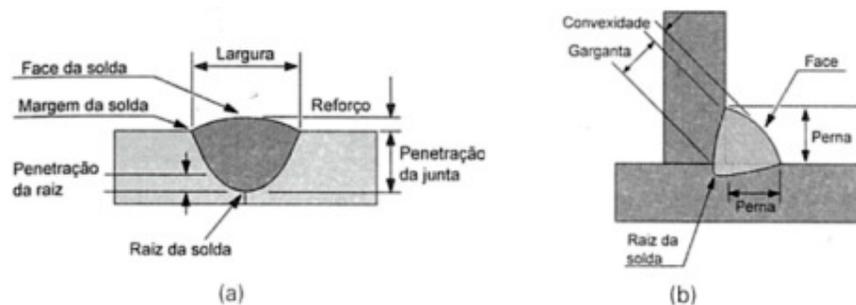


Figura 21 - Características geométricas de uma união soldada: a - solda de topo; b - solda em ângulo.

Fonte: MARQUES, 2009.

O entendimento dos sentidos e intensidades das cargas atuantes sobre uma junta auxiliam a projetá-la de forma a otimizar a absorção dos carregamentos, sendo que este aspecto afeta tanto a questão mecânica da união quanto os custos de produção, uma vez que o correto dimensionamento necessitará de menores quantidades de materiais para obter o produto final, em comparação a um elemento mal dimensionado. Em relação à resistência, segundo MACHADO (1997), as juntas soldadas dispostas transversalmente possuem uma resistência mecânica cerca de 1,23 vezes maior que juntas dispostas longitudinalmente.

### 3.5.2 Processo de Soldagem MAG

A união de metais por soldagem é um dos processos mais utilizados na fabricação mecânica, devido principalmente à sua facilidade de operação, apreciável resistência

mecânica conferida ao elemento soldado, custos relativamente baixos e possibilidade de obter geometrias de formas e tamanhos inviáveis a outros processos (MACHADO, 1996). Sua aplicação é vista em praticamente todos os setores da indústria, sendo utilizado tanto para a fabricação de máquinas e equipamentos como para eventuais reparos.

Segundo a AWS – *American Welding Society*, a soldagem é definida como “uma coalescência localizada de metais ou não-metais produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, com ou sem a aplicação de pressão, ou com aplicação de pressão com ou sem o uso de metal de adição” (ANSI/AWS, 1994, p. 38).

O processo de solda MAG – *Metal Active Gás* - é um dos métodos mais versáteis de soldagem por deposição de material para os aços de baixo carbono e baixa liga. É um processo que se baseia na formação de um arco elétrico entre a peça e um eletrodo maciço. Algumas de suas principais vantagens são a elevada velocidade de soldagem, possibilidade da solda ser executada em todas as posições, não há formação de escória e há baixa absorção de hidrogênio devido à proteção oferecida pelos gases de proteção. Entretanto, há algumas desvantagens, como a elevada velocidade de resfriamento, dificuldade de efetuar a solda em locais com fluxo de ar, além de possuir custo superior em relação a outros processos, como a solda por eletrodo revestido (WAINER, 2004).

A poça de fusão, assim denominada a região de junção da solda, é protegida geralmente por uma mistura de gases, os quais podem ser inertes ou oxidantes (MACHADO, 1996), sendo que este possui influência marcante sobre a geometria e propriedades mecânicas do metal fundido.

### **3.5.3 Soldabilidade dos Aços**

Os aços carbono de baixa liga são ideais para processos de soldagem, pois por possuírem baixas quantidades de carbono e geralmente quantidades relativamente baixas de elementos ligantes, o material resultante do processo de fusão geralmente possui características mecânicas semelhantes ao metal de base, desde que seguidos os parâmetros de soldagem adequados.

De uma maneira geral os aços carbono usualmente utilizados em processos de soldagem, sem que haja a necessidade de cuidados especiais durante este processo, possuem uma quantidade de carbono inferior a 0,35% (BLODGETT, 1972). Para aços com

quantidades maiores de carbono geralmente são necessárias ações antes, durante ou depois da solda, ou em alguns casos em todas as três etapas, as quais encarecem o processo. Alguns desses cuidados são o pré-aquecimento do metal de base, o controle de resfriamento, a utilização de eletrodos especiais e tratamentos térmicos pós-soldagem.

Todas essas ações são eventualmente necessárias para que a junta soldada desempenhe sua função com características mecânicas desejáveis, evitando a ocorrência de eventuais falhas.

A soldabilidade é definida pela AWS como “a capacidade de um material ser soldado sob as condições impostas de fabricação em uma estrutura específica e convenientemente projetada, de modo a executar satisfatoriamente o serviço pretendido.” (AWS, 2004, p. 320).

Segundo BLOODGET (1972), a soldabilidade se refere à relativa facilidade de se produzir uma junta. Um aço é dito idealmente soldável se a junta soldada pode ser produzida sem dificuldade ou custo excessivo, onde fatores como temperatura de pré-aquecimento ou tratamentos térmicos pós-soldagem não necessitam ser controlados ou efetuados.

Durante o processo de soldagem, a microestrutura do metal na região da solda sofre grandes mudanças, devido à fusão que ocorre no cordão. De uma forma geral, o cordão de solda formado passa por um processo de fundição e tratamento térmico, originando um metal de solda com dureza maior que o metal de base, em função do rápido resfriamento. Por outro lado a ZAC – Zona Afetada pelo Calor, devido ao metal de base não fundido ser submetido a temperaturas acima da zona crítica, transformações microestruturais conferem a esta região dureza inferior ao metal de base e à zona fundida, tornando-a suscetível à falhas decorrentes de carregamentos excessivos em juntas soldadas.

Devido ao elevado número de variáveis envolvidas no processo de solda, controlar todas elas dinamicamente de forma a atender às condições ideais do processo é economicamente inviável e complicado

Segundo FIGUEIREDO (2005) os principais aspectos que devem ser levados em consideração durante a solda são: soldabilidade do material de base, compatibilidade entre material de base e metal de adição, geometria do eletrodo, cálculo de esforços, geometria da junta, equipamentos e parâmetros de processo, nível de qualificação do corpo técnico, tratamentos térmicos antes e após a soldagem, custos, ensaios destrutivos e não-destrutivos, normas, códigos e procedimentos de solda.

Durante o processo de soldagem, logo após a deposição do metal de solda, outro fator que tem forte influência sobre as propriedades da junta é a velocidade de resfriamento, a qual possui relação direta com a espessura das peças que compõem a junta. A presença localizada de calor aumenta a velocidade de resfriamento, devido à diferença de temperatura entre a zona fundida e a vizinhança. Isso favorece o surgimento de microestruturas presentes em materiais tratados termicamente, como a martensita e a perlita.

A figura 22 mostra a relação entre a espessura das peças a serem soldadas em função da velocidade de resfriamento da junta.

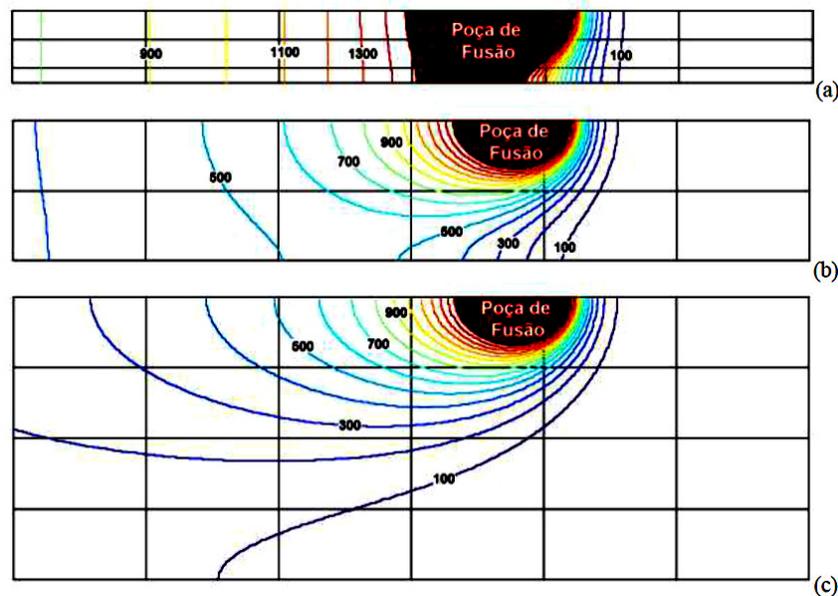


Figura 22 - Distribuição da temperatura de soldagem para chapas de aço de: (a) 5mm; (b) 10mm; (c) 20mm.

Fonte: MODINESI, 2011.

A partir da figura 22 pode-se verificar que a penetração, bem como a ZAC, diminuem de tamanho à medida que a espessura da chapa aumenta. Isso é explicado pelo aumento no volume do material que precisa ser aquecido para atingir as faixas de temperatura de fusão. Portanto, para um aço com mesma classificação e tomando como base analógica as características mostradas na figura 22, a soldabilidade será maior para a amostra da figura 22 *a*.

Para as espessuras de chapas comumente usadas, o processo não encontra dificuldade em manter a tensão de escoamento requerida. Porém, para espessuras muito grossas, devido às suas baixas velocidades de resfriamento, o carbono ou composição de liga provavelmente terá de ser incrementada para manter a tensão de escoamento (BLODGET, 1972, p. 6.1-2).

A figura 23 mostra a elevação da tensão de escoamento em função do aumento da velocidade de resfriamento, para um aço com 0,8% de carbono.

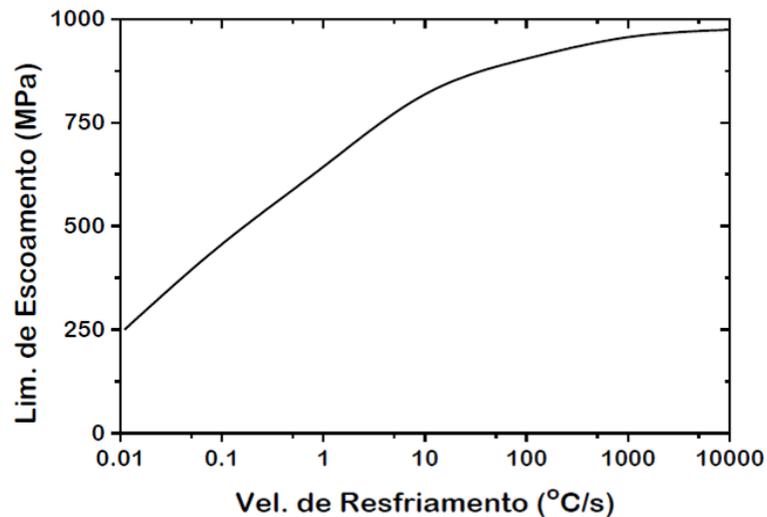


Figura 23 - Resistência mecânica em função da velocidade de resfriamento.

Fonte: MODONESI, 2012.

A figura 23 caracteriza a formação de microestruturas martensíticas, devido ao aumento da velocidade de resfriamento, o que na maioria dos casos é indesejável para juntas soldadas, devido à fragilidade que este microconstituente causa ao material. O produto final do processo de solda é semelhante a uma peça fundida, ou lingote (MODONESI, 2012, pg. 2.1).

Os vários parâmetros que necessitam ser controlados durante a soldagem são para, além de garantir a correta junção entre as peças, evitar ou ao menos diminuir a formação de defeitos nas regiões afetadas pelo calor da solda. Entre estes, a velocidade de resfriamento tem papel crucial, pois afeta diretamente no tamanho de grão formado, assim como a microestrutura formada.

Um dos defeitos mais grosseiros e perigosos é a formação de trincas, que, segundo MODONESI (2012) podem estar associadas a dois fatores: o primeiro é devido às solicitações mecânicas de tração e o segundo devido a uma incapacidade do material de acomodar estas solicitações deformando-se plasticamente. NORTON, apud Fisher e Yen,

coloca "que praticamente todas as partes de uma estrutura contém descontinuidades, variando de microscópicas ( $<0,010\text{in}$ ) até macroscópicas, introduzidas nos processos de fabricação ou de manufatura das mesmas" (NORTON, 2006, pg. 293).

A figura 24 mostra a classificação das trincas de acordo com sua localização.

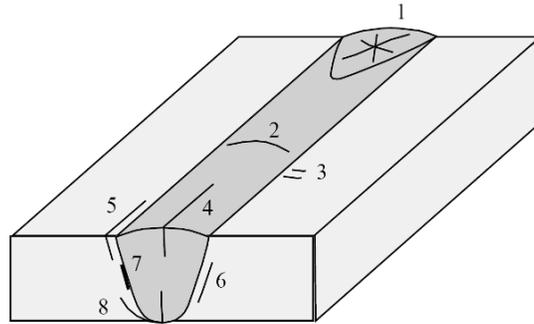


Figura 24 - Localização dos principais tipos de trincas em juntas soldadas.

Fonte: MODONESI, 2012.

As trincas mostradas na figura 24 são: 1-fissuração na cratera; 2-fissuração transversal na zona fundida; 3-fissuração transversal na ZAC; 4-fissuração longitudinal; 5-fissuração na margem da solda; 6-fissuração sob o cordão; 7-fissuração na linha de fusão; 8-fissuração na raiz da solda (MODONESI, 2012, p. 7.1). As trincas podem ter diversas origens, como trincamento por hidrogênio, decoesão lamelar e durante a solidificação. Independente da forma como surgem, seu efeito é, muitas vezes, catastrófico. Novamente o controle dos parâmetros de soldagem possui vital importância para evitar o surgimento desses defeitos.

Outra imperfeição com efeitos nocivos notáveis à junta soldada são as porosidades. Semelhantes, em efeito, às trincas, reduzem drasticamente a vida em fadiga dos componentes, pois reduzem a área útil que resiste às tensões aplicadas sobre o componente. A figura 25 mostra a influência da porosidade, de acordo com seu tamanho, na resistência mecânica da junta.

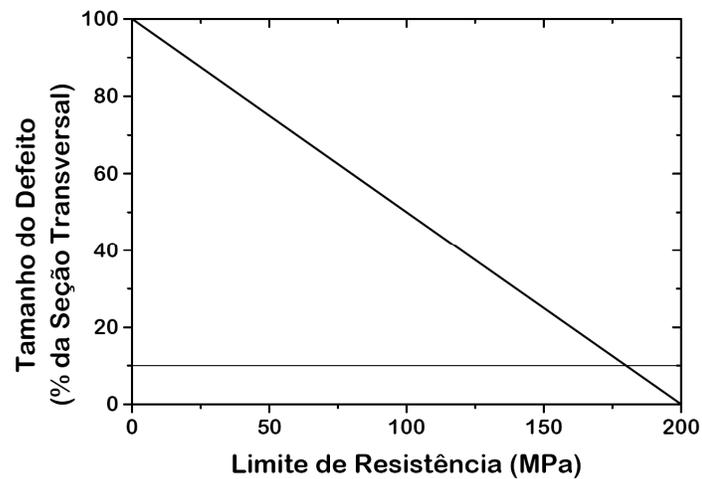


Figura 25 - Influência do tamanho do defeito em relação à resistência mecânica da junta soldada.

Fonte: MODONESI, 2010

Observa-se que o aumento no tamanho dos defeitos é inversamente proporcional, e constantemente linear, à diminuição da resistência da junta, pois está relacionado com a área da seção transversal onde está localizado. A figura 25 é uma simplificação deste processo, sendo que a Mecânica da Fratura demonstra com precisão este efeito. A presença de defeitos, além de diminuir a seção transversal da junta, afeta a resistência à fadiga da junta, pois aumenta a suscetibilidade ao surgimento de trincas.

Dentre os pontos que devem ser levados em consideração para que uma junta possua boas características mecânicas a soldabilidade está entre as mais importantes. Para que um aço possua boa soldabilidade, segundo MORAIS (2009), este não deve apresentar susceptibilidade para a formação de defeitos na ZAC - zona termicamente afetada, sendo que esse requisito deve ser atendido em diversas situações, ou procedimentos de soldagem.

A tabela 2 mostra uma referência para avaliação prévia de um material quanto a sua soldabilidade.

Tabela 2 - Limites de porcentagem de elementos químicos presentes no aço para classificá-lo em relação à soldabilidade.

Elemento	Faixa Normal, %	Aço Excedendo Qualquer das Seguintes Porcentagens Provavelmente Necessitará de Cuidados Extras
Carbono (C)	.06 - .20	.35
Manganês (Mn)	.35 - .80	1.40
Silício (Si)	.10 max	.30
Enxofre (S)	.035 max	.050
Fósforo (P)	.030 max	.040

Fonte: Adaptado de BLODGETT, 1972.

Pela análise da tabela 2 pode ser visto que é especificada uma variação na composição dos elementos químicos do metal, dentro da qual um material é normalmente soldável e também um limite além do qual provavelmente serão necessários cuidados especiais com o processo. Assim, sabe-se que para aços com percentual de carbono acima de 0,35%, conforme mostrado na tabela 2, é recomendado a utilização de processos pré e/ou pós soldagem.

Entre outros resultados, a soldabilidade visa identificar a compatibilidade entre os materiais presentes durante o processo de fusão. Um conceito comumente usado para prever esta compatibilidade é o cálculo do carbono equivalente -  $C_{eq}$ , o qual relaciona os principais elementos químicos presentes nos metais de base, combinando-os para uma equivalência em carbono total da junta.

Segundo a ASM, várias equações foram desenvolvidas para determinar o  $C_{eq}$ , entretanto, duas delas são mais comumente usadas. A primeira, desenvolvida pelo International Institute of Welding - IIW, relaciona, além de outros elementos químicos, o componente microligante vanádio em seu cálculo, como pode ser visto na equação 2 (ASM, 1993):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

A segunda equação, desenvolvida por WINN, é mostrada na equação 3 (WINN apud ASM, 1993).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \quad (3)$$

Outra equação, apresentada por ESAB (2004), substitui o silício, na equação 2, pelo Cu, além de alterar o denominador do níquel, como pode ser visto na equação 4.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{13} \quad (4)$$

Apesar da existência das equações, os valores do carbono equivalente devem ser considerados apenas como referência, em função dos inúmeros fatores que afetam as propriedades da junta soldada e que não são consideradas nas equações (ASM, 1993).

O fato de um aço possuir um carbono equivalente elevado não significa que este material não seja soldável, mas sim que deverão ser tomados alguns cuidados para que a junta adquira as características mecânicas que atendam as necessidades de projeto.

Em casos onde o carbono equivalente seja elevado, ou então em juntas com espessuras relativamente grandes, a temperatura de pré-aquecimento é uma alternativa comumente usada para minimizar a fragilização da junta ou evitar a formação de microestruturas indesejadas. No entanto, não é especificado que um material de baixo carbono equivalente não deva ser soldado utilizando um pré-aquecimento

De certa forma, quanto mais controle está se fazendo sobre uma junta soldada, melhores serão suas propriedades mecânicas, porém maiores serão seus custos de produção, sendo este um fator que incentiva estudos para evidenciar a necessidade ou não desses controles durante o processo de solda.

A determinação da temperatura de pré-aquecimento é realizada através da equação 5, que é dada em função da espessura do material e do carbono equivalente (ESAB, 2004).

$$\text{Temperatura de pré - aquecimento } (^{\circ}\text{C}) = 350 \times \sqrt{C_{eq.total} - 0,25} \quad (5)$$

onde:

$$C_{eq.total} = 0,005 \times C_{eq} \times \text{espessura}(mm) \quad (6)$$

Dependendo do valor do carbono equivalente há faixas de temperaturas nas quais é recomendável pré-aquecer o material. Os materiais que se enquadram no pré-aquecimento opcional são os aços de baixo carbono e alguns aços microligados.

A tabela 3 apresenta valores sugeridos por ESAB (2004) para a temperatura de pré-aquecimento em função do carbono equivalente.

Tabela 3 - Temperatura de pré-aquecimento em função do carbono equivalente.

Carbono equivalente $C_{eq}$ (%)	Temperatura de pré- aquecimento recomendada
< 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300°C

Fonte: 4-ESAB, 2004.

A figura 26 mostra relações entre o carbono equivalente e a temperatura de pré-aquecimento mínima sugerida pela ASM.

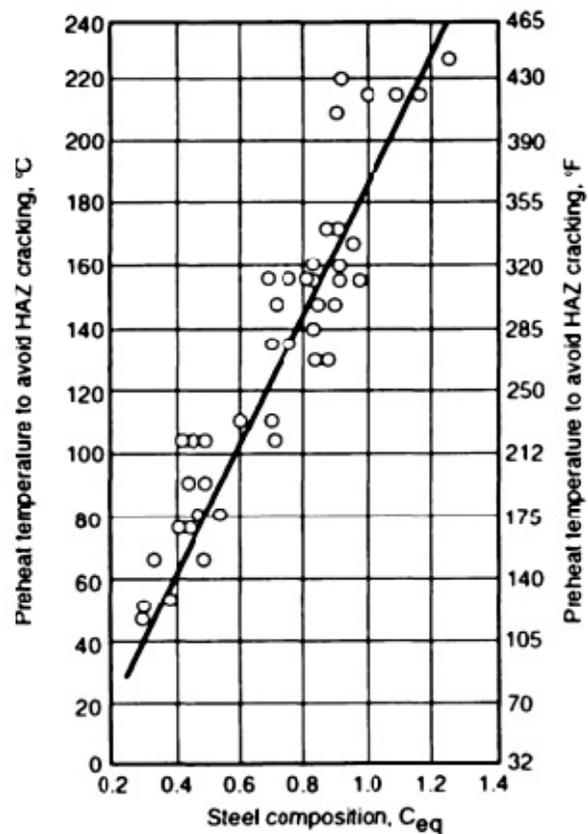


Figura 26 - Carbono equivalente em relação à temperatura de pré-aquecimento mínima.

Fonte: ASM, 1993.

Pode ser observado que para alguns casos, onde o carbono equivalente é baixo, as temperaturas de pré-aquecimento sugeridas são próximas da temperatura ambiente.

A tabela 4 mostra as temperaturas de pré-aquecimento sugeridas por BLODGETT (1972) para diversos materiais, comumente usados na indústria metal-mecânica, definidas em função da classificação do material e sua espessura, sendo esta tabela aplicada a aços planos.

Tabela 4 - Temperatura de pré-aquecimento em função da espessura da chapa e de sua classificação quanto à composição química.

Steel	Plate Thickness				
	1/4 "	1/2 "	1"	2"	4"
1020	-	-	-	-	150
1025	-	-	-	-	200
1030	-	-	-	100	200
1035	-	-	-	200	300
1040	-	-	200	300	300
1045	100	200	300	350	350
1050	200	300	350	400	400
1060	300	400	400	450	500
1070	400	450	500	500	550
1080	450	500	550	550	600

Fonte: Adaptado de BLODGETT, 1972.

Com a análise das tabelas 3 e 4 percebe-se que para aços que possuem carbono equivalente inferior a 0,3% o pré-aquecimento é opcional, até espessuras de 25,4 mm.

A determinação da soldabilidade pode ser realizada submetendo o material a ensaios mecânicos e metalográficos, onde são caracterizadas a resistência mecânica da junta, resistência à fadiga, dureza, bem como verificações da penetração da solda, diluição e tamanho da zona afetada pelo calor - ZAC. Por estar localizada entre a região do metal de solda e do MB, possui uma grande variedade de microestruturas, devido às várias temperaturas em que é submetida, conforme pode ser observado na figura 27.

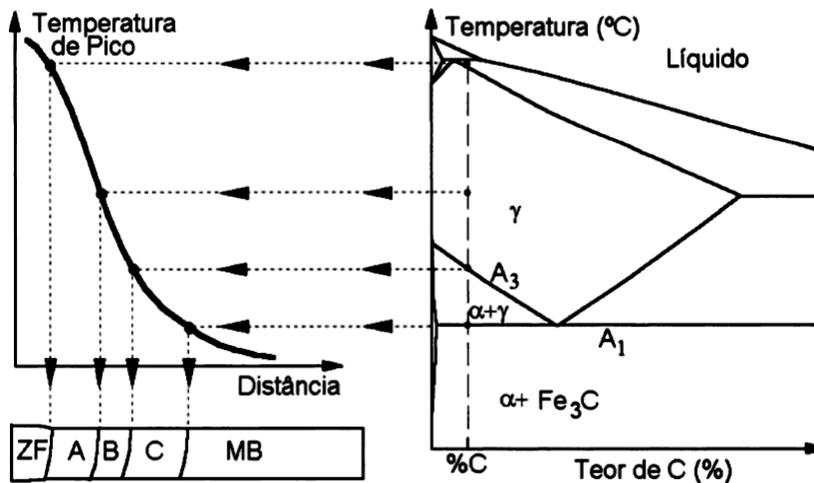


Figura 27 - Relação entre as regiões de uma junta soldada e suas respectivas temperaturas de origem.

Fonte: MARQUES, 2009.

Na figura 28 é mostrada a seção transversal de uma junta soldada, mostrando macrograficamente as diferentes regiões da peça, bem como as respectivas temperaturas em que são formadas.

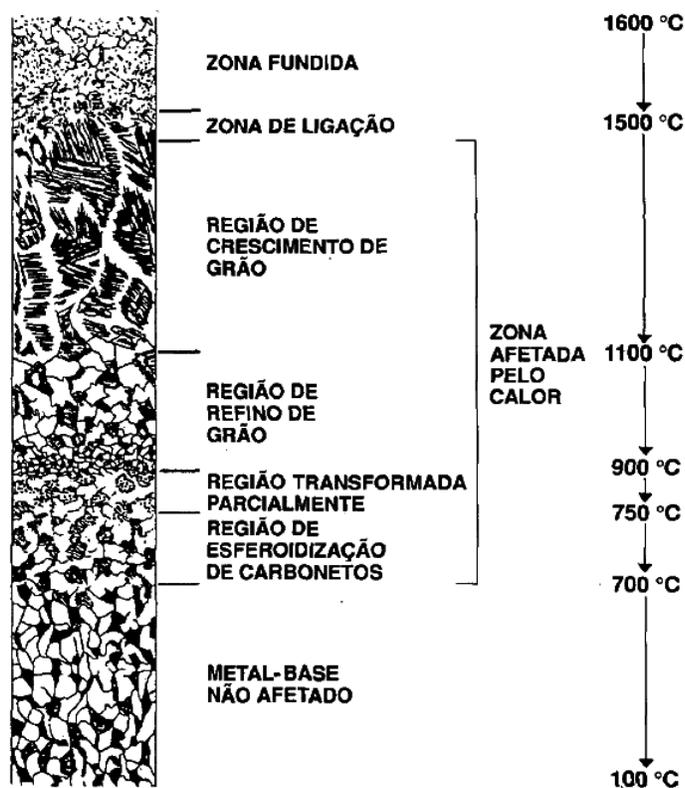


Figura 28 - Caracterização morfológica das regiões de uma junta soldada em função das temperaturas de origem.

Fonte: WAINER, 2004.

Partindo do núcleo da solda em direção ao metal de base, na faixa de temperaturas entre 1600°C e 1500°C, encontra-se a zona fundida, local onde ocorre a fusão entre o metal de base e o metal de adição. Esta região é indicada pela área da ZF - zona fundida - da figura 27, a qual relaciona a morfologia de cada região da junta com o diagrama de fases do aço carbono, onde pode ser observado que o pico de temperatura corresponde ao metal líquido. Esta microestrutura geralmente possui resistência mecânica superior ao metal de base, devido à elevada temperatura que atinge e posterior resfriamento, geralmente rápido. Em casos onde os materiais fundidos possuem quantidades de carbono superiores a 0,15% ocorre o início da formação de martensita (WAINER, 2004).

A região subsequente, na faixa de temperaturas de 1500°C a 1100°C, ocorre o crescimento de grão, indicado pela área A na figura 27, sendo caracterizado por uma estrutura grosseira, com placas de ferrita, além da presença de bainita (MARQUES, 2009).

Na sequência encontra-se a região de refino de grão, formada em temperaturas que vão de 1100°C a 900°C, sendo que a microestrutura resultante é, geralmente, caracterizada por uma estrutura fina de ferrita e perlita (MARQUES, 2009). Entretanto, nas juntas soldadas esta região possui, como característica marcante dos aços microligados, resistência e ductilidade elevadas (WAINER, 2004), sendo representada pela área B na figura 27.

Após esta zona situa-se a região denominada intercrítica, ou zona parcialmente transformada, localizada entre a região de refino de grão e o metal de base. Nesta faixa do material a temperatura chega à aproximadamente 900°C, ocorrendo a austenitização de apenas uma parte da perlita, estando representada pela área C na figura 27.

A figura 29 mostra, esquematicamente, a microestrutura formada em função da velocidade de resfriamento.

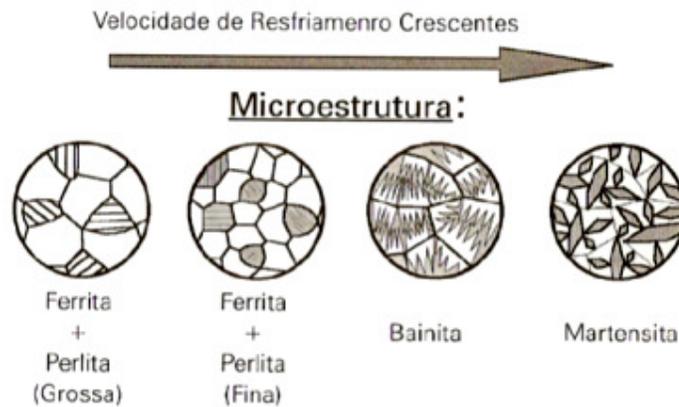


Figura 29 – Influência da velocidade de resfriamento na microestrutura final da junta zona fundida.

Fonte: MARQUES, 2009.

Se observarmos a granulometria de toda a seção de uma junta solda, comprova-se a seguinte explicação de ESAB, complementada pela análise da figura 30.

Com a continuação do processo de solidificação pode ser observado que os grãos no centro são menores e possuem uma textura mais fina que os grãos localizados nos limites exteriores do depósito de solda. Este fenômeno ocorre porque, à medida que o metal de solda se resfria, o calor do centro do depósito de solda dissipa-se em direção ao metal de base através dos grãos mais externos que se solidificaram primeiro. Consequentemente, esses grãos permanecem, já no estado sólido, mais tempo a altas temperaturas, o que favorece seu crescimento (ESAB, 2004, p. 17).



Figura 30 - Etapas e características do processo de solidificação de uma junta soldada.

Fonte: ESAB, 2004.

Uma junta soldada é influenciada por uma infinidade de fatores que, em conjunto, definem suas características finais. Dentre eles podem ser citadas a composição química do

metal de base e metal de adição, o carbono equivalente do metal de base, resistência mecânica dos materiais envolvidos na formação da junta, gases de proteção e o aporte térmico, ou a energia fornecida aos elementos da junta, durante a soldagem.

A soldagem pode ser comparada com um tratamento térmico, causando localmente alterações microestruturais e alterando as propriedades do material. A correta seleção do processo de soldagem, bem como dos materiais utilizados, são fatores fundamentais para minimizar efeitos indesejados e que possam comprometer o desempenho mecânico da junta.

Alguns aspectos relacionados à operação do aparelho de solda também possuem influência significativa nas propriedades da junta soldada, seja em função da velocidade de soldagem ou da incorreta parametrização do equipamento. Relacionado a isso, um dos problemas mais comuns é o excessivo tamanho do reforço, possuindo influência direta na resistência à fadiga, como mostrado na figura 31.

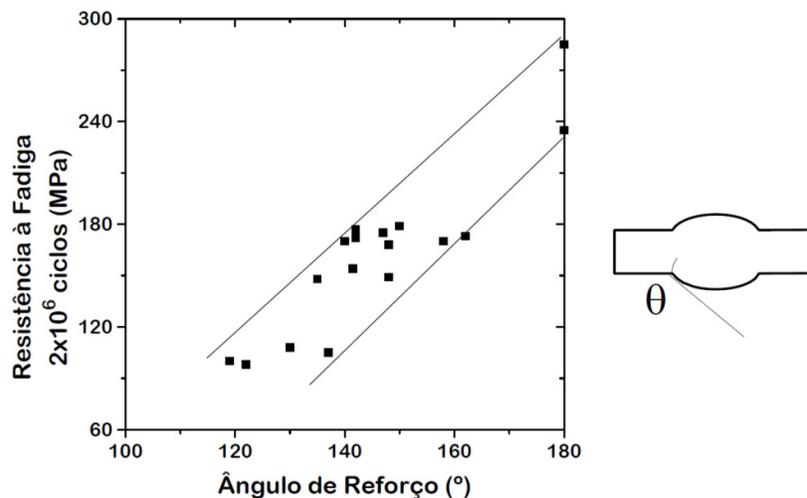


Figura 31 - Influência da altura do reforço da solda na resistência à fadiga da junta.

Fonte: MODONESI, 2010.

Observa-se que quanto maior for o ângulo do reforço e, conseqüentemente, maior a altura mantendo a largura constante, menor será a resistência à fadiga da junta. Fatores como gás de proteção e taxa de deposição afetam esta característica do cordão de solda.

Todos esses ciclos térmicos resultam em difusões entre os materiais, tanto sólidos como gasosos, presentes no processo de solda. Os elementos presentes contribuem para a composição das propriedades mecânicas da junta, alguns em maior e outros em menor proporção. Entretanto, em casos onde os parâmetros de soldagem não são bem controlados,

ou mesmo os materiais a serem soldados não são totalmente suscetíveis ao processo, podem ocorrer imperfeições no produto final da solda que muitas vezes inutilizam o componente fabricado.

Os fatores acima descritos podem definir a suscetibilidade de uma junta a determinado processo de solda, sendo que qualquer anomalia presente em alguma dessas variáveis, ou problemas presentes em escala macroscópica, como trincas, mordeduras ou inclusões, falta de fusão, falta de penetração ou perfuração, podem ser motivos para um maior controle ou modificações de projeto ou processo, a fim de garantir a qualidade esperada da junta.

### 3.5.4 Energia de Soldagem

Durante o processo de soldagem a região que sofre a ação de união é caracterizada pela difusão entre os metais de base e de adição e, em alguns casos, somente os metais de base. Para que isso ocorra uma grande quantidade de energia é necessária para ativar a movimentação atômica entre os materiais.

Na soldagem a arco elétrico a energia de soldagem, conhecida também por aporte térmico - *heat input*, é definida como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento (MARQUES, 2009, p. 88).

A equação 7 define esta grandeza.

$$At = \frac{V \times I}{vs} \quad (7)$$

Onde:

*At*: aporte térmico, em kj/mm;

*V*: tensão, em volts;

*I*: corrente elétrica, em ampêre;

*vs*: velocidade de soldagem, em mm/min.

Segundo WAINER , "uma parte da energia disponível é dissipada para a atmosfera [...], outra pequena fração perde-se por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão" (2004, p. 360). Assim, de toda a energia fornecida para o processo de solda, é

efetivamente utilizado para a fusão dos materiais, no caso do processo MIG/MAG, 0,75% da energia fornecida, com uma variação de  $\pm 0,10\%$  (MACHADO, 1996).

Esta energia, além de ser concentrada, gera “pequenas regiões de temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material” (MARQUES, 2009, p. 88).

A energia de soldagem está relacionada diretamente com a taxa de deposição do metal de adição, afetando a profundidade de fusão e velocidade de resfriamento da junta.

A diluição é uma informação importante para prever a composição química do metal de solda, possibilitando estimar as características deste. Pode ser definida como o percentual em volume do metal de base que se dissolve na poça de fusão do metal de solda.

A figura 32 mostra, esquematicamente, as regiões que compõem a zona fundida e o MB.



Figura 32 - Zona fundida e metal de base de uma junta soldada.

Fonte: MACHADO, 1996.

### 3.5.5 Distorções

Durante o processo de soldagem um dos fatores que demanda grande atenção é a distorção das peças, que são deformações na geometria das peças devido ao ciclo térmico presente durante a soldagem, resultando em tensões devido à dilatação dos materiais.

A figura 33 mostra, esquematicamente, o movimento que as distorções efetuam sobre uma junta soldada de topo.

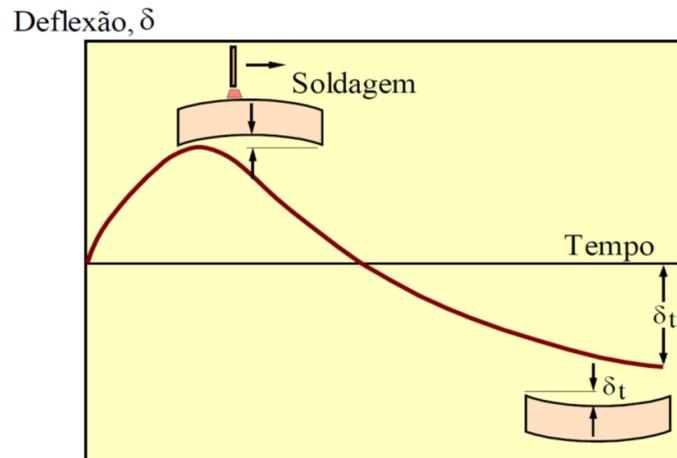


Figura 33 - Ciclo volumétrico da distorção em função do tempo.

Fonte: MODONESI, 2012.

Em função da dilatação térmica pode ser observada a variação dimensional da junta durante todo o ciclo de solda, do fornecimento de calor até o total resfriamento. Primeiramente, devido ao fornecimento de calor, ocorre a dilatação do metal fundido. Quando está na fase líquida o metal líquido não impõe grandes tensões sobre os componentes da junta, entretanto o calor fornecido para as regiões sólidas faz com que a dilatação térmica deforme os materiais dos componentes vizinhos. Durante o resfriamento as ligações atômicas tornam-se mais rígidas, aumentando esta rigidez à medida que o metal de solda é solidificado. Neste processo, a dilatação passa para um ponto neutro até converter-se na contração do MS - metal de solda, resultando em tensões de tração sobre os componentes da junta.

Esta contração é suficientemente forte para causar deformações no MB, resultando no conhecido "empenamento" das peças soldadas.

A figura 34 mostra os três tipos mais comuns de distorções existentes em juntas soldadas, sendo ilustradas para chapas metálicas.

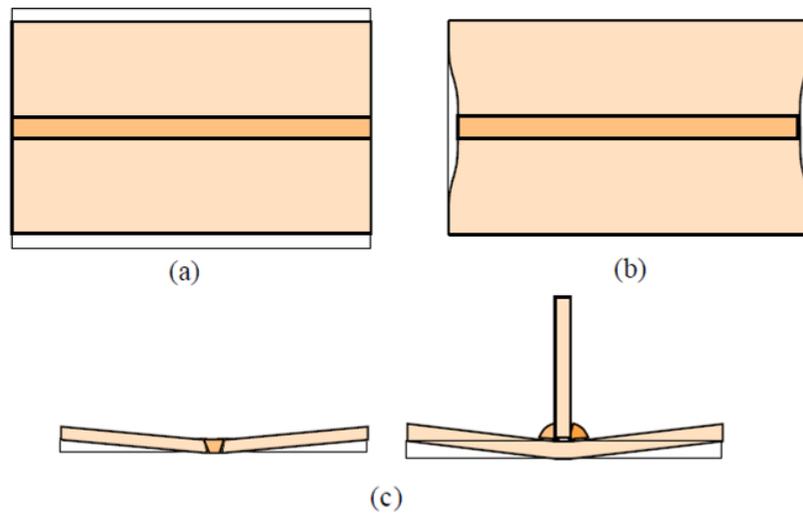


Figura 34 - Principais tipos de distorções.

Fonte: MODONESI, 2012.

Como pode ser observado as distorções fazem parte do cotidiano do processo de solda. Seus efeitos podem ser prejudiciais ou simplesmente desprezados, dependendo de sua magnitude e da aplicação a que será submetida a peça final.

Para a produção de conjuntos soldados geralmente são utilizados dispositivos de soldagem que são projetados para fixar e permitir a soldagem de peças, garantindo que o conjunto final possua as dimensões desejadas, obtidas mediante a restrição das deformações causadas pelas dilatações térmicas dos componentes. Entretanto esta prática resulta em tensões residuais que muitas vezes passam despercebidas ou simplesmente são desconsideradas.

Há estudos e práticas que minimizam os efeitos das distorções, onde a ordem com que os cordões de solda são aplicados contribui para que essas deformações atuem umas sobre as outras, fazendo com que as tensões atuantes sejam grosseiramente, mas não totalmente, anuladas.

Uma possível solução para este problema seria projetar a disposição dos elementos a serem soldados de forma que, após o processo de solda e sob a ação das distorções, os componentes situem-se em suas posições especificadas. Porém este método é dificilmente aplicável devido à grande quantidade de variáveis a serem controladas para o sucesso do resultado final, além de ser um processo basicamente empírico.

### 3.6 FADIGA

Na história dos projetos mecânicos o fenômeno da fadiga é tratado com vital importância, visto o impacto que tem sobre o sucesso no desenvolvimento destes. Segundo CHIAVERINI (1986), cerca de 90% das rupturas das peças em serviço ocorrem por fadiga. Segundo Reguly (2010, p. 3), “fadiga, por definição, é a ruptura progressiva que ocorre em componentes e estruturas devido a solicitações dinâmicas e cíclicas.”

Falhas por fadiga são causadas pela ação simultânea de tensões cíclicas, tensões de tração e deformações plásticas. Se nenhum destes eventos estiver presente, a falha por fadiga não terá início e a trinca não se propagará (ASM, 2002). Há, basicamente, dois tipos de falhas por fadiga, sendo classificadas em fadiga de alto e baixo ciclo, as quais ocorrem com  $10^3$  ciclos ou mais e com menos de  $10^3$  ciclos, respectivamente (REGULY, 2010, p. 3).

A fadiga de baixo ciclo ocorre quando as tensões aplicadas excedem a tensão de escoamento do material. Neste caso poucas flexões são necessárias para que ocorra a fratura do material. Na fadiga de alto ciclo as tensões não ultrapassam o limite plástico do material, sendo que a ruptura ocorre após um elevado número de ciclos devido à nucleação e propagação de trincas ou propagação de trincas a partir de defeitos presentes no material ou componente durante sua fabricação.

Devido à anisotropia presente nos materiais e à dificuldade de se repetir com precisão os parâmetros e, por consequência, as propriedades mecânicas e geométricas da solda, o comportamento a fadiga varia de componente para componente.

As falhas por fadiga iniciam geralmente em superfícies irregulares, como superfícies ásperas (rugosas), entalhes (causados por manuseio e armazenamento indevidos), corrosão, marcas e estampos de todos os tipos (impacto, químico ou eletroerosão), marcas de ensaios de dureza (Rockwell, Brinell, ou Vickers), fricção (KLEBANOV, 2007, p. 364).

As cargas cíclicas atuantes sobre o componente, aliadas a elevada tensão localizada, que neste caso é maior do que a tensão atuante sobre a seção transversal, resultam no surgimento de microtrincas. "A trinca então se propaga através da seção transversal da peça até que a ligação residual é insuficiente para suportar a carga aplicada e a falha final ocorre por um mecanismo estático" (CHARLES, 1997, p. 102). A falha por fadiga é

dividida em três estágios: "início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca." (NORTON, 2006, p. 293)

A figura 35 esquematiza as etapas de uma falha por fadiga.

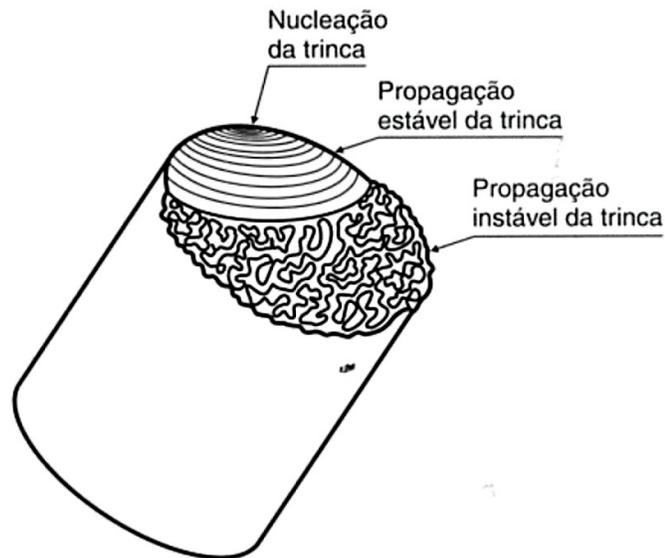


Figura 35 - Etapas da falha por fadiga.

Fonte: GARCIA, 2013.

Pode ser visto que cada etapa possui aparências distintas, relacionadas com a velocidade com que a trinca se propaga. O tamanho da região de nucleação mais a região de propagação estável da trinca, em relação ao tamanho da região de propagação instável, fornece uma idéia do dimensionamento de uma peça fraturada para a carga a qual foi submetida. Quanto menor for a região de propagação instável da trinca maior é o coeficiente de segurança utilizado no projeto.

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (BITTENCOURT, 2008) e a tensões muito inferiores àquelas determinadas nos ensaios estáticos de tração, compressão e torção (GARCIA, 2013).

Em juntas soldadas as falhas por fadiga são acentuadas devido às tensões residuais devidas ao ciclo térmico do processo de solda e às imperfeições causadas pela fusão do material. Assim, uma junta soldada que é submetida a tensões muito abaixo das tensões que resultariam em uma fadiga de baixo ciclo pode vir a falhar, devido ao somatório das

tensões aplicadas mais as residuais. Entretanto “é de conhecimento que todas as estruturas de juntas soldadas, antes de um alívio de tensões, contêm tensões residuais da magnitude da tensão de escoamento do material” (CHARLES, 1997, p. 111).

Durante o projeto de uma junta deve ser levado em consideração, para cada aplicação, o formato da junta que se está projetando em relação às tensões atuantes sobre ela.

A figura 36 mostra, para três configurações de solda em ângulo, a influência do formato da junta na resistência mecânica e à fadiga.

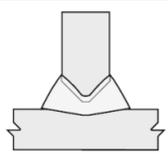
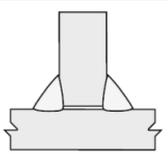
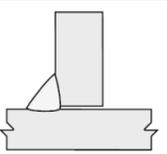
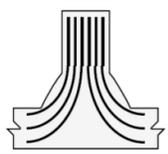
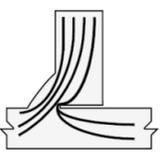
Juntas em T			
Padrões de tensões			
Resistência mecânica	100%	80%	30%
Resistência à fadiga	40%	25%	10%

Figura 36 - Distribuição de tensões para três configurações de juntas em ângulo.

Fonte: MODONESI, 2012.

A figura 37 mostra, para quatro configurações de solda de topo, a influência do formato da junta na resistência mecânica e à fadiga.

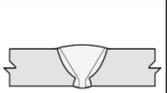
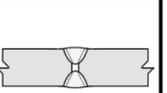
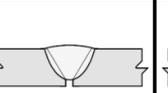
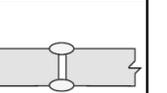
Juntas de topo				
Padrões de tensões				
Resistência mecânica	150%	85%	70%	60%
Resistência à fadiga	100%	35%	15%	10%

Figura 37 - Distribuição de tensões para três configurações de juntas de topo.

Fonte: MODONESI, 2012.

Pode ser observado como o formato do cordão de solda, bem como sua penetração, tem influência marcante sobre as propriedades mecânicas da junta, em função da distribuição das tensões atuantes sobre a mesma e o tamanho da seção transversal do cordão que irá suportá-las.

Em estudo realizado por MACHADO (2011) utilizando simulações de elementos finitos para avaliar juntas soldadas, foi verificado que em pontos específicos da junta os cálculos virtuais mostravam regiões de elevadas tensões, muito acima do limite de resistência a tração do material. Este fenômeno é explicado por MACHADO:

[...] na modelagem em questão não foi considerado o fato de na raiz e nas extremidades (pés) da junta soldada ser ultrapassado o limite da resistência ao escoamento do MS e do MB – tão logo ela seja submetida a suficientemente elevado carregamento e de forma extremamente localizada. Portanto, nestes pontos os materiais sofrem deformações plásticas e as tensões extremas são atenuadas e redistribuídas (MACHADO, 2011, p. 191).

Quando as tensões atuantes sobre os componentes, e seu comportamento, são conhecidas há soluções que amenizam os efeitos da fadiga, como tratamentos mecânico ou térmico após o processo de soldagem. Porém, no caso do canal embocador proposto neste trabalho são conhecidas apenas as tensões externas atuantes sobre o conjunto. Embora onerosos em relação aos custos do projeto, ensaios de laboratório são uma forma eficaz e rápida de prever possíveis falhas em componentes, sendo que o custo envolvido no processo de análise, quando diluído pelo tempo de vida do projeto e seu respectivo volume de produção, certamente representará uma pequena porcentagem dos possíveis custos de garantia decorrentes de falhas em campo.

### **3.7 CONJUNTO SOLDADO DO CANAL EMBOCADOR**

A escolha do elemento a ser estudado neste trabalho se deu em função de características como o dimensional, função e tipo de esforços a que é submetido. É um elemento que possibilita a verificação da eficácia na redução de peso devido aos esforços que suporta durante o funcionamento e deslocamento da máquina colheitadeira.

Durante a análise do conceito do novo canal embocador estudou-se a possibilidade na redução da quantidade de uniões soldadas, visto as limitações, em termos de resistência mecânica e à fadiga, da solda.

Em relação à resistência mecânica da junta, BLODGETT sugere que o tamanho do filete de solda seja de aproximadamente 3/4 da espessura da chapa (BLODGETT, 1972). Neste caso é considerada a menor espessura de chapa utilizada no local da solda. A AWS coloca, de acordo com a tabela 5, valores mínimos para o tamanho do filete de solda.

Tabela 5 - Tamanho mínimo recomendado para o filete de solda.

<b>Tamanho Mínimo Para Filetes de Solda</b>	
<b>Espessura do Metal Base (t)</b>	<b>Tamanho Mínimo do Filete de Solda</b>
<b><math>t \leq 6</math></b>	<b>3</b>
<b><math>6 &lt; t \leq 12</math></b>	<b>5</b>
<b><math>12 &lt; t \leq 20</math></b>	<b>6</b>
<b><math>20 &lt; t</math></b>	<b>8</b>

Fonte: Adaptado de AWS, 2004.

É evidente que, em algumas situações, as regras propostas são contornadas. Entretanto deve-se ter em mente a necessidade de haver uma proporção entre as espessuras das peças e o tamanho dos cordões de solda, tanto da perna quanto do comprimento do cordão, com a finalidade de evitar desperdícios, super ou subdimensionamento.

O canal embocador atualmente produzido possui sua estrutura em forma de monobloco, onde as mesmas peças que atuam estruturalmente no conjunto têm a função de vedação. Este conceito será modificado, em função de que algumas culturas, principalmente o arroz, agem de forma extremamente agressiva sobre os componentes das máquinas, desgastando-os e reduzindo drasticamente sua vida útil. Para isso, a proposta de redução de peso considera a substituição desses elementos, que efetivamente podem atuar somente como fechamentos, por outros fabricados em aço de médio ou alto carbono, resistente ao desgaste. Estas paredes terão papel puramente de vedação, não exercendo qualquer função estrutural, podendo ser substituídas após terem sofrido desgaste excessivo, além de possibilitar que materiais mais baratos possam ser utilizados em função da cultura que está sendo processada.

A primeira etapa para o dimensionamento do conjunto é o conhecimento das forças atuantes sobre o mesmo. O levantamento das cargas atuantes teve como base as situações

mais severas de trabalho. Neste caso, utilizou-se uma plataforma para colheita de milho de 11 linhas, com espaçamento de 45cm entre linhas, a qual possui peso de 2450Kg, aproximadamente, e é acoplada diretamente à frente do canal embocador.

As figuras 38 e 39 mostram os pontos onde o conjunto é acoplado à máquina colheitadeira e os locais onde atuam as forças oriundas da ação da plataforma recolhedora, respectivamente.

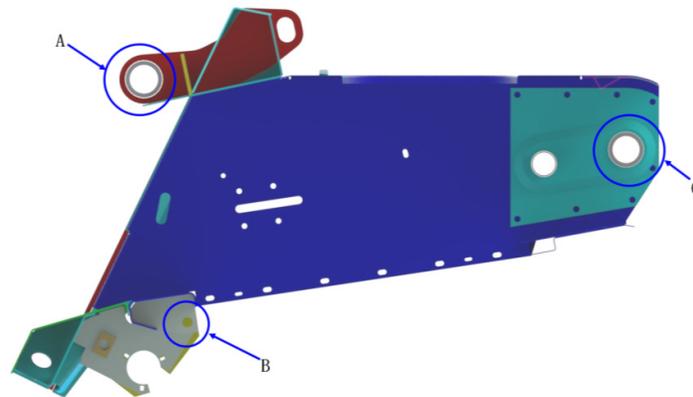


Figura 38 - Pontos de montagem do canal embocador na máquina colheitadeira e na plataforma de corte.

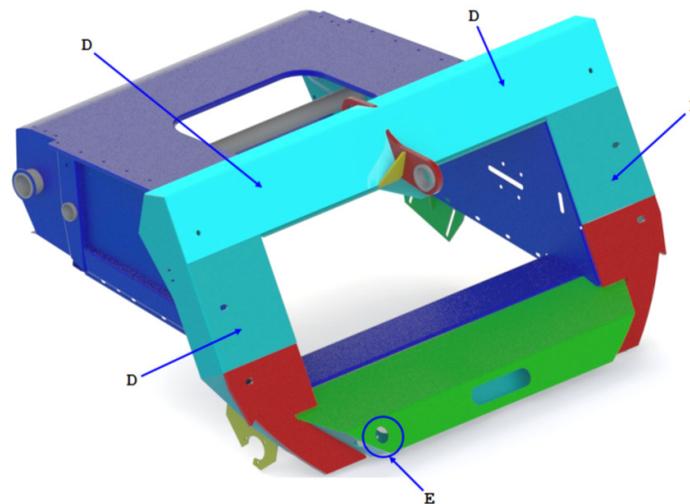


Figura 39 - Vista isométrica dos pontos de ação de tensões sobre o canal embocador.

O ponto A é o local de sustentação da plataforma de recolhimento, sendo que neste local há uma rótula, permitindo a articulação lateral da plataforma.

Os pontos B, presentes um em cada lateral do conjunto, são os pontos de montagem dos atuadores hidráulicos, os quais efetuam o levante vertical e sustentam o conjunto.

Os pontos *C*, também presentes um em cada lado do conjunto, são os pontos de montagem e articulação do canal embocador no corpo da máquina colheitadeira.

As regiões indicadas pelos pontos *D* são as superfícies de contato com a plataforma. Eventualmente esta região sofre a ação de forças normais.

No ponto *E* é montado o atuador hidráulico responsável pela articulação lateral da plataforma. Além dos esforços longitudinais e verticais exercidos no conjunto, durante a colheita é comum a transposição de obstáculos, geralmente representados por curvas de nível ou eventuais irregularidades do solo, fazendo com que a plataforma realize uma inclinação em relação ao eixo longitudinal da máquina, afetando diretamente o conjunto embocador em relação à torção, devido à inércia da plataforma.

A figura 40 mostra o movimento causado pela torção da plataforma.



Figura 40 - Movimento rotacional da plataforma.

Fonte: Massey, 2013.

O canal embocador, assim como vários outros conjuntos da máquina colheitadeira, possui circuitos hidráulicos que o auxiliam a desempenhar sua função no processo de colheita. Durante o seu funcionamento ocorrem picos de pressão no sistema hidráulico, sendo que em determinadas situações estes picos podem vir a exceder a pressão máxima permitida pelo sistema. Para evitar que ocorram danos aos componentes do circuito, são acopladas válvulas de alívio e acumuladores de pressão, os quais entram em funcionamento sempre que esses picos de pressão atuam sobre o sistema. Diferentemente das válvulas de alívio, os acumuladores de pressão atuam durante todo o funcionamento da máquina colheitadeira, absorvendo impactos e amortecendo variações, bruscas ou não, na pressão do sistema.

Como o movimento angular da plataforma é controlado eletronicamente por sensores e atuadores hidráulicos, o máximo carregamento atuante sobre o canal embocador foi considerado como sendo a carga imposta pela máxima pressão permissível atuante sobre o sistema hidráulico.

Como a base para o projeto do novo canal embocador foi o conjunto atualmente produzido, as dimensões internas, bem como os pontos de montagem dos mecanismos foram mantidos em suas posições atuais. Isto levou ao desenvolvimento de uma estrutura semelhante à atual, porém com características estruturais diferenciadas.

A figura 41 mostra as espessuras de chapas de aço utilizadas na fabricação do atual conjunto.

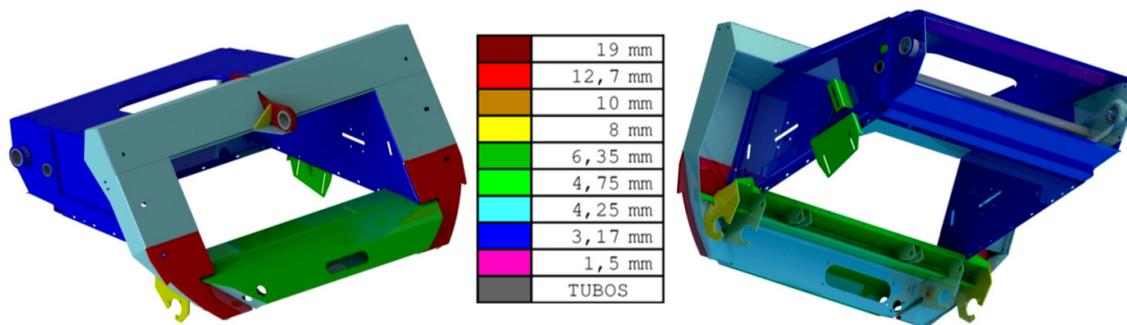


Figura 41 - Espessuras de chapas utilizadas no canal embocador atual.

Observa-se a utilização de espessuras com grandes variações em função da utilização de materiais com baixa resistência mecânica. Este conceito gera desperdícios, pois durante a fabricação dos componentes a não comunização de materiais resulta na necessidade de preparação da manufatura para cada espessura de material, devido a parâmetros de corte e conformação das chapas de aço, além da necessidade de eventualmente manter estoque de peças devido à baixa quantidade de componentes necessários, de acordo com as espessuras utilizadas.

A figura 42 mostra o percentual de cada espessura, em peso, utilizado no canal embocador atualmente produzido.

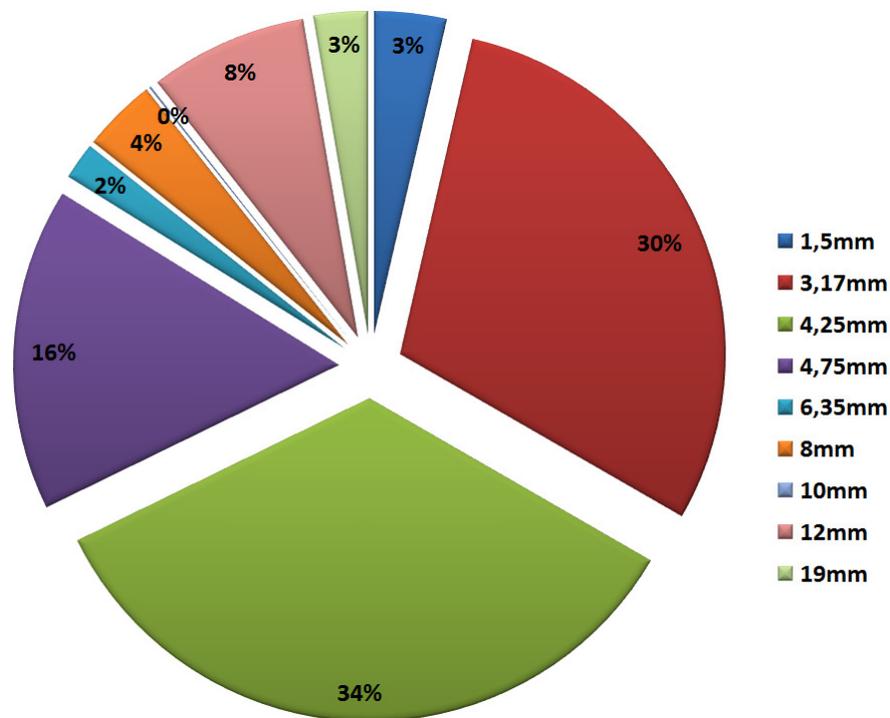


Figura 42 - Percentual, em peso, de cada espessura de chapa utilizada no canal embocador atual.

### 3.8 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos em materiais metálicos estão presentes em praticamente todas as classes de produtos no setor metal mecânico, visando obter informações a respeito das propriedades e comportamento mecânico com que o produto irá chegar ao mercado. São classificados em ensaios destrutivos e não destrutivos, sendo que a estrutura interna, bem como os processo de fabricação empregados definem o comportamento mecânico de um material. Sendo assim, cada componente deve possuir suas próprias características, distinguindo-o dos demais seja pelo seu processo de fabricação ou pelas características de aplicação (GARCIA, 2013).

Neste trabalho serão utilizados apenas ensaios destrutivos, que são os de tração, dobramento, microdureza e fadiga. De uma maneira geral são realizados aplicando-se carregamentos mecânicos, sejam eles de tração, compressão, flexão, torção ou cisalhamento, obtendo assim dados sobre o comportamento do material a cada tipo de esforço (SOUZA, 1982).

### **3.8.1 Ensaio de Tração**

O ensaio de tração permite adquirir informações a respeito da resistência mecânica à tração e da tensão de escoamento dos materiais, citado por SOUZA (1982) como um dos principais ensaios mecânicos, devido a sua simplicidade e quantidade de informações que fornece a respeito do material.

No caso deste trabalho, o experimento terá como finalidade, além de identificar as propriedades mecânicas do metal utilizado, verificar a resistência mecânica da solda, a qual une as duas metades do corpo de prova, caracterizando a viabilidade dos parâmetros de solda empregados.

### **3.8.2 Ensaio de Dobramento**

Os ensaios de dobramento serão realizados com a finalidade de avaliar o comportamento da solda mediante uma deformação localizada no metal de solda. Segundo SOUZA, este ensaio "fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material" (1982, p. 138).

Este tipo de experimento não fornece informações numéricas como resultado, sendo que seu objetivo é identificar a suscetibilidade do material a um processo de dobra, verificando a presença ou não de defeitos na superfície deformada. Assim sendo, a carga aplicada no ensaio não tem maior importância. Entretanto as geometrias dos componentes utilizados para a realização do ensaio, como o cutelo, apoios e o ângulo de dobramento definem a severidade do experimento (SOUZA, 1982).

### **3.8.3 Perfil de Microdureza**

A análise de microdureza mostra, entre outras propriedades, a suscetibilidade de um material à formação de microestruturas martensíticas, as quais são características de tratamentos térmicos. Há uma relação direta da dureza com as forças de ligação

interatômicas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica (GARCIA, 2013).

Diferentemente de um ensaio normal de dureza, onde marcações relativamente grandes são deixadas no componente após o ensaio, a microdureza permite a obtenção da dureza utilizando escalas menores de cargas e punções, causando danos microscópicos no componente. Isso permite a medição da dureza em peças de pequenas espessuras ou com finas camadas onde as propriedades devem ser mensuradas (SOUZA, 1982).

### **3.8.4 Ensaio de Fadiga**

Durante a elaboração do projeto do novo canal embocador aspectos como disponibilidade de matéria-prima, manufaturabilidade e tempo de projeto serão avaliados em cada etapa do desenvolvimento. Em relação ao projeto como um todo, o tempo demandado para a avaliação de um ensaio de fadiga é baixo em relação ao tempo total do projeto, além do resultado obtido com este tipo de avaliação ser de extrema importância para a validação do estudo, pois pode simular, de forma extrema, condições reais de trabalho.

As análises realizadas por elementos finitos apresentam resultados relativos às condições estáticas de carregamento, acrescidas de um coeficiente de segurança determinado por medições das acelerações a que o conjunto é submetido em campo, onde foram identificados os pontos onde ocorrem as principais concentrações de tensões. Os principais fatores que afetam o coeficiente de segurança são a transposição de obstáculos em velocidades relativamente elevadas da máquina colheitadeira, o deslocamento pela lavoura ou por estradas de chão batido, sendo que esta última geralmente ocorre em altas velocidades, tomando como referência as velocidades máximas dessas máquinas, as quais chegam a atingir 30 quilômetros horários, sendo uma velocidade relativamente elevada para um equipamento que possui peso entre 8 e 18 toneladas e um centro de gravidade extremamente elevado.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO UTILIZADOS**

Diferentemente do canal embocador atualmente fabricado, o novo conjunto irá possuir um formato estrutural semelhante a um chassi automotivo. Os locais onde preferencialmente atuam os esforços de tração, compressão e torção serão aplicados elementos mais rígidos e espessos, atuando como uma caixa treliçada. Isso permite que nas regiões onde praticamente não há tensões atuantes, ou existem em pequenas intensidades, seja diminuído a quantidade de material utilizado, ou até mesmo eliminá-lo. Nesses locais a idéia para um projeto final é a utilização de chapas com a finalidade de vedação, permitindo a substituição quando danificadas, seja por choques mecânicos ou desgaste.

Considerando o processo de solda da estrutura, em locais onde são realizadas soldas de topo e em ângulo, ao invés de se utilizar chanfros ou espaçamento entre as peças, será empregado um artifício que consiste em fazer recortes, de baixa profundidade, durante o processo de corte das peças, sendo que os espaços existentes nessas regiões servem para, além de auxiliar a penetração da solda, definir a posição dos cordões, fazendo com que o tempo de medição e distribuição da solda seja excluído das tarefas do soldador. Em relação ao tempo do processo de solda como um todo, da movimentação das peças até a finalização da solda, este método representa um ganho de 5 a 10% no tempo total do processo.

Para a etapa de posicionamento entre as peças as serem soldadas, pequenos encaixes serão projetados para auxiliar e garantir o correto posicionamento dos componentes em todo o conjunto. Este processo, em termos de ganhos de tempo, é mais representativo para fabricação de protótipos, pois nesta etapa do desenvolvimento de um produto o ferramental utilizado geralmente é provisório. Em comparação com um conjunto fabricado e soldado inteiramente através de traçados e pontamentos de solda para pré-fixar as peças, a utilização de encaixes possibilita reduzir o tempo de obtenção de um conjunto, sem ferramental, em mais de 100%, sendo este um valor aproximado, pois para alguns conjuntos com maior complexidade esta redução pode ultrapassar facilmente este

percentual. A precisão no posicionamento é outra grande vantagem deste método, pois a tolerância de posicionamento entre as peças é relativa à tolerância do corte por laser, a qual gira em torno de  $\pm 0,15\text{mm}$ , ou em casos onde o processo de dobra é empregado, a tolerância passa a ser deste, sendo que para a indústria de máquinas agrícolas em geral esta tolerância gira em torno de  $\pm 0,5\text{mm}$  a  $\pm 1,0\text{mm}$ .

Os dois métodos utilizados para a otimização do processo de soldagem se convertem em ganho de tempo durante a fabricação do conjunto, podendo ser considerados como um sistema Poka-Yoke, pois garantem que as peças sejam montadas em suas posições corretas, bem como a correta distribuição dos cordões de solda, anulando um eventual erro na interpretação do desenho e posterior equívoco no posicionamento dos componentes e das soldas, podendo gerar além de desperdícios, danos ao componente durante os testes.

Embora seja utilizado este novo conceito, alguns métodos já conhecidos como soldas tampão em furos pré-existentes, o que não deixa de ser um método de pré-posicionamento dos cordões de solda, serão empregados.

Diferentemente do conjunto estudado neste trabalho, os novos métodos de fabricação utilizados neste projeto já foram submetidos a testes de campo e a longas horas de exposição a carregamentos, mostrando bons resultados, sem qualquer indício de enfraquecimento ou falha dos componentes onde foram aplicados.

Um dos principais fatores que diferem a manufatura da indústria agrícola, que de certa forma acaba se tornando uma limitação, em relação à automobilística é a restrição em relação à utilização de peças fabricadas por repuxos ou nervuramento, obtidos através de ferramentas de conformação a frio ou a quente.

Isso se deve ao relativo baixo volume de produção, em comparação com a indústria automobilística, onde as carrocerias dos automóveis são estruturadas por peças conformadas quase na sua totalidade por processos de repuxamento, acarretando em um melhor aproveitamento das propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Na indústria agrícola, em algumas situações específicas, processos de repuxamento ou forjamento são utilizados em função de solicitações ou limitações espaciais dos componentes.

O processo de dobra predominante no projeto de máquinas colheitadeiras é a dobra linear, onde um punção e uma matriz fazem uma dobra longitudinal retilínea. A estruturação dos conjuntos é realizada através da junção soldada dos componentes.

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO NOVO CANAL EMBOCADOR

A concepção do projeto do novo canal embocador tem como premissas, além da redução de peso, a comunicação e aproveitamento de matérias-primas e peças, evitando desperdícios de recursos diretos e indiretos ao processo.

O redimensionamento do novo conjunto soldado do canal embocador será realizado com base no conjunto atualmente fabricado, sendo que as dimensões internas, externas e os pontos de montagem dos componentes serão mantidos em suas posições e dimensões originais. O objetivo desta consideração é de manter as configurações dos mecanismos envolvidos na montagem do conjunto final, bem como o local onde este é acoplado à máquina colheitadeira.

Durante a elaboração do novo canal embocador requisitos como manufaturabilidade, resistência mecânica e *design* nortearão o desenvolvimento do projeto.

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 boa disponibilidade no mercado nacional, além de possuir similares no mercado internacional, e às suas propriedades mecânicas apreciáveis, o tornando um substituto potencial para aços de baixo carbono e baixa resistência mecânica.

Com o projeto conceitual estrutural definido, ensaios mecânicos são necessários para verificar o comportamento dos materiais a serem utilizados, combinados com os processos de fabricação empregados para fabricação e união dos componentes. Neste trabalho serão realizados ensaios de microdureza, dobramento, tração, metalografia e ensaio de fadiga, sendo que este último será aplicado somente no conjunto soldado final, verificando toda a estrutura quanto à suscetibilidade à fratura por fadiga.

## 4.3 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos consiste em uma etapa crucial no desenvolvimento do projeto do novo canal embocador, pois a partir dela, com a definição do conceito

estrutural do produto, serão feitas as avaliações de distribuição de tensões, verificando a necessidade de adicionar ou remover material dos elementos estruturais do conjunto.

A análise de FEA para o presente estudo considerará somente a deformação elástica do material, visto a complexidade de avaliar uma deformação elasto-plástica. A execução da análise de elementos finitos foi feita pelo software Pro/Mechanica, o qual é uma extensão do software de projetos ProEngineer, da empresa PTC®. A opção por realizar as análises neste *software* foi em função da possibilidade da estrutura projetada em CAD ser analisada diretamente pelo *software* de FEA, necessitando apenas de ajustes de posicionamento, bem como as definições de material, pontos de carregamento e restrições.

Os carregamentos aplicados para o ensaio serão definidos em função do peso da plataforma de recolhimento acrescido de um coeficiente de segurança definido a partir de medições feitas em campo das acelerações a que o conjunto é submetido durante o deslocamento da máquina colheitadeira.

Para a preparação do modelo matemático para a análise de FEA foi considerado que em todas as interfaces entre dos componentes do conjunto não há nenhum grau de liberdade, ou seja, todos os componentes estão fixados uns aos outros, configurando um conjunto rigidamente soldado.

Em relação ao conjunto final foi mantido somente um grau de liberdade em cada ponto de montagem nos pontos de montagem B e C, mostrados na figura 38, mantendo livre somente a rotação nestes pontos. Esta configuração reproduz a condição real de montagem, pois nos pontos B e C a fixação é feita por pinos, permitindo a livre rotação axial, porém a translação ao longo do eixo dos pinos é restrita.

#### **4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS**

Para a avaliação da soldabilidade e das propriedades mecânicas do aço LNE 380 os corpos de prova foram confeccionados segundo a norma AWS D1.1-2004, sendo que as dimensões dos corpos de prova para dobramento e tração são mostradas nas figuras 43 *a* e 43 *b*, respectivamente.

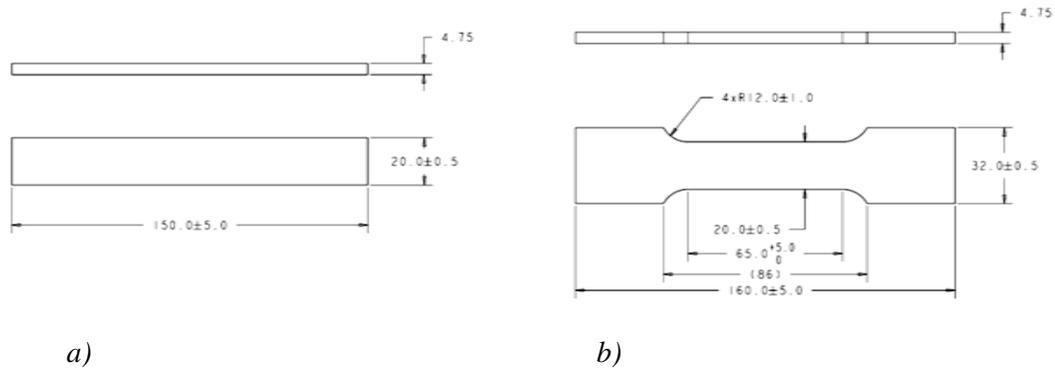


Figura 43 - Dimensões dos corpos de prova para: a) dobramento e b) tração.

Os parâmetros de soldagem utilizados na fabricação dos corpos de prova são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros e consumíveis de soldagem

Parâmetro	Valor para:	
	Solda de topo	Solda em ângulo
Diâmetro do eletrodo(mm) / material	0,8/ (AWS 5.18) ER70 S-6	1,2/ (AWS 5.18) ER70 S-6
Vazão e tipo de gás	10 L/min - Ar + 25%CO <sub>2</sub>	10 L/min - Ar + 25%CO <sub>2</sub>
Metal de base	NBR LNE380	NBR LNE380
Dimensão do metal de base (MB)	160,0 x 32,0 x 4,75	150,0 x 20,0 x 4,75
Posição de soldagem	1G	1G
Polaridade	Eletrodo Positivo (CCEP)	Eletrodo Positivo (CCEP)
Condução da tocha	Manual	Manual
Transferência do metal de solda	Globular	Globular
Corrente de soldagem (A) *	128,5	231
Tensão do arco elétrico (V) *	20	23
Velocidade de soldagem (MM/s) *	5	5,2

\* valores médios

O aporte térmico é mostrado como resultado da equação 8, dada em kiloJoules de energia.

$$E = \eta \frac{L \times V}{v} \quad (8)$$

O aporte térmico durante a soldagem foi de 61.54 kJ.

Para a junta em ângulo o aporte térmico foi de 131,1kJ.

As propriedades mecânicas bem como a composição química do arame de solda utilizado são mostradas na tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e químicas do arame de solda utilizado no projeto.

Características dos Arames de Solda	
Composição Química (%)	
C	0,08
Si	0,90
Mn	1,50
Propriedades Mecânicas (Mpa)	
Lim. Resit.	540,0
Lim. Esc.	440,0

Foram soldados seis corpos de prova, em estado bruto, com dimensões de 200,0 x 200,0 x 4,75mm, onde de cada peça foram retirados dois corpos de prova para ensaio de tração e dois para o ensaio de dobramento.

Foram confeccionados, além dos corpos de prova soldados, quatro corpos de prova do metal base, com a finalidade de comparar os resultados em relação ao metal de base utilizado.

As amostras foram cortadas com cerca de 25% de sobremetal, sendo posteriormente usinadas nas dimensões especificadas pela norma AWS D1.1 2004.

Na solda dos corpos de prova foi utilizado o processo de soldagem a arco elétrico com proteção por gás e eletrodo consumível, conhecido por MAG convencional.

Foram realizados dois passes de solda, um em cada lado da junta, sendo que anteriormente à realização do segundo passe foi efetuada uma limpeza da raiz da solda com disco de corte. A solda foi realizada com cobre junta.

Para a identificação da diluição foram analisadas uma junta soldada em topo e outra em ângulo, com a intenção de comparar os resultados em função do maior aporte de calor fornecido para a junta em ângulo.

Durante a elaboração do projeto estrutural do novo canal embocador, análises de elementos finitos serão realizadas ao longo de toda a fase de desenvolvimento, pois são de extrema importância devido aos resultados que ela apresenta, otimizando vários dos processos que envolvem o projeto de um novo produto, como a verificação das tensões atuantes, deformações e possíveis falhas que venham a ocorrer no conjunto ao longo do tempo. Com esta etapa concluída, o conjunto produto pode ser fabricado para a execução dos testes finais.

Após todas as verificações em relação aos materiais e processos de fabricação utilizados, a fabricação do conjunto é realizada com a finalidade de verificar na prática os

estudos matemáticos e ensaios mecânicos realizados, obtendo a estrutura alvo do estudo, sendo que posteriormente a mesma será submetida a um ensaio de fadiga, verificando a interação mecânica entre todos os componentes que a estruturam.

#### 4.5 BANCADA PARA ENSAIOS DE FADIGA

A bancada para a realização do ensaio foi definida em função dos pontos de montagem do conjunto e dos pontos e direções de aplicação dos carregamentos. As cargas foram aplicadas com a finalidade de reproduzir as solicitações existentes no campo.

A figura 44 mostra uma vista isométrica do projeto da bancada de testes e a figura 45 mostra uma vista do canal embocador montado sobre a bancada.

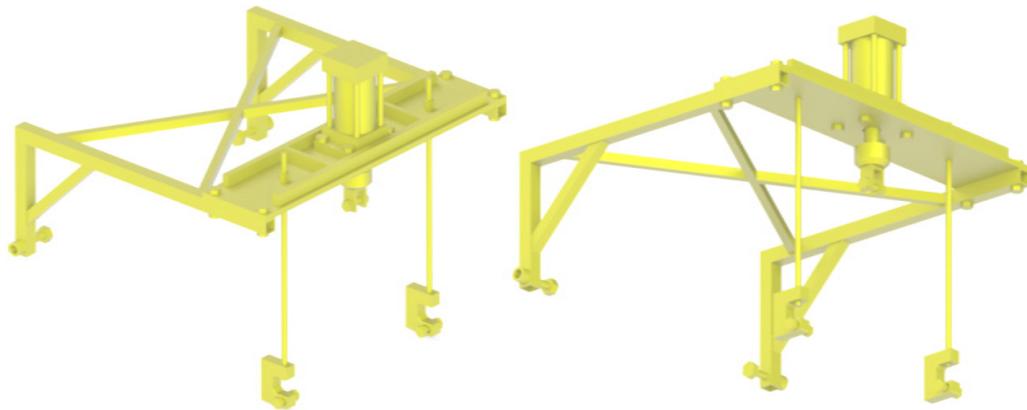


Figura 44 - Vista isométrica do projeto da bancada para o ensaio de fadiga.

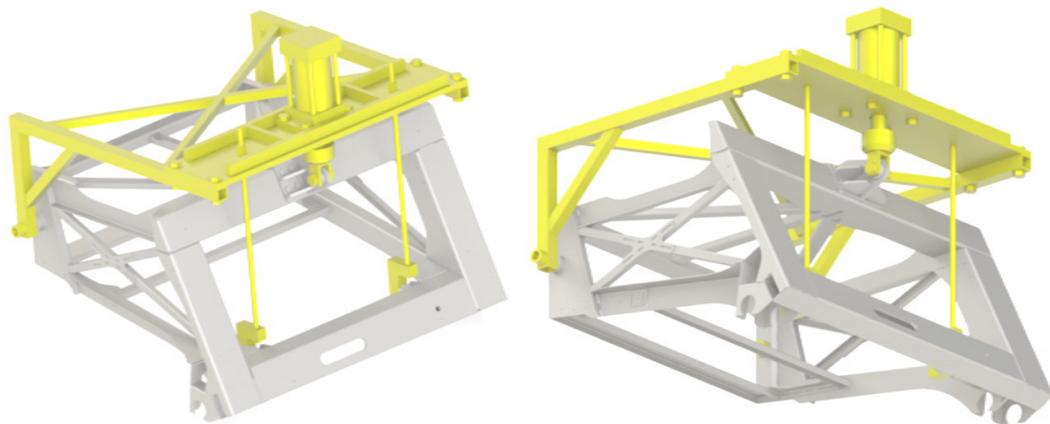


Figura 45 - Vista isométrica da bancada de fadiga com o canal embocador.

Os carregamentos utilizados, por serem cíclicos, são menores do que os utilizados nas análises estáticas. Na análise de fadiga foram utilizadas, inicialmente, cargas de 60kN, sendo que a aplicação destas se deu da seguinte forma: o conjunto foi submetido a um pré-carregamento de 40kN controlado por meio de uma célula de carga e, posteriormente, uma carga cíclica de 20kN foi aplicada sobre a pré-carga, resultando em uma tensão de 60kN. A frequência utilizada foi de 5Hz.

Como o carregamento de fadiga é aplicado sobre um carregamento pré-estabelecido, o ciclo de cargas não passa por uma região de inversão de sinais, onde os valores das tensões máximas e mínimas não são iguais, pois na prática a plataforma nunca exerce esforço em direção oposta ao solo no sentido vertical.

A montagem da bancada de testes é mostrada na figura 46, onde podem ser vistas as relações entre o conjunto soldado a ser avaliado, a estrutura da bancada e o sistema hidráulico, mostrando as posições do atuador e da célula de carga utilizados.



Figura 46 - Instalação da bancada de fadiga para o conjunto proposto.

Para a validação das tensões obtidas pela análise de elementos finitos foram colados 4 strain gauges em locais onde foram identificadas concentrações de tensões na análise virtual, sendo que as posições destes no conjunto soldado são mostradas na figura 47.

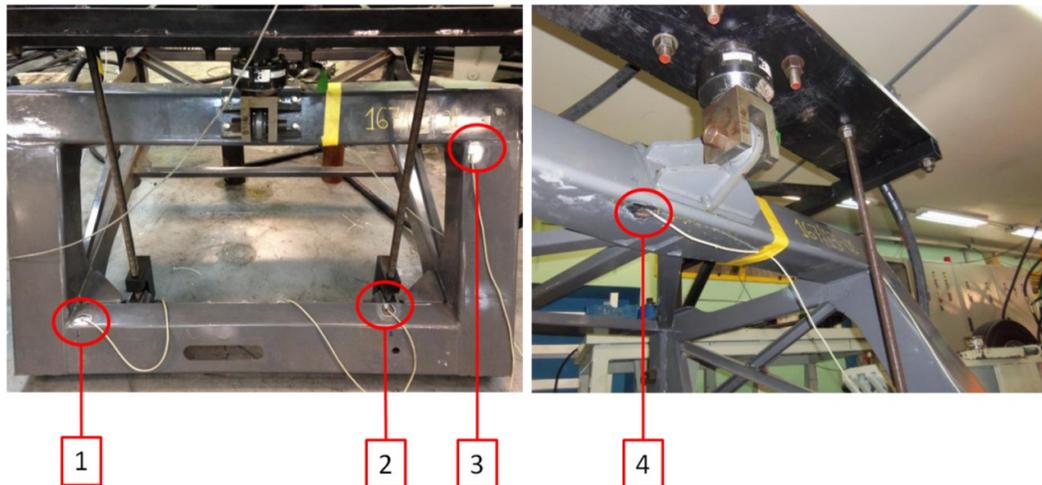


Figura 47 - Posicionamento dos strain gauges no embocador proposto.

A figura 48 mostra a montagem do canal embocador atualmente fabricado na bancada de testes juntamente com os strain gauges colados, o qual será submetido aos mesmos carregamentos, pontos de fixação, direção e aplicação das cargas que o embocador projetado neste trabalho.



Figura 48 - Instalação da bancada de fadiga para o conjunto produzido atualmente.

Como pode ser observado pela figura 48 há regiões oxidadas, devido a uma operação que o conjunto desempenhou por aproximadamente 40 horas na lavoura, havendo a remoção da pintura devido à abrasão do material colhido. Entretanto a espessura da

chapa não foi afetada pelo desgaste, havendo somente remoção de proteção superficial. Pode-se observar o posicionamento dos strain gauges nos mesmos locais em que foram fixados no conjunto proposto por este trabalho.

Os conjuntos serão submetidos a um número indeterminado de ciclos, visando obter a vida em fadiga do elemento.

Para início dos testes foi definido um escalonamento dos carregamentos, com a finalidade de comparar os resultados dos dois conjuntos avaliados.

As etapas do escalonamento consistem em submeter os conjuntos às seguintes cargas:

1: Aplicar um carregamento de 60kN durante  $1 \times 10^5$  ciclos;

2: Aumentar o carregamento em 10%, chegando a 66kN, e submetê-lo até  $2 \times 10^5$  ciclos;

3: Aumentar o carregamento em 10%, chegando a 72,6kN, e submetê-lo até  $3 \times 10^5$  ciclos;

4: Aumentar o carregamento em 10%, atingindo 79,86kN e submetê-lo a uma ciclagem até que ocorra uma falha.

O escalonamento visa comparar as resistências de cada conjunto à medida que o carregamento é aumentado.

#### **4.6 AVALIAÇÃO DE CUSTOS**

Na indústria metal mecânica os aços de baixo carbono e baixa resistência mecânica possuem aplicação predominante devido à boa relação resistência versus custo. Apesar de possuírem propriedades mecânicas inferiores aos aços de alta resistência e baixa liga, como é o caso do LNE 380, suas características geralmente atendem aos requisitos de inúmeras aplicações, que vão de componentes estruturais até itens com relevância puramente estética.

Evidentemente que aços com melhores propriedades mecânicas têm um custo unitário superior, devido à tecnologia empregada na sua fabricação e aos elementos químicos que fazem parte de sua composição. Entretanto, quando se está utilizando um

material com melhores propriedades mecânicas, há a possibilidade de diminuir a quantidade de material utilizado para a fabricação de componentes, além do valor agregado ao produto devido ao emprego de tecnologia.

A avaliação de custos detalhada envolve não somente o levantamento das quantidades de materiais utilizados em um projeto, mas todos os recursos envolvidos no processo de desenvolvimento e fabricação de um produto. Entretanto neste trabalho serão abordados somente os custos relativos às quantidades de aço e arames de solda utilizados, sendo que os valores obtidos com esses dois elementos constituem o maior montante de custos envolvidos em um conjunto soldado. À quantidade de aço estão relacionados os tempo de corte, dobra e preparação para cada processo. À quantidade de arame de solda estão relacionadas as quantidades de gases de proteção, tempo de operação de solda e consumo de energia elétrica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Após a definição conceitual do novo canal embocador, este foi modelado e analisado por cálculos computacionais de elementos finitos, mostrando as regiões com maiores tensões atuantes.

O material LNE 380 foi utilizado em quatro espessuras, sendo elas de 3,17mm, 4,75mm, 6,35mm e 8mm, com as bitolas distribuídas de acordo com a análise de FEA e observada na figura 54.

As espessuras de 12 e 16mm foram utilizadas no subconjunto que sustenta a plataforma de recolhimento, onde está localizado o ponto A na figura 38. Este local não foi tratado com a finalidade de redução de peso, visto que para a finalização do projeto este componente, hoje constituído a partir de um conjunto soldado, será moldado em uma peça fundida, com possibilidade de utilizá-lo em outros modelos de máquinas colheitadeiras. Portanto, para a análise em questão, o mesmo está superdimensionado, a fim de não torná-lo um local crítico para o acúmulo de tensões.

Para o cálculo das tensões a serem utilizadas nos ensaios de FEA e de fadiga foram obtidos em campo os valores das acelerações a que a plataforma de recolhimento é submetida, possibilitando o cálculo referencial das tensões protegidas por um coeficiente de segurança.

A tabela 8 mostra os valores das acelerações verticais obtidas em campo, considerando diferentes condições de velocidade de deslocamento e de terreno.

Tabela 8 - Acelerações verticais da plataforma da máquina colheitadeira em campo.

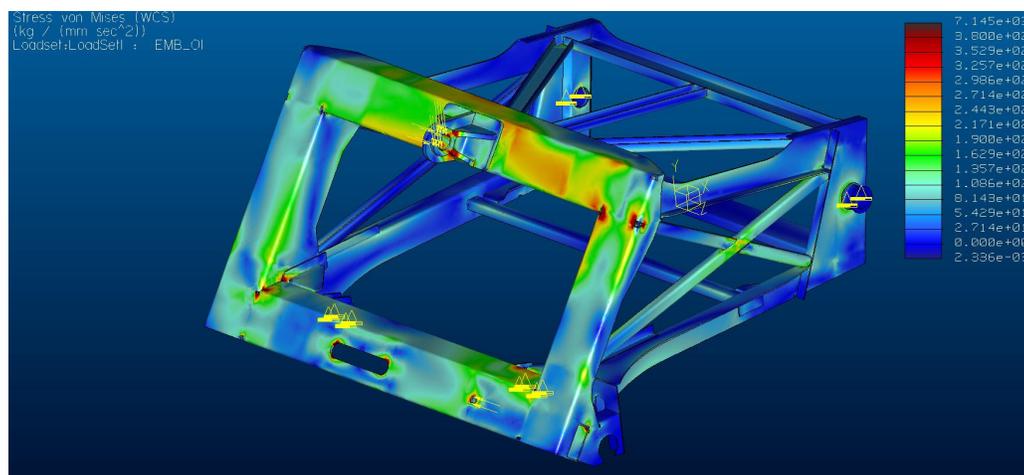
Local	Velocidade	Aceleração Vertical
Estrada	8 km/h	14,60 m/s <sup>2</sup>
Estrada	15 km/h	14,51 m/s <sup>2</sup>
Lavoura	12km/h	14,67 m/s <sup>2</sup>

Os dados foram coletados com a instalação de acelerômetros em pontos específicos da plataforma, identificando as acelerações a que o conjunto é submetido durante a movimentação da colheitadeira.

Há duas situações básicas em que as cargas atuam sobre o embocador. Uma delas, e a menos severa, é durante o processo de colheita, pois devido à uniformidade com que a plataforma precisa trabalhar para garantir um recolhimento adequado, há poucas cargas atuantes além do peso da própria plataforma, devido principalmente à velocidade com que a máquina se desloca e às condições de relevo da lavoura, embora hajam situações de deslocamento brusco do conjunto devido a irregularidades pontuais no terreno. A outra situação, e a mais severa, ocorre durante a movimentação da máquina colheitadeira quando não está colhendo, podendo esta movimentação acontecer em áreas de lavouras, estradas de chão ou terrenos irregulares, sendo esta última a pior situação, agravada pela velocidade com que a máquina se desloca, geralmente superior à velocidade de colheita que gira em torno de 4 a 8 quilômetros por hora, dependendo da capacidade da máquina e das características do produto a ser colhido.

Os dados mostrados na tabela 8 são válidos somente para a plataforma e as condições de testes utilizadas neste trabalho.

As figuras 49 *a*, 49 *b* e 49 *c* mostram os resultados das análises de elementos finitos.



(a)

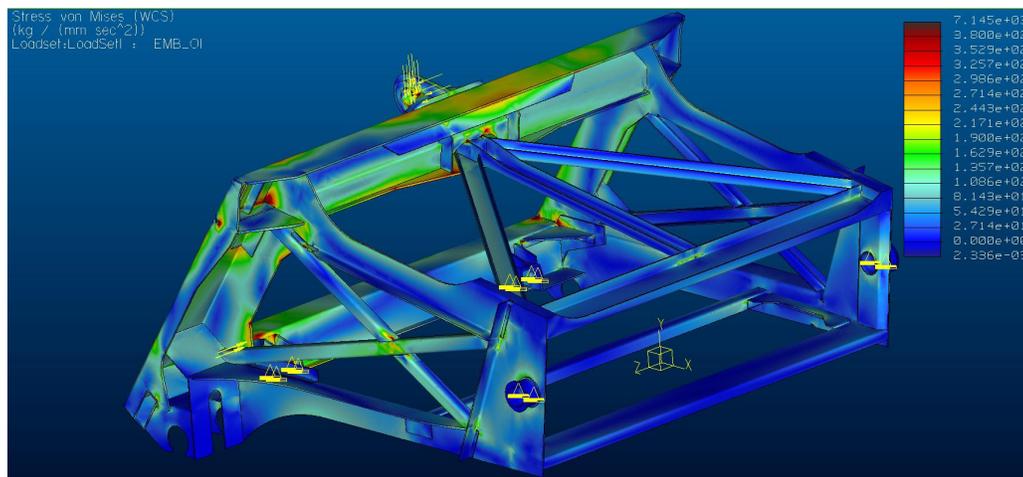
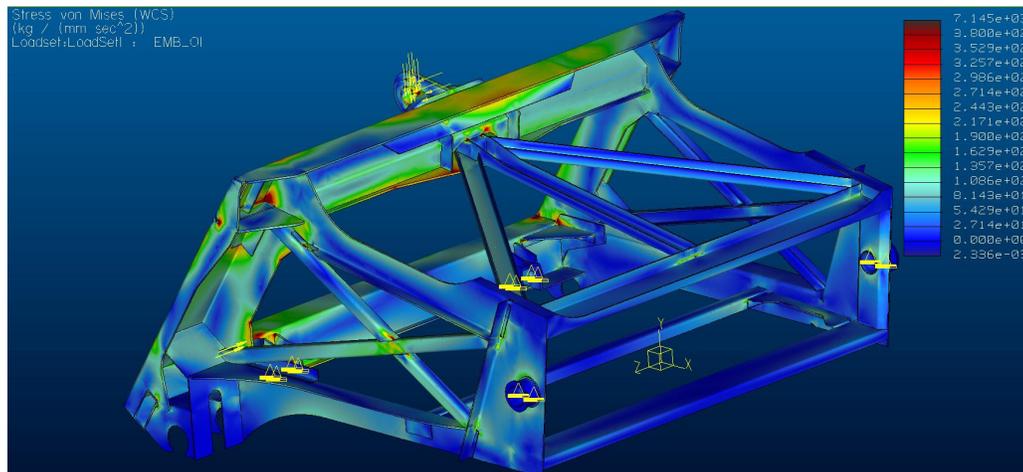


Figura 49 - Simulação de elementos finitos tendo como referência a tensão de escoamento mínima do aço LNE 380.

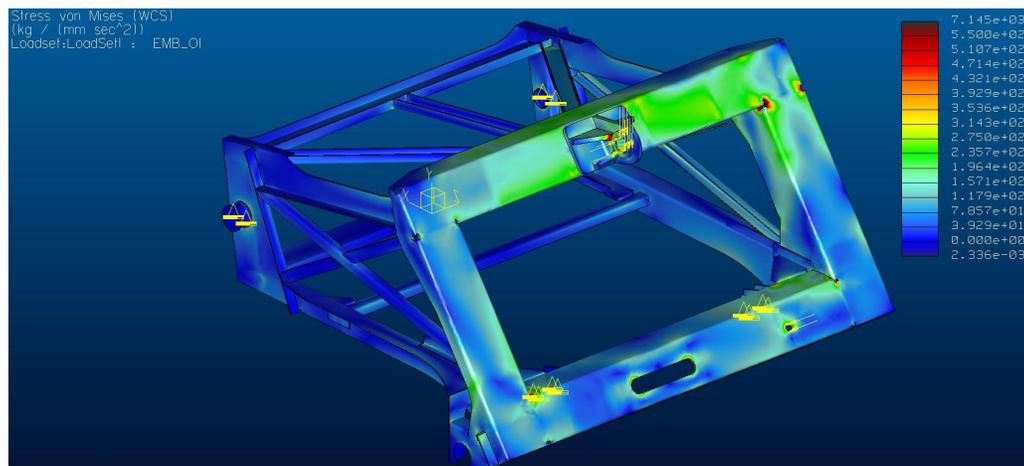
Os ensaios de FEA foram realizados ao longo de todo o desenvolvimento do projeto, sendo que ao longo de todo o processo cerca de 30 análises foram realizadas, onde cada análise virtual levou em média 15 minutos para ser processada. Este tempo é função direta da configuração do computador utilizado para tal.

Como a norma NBR 6656 especifica um limite mínimo para a tensão de escoamento, utilizou-se este como referência para a escala de tensões obtidas por FEA, embora sabe-se que as usinas geralmente fornecem os materiais com uma margem de segurança em relação às tensões de escoamento e ruptura.

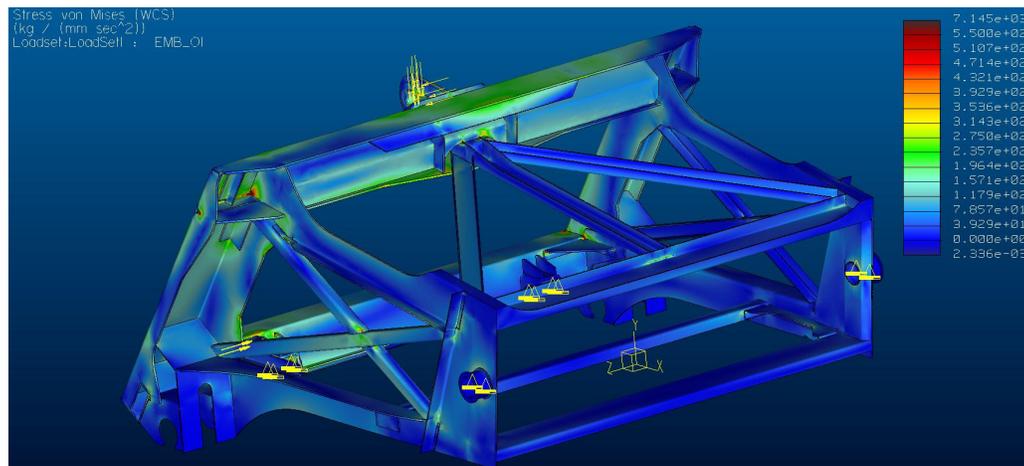
Através da análise das escalas de tensões pode ser observado que há pontos de concentrações de tensões que excedem o limite de resistência à tração do material

especificado, o qual possui limite mínimo de escoamento de 380 MPa, porém, como já foi abordado, esta é uma característica que, segundo MACHADO, pode ser desconsiderada.

Esses pontos, onde ocorrem as altas tensões, são regiões de cantos ou raios de dobra e encontro perpendicular entre dois ou mais componentes. Uma análise de FEA posterior foi realizada utilizando uma referência de resistência ao escoamento do material acima do especificado como mínimo na norma NBR 6656. Nas figuras 50 *a* e 50 *b* a legenda de tensões foi modificada para uma tensão de escoamento de 550 MPa, evidenciando a pontualidade das regiões que possuem concentrações de tensões.



(a)



(b)

Figura 50 - Simulação de elementos finitos tendo como referência 90% da tensão máxima de escoamento do aço LNE 380.

É visível a predominância das concentrações de tensões em alívios de dobra e pontos de coincidência de arestas entre as peças, além da considerável redução das regiões

destacadas com cores avermelhadas, as quais mostram os pontos com os mais altos níveis de tensões.

## 5.2 APLICAÇÃO DO AÇO LNE 380

Com as informações virtuais do novo conjunto soldado foi iniciada a fabricação do mesmo, sendo que após sua finalização foram comprovados os ganhos com reduções de recursos para a fabricação do conjunto, como as matérias-primas aplicadas na estrutura do conjunto, consumíveis de solda, pintura e mão de obra.

Após a execução do conjunto soldado foram iniciados os testes com os corpos de prova, sendo que a primeira etapa das análises consistiu em verificar a matéria recebida para a fabricação do protótipo.

A tabela 9 mostra a composição química, bem como as propriedades mecânicas, caracterizadas pelo certificado de matéria-prima, disponibilizado pelo fornecedor do material.

Tabela 9: Composição química e propriedades mecânicas do aço LNE 380 de acordo com o certificado de matéria-prima

Propriedades Mecânicas								
Lim. Esc.	Lim. Res.	Alongam.						
MPa	MPa	%						
456	549	24.3						

Composição Química								
C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti
0,08	1,04	0,017	0,005	0,016	0,028	0,028	0,003	0,002

Pela análise de espectroscopia, a composição disponibilizada pelo fornecedor das chapas foi confrontada com as obtidas pela análise espectroscópica, onde os resultados mostraram o atendimento do material à sua respectiva norma, conforme pode ser observado na tabela 10.

Tabela 10 - Composição química obtida pelo ensaio de espectroscopia do aço LNE 380.

Porcentagem	Elemento Químico								
	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti
%	0,099	1	0,027	0,14	0,006	0,02	0,032	0,005	0,005

As características mecânicas exigidas pela norma do material a ser estudado estão mostradas na tabela 11, bem como as características de outros aços de sua família.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas de aços carbono estabelecidas pela norma NBR 6656.

Grau	Limite de escoamento MPa	Limite de resistência MPa	Alongamento mínimo $l_o = 5,65\sqrt{S_o}$ %	Calço de dobramento a 180° em função da espessura nominal <i>e</i> mm
LNE280	280 a 430	410 a 540	30	Zero
LNE380	380 a 530	460 a 600	23	Zero
LNE400	400 a 530	520 a 650	23	Zero
LNE500	500 a 620	560 a 700	18	$e > 10,00 - 1,0 e$

Fonte: 19-NBR 6656, 2008).

Pode ser observado que esses aços possuem resistência mecânica muito superior em relação aos aços de baixo carbono em função dos elementos microligantes presentes, os quais atuam no refino do tamanho de grão aumentando assim sua resistência mecânica.

Após o término do projeto do novo conjunto do canal embocador foi realizada uma avaliação comparativa de volumes de matérias primas utilizadas, em comparação com o conjunto fabricado atualmente.

A figura 51 mostra a distribuição de espessuras de chapas no novo canal embocador.

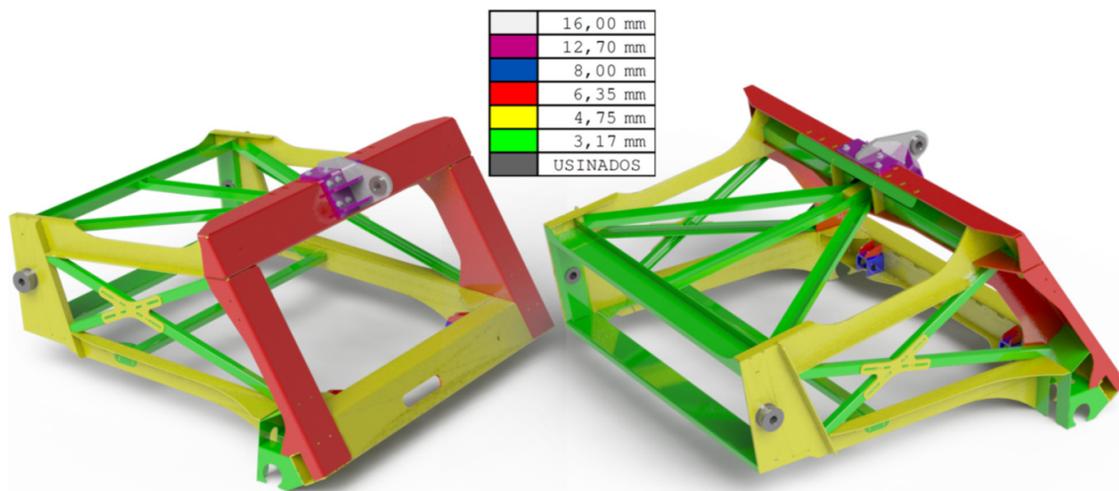


Figura 51 - Espessuras de chapas utilizadas no canal embocador proposto

A figura 52 mostra o percentual de cada espessura, em peso, utilizada no canal embocador proposto neste trabalho.

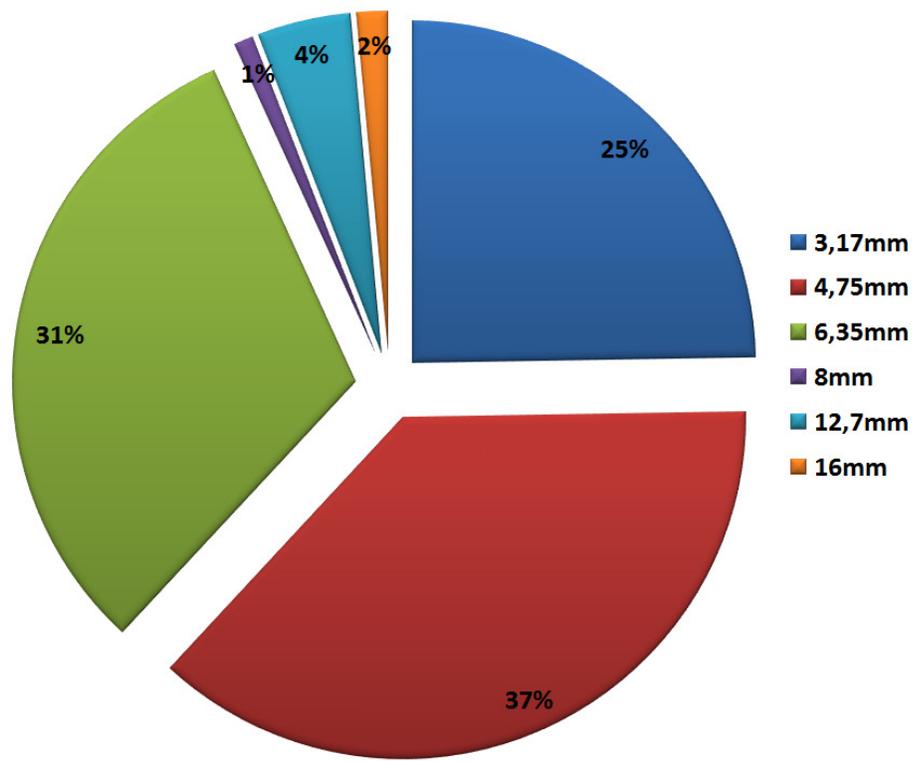


Figura 52 - Percentual, em peso, de cada espessura de chapa utilizada no canal embocador proposto.

Em comparação com as figuras 41 e 42 pode-se observar, além da eliminação das chapas de 10 e 19mm, a diminuição no número de bitolas utilizadas, gerando uma redução no tempo de preparação das máquinas para a manufatura dos componentes, bem como uma otimização na logística das peças.

O projeto do conjunto final do canal embocador é mostrado na figura 53, onde estão detalhadas as especificações de solda, quantidade de peças e dimensional, sendo que este desenho foi usado para a fabricação do conjunto ensaiado em fadiga.

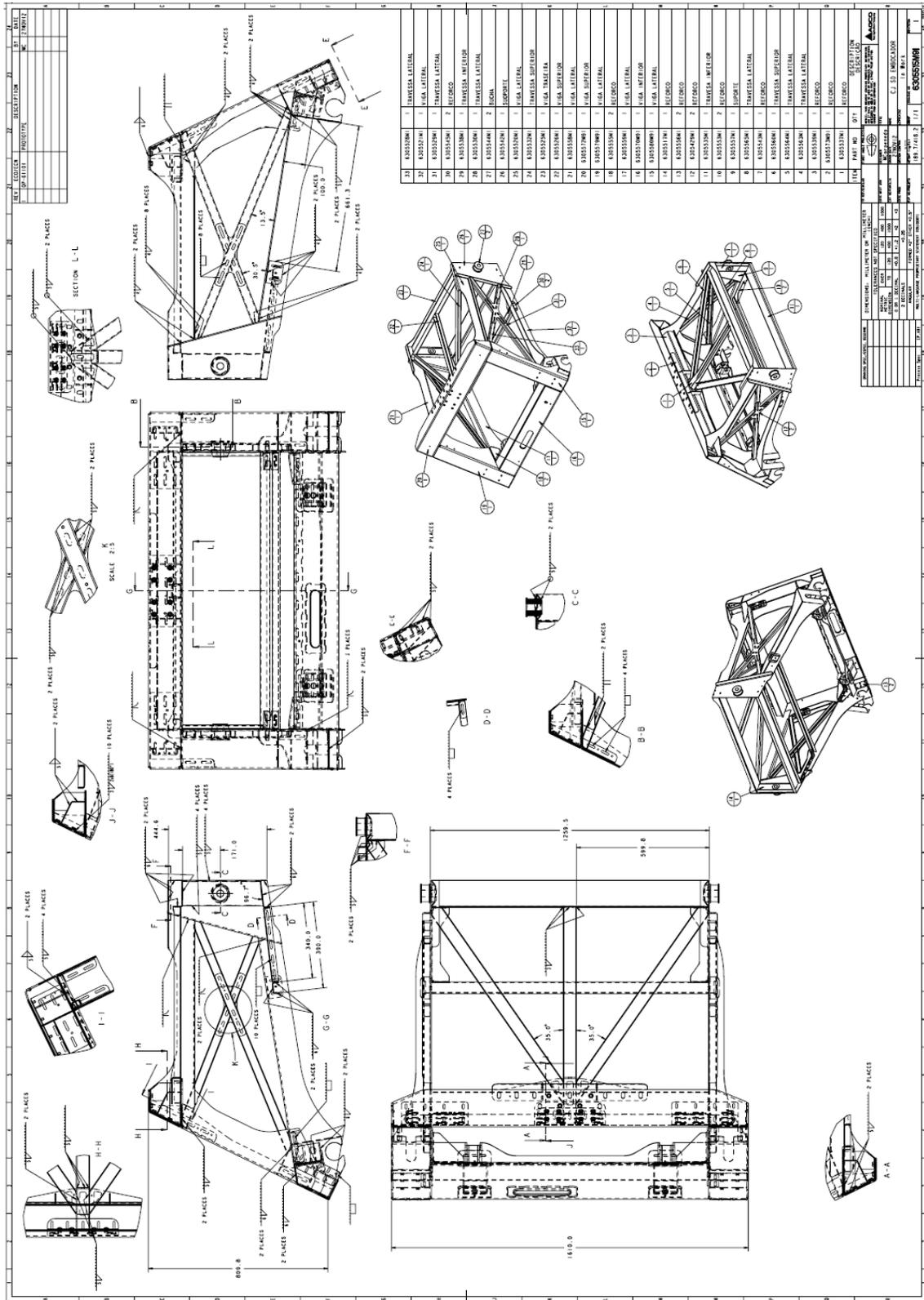


Figura 53 - Projeto estrutural do novo canal embocador.

Além da melhora no aspecto estrutural, o novo conjunto possui aspectos inovadores como a utilização de materiais diferenciados, aplicação de métodos de fabricação que

otimizam o tempo de fabricação, diminuindo os desperdícios tanto de matéria-prima como de mão de obra.

O projeto resultou em uma redução de 21% de peso em relação ao conjunto atualmente fabricado, considerando uma quantidade, em kilogramas, estipulada para os componentes a serem aplicados como elementos de vedação para a estrutura.

### **5.3 SOLDABILIDADE DO AÇO LNE 380**

Como parte do estudo da soldabilidade do aço LNE 380, primeiramente foi avaliada a diluição da solda em juntas de topo e em ângulo.

A diluição para a solda de topo foi de 80.3% e a diluição para a solda em ângulo foi de 74.9%. Embora as diferenças sejam baixas, a maior diluição da solda de topo pode ser explicada pela maior área disponível para a deposição do metal de adição, bem como a maior perpendicularidade com que a tocha é posicionada em relação às peças a serem soldadas. Enquanto na solda de topo há uma área totalmente plana, na solda em ângulo o elemento vertical do conjunto soldado impede que o bico da tocha tenha uma proximidade à junta semelhante à solda de topo, fazendo com que o tamanho do reforço da solda seja maior, em comparação com a solda de topo, devido à menor área horizontal disponível para deposição da solda. A penetração também é inferior na solda em ângulo.

Para o cálculo do carbono equivalente foi utilizada a equação proposta pelo IIW, sendo a equação 2 deste trabalho, onde o carbono equivalente resultou em 0,1%, ficando muito abaixo de valores próximos da necessidade de controles para o processo de solda.

As figuras 54 e 55 mostram a da penetração e o tamanho do reforço para as soldas em ângulo e topo, respectivamente.

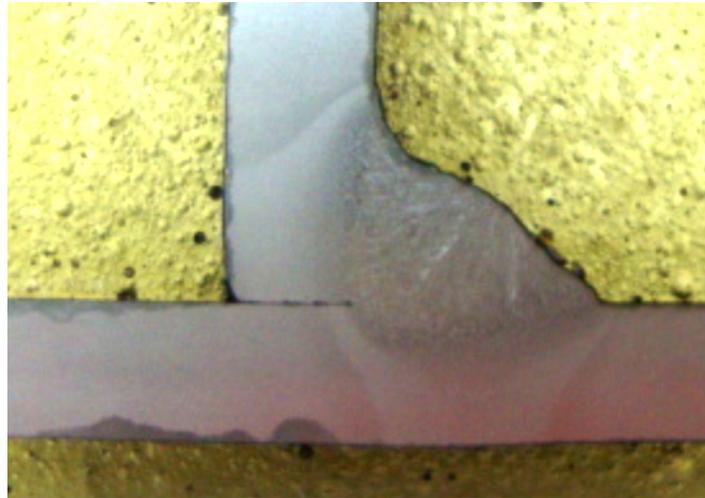


Figura 54 - Macrografia de uma junta soldada em ângulo mostrando o tamanho do reforço da solda e sua penetração.



Figura 55 - Macrografia de uma junta soldada de topo mostrando o tamanho do reforço da solda e sua penetração.

Observa-se que, em função do maior aporte térmico presente na solda em ângulo, a ZAC conseqüentemente é maior, entretanto a microestrutura presente é semelhante, o mesmo ocorrendo para a microdureza.

Para a análise metalográfica os corpos de prova foram cortados, polidos e atacados com Nital 3%.

A figura 56 mostra uma imagem do MB com aumento de 100x e um detalhe com um aumento de 1000x.

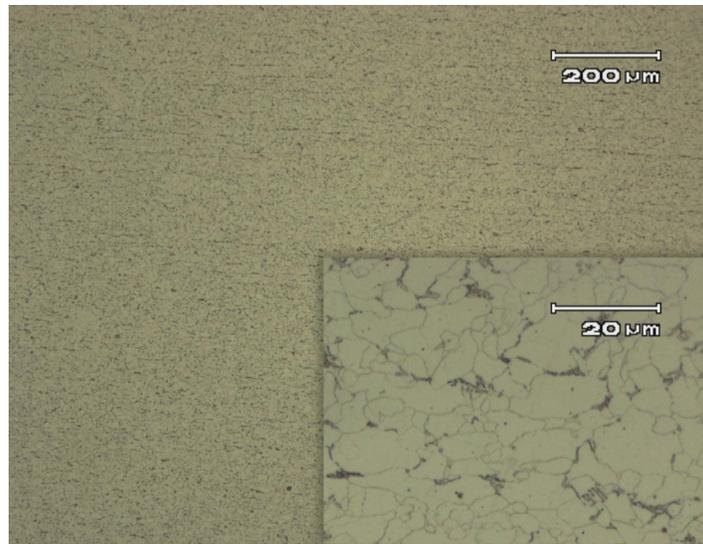


Figura 56 - Micrografia do metal de base com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes.

A figura 56 nos mostra o estado do MB, caracterizando-se por um material com granulação refinada, o que lhe confere a elevada resistência mecânica, mesmo com baixo percentual de carbono. Em menor escala percebe-se a orientação dos grãos devido ao processo de laminação, formados em sua grande maioria por ferrita e por algumas pequenas regiões de perlita. Há presença de carbonetos dispersos.

A figura 57 mostra uma imagem da ZAC com aumento de 100x e um detalhe com um aumento de 1000x.

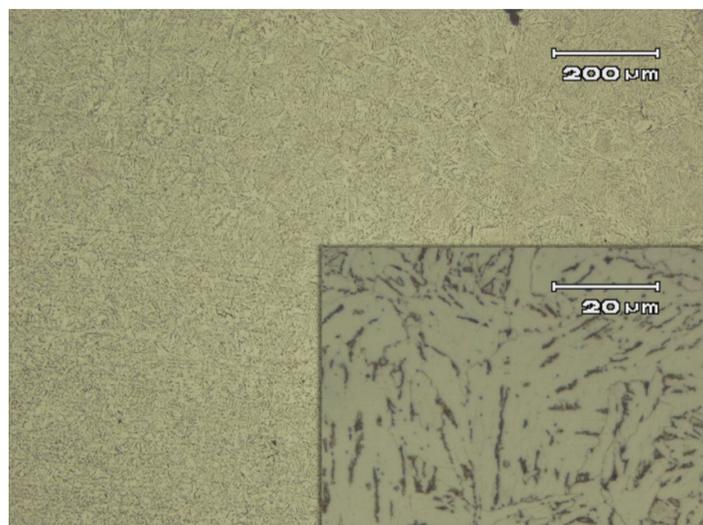


Figura 57 - Micrografia da ZAC com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes.

A figura 57 mostra a ZAC, havendo aumento no tamanho dos grãos devido à difusão entre as fronteiras granulométricas, entretanto apresentando os mesmos microconstituintes do MB, sendo ferrita com regiões de perlita dispersa na matriz ferrítica.

Mesmo com o aumento dos grãos, a orientação destes devido ao sentido de laminação ainda está presente.

A figura 58 mostra uma imagem do metal de solda com aumento de 100x e um detalhe com um aumento de 1000x.

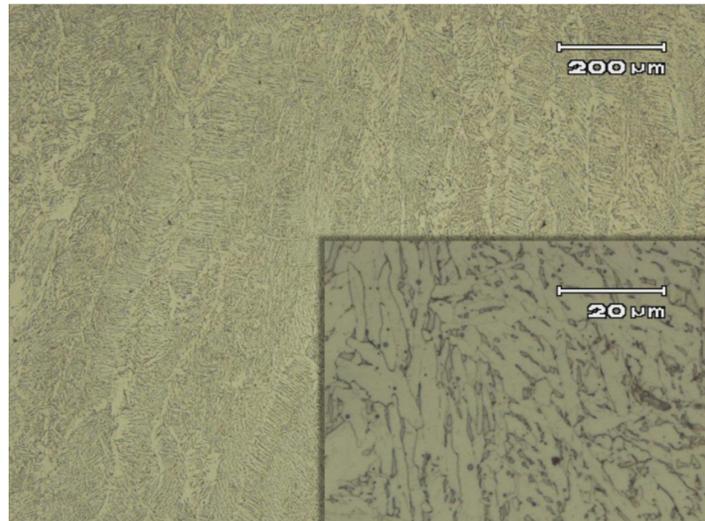


Figura 58 - Micrografia do MS com aumento de 100 vezes e detalhe com aumento de 1000 vezes.

Pela análise da figura 58 percebe-se a formação razoável quantidade de perlita em uma matriz ferrítica, o que explica a dureza superior na região da solda. São visíveis grãos colunares com a presença de colônias de perlita e a matriz ferrítica.

Com a análise metalográfica concluída, os ensaios mecânicos foram realizados, sendo que os resultados são mostrados na sequência.

#### 5.4 ENSAIOS MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA

A tabela 12 mostra os valores obtidos nos ensaios de tração.

Tabela 12: Valores médios dos resultados dos ensaios mecânicos de tração.

Corpo de Prova	Limit. Resist. (Mpa)	Limit. Esco. (Mpa)
Metal de Bse	534,0	455,9
Junta Soldada	517,9	454,0

Através dos resultados obtidos pode-se observar que não há diferenças consideráveis entre a resistência mecânica obtida nos corpos de prova soldados e do MB.

Comparando os valores médios obtidos nos ensaios e comparando-os com os valores estabelecidos pela NBR 6656, verifica-se que o processo empregado para a soldagem do material, bem como os parâmetros e consumíveis de solda, resultaram em um produto com características mecânicas que se assemelham às propriedades do metal de base.

Nos ensaios de tração os corpos 1 e 10 tiveram o ruptura na região da zona fundida. Entretanto os valores de suas tensões de escoamento e de ruptura ficaram dentro dos valores gerais obtidos para as demais amostras. Os demais corpos de prova tiveram seu rompimento em regiões próximas à ZAC.

Este rompimento na zona fundida pode ter origem em diversos pontos, como inclusões ou má penetração da solda.

Para o ensaio de dobramento foram realizadas dobras de face e de raiz, caracterizando as regiões do primeiro e segundo passe de solda, respectivamente. Foram confeccionados 10 corpos de prova, cinco para dobramento de face e cinco para dobramento de raiz. O ângulo de dobramento foi de 180 graus, com variação de  $\pm 2$  graus. O diâmetro do rolete superior é de 16mm e dos roletes inferiores de 31mm.

Em ambos os ensaios não foram verificadas trincas na região da solda. Entretanto em três amostras foram identificadas lacunas, nas laterais dos corpos de prova, em regiões localizadas no centro do cordão de solda. Possivelmente o defeito é oriundo de uma má fusão entre os cordões de solda do primeiro e segundo passe, devido à escória não removida durante a limpeza do primeiro passe de solda ou a penetração insuficiente da solda no segundo passe, agravado por estarem localizados na porção de corpo de prova que foi tracionada pelo processo de dobra.

A figura 59 mostra um corpo de prova ensaiado em dobramento com uma ampliação da região onde ocorreu o surgimento da lacuna.

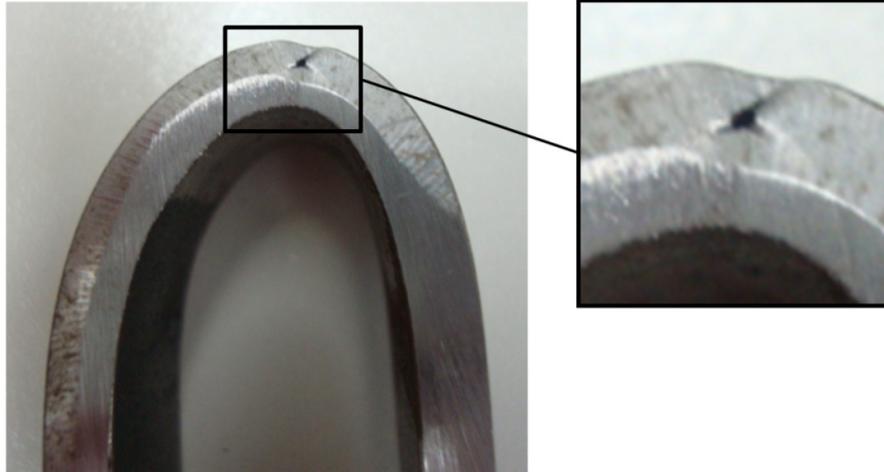


Figura 59 - Corpo de prova ensaiado para dobramento

Estas imperfeições foram identificadas em um corpo de prova no dobramento de face e dois corpos de prova no dobramento de raiz. Entretanto as propriedades mecânicas dos corpos de prova com a presença destas imperfeições não foram alteradas.

Apesar de ter ocorrido no ensaio de dobramento, o defeito mostrado na figura 59 pode ser uma possível causa para o rompimentos dos corpos de prova 1 e 10 nos ensaios de tração, os quais romperam na região da solda.

Em três corpos de prova também foram identificadas pequenas trincas presentes nas arestas da região que sofreu dobramento. Entretanto essas trincas não serão consideradas, pois surgiram devido à deformação plástica do material nas arestas do corpo de prova. A deformação deu início à formação de um flanco nas arestas que sofreram tração. Devido à brusca redução de espessura, a deformação foi suficiente para romper o material.

Em todas as amostras ensaiadas o dobramento ocorreu sem indícios de trincas ou rompimento superficial do metal de solda, caracterizando a boa tenacidade desta, embora falhas ocorreram no centro da solda.

Em relação ao ensaio para caracterização do perfil de microdureza, os perfis foram efetuados nos sentidos horizontal e vertical, ambos cruzando no centro do cordão de solda. No sentido horizontal foram realizados quatro perfis e no sentido vertical foi realizado um perfil, conforme mostrado na figura 60.

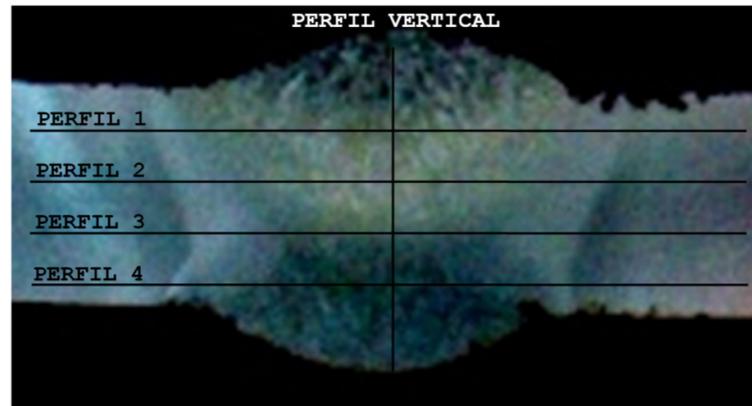
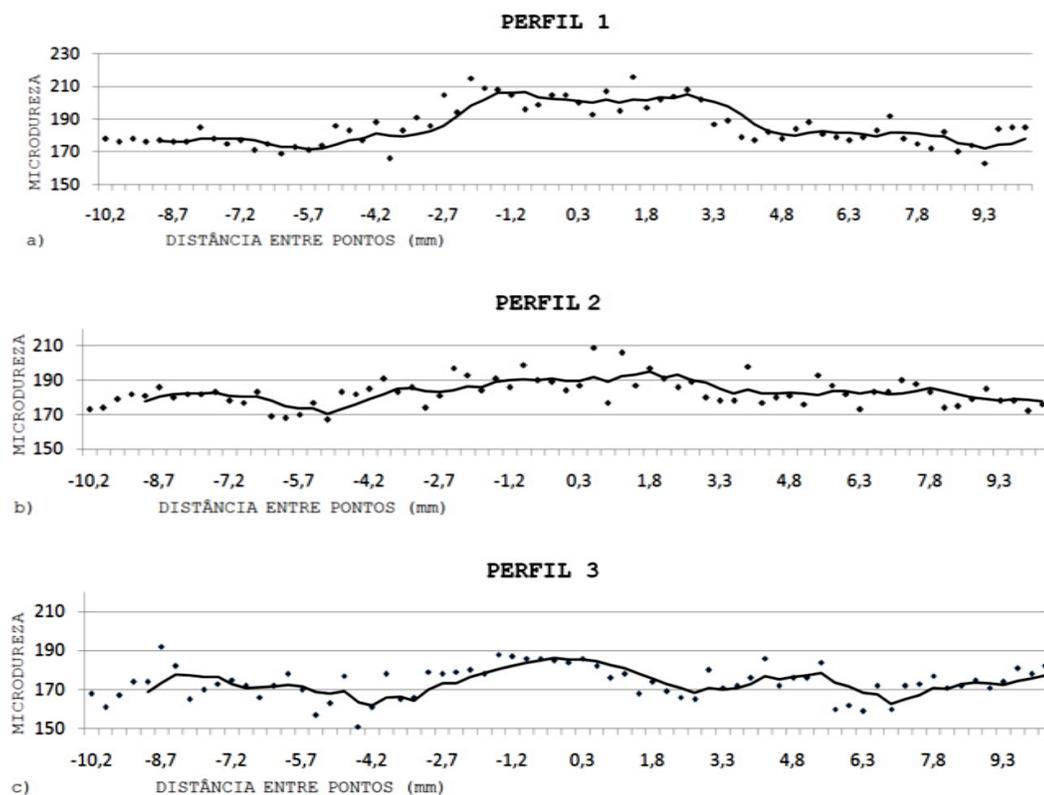


Figura 60 - Sequência dos perfis de microdureza realizados.

O ensaio de microdureza mostrou pouca variação na dureza entre o MB, ZAC e zona fundida.

A figura 61 mostra os perfis de microdureza no sentido horizontal do cordão de solda, de acordo com a seqüência mostrada na figura 62:



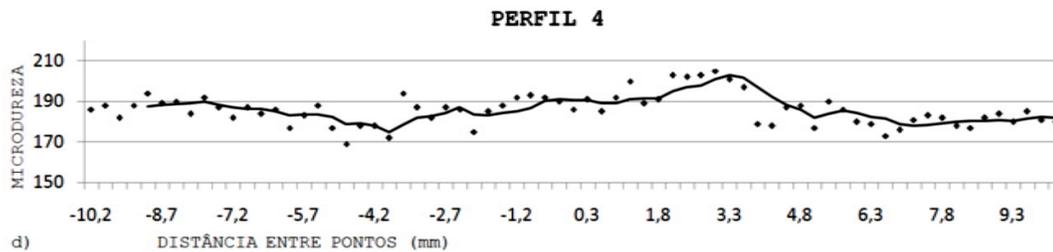


Figura 61 - Resultados da microdureza realizada no sentido horizontal para: a) perfil 1; b) perfil 2; c) perfil 3 e d) perfil 4. Microdureza Vickers HV<sub>0,3</sub>.

A figura 62 mostra o perfil de microdureza no sentido vertical do cordão de solda.

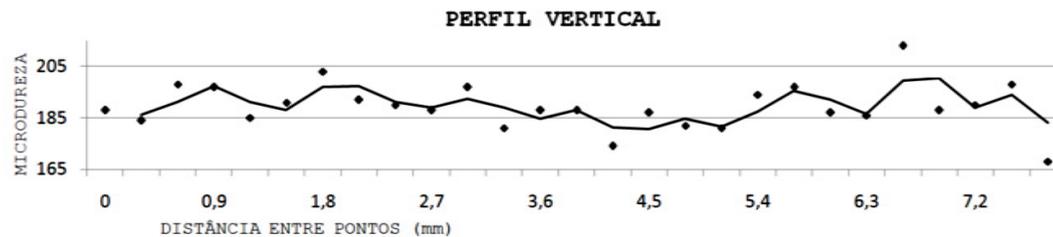


Figura 62 - Perfil de microdureza no sentido vertical da amostra, no centro do cordão de solda. Microdureza Vickers HV<sub>0,3</sub>.

É visível a variação de dureza, no sentido horizontal, entre as regiões da junta soldada e do MB. Observa-se que no centro da solda, aproximadamente entre as dimensões de  $\pm 3,0$  milímetros, ocorre a maior dureza da amostra, devido à presença de microestruturas perlíticas, originadas pela transformação de fases ocorrida. Entretanto a dureza nesta região não ultrapassou 7,4% em relação à dureza registrada no MB, que foi de 177,5 HV.

Conforme pode ser observado na figura 63, embora houvesse variação no tamanho da seção horizontal do cordão de solda, de acordo com a localização de cada perfil, os valores médios das microdurezas no MB, ZAC e metal fundido permaneceram semelhantes.

No perfil vertical, abrangendo somente a região da zona fundida, houve uma variação de 21,1% nos valores da dureza, considerando o maior e o menor valor, sendo que parte dos valores desta região sobrepõe-se à dureza do MB e sobre alguns pontos da ZAC, o que evidencia a homogeneidade das durezas.

Comparando os resultados com o perfil no sentido horizontal, houve uma variação de 20% entre a maior dureza medida na zona fundida e no MB.

## 5.5 ENSAIO DE FADIGA

Após todas as verificações das propriedades mecânicas da solda através dos ensaios dos corpos de prova o conjunto soldado do novo canal embocador, bem como o atualmente produzido, foram submetidos a um ensaio de fadiga, onde foram aplicadas cargas que simulam condições reais de serviço, acrescidas de um coeficiente de segurança determinado por medições de picos de carregamento obtidos em campo.

Durante os ensaios, com a aplicação das cargas, foi observada uma deformação cíclica na estrutura notavelmente maior no embocador atualmente produzido, em comparação com o conjunto proposto neste trabalho. Com a análise dos dados coletados pelo sensor de deslocamento instalado paralelamente ao atuador hidráulico, observou-se que o embocador atualmente produzido teve uma deformação 177% superior ao conjunto proposto neste trabalho.

Deve-se considerar nesta amplitude de deformação que parte dela ocorria devido à deformação da estrutura da bancada, porém como as cargas aplicadas foram as mesmas para os dois conjuntos, a deformação da estrutura era a mesma, independente do elemento que estava sendo ensaiado, pois as cargas aplicadas eram iguais.

As maiores deformações ocorreram nas travessas superior, onde estava pivotado o atuador hidráulico, e na travessa inferior, onde estavam montados os tirantes que simulam os pontos de apoio do conjunto com os atuadores hidráulicos de levante do embocador na máquina colheitadeira.

Primeiramente foi ensaiado o conjunto reprojeto e proposto neste trabalho, o qual alcançou  $2 \times 10^6$  ciclos sem qualquer dano. Após ter atingido estes valores, o conjunto foi submetido a um número indeterminado de ciclos, com a finalidade de identificar o limite de resistência a fadiga do mesmo. Nesta situação o novo embocador atingiu  $4,8 \times 10^6$  ciclos, sendo que neste ponto ocorreu uma falha na ZAC do suporte esquerdo do cilindro, região ilustrada pela posição B na figura 38. Na bancada para este ensaio o suporte próximo à região da trinca serviu de ponto de montagem para os tirantes laterais, visualizados na figura 44.

Em seguida o conjunto atualmente fabricado foi submetido aos ensaios, sendo que logo após o início da segunda etapa de carregamentos, em 201000 ciclos, identificou-se a

formação de uma trinca, localizada também na ZAC do suporte esquerdo do cilindro, semelhante ao ocorrido com o novo canal embocador.

Em relação ao conjunto atualmente fabricado, apesar do surgimento das falhas nos ensaios de fadiga, é importante frisar que o mesmo não apresenta histórico de falhas em campo, podendo ser uma medida da severidade dos testes realizados em laboratório.

A região da solda onde ocorreu a trinca não apresenta sinais de oxidação, como pode ser visto na figura 62, sendo que a falha ocorreu devido à presença da ZAC, estando esta tangente à linha da ruptura no material.

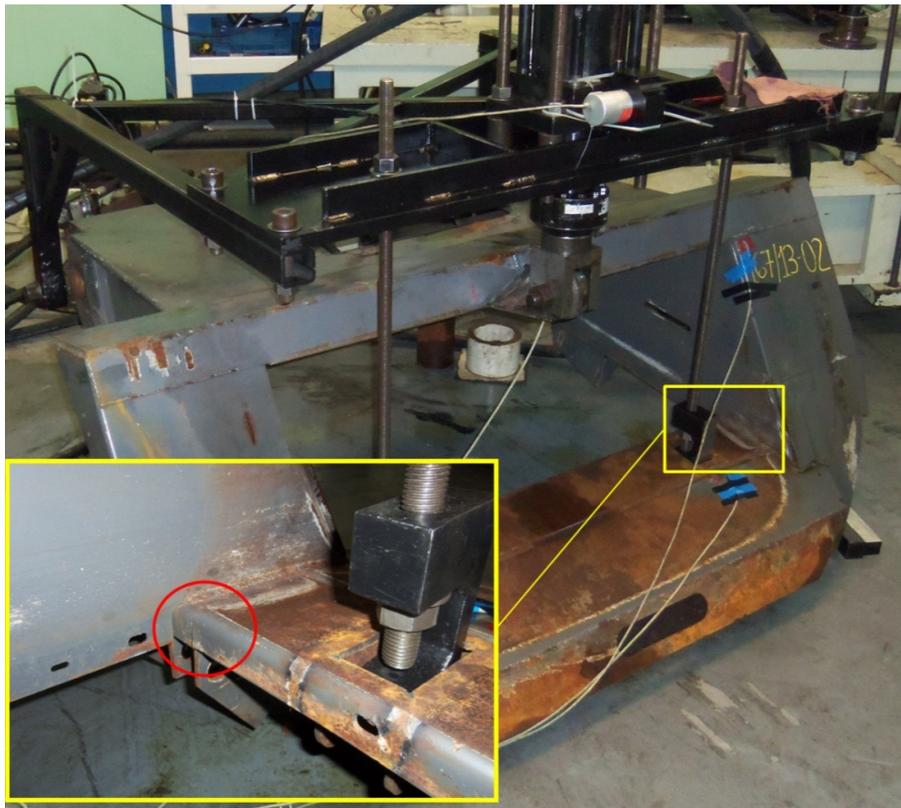


Figura 62 - Região de ocorrência da trinca no embocador atualmente fabricado.

A figura 63 mostra os patamares de carregamento em relação ao número de ciclos para os ensaios do novo canal embocador e para o atualmente fabricado.

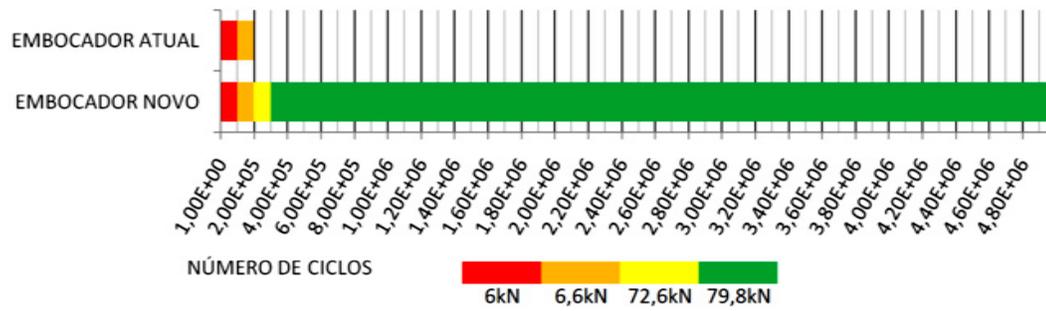
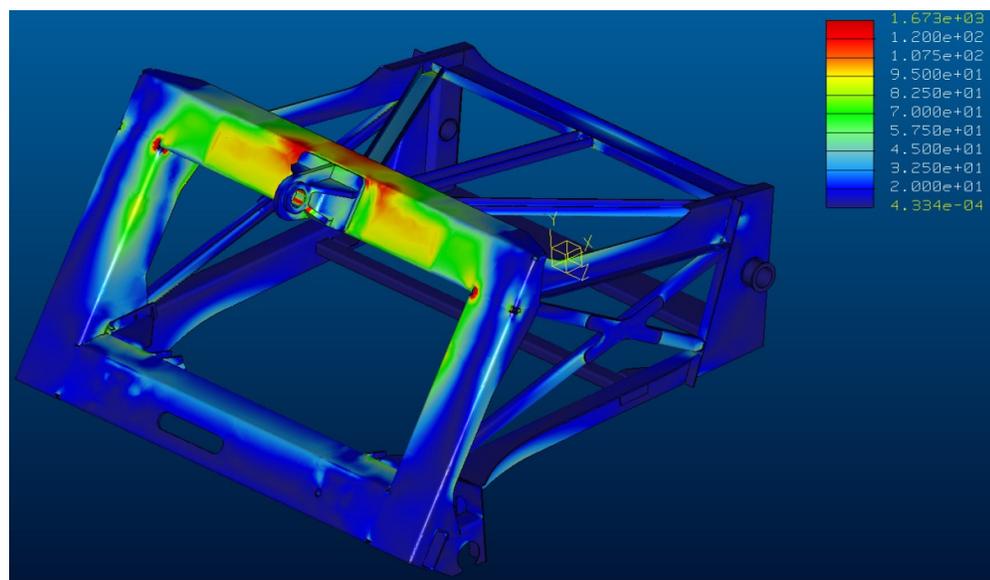


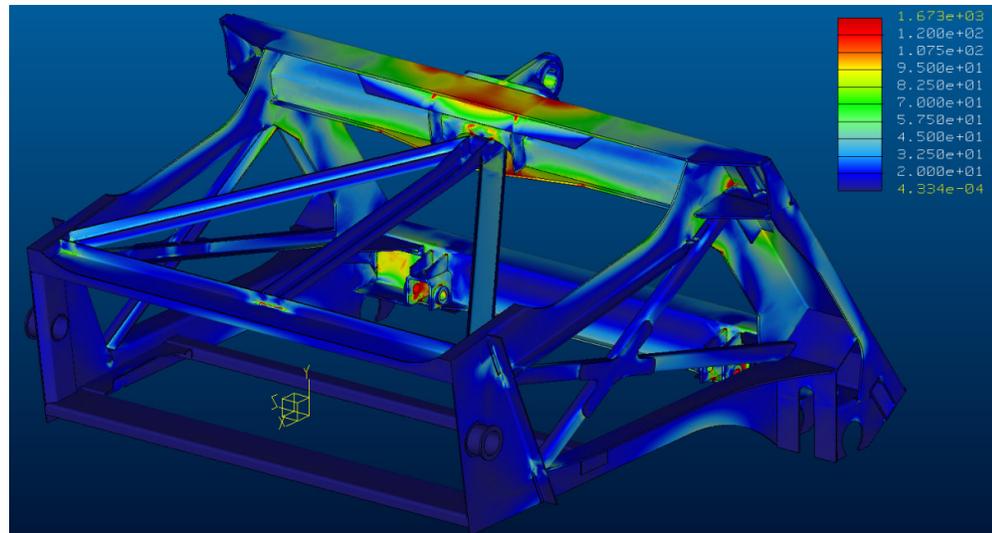
Figura 63 - Patamares de carregamentos em função do número de ciclos.

Embora não haja assimetrias no conjunto que possibilitem uma correlação entre as falhas e a posição onde ocorreram, o fato de terem surgido no mesmo local, na ZAC do suporte do cilindro, evidencia esta área como um local de altas concentrações de tensões, necessitando de medidas para reforçar e distribuir as tensões atuantes sobre esses componentes.

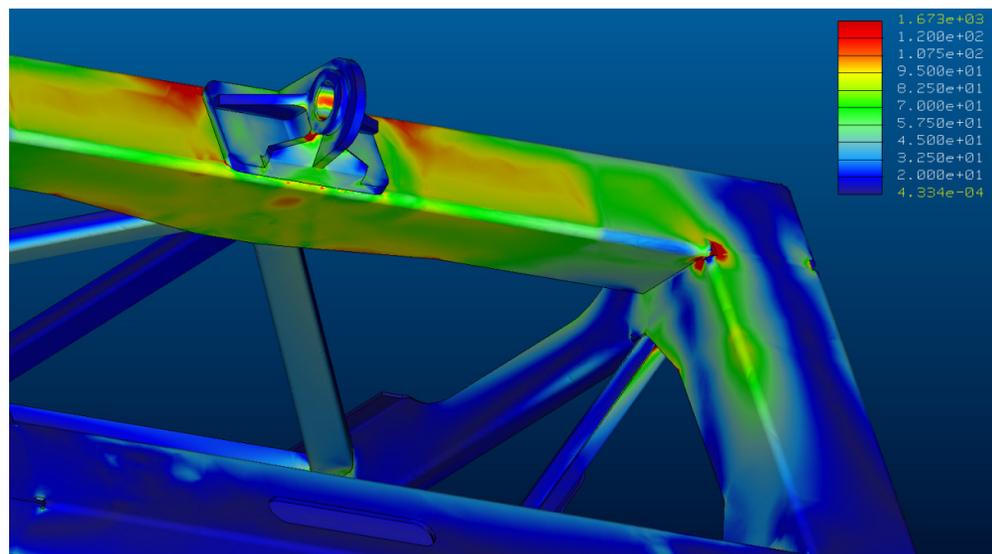
As figuras 64 *a*, 64 *b* e 64 *c* mostram a análise de elementos finitos com os mesmos carregamentos aplicados no ensaio de fadiga, sendo o carregamento vertical de 72,6kN, com a finalidade de comparar os resultados virtuais com os obtidos no ensaio de fadiga.



(a)



(b)



(c)

Figura 64 - Simulação de elementos finitos utilizando o carregamento para o ensaio de fadiga.

É possível verificar que há acúmulo de tensões que extrapolam a tensão de ruptura do material, chegando a 167,3 GPa. Entretanto, como já explicado, nestes locais de concentrações de tensões ocorrem deformações plásticas com intensidade suficiente para redistribuir as cargas e tornar a junta estável sob o ponto de vista de resistência mecânica. Portanto esses pontos de concentrações de tensões serão desconsiderados para avaliações realizadas no presente estudo.

A tabela 13 mostra os valores das tensões obtidas em cada strain gauge.

Tabela 13 - Tensões obtidas nos strain gauges no ensaio de fadiga do novo canal embocador.

Patamar de Carregamento	Tensão nos Strain Gauges (MPa)			
	1	2	3	4
Nível 1 (6.0kN)	7,7	7,4	29,5	84,3
Nível 2 (6.6kN)	13,9	3,0	25,0	86,1
Nível 3 (7.26kN)	36,1	13,2	62,2	123,3

Pode ser observado que além do acréscimo da tensão lida em cada strain gauge ao longo do aumento do carregamento, em alguns pontos ocorre uma diminuição da tensão atuante. A provável causa deste efeito é a deformação plástica que ocorreu durante o ensaio, embora a deformação dimensional do conjunto durante o ensaio ter sido baixa, somado à não ocorrência de trincas aparentes.

Comparando os valores das tensões máximas mostradas na tabela 13 e analisando as escalas de tensões mostradas na figura 65 é possível afirmar, com algum grau de tolerância, que as tensões obtidas pela análise de elementos finitos são válidas, uma vez que se aproximam fielmente das tensões obtidas pela medição de deformação nos strain gauges.

A tabela 14 mostra um comparativo entre as tensões obtidas no último patamar de carregamento do ensaio de fadiga, para o novo canal embocador, e as tensões lidas graficamente pelas análises de elementos finitos, onde foram aplicados os mesmos níveis de carregamentos, tanto para o ensaio de fadiga quanto para elementos finitos.

Tabela 14 - Tensões obtidas nos ensaios de fadiga e de elementos finitos, para uma mesma carga aplicada.

Leitura das Tensões	Nível de Tensões (Mpa)			
	1	2	3	4
Bancada de Fadiga	36,1	13,2	62,2	123,3
Elementos Finitos	20,0	30,0	70,0	100,0

A leitura realizada graficamente pelas imagens obtidas por elementos finitos são aproximadas, pois os resultados das tensões são apresentados em escala de cores, não em valores. Apesar de haver incerteza nos valores identificados, devido a aproximações feitas pela identificação das cores mostradas, há proximidade entre os valores encontrados nos dois ensaios.

Em relação às tensões obtidas no ensaio do conjunto soldado fabricado atualmente, a tabela 15 mostra os respectivos valores.

Tabela 15 - Tensões obtidas nos strain gauges no ensaio de fadiga no embocador atual.

Patamar de Carregamento	Tensão no Strain Gauge (MPa)			
	1	2	3	4
Nível 1 (6.0kN)	412,5	258,4	206,8	324,1
Nível 2 (6.6kN)	517,1	288,6	272,4	425,3

É visível a diferença entre os valores das tensões obtidas nos strain gauges instalados no novo canal embocador e no atualmente fabricado, sendo devida principalmente à forma construtiva do novo conjunto, o qual possui elementos estruturais com formatos e posições diferentes dos utilizados no conjunto atual, responsáveis pelo enrijecimento da estrutura e, conseqüentemente, resultando em menores deformações. Outro fator que afeta as tensões atuantes é o material utilizado, sendo que no conjunto atualmente fabricado a tensão de escoamento do material é nominalmente 54% inferior ao aço microligado utilizado no projeto do novo conjunto.

## 5.6 CUSTOS DO NOVO CANAL EMBOCADOR

A avaliação de custos objetivada neste trabalho não pretende desmembrar e calcular todos os custos envolvidos na fabricação do novo canal embocador, os quais vão desde os tempos de trabalho das máquinas industriais até os custos com energia elétrica, mas sim demonstrar através de uma análise comparativa os ganhos em matérias-primas e mão-de-obra na execução do conjunto soldado proposto.

Para isso foram definidas duas unidades formadoras do custo de produção responsáveis por afetar todos os demais itens que compõem o custo do produto, que são as quantidades de chapas de aço e de arame de solda, em kg, necessárias para a fabricação do conjunto do canal embocador. Na quantidade de chapas de aço estão relacionados os tempos de corte, dobra, preparação das peças, transporte, mão-de-obra e energia. Para a solda estão relacionadas, além da mão-de-obra e da energia, o tempo de solda, preparação das peças para a solda.

Em relação às quantidades de arame de solda, o embocador atualmente produzido apresentou uma quantidade, em kg, 8,9% superior ao embocador proposto neste trabalho. Entretanto será considerada uma tolerância nas medições em função de que a solda é realizada manualmente, acarretando em variações tanto em tamanho de perna quanto em

comprimento do cordão, sendo considerada a variação de 10%, para mais e para menos. Assim sendo, a quantidade de solda utilizada para ambas as estruturas é a mesma, não afetando consideravelmente os custos do produto.

Em relação às quantidades, em kg, de chapas de aço utilizadas o canal embocador proposto neste trabalho apresentou uma redução de 16,6% em relação ao atualmente fabricado, porém o custo do aço LNE 380 é cerca de 30% superior ao aço ASTM CS, o que resulta em um leve aumento total de custo do novo canal embocador em relação ao atualmente fabricado.

Comparando os custos primários envolvendo as chapas de aço e o arame de solda, há uma equivalência entre os custos dos dois conjuntos. Porém como não será abordado os ganhos relativos aos processos de fabricação e de mão-de-obra, pode-se afirmar que haverá ganhos do novo conjunto em relação ao atualmente fabricado, devido à forma construtiva e aos dispositivos empregados para a montagem e solda dos componentes.

## 6 CONCLUSÕES

Com os ensaios realizados pode-se constatar que o material LNE 380 comportou-se de forma aceitável para o estudo proposto. Apesar de possuir resistência mecânica elevada em comparação com outros materiais com soldabilidade equivalente e baixo percentual de carbono, o processo de fabricação deste aço mostra a importância e viabilidade dos aços microligados quando aplicados na redução de peso, neste caso sendo aplicado na indústria de máquinas agrícolas.

No presente estudo, houve uma redução de 16,6% no peso do conjunto soldado. Em contrapartida o aumento no custo da matéria-prima com a utilização do aço LNE 380 foi de 30%, sendo que este valor pode variar de acordo com as condições de mercado, como demanda e taxa cambial.

Com a utilização deste material houve redução nos tamanhos dos componentes e uma diminuição percentual baixa na distância linear de solda, os quais reduziram as quantidades de consumíveis de soldagem, energia elétrica e de mão-de-obra.

No balanço entre a redução de peso e a diferença no custo da matéria-prima, a utilização do aço LNE 380 resultou em uma equivalência de valores. Porém, levando em consideração os custos de processo envolvidos na fabricação do conjunto como corte, dobra, solda, energia elétrica e logística, sem contar o valor agregado na utilização deste conceito, o projeto estudado mostrou-se competitivo, pois agrega vantagens em várias etapas de sua cadeia produtiva, que vão desde a manufatura até o local onde o produto final é aplicado, a lavoura, sendo que a busca pela redução de peso foi atingida sem afetar o conjunto estruturalmente.

O objetivo experimental deste trabalho foi alcançado, onde os resultados mostraram que a redução de peso em máquinas agrícolas utilizando materiais tecnologicamente avançados é viável, além de possuir um vasto campo de pesquisa para estudo e aplicação deste conceito que já é difundido na indústria automobilística.

A simples adição de elementos microligantes, combinada com controles durante o processo de fabricação do aço, faz com que este material adquira propriedades que aliam

alta resistência mecânica, ductilidade e boa soldabilidade, sendo capaz de ser soldado com relativa facilidade, considerando os inconvenientes causados pelo ciclo térmico da solda.

O assunto redução de peso em máquinas agrícolas ainda é pouco abordado em trabalhos científicos, sendo restrito muitas vezes ao conhecimento de algumas poucas pessoas em determinadas empresas do setor.

Assim como no canal embocador, muitas outras estruturas de uma máquina colheitadeira são fabricadas em aço, principalmente a partir de chapas, o que nos remete ao potencial de redução de peso em um equipamento que possui pesos a partir de 10 toneladas, considerando as menores máquinas, sendo este aspecto importante tanto para a redução no consumo de combustível quanto para a compactação do solo.

O fator compactação do solo impacta diretamente sobre a produtividade da lavoura, o que em decomposição acaba por resultar no acréscimo de energia para compensar as perdas devidas à compactação do solo. Em relação a este último fator pode-se pensar que é um exagero considerar a área compactada pela rodagem das máquinas agrícolas na produtividade de uma lavoura, porém a agricultura de precisão está cada vez mais presente no campo, onde as áreas de cultivo são tratadas como uma imensa malha, onde cada quadrante possui tratamento individual, garantindo que a produção seja obtida uniformemente em toda a lavoura e da forma mais eficiente possível.

No setor de máquinas e implementos agrícolas há um leque de oportunidades, visto a quantidade de produtos disponíveis para o setor e a predominância na utilização de aços planos de baixo carbono e baixa resistência mecânica na fabricação desses produtos.

Estudos como o realizado por este trabalho possibilitam ampliar a visão de que a redução de peso em máquinas agrícolas, quando necessária, é viável, sendo grande a oferta de soluções tanto em processos quanto em matérias-primas para viabilizar este conceito.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O assunto abordado neste trabalho possui poucas referências bibliográficas quando a área abordada está relacionada com máquinas agrícolas. Assim sendo, há um vasto campo de pesquisa que pode ser desenvolvido, estando abaixo listados alguns assuntos que dão continuidade ao conceito de redução de massa em máquinas agrícolas, além de serem tópicos importantes quando o assunto redução de peso é abordado.

- Avaliar a redução no consumo de combustível de uma máquina, ou grupo de máquinas agrícolas, em função da redução do peso estrutural, apresentando complementarmente a redução nos níveis de emissões de gases nocivos ao meio ambiente.

- Determinar quantitativamente o impacto da redução de peso na produtividade agrícola, comparando a produtividade de uma área com estratificação da produtividade no solo com e sem compactação, mostrando o impacto da compactação do solo no volume percentual de um volume de produção de grãos.

- Estudar, dentro do cenário industrial agrícola, as possibilidades de materiais e processos de fabricação possíveis para otimizar estudos de redução de peso em máquinas e implementos agrícolas.

- Avaliar quantitativamente a utilização de materiais não metálicos, ou metálicos com densidade inferior ao aço, como alternativa para a redução de peso em máquinas agrícolas, comparando a situação atual de máquinas em relação a décadas passadas, caracterizando a evolução e identificando futuras tendências para o uso destes materiais.

- Desenvolver um estudo para quantificar os ganhos representados pela utilização dos métodos de pré-posicionamento da solda utilizados no projeto do conjunto estudado neste trabalho. Avaliar os ganhos em relação à logística na fábrica, tempo de operação de solda, padronização do tamanho dos cordões de solda, além de avaliar a resistência da solda com e sem a utilização deste método.

- Desenvolver estudo de campo para identificar os carregamentos atuantes sobre os demais conjuntos de uma máquina ou implemento agrícola, identificando a partir dos dados coletados a criticidade e potencial de redução de peso em máquinas agrícolas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA. **Máquinas Agrícolas: 50 anos**. São Paulo: Automotive Business Editora, 2011.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2013**. São Paulo: Ponto & Letra, 2013. 164p. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 15 de agosto de 2013.

American Welding Society. **ANSI/AWS A3.0-94**. Standard Welding Terms and Definitions. Miami. 1994.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK. Volume 6**. Welding, Brazing and Soldering. United States of America, 1993.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK. Volume 20**. Materials Selection and Design. United States of America, 1997.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK. Volume 11**. Failure, Analysis and Prevention. United States of America, 2002.

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 – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A1011/A1011M**: Standard Specification For Steel, Sheet And Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low Alloy, High-Strength Low Alloy With improved Formability, And Ultra-High Strength. West Conshohoken-PA, 2012.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A1008/A1008M**: Standard Specification For Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low Alloy, High-Strength Low Alloy With improved Formability, Solution Hardened, And Bake hardenable. West Conshohoken-PA, 2012

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

BITTENCOURT, Carolina et al. Fadiga de Materiais: Uma Revisão Bibliográfica. In: 8º Encontro Interno - 12º Seminário de Iniciação Científica, 12., 2008, Uberlândia. **Anais Eletrônicos**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/seg/cd2008/PDF/IC2008-0165.PDF>>. Acesso em: 22 de abril de 2013.

BLODGETT, Omer W. **Design of Weldments**. Cleveland. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 1972.

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

CHARLES, J. A; Crane, F. A. A; Furnerss, J. A. G. **Selection and Use of Engineering Materials**. Third Edition. Woburn, MA: Butterwoth-Heinemann, 1997.

CHIAVERINI, Vicente. **Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

CUMMINS Emissions Solutions. **Off-Highway Emissions Regulations**. Columbus, IN: Cummins, 2012. Boletim.

DECICCO, John M. **Steel and Iron Technologies for Automotive Lightweighting**. Environmental Defense. 2005. 21p. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd30/steel.pdf>>. Acesso em: 11 Julho de 2011.

ESAB. **Metalurgia da Soldagem**. 2004. Elaborado, traduzido (parte) e adaptado por Cleber Fortes. Assistência Técnica Consumíveis - ESAB BR. 2004. 96p. Disponível em:<[http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0\\_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf)>. Acesso em: 07 de agosto de 2013.

FIGUEIREDO, Kléber M. de. **Tecnologia da Soldagem**. 2005. 110p. Apostila - Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão/ Departamento de Mecânica e Materiais.

FILHO, Eduardo G. S. Colheita de Grãos. **Caderno Técnico - Cultivar Máquinas**, Pelotas, Maio/Junho de 2002.

GARCIA, Bibiana P. et al. O setor de Máquinas Agrícolas Brasileiro e o Comércio Internacional. **Estudos do CEPE - Centro de Estudos e Pesquisas Econômicas**. Santa Cruz do Sul, n° 27, 24 - 43, Janeiro-Junho de 2008. Disponível em: <<http://online.unisc.br/seer/index.php/cepe/article/view/652>>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

GARCIA, Amauri; Spim, Jaime A.; Santos, Carlos A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. LTC, 2013.

GLADMANN T. **Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**. 1<sup>a</sup> Ed. Londres: The Institute of Materials, 1997.

GORNI, Antonio A. *et al*, Desenvolvimento de Aços Microligados com Alta Resistência Mecânica e Boa Ductilidade In: 62<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 62<sup>nd</sup> ABM International Annual Congress, 62., 2007, Vitória, ES. **Arquivo Eletrônicos**. Vitória, ES, 2007. Disponível em: <[http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_CongABMARBL\\_2007.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_CongABMARBL_2007.pdf)>. Acesso em: 24 de Junho de 2013.

GORNI, Antônio A. **Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas**. Corte & Conformação de Metais, São Paulo, SP, 4, 44, 26-57, Dezembro de 2008a.

GORNI, Antônio A. Engenharia Microestrutural das Chapas de Aços Avançados de Alta Resistência. In: 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, 11., 2008b, Porto Alegre. **Arquivo Eletrônico**. Disponível em: < [http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_SENAFOR\\_2008.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_SENAFOR_2008.pdf)>. Acesso em: 16 de junho de 2013.

GORNI, Antonio A. Estudo Traça Relações Entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas em Aços Estruturais. **Corte & Conformação de Metais**. Corte & Conformação de Metais, São Paulo, 3, 35, 100-110, Março de 2008c.

GORNI, Antonio A.; Silveira, José H. D. da; Reis, Jackson S. de S. Metalurgia dos Aços Microligados Usados na Fabricação de Tubos Soldados Com Grande Diâmetro. **Tubo & Companhia**, 5, 26, 56-63, Setembro/Outubro de 2009. Disponível em: <[http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_TuboCia\\_Set2009.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_TuboCia_Set2009.pdf)>. Acesso em: 27 de março de 2013.

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.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5 edição. São Paulo: Pearson, 2004.

KLEBANOV, Boris M; Barlam, David M; Nystrom, Frederic E. **Machine Elements: Life and Design**. Florida: Taylor & Francis Group. 2007.

KORCHYNSKY, Michael. **A New Role for Microalloyed Steels – Adding Economic Value**. 11 p. Artigo. Disponível em: <<http://vanitec.org/wp-content/uploads/2011/09/A-New-Role-for-Microalloyed-Steels-Adding-Economic-Value.pdf>>. Acesso em: 11 Julho de 2011.

MACHADO, Ivan G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Editado pelo Autor. Porto Alegre, 1996.

MACHADO, Ivan G. Solda Transversal versus Solda Longitudinal. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, 3, 3, 28-29, Agosto de 1997.

MACHADO, Ivan G. **Dimensionamento de Juntas Soldadas: Uma Revisão Crítica**. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v.16, nº 2, p. 189-201, Abr/Jun 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/si/v16n2/a11v16n2.pdf>>. Acesso em: 6 de maio de 2013.

MADE-IN-CHINA. Disponível em: <[http://pt.made-in-china.com/co\\_yanguodong2008/product\\_Wheat-Harvester-4lz-3-Wheel-Type-Self-Propelled-Wheat-Combine-Harvester-2360mm-Cutter-Width-Reaper\\_hhogseigu.html](http://pt.made-in-china.com/co_yanguodong2008/product_Wheat-Harvester-4lz-3-Wheel-Type-Self-Propelled-Wheat-Combine-Harvester-2360mm-Cutter-Width-Reaper_hhogseigu.html)>. Acesso em: 2 de outubro de 2013.

MAPA. **Brasil Projeções do Agronegócio 2011/2012 a 2021/2022**. Brasília: 2012, 50p. Relatório.

MARQUES, Paulo V; Modonesi, Paulo J; Bracarense, Alexandre Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 2<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MASSEY Ferguson. Disponível em: <<http://www.masseyferguson.com>> Acessado em: 4 de maio de 2013.

MODONESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. 2010. 73p. Apostila. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2010.

MODONESI, Paulo J; Marques, Paulo V; Santos, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012. 209p. Apostila. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 11 de setembro de 2012.

MODONESI, Paulo J; Marques, P. V. **Soldagem I**. Introdução aos Processos de Soldagem. 2011. 52p. Apostila. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/processo.pdf>>. Acesso em: 30 de agosto de 2013.

MORAIS, Willy A. de; Borges, Herbert C. **Condições Técnico-Econômicas Para Viabilizar o Emprego de Aços Planos de Elevada Resistência Mecânica em Aplicações Práticas**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, 6, 1, 1-6, Julho-Setembro de 2009. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/1321308.pdf>>. Acesso em: 22 de março de 2013.

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

MOURA, Robson L. C. de; Miranda, Gilberto W. A. de. Comportamento de Chapas de Aço de Alta Resistência em Processo de Estampagem com Ferramental Revestido de Cromo. In: 6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6., 2011, Caxias Do Sul. **Arquivo Eletrônico**. Disponível em: < <http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0105.pdf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2013.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem Integrada**. 2<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookmann, 2004.

PASQUAL, Cássia A; Pedrozo, Eugenio A. Características do Negócio no Setor de Máquinas Agrícolas. **RAE-eletrônica**, São Paulo, v 6, n<sup>o</sup> 1, art. 3, Janeiro-Junho de 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/20528/000624274.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 de maio de 2013.

PORTELLA, José A. **Colheita de Grãos Mecanizada: Implementos, Manutenção e Regulagem**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000.

REGULY, Afonso et al. **Fadiga e Análise de Falha**. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2010.

ROLDÃO, Rodrigo de F; Gallego, Juno. **Relação entre a Dureza e a Microestrutura da Ferrita Observada em Aços Microligados**. Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2004. 4p. Disponível em: < [http://www.abcm.org.br/xi\\_creem/resumos/MT/CRE04-MT04.pdf](http://www.abcm.org.br/xi_creem/resumos/MT/CRE04-MT04.pdf) >. Acesso em: 30 de abril de 2013.

SENUMA, Takehide. **Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets**. ISIJ International, 41, 6, 520 – 532, 2001. Disponível em: < [https://www.jstage.jst.go.jp/pub/html/AY03S050\\_en.html](https://www.jstage.jst.go.jp/pub/html/AY03S050_en.html) >. Acesso em: 20 de Julho de 2001.

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.

SILVEIRA, Vitor H. M.; SCHAEFFER, Lírio. **Estampagem de Chapas de Alta Resistência Para Uso Automotivo – Uma Revisão**. Porto Alegre. 10 p. Artigo. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa/revisao%20automotivo/CHAPAS%20DE%20ALTA%20RESIST%CANCIA.pdf>>. Acesso em: 11 de Julho de 2011.

SILVEIRA, Gastão M. da. **Máquinas Para Colheita e Transporte**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2001.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

STEPHENS, Ralph I; et al. **Metal Fatigue in Engineering**. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1980.

TREKKERMIX. Disponível em: <<http://trekkermix.blogspot.com.br/2012/09/nieuwe-fendt-500-vario.html>>. Acessado em: 4 de junho de 2013.

TREVISAN, Roseana da E; Maia, Ivan G. **Análise da Porosidade em Juntas Soldadas Pelo Processo MIMG/MAG Robotizado**. Campinas: DEF-FEM-UNICAMP. 8p. Disponível em: < <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021029281.pdf> >. Acesso em: 25 de maio de 2013.

VIAN, Carlos E. de F; Júnior, A. M. A. Evolução Histórica da Indústria de Máquinas Agrícolas no Mundo: Origens e Tendências. In: 48° SOBER - Congresso Brasileiro de Economia, Administração e Sociologia Rural, 48, 2010, Campo Grande. **Anais Eletrônicos**. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/15/1208.pdf>>. Acesso em: 30 de abril de 2013.

WAINER, Emílio; Brandi, Sérgio D.; Mello, Fábio D. H. de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

WALLENTOWITZ, Henning; Leyers, J; Parr, Dr. T. **Materials for Future Automotive Body Structures**. Relatório. Business Briefing: Global Automotive Manufacturing & Technology, 2003. 4p. Disponível em: <[http://www.touchbriefings.com/pdf/11/auto031\\_r\\_wallentowitz.pdf](http://www.touchbriefings.com/pdf/11/auto031_r_wallentowitz.pdf)>. Acesso em: 10 de Julho de 2011.

ZEEMANN, Annelise. **Diluição**. 2003. 4p. Artigo. Disponível em: <<http://www.baruke.com.br/img/catalogo/1340244227.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2013.