



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO TCC II**

EDIWALDO JÚNIO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM CHASSI TUBULAR PARA
VEÍCULO OFF-ROAD DO TIPO BAJA: Concepção, Validação Estrutural,
Manufatura, Soldagem, Controle de Qualidade e Análise de Custos**

Belo Horizonte

2026

EDIWALDO JÚNIO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM CHASSI TUBULAR PARA
VEÍCULO OFF-ROAD DO TIPO BAJA: Concepção, Validação Estrutural,
Manufatura, Soldagem, Controle de Qualidade e Análise de Custos**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Ivanilza Felizardo

Belo Horizonte

2026

S729m Souza, Ediwaldo Júnio de
Metodologia de desenvolvimento de um chassi tubular para veículo off-road do tipo Baja: concepção, validação estrutural, manufatura, soldagem, controle de qualidade e análise de custos / Ediwaldo Júnio de Souza – 2026.
166 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientadora: Ivanilza Felizardo.

Banca examinadora: Ivanilza Felizardo, Marcelo Rios de Araújo e Sandro Cardoso Santos.

Bibliografia: f. 103-106.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tubos de aço – Teses. 2. Projeto de máquinas – Teses. 3. Método dos elementos finitos – Teses. 4. Processos de fabricação – Teses. 5. Custo – Análise – Teses. 6. Ciclo de vida do produto – Teses. I. Felizardo, Ivanilza. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

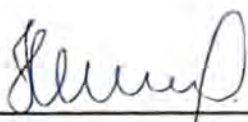
CDD 620.0042

EDIWALDO JÚNIO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM CHASSI TUBULAR PARA
VEÍCULO OFF-ROAD DO TIPO BAJA: CONCEPÇÃO, VALIDAÇÃO
ESTRUTURAL, MANUFATURA, SOLDAGEM, CONTROLE DE QUALIDADE
E ANÁLISE DE CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 18/06/2026



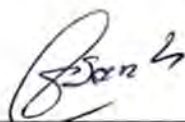
Prof.ª Dr.ª. Ivanilza Felizardo – Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Msc. Marcelo Rios de Araújo – Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos – Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

“A ciência descobre o que existe; a engenharia cria o que nunca existiu.”

Theodore von Kármán (1881–1963)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, força e coragem que me sustentaram durante toda essa caminhada. Foi por meio da fé que pude enxergar propósito em cada desafio e, assim, persistir com disciplina na busca pelos meus objetivos.

Aos meus pais e às minhas irmãs, meu amor e gratidão eternos. Vocês foram meu alicerce em todos os sentidos. Obrigado por acreditarem nos meus sonhos e não medirem esforços para que eu os realizasse. Cada conquista minha é, antes de tudo, de vocês. Sem os seus sacrifícios, apoio e amor incondicional, esse sonho não teria se concretizado. Vocês são, e sempre serão, meu maior exemplo de força e dedicação.

Aos amigos que caminharam ao meu lado nessa jornada, meu muito obrigado. Sou grato pelas conversas sinceras, pelo ombro amigo nos momentos de incerteza, pelas risadas que aliviaram a pressão dos dias difíceis e pelas palavras de encorajamento quando tudo parecia incerto. A presença de vocês tornou essa caminhada mais leve, descontraída e, acima de tudo, significativa. Como diz um grande amigo: "Sozinhos temos esperança; juntos, temos glórias."

Agradeço ao CEFET-MG por ter sido palco de tantas experiências transformadoras. Foram anos de aprendizado, crescimento pessoal e profissional, além de ensinamentos que levarei comigo para sempre. A minha orientadora, Prof^a. Dr.^a Ivanilza Felizardo, aos professores e profissionais que me acompanharam nessa trajetória, meu profundo respeito e gratidão. Obrigado por compartilharem seus conhecimentos com tanta dedicação, paciência e profissionalismo.

Expresso também minha eterna gratidão à equipe CEFAST BAJA SAE por todas as amizades, experiências e momentos incríveis que tive a oportunidade de vivenciar ao longo de exatos 3 anos, 11 meses e 12 dias. Valeu a pena cada noite virada e cada obstáculo contornado para tornar nossos sonhos realidade. Essas lembranças estarão sempre guardadas na minha memória e no meu coração.

Finalizo esse ciclo com a sensação de gratidão e dever cumprido. Foram anos de dedicação e comprometimento a um sonho que agora se torna realidade. Sigo pronto para os próximos passos, mas sem esquecer jamais de todos que tornaram essa vitória possível.

RESUMO

O desenvolvimento de chassis tubulares para veículos off-road do tipo Baja exige a integração entre projeto estrutural, seleção de materiais, ergonomia, manufatura, soldagem, controle de qualidade, análise de custos e acompanhamento do ciclo de vida. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar uma metodologia integrada para o desenvolvimento de um chassi tubular aplicado a um veículo Baja SAE, com apoio do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI). A metodologia contemplou a concepção geométrica em CAD, a validação ergonômica do cockpit, a seleção de materiais com base no RATBSB, a validação estrutural por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a comparação de processos de manufatura e custos, a inspeção dimensional e a análise do ciclo de vida operacional do protótipo. A geometria proposta apresentou adequação aos requisitos de segurança, ergonomia e integração dos subsistemas, com score RULA igual a 3 para o percentil crítico P99 masculino. Na seleção de materiais, definiu-se o aço SAE 4130 para os membros primários, com redução de massa de 33,34% em relação à configuração de referência. A análise estrutural resultou em rigidez torcional de 1553,72 N·m/°, relação aproximada de 19:1 entre a rigidez do chassi e a da suspensão, e frequências naturais de 38,43 Hz e 50,93 Hz, com afastamento adequado em relação à frequência de combustão e maior proximidade com a frequência fundamental do virabrequim em regimes específicos. A estimativa de massa realizada pelo SDI apresentou variação de -2,02% em relação à massa real, enquanto a inspeção dimensional indicou desvio aproximado de 2,93% entre o modelo CAD e a estrutura manufaturada. Na análise produtiva, o cenário híbrido apresentou o melhor equilíbrio entre tempo, custo e viabilidade operacional, com 93,847 h de fabricação e custo total de R\$ 24.530,92, sendo a alternativa de menor custo global entre os cenários avaliados. No ciclo de vida, o protótipo apresentou 145,3 h operadas, 75,7% da vida útil consumida e custo corretivo total de R\$ 500,00. Conclui-se que a metodologia proposta, apoiada pelo SDI, mostrou-se adequada para sistematizar o desenvolvimento de chassis tubulares, contribuindo para a rastreabilidade das decisões, a gestão do conhecimento e a melhoria contínua em futuros ciclos de projeto.

Palavras-chave: Chassi Tubular; Método dos Elementos Finitos; Processos de Manufatura; Análise de Custos; Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The development of tubular chassis for Baja-type off-road vehicles requires the integration of structural design, material selection, ergonomics, manufacturing, welding, quality control, cost analysis, and life cycle monitoring. In this context, this study aimed to develop, implement, and evaluate an integrated methodology for the development of a tubular chassis applied to a Baja SAE vehicle, supported by the Integrated Sizing System (SDI). The methodology included CAD-based geometric design, ergonomic validation of the cockpit, material selection based on the RATBSB, structural validation using the Finite Element Method (FEM), comparison of manufacturing processes and costs, dimensional inspection, and operational life cycle analysis of the prototype. The proposed geometry met the requirements related to safety, ergonomics, and subsystem integration, with a RULA score of 3 for the critical P99 male percentile. For material selection, SAE 4130 steel was defined for the primary members, resulting in a mass reduction of 33.34% compared to the reference configuration. The structural analysis resulted in a torsional stiffness of 1553.72 N·m/°, an approximate 19:1 ratio between chassis stiffness and suspension stiffness, and natural frequencies of 38.43 Hz and 50.93 Hz, with adequate separation from the combustion frequency and greater proximity to the fundamental crankshaft rotational frequency under specific operating regimes. The mass estimate performed by the SDI showed a variation of -2.02% in relation to the actual mass, while the dimensional inspection indicated an approximate deviation of 2.93% between the CAD model and the manufactured structure. In the production analysis, the hybrid scenario presented the best balance between time, cost, and operational feasibility, with 93.847 h of manufacturing time and a total cost of BRL 24,530.92, representing the lowest overall cost among the evaluated scenarios. In the life cycle analysis, the prototype accumulated 145.3 operating hours, consumed 75.7% of its planned service life, and presented a total corrective maintenance cost of BRL 500.00. It is concluded that the proposed methodology, supported by the SDI, proved suitable for systematizing the development of tubular chassis, contributing to decision traceability, knowledge management, and continuous improvement in future design cycles.

Keywords: Roll cage; Finite Element Method; Manufacturing Processes; Cost Analysis; Life Cycle.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo Geral	18
2.2. Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1. Definições Iniciais	19
3.1.1. Classificação por aplicação	19
3.1.1.1. Competição off-road (Baja SAE, Rally, Ultra4)	20
3.1.1.2. Competição on-road (Fórmula, Turismo, GT)	21
3.1.1.3. Uso recreativo e utilitário (UTVs, veículos agrícolas).....	22
3.1.2. Classificação por material	24
3.1.2.1. Aços carbono estruturais (SAE/AISI 1010–1045)	24
3.1.2.2. Aços de baixa liga de alta resistência (HSLA).....	24
3.1.2.3. Alumínio e ligas especiais.....	25
3.1.3. Classificação por geometria e rigidez	26
3.1.3.1. Space frame tradicional	26
3.1.3.2. Estruturas semi-espaciais (semi-space frame).....	27
3.1.3.3. Estruturas monocoque com reforços tubulares	27
3.1.3.4. X-frame, A-frame e configurações diagonais	28
3.1.3.5. Estruturas híbridas tubulares com chapas estruturais.....	29
3.1.4. Gaiola de proteção – RATBSB BAJA SAE BRASIL	29
3.1.4.1. Classificação da geometria.....	29
3.1.4.2. Travamentos parede corta-chamas	30
3.1.4.3. Travamentos assoalho	32
3.1.4.4. Plano intermediário do cockpit.....	34
3.1.4.5. Travamentos lateral e traseiro	35

3.1.4.6. Materiais e cálculos de equivalência	36
3.2. Caráter Ergonômico	37
3.2.1. Antropometria e definição do envelope do piloto	38
3.2.2. Avaliação de conforto	39
3.3. Análise estrutural aplicada a chassis tubulares	40
3.3.1. Método dos elementos finitos na validação estrutural	41
3.3.2. Resposta dinâmica, vibrações e implicações estruturais	42
3.3.3. Análises estruturais aplicadas a protótipos Baja SAE.....	42
3.3.3.1. Rigidez torcional (Torsional stiffness)	42
3.3.3.2. Análise modal.....	43
3.3.3.3. Análise estática linear (análise de resistência)	45
3.3.3.4. Análise de flambagem (instabilidade estrutural).....	46
3.3.3.5. Análise de fadiga	47
3.3.4. Ensaio experimentais e correlação com o modelo numérico.....	48
3.4. Processos de conformação	49
3.5. Soldagem.....	50
3.5.1. Soldagem TIG (GTAW).....	51
3.5.2. Soldagem MIG/MAG (GMAW)	51
3.5.3. Soldagem por arco pulsado (Pulsed arc welding)	51
3.5.3.1. Controle das variáveis no arco pulsado	52
3.5.3.2. Soldagem por arco pulsado em tubos de parede fina	52
3.5.4. Juntas e chanfros de soldagem	53
3.5.4.1. Juntas de soldagem em estruturas tubulares.....	53
3.5.4.2. Preparação das juntas e função dos chanfros	54
3.5.5. Aspectos metalúrgicos.....	55
3.5.6. Controle tecnológico e qualidade da soldagem	56
3.6. Ensaio Mecânicos	56

3.6.1. Ensaaios destrutivos (ED)	57
3.6.2. Ensaaios não destrutivos (END)	58
3.6.3. Aplicação no contexto automotivo e estrutural	58
3.7. Metrologia Óptica	59
3.8. Análise de Custos	60
3.9 Lacunas da Literatura e Justificativa da Metodologia Proposta	62
4. METODOLOGIA	63
4.1. Criação da Geometria	66
4.1.1. Definições de projeto	66
4.1.2. Definições de materiais	67
4.1.3. Estimativa de massa da estrutura	67
4.2. Estudos Ergonômicos	67
4.2.1. Gabarito físico	67
4.2.2. Análise ergonômica	68
4.3. Validação Estrutural da Geometria	68
4.3.1. Análise de rigidez torcional	69
4.3.2. Análise modal	71
4.4. Manufatura	72
4.4.1. Planejamento e controle de produção/ Suprimentos	72
4.4.2. Corte e dobra	72
4.4.3. Ajustagem mecânica	73
4.4.4. Montagem de gabaritos	74
4.4.5. Soldagem	74
4.4.6. Ensaaios mecânicos	75
4.4.7. Pintura	76
4.5. Análise de variações entre o modelo numérico e real	76
4.6. Ciclo de Vida	77

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1.	Criação da Geometria	78
5.1.1.	Definições de projeto.....	78
5.1.2.	Definições de materiais	80
5.1.3.	Estimativa de massa da estrutura.....	82
5.2.	Estudos Ergonômicos	83
5.2.1.	Gabarito físico	83
5.2.2.	Análise ergonômica	83
5.3.	Validação da geometria	85
5.3.1.	Análise de rigidez torcional.....	85
5.3.2.	Análise modal.....	87
5.4.	Manufatura.....	89
5.4.1.	Planejamento e controle de produção/ Suprimentos	89
5.4.2.	Corte e dobra	91
5.4.3.	Ajustagem mecânica.....	92
5.4.4.	Montagem de gabaritos	92
5.4.5.	Soldagem	93
5.4.6.	Ensaio mecânicos.....	94
5.4.7.	Pintura	95
5.4.8.	Manufatura híbrida	96
5.5.	Análise de variações entre o modelo numérico e real	96
5.6.	Ciclo de Vida	97
6.	CONCLUSÕES	98
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
9.	APÊNDICES	107
	APÊNDICE A1 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (a) (Ø30x1,6mm) – SDI..	107

APÊNDICE A2 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (b) ($\varnothing 31,75 \times 1,24 \text{mm}$) – SDI	108
APÊNDICE A3 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (a) ($\varnothing 34,93 \times 1,016 \text{mm}$) – SDI	109
APÊNDICE A4 – Cálculos de Equivalência Aço Docol R8 ($\varnothing 31,75 \times 1,24 \text{mm}$) – SDI	110
APÊNDICE B1 – Cálculos de Materiais e Sobremetais – SDI	111
APÊNDICE B2 – Cálculo de Chapas – SDI.....	116
APÊNDICE B3 – Cálculo de Cordões de Solda – SDI	119
APÊNDICE B4 – Cálculo de Massa da Estrutura – SDI.....	125
APÊNDICE C1 – Planejamento e Controle de Produção (PCP) – SDI.....	132
APÊNDICE C2 – Gestão de Suprimentos – SDI.....	135
APÊNDICE D1 – Otimização de Cortes – SDI.....	142
APÊNDICE D2 – Especificação do Processo de Soldagem (EPS) – SDI.....	146
APÊNDICE E1 – Análise de Ciclo de Vida – SDI.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Membros e Pontos da Gaiola de Proteção	30
Figura 3.2 – Membros do RRH	31
Figura 3.3 – Configurações do travamento LDB	31
Figura 3.4 – Configurações do travamento LFDB	32
Figura 3.5 – Configurações aceitáveis para o USM e membro ASB	32
Figura 3.6 – Configuração do ESS	33
Figura 3.7 – Alturas dos membros SIM e RHO e posição do ponto C	33
Figura 3.8 – Vista superior dos SIM e configurações aceitáveis e inaceitáveis	34
Figura 3.9 – Configurações do travamento dianteiro	35
Figura 3.10 – Configurações do travamento traseiro	35
Figura 4.1 – Metodologia de Desenvolvimento do Chassi	63
Figura 4.2 – Arquitetura funcional e fluxo de integração do Sistema SDI	64
Figura 4.3 – Análise experimental de rigidez torcional realizada em protótipo anterior	69
Figura 4.4 – Comparativo entre análise teórica e teste prático da rigidez torcional	70
Figura 4.5 – Condições de contorno – Análise Modal	71
Figura 5.1 – Otimização do volume interno do cockpit	79
Figura 5.2 – Modificações estruturais na gaiola	79
Figura 5.3 – Divisão dos aços utilizados na estrutura	82
Figura 5.4 – Resultado P99 masculino - Método RULA - Software CATIA®	84
Figura 5.5 – Resultado Rigidez Torcional – Software Ansys Workbench®	85
Figura 5.6 – Resultado Análise Modal – Software Ansys Workbench®	87
Figura 5.7 – Gabaritos destinados a manufatura da estrutura	93
Figura 5.8 – Gabaritos destinados a manufatura dos pontos de suspensão	93
Figura 5.9 – Resultado do Ensaio de Flexão – Corpo de Prova com União em 90°	95
Figura 5.10 – Inspeção Destrutiva (Aspecto externo do cordão e Corte para visualização da penetração da solda) – Corpo de Prova com União em 30°	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Informações gerais das ligas de aço (% de C e dimensões)	80
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas das ligas de aço	81
Tabela 5.3 – Ângulos articulares avaliados na análise ergonômica do cockpit e respectivos intervalos de referência biomecânica baseados na SAE J1100 e no método RULA	84
Tabela 5.4 – Resultados de Rigidez Torcional obtidos para cada setup avaliado	86

Tabela 5.5 – Frequências de excitação do conjunto motriz Honda® GX390 em diferentes regimes de rotação	87
Tabela 5.6 – Comparativo de tempo e custo com mão de obra por cenário produtivo	89
Tabela 5.7 – Comparativo de tempo e custo com equipamentos por cenário produtivo	89
Tabela 5.8 – Comparativo de custo com insumos por cenário produtivo	90
Tabela 5.9 – Comparativo de custo por categoria por cenário produtivo	91
Tabela 5.10 – Composição do cenário híbrido otimizado por tempo e categorias de custo ...	96

ABREVIações

RATBSB	Regulamento Administrativo e Técnico do Baja SAE Brasil
RRH	Rear Roll Hoop (Arco principal traseiro)
RHO	Roll Hoop Overhead Members (Membros superiores do arco principal)
FBM	Front Bracing Members (Membros de reforço frontal)
ALC	Aft Lateral Cross Member (Membro transversal lateral traseiro)
BLC	Overhead Lateral Cross Member (Membro transversal lateral superior)
FLC	Front Lateral Cross Member (Membro transversal lateral frontal)
CLC	Upper Lateral Cross Member (Membro transversal lateral superior)
DLC	SIM Lateral Cross Member (Membro transversal lateral do sistema de impacto lateral)
LFS	Lower Frame Side Members (Membros laterais inferiores do chassi)
SHC	Shoulder Harness Cross Member (Membro transversal de ancoragem do cinto de ombro)
ASB	Anti-Submarine Seat Belt Member (Membro longitudinal de ancoragem do cinto antissubmarino)
ESS	Elevated Seat Support (Suporte elevado do assento)
LDB	Lateral Diagonal Bracing (Travamento diagonal lateral)
SIM	Side Impact Members (Membros de impacto lateral)
FAB	Fore-Aft Bracing Members (Membros de travamento longitudinal frente–traseira)
USM	Under Seat Member (Membro inferior ao assento)
LFDB	Lower Frame Diagonal Bracing (Travamento diagonal inferior do chassi)
ILC	Intermediate Lateral Cross Member (Membro transversal lateral intermediário)
RLC	Rear Lateral Cross member (Membro transversal lateral traseiro)
MEF	Método dos Elementos Finitos
SDI	Sistema de Dimensionamento Integrado

1. INTRODUÇÃO

O Programa Estudantil BAJA SAE Brasil é uma iniciativa promovida pela Society of Automotive Engineers (SAE), destinada a incentivar estudantes de engenharia a aplicarem os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula, associados ao desenvolvimento de competências práticas obtidas durante a vivência de projeto. O programa consiste no desenvolvimento de um veículo off-road de alto desempenho, apto a se locomover em locais de terreno irregular, transpondo quaisquer tipos de obstáculos e sob quaisquer condições climáticas. No âmbito da competição, cada equipe é responsável pela concepção, modelagem, construção e validação do protótipo, seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelo Regulamento Administrativo e Técnico BAJA SAE BRASIL (RATBSB).

Essa proposta educacional promove um ambiente que simula as demandas reais da indústria automotiva, exigindo dos participantes competências relacionadas à gestão de projetos, análise estrutural, processos de manufatura, controle de qualidade e gestão de custos. Tais habilidades contribuem de forma significativa para a formação profissional dos estudantes e correspondem a atributos amplamente reconhecidos e valorizados pela indústria. Assim, o programa se consolida como um ambiente formativo de caráter aplicado, voltado à promoção da inovação, do trabalho colaborativo e da integração multidisciplinar entre diferentes áreas da engenharia – princípios estes que, segundo o Project Management Institute (2021), integram o conjunto de conhecimentos, habilidades e técnicas essenciais para a entrega de valor e o desenvolvimento profissional no contexto de projetos de engenharia.

A busca por inovação e pela melhoria contínua em projetos de veículos de competição tem como objetivo principal o aumento do desempenho e da eficiência estrutural, tanto nas equipes da modalidade Baja SAE / Fórmula SAE quanto no automobilismo de alto desempenho em geral, como Fórmula 1 (*FIA Fórmula One World Championship*), Fórmula Indy (*NTT IndyCar Series*), WRC (*World Rally Championship*), NASCAR Cup Series, Stock Car Pro Series. Entretanto, esse avanço tecnológico deve ser acompanhado de estratégias que garantam elevados níveis de segurança e proteção aos condutores durante a operação. Segundo Gillespie (1992), o desempenho veicular e a segurança são resultados diretos da melhoria contínua no projeto estrutural, na seleção de materiais e nos processos de fabricação, visando otimizar a rigidez e a absorção de energia sob cargas dinâmicas.

Adams (1993) complementa que o chassi deve equilibrar rigidez, leveza e segurança, atuando como uma célula de sobrevivência capaz de suportar grandes esforços durante impactos, enquanto Reimpell, Stoll e Betzler (2001) destacam que o desenvolvimento de

veículos de alta performance envolve processos iterativos voltados à eficiência e à confiabilidade estrutural. No âmbito dos regulamentos de segurança, a FIA (2024) estabelece que a célula de sobrevivência e as estruturas de capotamento devem preservar a integridade do habitáculo sob impactos severos, princípio também seguido nas competições acadêmicas da SAE Brasil, cujo regulamento (SAE INTERNATIONAL, 2025) define requisitos de projeto, dimensionamento e validação da gaiola de proteção (*roll cage*).

De modo semelhante, programas internacionais de avaliação veicular aplicados a veículos de passeio, como o Latin NCAP (*Latin New Car Assessment Programme - 2023*), Euro NCAP (*European New Car Assessment Programme - 2024*), a NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) e o IIHS (*Insurance Institute for Highway Safety*), reforçam que a integridade estrutural do compartimento dos ocupantes e a capacidade de dissipação de energia por zonas de deformação controlada são parâmetros fundamentais para a redução do risco de lesões em colisões. Conforme Bathe (1996), o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) permite avaliar com precisão os mecanismos de deformação e absorção de energia em estruturas de segurança, enquanto Okumura (1982) e Lancaster (1999) ressaltam que juntas soldadas em estruturas tubulares de aços de alta resistência devem manter simultaneamente tenacidade e ductilidade, evitando falhas frágeis durante impactos.

Assim, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aprimoramento de habitáculos mais resistentes e confiáveis constituem um dos principais focos das engenharias automotiva e mecânica na atualidade. Veículos de alto desempenho são, em sua maioria, equipados com gaiolas de proteção formadas por tubos de aços de alta resistência mecânica, unidos por soldagem de alta precisão e projetados com diferentes geometrias e espessuras de parede, de modo a absorver e dissipar a energia de impacto durante colisões, reduzindo significativamente os riscos de lesões aos ocupantes (EURO NCAP, 2024; KOU, 2003).

No que concerne a engenharia aplicada a seleção de materiais, a redução de massa estrutural constitui um dos principais objetivos no desenvolvimento de veículos de competição, uma vez que influencia diretamente o desempenho dinâmico, a eficiência energética e a dirigibilidade. Conforme Ashby e Jones (2019), a redução de massa sem comprometer a resistência e a rigidez estrutural representa um dos maiores desafios da engenharia contemporânea, exigindo a seleção criteriosa de materiais e processos de fabricação. Diante desse cenário, a busca por ligas metálicas e materiais compósitos com propriedades físico-mecânicas superiores amplia as possibilidades de projeto, permitindo o desenvolvimento de estruturas mais leves, seguras e eficientes. Nesse contexto, observa-se a migração gradual do

tradicional aço AISI 4130 (Cr-Mo) para a classe de aços avançados de alta resistência (AHSS), como o Docol Tube R8, devido aos maiores limites de escoamento e de resistência, que permitem empregar menores espessuras de parede sem perda de integridade estrutural. Dados de produto do fabricante indicam que o Docol Tube R8 apresenta propriedades mecânicas superiores e controle rigoroso de composição e processo, favorecendo desempenho em fadiga e consistência dimensional (SSAB, 2021). Para efeito de comparação e seleção de materiais, os valores típicos do 4130 em condição normalizada/laminada constam em manuais técnico-metálicos (ASM INTERNATIONAL, 2015) e em normas de composição e propriedades (SAE, J404), devendo a escolha final considerar também requisitos de projeto, processo de soldagem e regulamentos técnicos (FIA, 2024; SAE INTERNATIONAL, 2025). Ademais, a combinação entre aços de alta resistência e materiais compósitos, quando devidamente avaliada sob os aspectos de rigidez específica e absorção de energia, possibilita o desenvolvimento de estruturas mais eficientes e sustentáveis, conforme destacam Reimpell, Stoll e Betzler (2001).

Sob o ponto de vista da dinâmica veicular, o chassi exerce papel determinante na rigidez estrutural do veículo, influenciando de forma direta o comportamento dinâmico, a estabilidade direcional e a resposta aos estímulos provenientes do pavimento. No contexto dos veículos off-road, busca-se um equilíbrio entre a rigidez do chassi e a rigidez da suspensão, uma vez que estruturas excessivamente flexíveis podem comprometer a precisão de condução, enquanto estruturas demasiadamente rígidas podem reduzir a capacidade de absorção de impactos e transmitir vibrações indesejadas ao condutor. Conforme Adams (1993), a rigidez estrutural do chassi deve ser suficientemente elevada para garantir a integridade geométrica do sistema de suspensão e permitir que esta desempenhe sua função de forma previsível. Segundo Milliken (1995), o desempenho dinâmico está diretamente relacionado à proporção entre rigidez torcional do chassi e rigidez do conjunto de suspensão, sendo desejável que a estrutura apresente deformações mínimas sob cargas laterais, de modo a manter a estabilidade do veículo em curvas e terrenos irregulares. Gillespie (1992) complementa que a rigidez do chassi influencia significativamente a distribuição da carga entre as rodas e o comportamento em transientes de aceleração e frenagem. Deakin (2000) destaca que, quanto maior a relação entre a rigidez da estrutura e a rigidez do sistema de suspensão, menor será a influência da flexão do chassi na transferência lateral de carga, resultando em respostas mais previsíveis e controle aprimorado da dirigibilidade. Assim, o projeto estrutural de veículos off-road deve considerar o compromisso entre rigidez e conformidade, de modo a equilibrar estabilidade, conforto e capacidade de transposição de obstáculos.

No âmbito de análise estrutural, a validação da rigidez estrutural é comumente realizada por meio de modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), ferramenta amplamente utilizada na engenharia para a análise de sistemas contínuos submetidos a condições complexas de carregamento. De modo geral, a aplicação do MEF consiste na formulação de um modelo matemático capaz de representar o comportamento físico de uma estrutura ou de seus componentes, considerando as ações externas, as condições de contorno e os parâmetros de material associados ao problema. Conforme Bathe (1996) e Logan (2016), o método baseia-se na subdivisão do domínio contínuo em um conjunto finito de subdomínios denominados elementos finitos, interconectados por pontos nodais que descrevem o campo de deslocamentos da estrutura. Cada elemento é governado por equações diferenciais que, quando integradas globalmente, permitem determinar as respostas estruturais sob as condições impostas. Soriano (2004) reforça que o emprego de softwares CAE (*Computer-Aided Engineering*) possibilita a discretização, o processamento e a análise de modelos complexos com elevado grau de confiabilidade. Para comprovar a validade dos resultados obtidos numericamente, são realizados testes experimentais controlados, de modo a comparar as respostas do modelo computacional com as observações empíricas. A correlação entre ambos é avaliada por meio de indicadores de erro e faixas de tolerância aceitáveis, assegurando que o modelo represente adequadamente o comportamento físico real da estrutura.

De forma complementar, o processo de manufatura e o controle de qualidade exercem papel decisivo no desenvolvimento de um chassi tubular de alto desempenho, visto que pequenas variações geométricas durante a fabricação podem afetar significativamente a precisão dos pontos de ancoragem da suspensão e, conseqüentemente, o comportamento dinâmico do veículo. Para minimizar essas variações, adota-se com frequência a fabricação da estrutura em seções independentes, seguida da montagem final por meio de gabaritos de posicionamento e travamento, que têm a função de restringir deslocamentos e rotações dos membros estruturais antes e durante a soldagem. Conforme Okumura (1982) e Lancaster (1999), a utilização de dispositivos de fixação e a aplicação de sequências controladas de soldagem são práticas fundamentais para reduzir tensões residuais, distorções e empenamentos na estrutura. Kalpakjian e Schmid (2014) acrescentam que a estabilidade dimensional de componentes soldados depende diretamente da rigidez do conjunto e do controle térmico durante o processo.

Adicionalmente, o controle dimensional por técnicas de metrologia óptica permite avaliar desvios geométricos e garantir a conformidade do produto em relação ao modelo projetado.

Quando associado a ensaios não destrutivos (líquido penetrante e ultrassom) e ensaios destrutivos em corpos de prova, o controle de qualidade assegura a integridade metalúrgica das juntas e a repetibilidade do processo de manufatura, conforme ressaltado por DeGarmo, Black e Kohser (2011). Dessa forma, a integração entre projeto, manufatura e controle metrológico é essencial para a confiabilidade estrutural e o desempenho global do veículo.

Do mesmo modo, a análise de custos exerce papel fundamental no desenvolvimento estrutural de veículos destinados a competições automobilísticas, visto que os recursos disponíveis impõem restrições diretas às soluções de engenharia empregadas. Em diversas modalidades, são estabelecidos limites financeiros (*financial fair play*) com o objetivo de promover equilíbrio competitivo entre as equipes e estimular a adoção de soluções técnicas inovadoras dentro de orçamentos pré-determinados. De acordo com Park (2007), o processo de engenharia econômica tem como finalidade comparar alternativas de projeto sob critérios de viabilidade financeira, assegurando que o desempenho obtido seja compatível com o investimento realizado. Nesse contexto, a etapa de concepção estrutural deve integrar simultaneamente critérios de custo, desempenho e manufaturabilidade, conforme reforçam Slack, Chambers e Johnston (2010), constituindo um ponto de equilíbrio entre a viabilidade técnica e a sustentabilidade econômica do projeto.

Observa-se, na prática da equipe CEFAST BAJA SAE, a ausência de um processo sistematizado capaz de integrar, de forma rastreável, as etapas de projeto estrutural, manufatura, soldagem, controle geométrico e análise de custos. Essa lacuna metodológica contribui para a fragmentação das decisões técnicas, o aumento da variabilidade construtiva e a dificuldade de estabelecer comparações objetivas entre diferentes protótipos. Como consequência, limita-se o aproveitamento dos aprendizados acumulados ao longo dos ciclos de desenvolvimento, reduzindo a eficiência dos processos de melhoria contínua e de gestão do conhecimento.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para o chassi tubular de veículos do tipo Baja SAE, contemplando os aspectos de segurança e conforto do condutor, a seleção de materiais, a relação entre rigidez estrutural e comportamento dinâmico da suspensão, além das etapas de análise estrutural, manufatura, soldagem e controle de qualidade. O estudo busca integrar todas as fases do processo de concepção do chassi, desde o projeto conceitual até a validação experimental, visando estabelecer um método capaz de fornecer resultados consistentes, reproduzíveis e aplicáveis ao desenvolvimento de estruturas automotivas de alto desempenho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver, implementar e avaliar uma metodologia integrada para o desenvolvimento de um chassi tubular aplicado a veículo off-road do tipo Baja, contemplando as etapas de concepção geométrica, validação estrutural, seleção de materiais, manufatura, soldagem, controle de qualidade, análise de custos e acompanhamento do ciclo de vida, com apoio do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), visando aumentar a rastreabilidade, a confiabilidade técnica e a eficiência do processo de desenvolvimento da estrutura.

2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver e implementar um sistema de dimensionamento como ferramenta de apoio à metodologia proposta, integrando dados de projeto, materiais, manufatura, soldagem, custos, inspeção e ciclo de vida em um ambiente único e rastreável;
- Desenvolver a geometria do chassi tubular em ambiente CAD e avaliar os materiais estruturais com base nos critérios de equivalência do RATBSB, considerando integração dos subsistemas, conformidade normativa, desempenho estrutural, redução de massa e coerência entre a massa estimada e a estrutura manufaturada;
- Identificar e aplicar referências normativas, regulamentares e antropométricas adequadas à concepção e otimização da geometria do chassi tubular, considerando os requisitos de segurança, ergonomia e desempenho aplicáveis ao veículo Baja;
- Desenvolver e validar o modelo estrutural da gaiola de proteção por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando metodologia experimental previamente consolidada em protótipos anteriores como referência para avaliação da rigidez torcional e do comportamento dinâmico preliminar do chassi;
- Estabelecer, documentar e comparar procedimentos de manufatura, inspeção e controle de qualidade aplicados ao chassi tubular, avaliando tempos e custos em cenários convencionais, automatizados e híbridos;
- Analisar as variações entre a geometria projetada e a geometria fabricada, utilizando procedimentos de inspeção dimensional e controle geométrico aplicados à verificação dos pontos de ancoragem da suspensão dianteira e traseira;
- Avaliar o ciclo de vida operacional do protótipo, integrando registros de operação, falhas, indicadores de confiabilidade, ações corretivas e custos de manutenção, de modo a subsidiar a gestão, a rastreabilidade e a documentação técnica da estrutura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Definições Iniciais

As estruturas de proteção veicular (*roll cages*) podem ser classificadas de acordo com sua aplicação, material, geometria estrutural e rigidez global, variáveis diretamente relacionadas ao tipo de veículo e ao nível de segurança requerido durante sua vida útil. Essas características definem a capacidade da estrutura de manter a integridade do habitáculo, absorver energia de impacto e proteger o condutor em situações de capotamento ou colisão lateral. Segundo a Federação Internacional de Automobilismo (FIA, 2023), a *roll cage* constitui “a principal barreira estrutural responsável por preservar o espaço de sobrevivência do ocupante durante eventos de alta severidade”.

Milliken (1995) destaca que a geometria da gaiola exerce influência direta sobre a rigidez torcional e a distribuição de esforços no chassi, tornando o arranjo de tubos e a presença de reforços diagonais fatores determinantes para o desempenho estrutural do veículo. Adams (1993) complementa que configurações bem projetadas contribuem para reduzir deformações permanentes e melhorar o comportamento dinâmico do conjunto, especialmente em veículos de competição.

No contexto de engenharia automotiva, destacam-se três abordagens gerais de classificação:

3.1.1. Classificação por aplicação

A classificação por aplicação relaciona o dimensionamento do chassi tubular e da *roll cage* ao espectro de carregamentos (quase-estáticos, dinâmicos e de impacto), às condições de contorno impostas pelos subsistemas (suspensão, trem de força e pontos de ancoragem) e aos mecanismos de falha esperados (escoamento, flambagem, fadiga e colapso progressivo). Gillespie (1992) ressalta que as exigências estruturais variam conforme o ambiente operacional e a severidade das excitações, o que condiciona a rigidez global, a distribuição de caminhos de carga e os critérios de validação. Do ponto de vista dinâmico, o chassi pode ser tratado como um sistema de múltiplos graus de liberdade, cuja resposta depende de massa, rigidez e amortecimento; a proximidade entre frequências naturais e frequências de excitação eleva amplitudes vibratórias e tensões alternadas, com impacto direto na vida em fadiga (INMAN, 2014; RAO, 2017; MEIROVITCH, 2001). Sob a ótica da resistência dos materiais, as solicitações são tipicamente combinadas (flexão, torção, tração/compressão e cisalhamento), devendo ser avaliadas com critérios consistentes de tensões e estabilidade estrutural, sobretudo

em membros tubulares esbeltos e regiões com concentração de tensões (BEER et al., 2015; HIBBELER, 2017).

3.1.1.1. Competição off-road (Baja SAE, Rally, Ultra4)

Em competições off-road, a estrutura veicular é submetida a excitações severas e de natureza predominantemente aleatória, decorrentes da interação contínua com o terreno irregular — incluindo degraus, valas, pedras e eventos de salto. Essas condições impõem carregamentos com elevada taxa de variação temporal, além de eventos transitórios de impacto, os quais exigem do chassi e da *roll cage* elevada capacidade de absorção e redistribuição de energia, bem como estabilidade estrutural sob solicitações combinadas.

- **Capotamento e tombamento:** predominam esforços de compressão e flexão nos arcos e montantes da *roll cage*, tornando essencial a preservação do espaço de sobrevivência do ocupante. A resistência à flambagem, tanto local quanto global, é um requisito crítico em membros tubulares esbeltos, devendo ser avaliada por critérios de estabilidade estrutural que considerem imperfeições geométricas e condições reais de contorno (HIBBELER, 2017; BEER et al., 2015).
- **Impacto lateral/oblíquo:** caracterizam-se por solicitações combinadas de cisalhamento e flexão, com elevada demanda por continuidade estrutural e eficiência na transferência de cargas. A adoção de triangulações adequadas é fundamental para impedir mecanismos de colapso no plano lateral, enquanto a definição clara de caminhos de carga contribui para a redução de concentrações de tensão em nós estruturais e juntas soldadas, aumentando a confiabilidade da estrutura (BEER et al., 2015).
- **Torção global do chassi:** a deformação angular do chassi (*twist*), induzida por irregularidades do terreno e por carregamentos assimétricos nas rodas, impõe a necessidade de rigidez torcional suficiente para a manutenção da geometria de suspensão, particularmente parâmetros como cambagem e convergência. Níveis excessivos de *twist* caracterizam elevada compliance estrutural — medida inversa da rigidez —, resultando em alterações indesejadas da resposta do veículo a comandos de direção e a variações de aderência, com impacto direto na dirigibilidade e na previsibilidade dinâmica (GILLESPIE, 1992).
- **Vibrações e fadiga:** o ambiente off-road apresenta um espectro amplo de excitações, aumentando o risco de proximidade entre frequências naturais da

estrutura e frequências de excitação, o que pode levar à ressonância estrutural e à amplificação de tensões alternadas. A relação entre rigidez, propriedades dinâmicas e resposta vibratória deve, portanto, ser considerada no projeto, de modo a reduzir níveis de tensão dinâmica e retardar a nucleação e propagação de trincas por fadiga (INMAN, 2014; RAO, 2017; MEIROVITCH, 2001). Do ponto de vista construtivo, esse cenário impõe atenção especial a concentradores de tensão — como entalhes, terminações de cordões de solda e nós com múltiplos tubos —, bem como à qualidade dos processos de fabricação, uma vez que a vida em fadiga é altamente sensível a detalhes geométricos e ao acabamento superficial (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016; NORTON, 2014; JUVINALL; MARSHEK, 2016).

De maneira geral, em aplicações off-road, o projeto do chassi e da *roll cage* é governado pela combinação entre robustez a impactos, rigidez torcional adequada e resistência à fadiga, apresentando forte dependência da geometria estrutural, da qualidade das uniões soldadas e do controle dimensional ao longo do processo de manufatura.

3.1.1.2. Competição on-road (Fórmula, Turismo, GT)

Em competições on-road, embora ocorram eventos de impacto localizados — como contatos entre veículos e a transposição de zebras —, o regime de carregamento tende a ser mais repetitivo e bem definido, com predominância de acelerações laterais elevadas e transferência de carga consistente ao longo do tempo. Nesse contexto, o desempenho estrutural do chassi exerce influência direta sobre a resposta dinâmica e a previsibilidade do comportamento veicular. Destacam-se, a seguir, os principais aspectos associados a essa aplicação:

- **Rigidez torcional e plataforma dinâmica:** a rigidez do chassi controla a magnitude das deformações estruturais induzidas pelas cargas transmitidas pela suspensão. Estruturas com elevada rigidez torcional reduzem variações indesejadas da geometria de suspensão, favorecendo a manutenção de parâmetros cinemáticos e melhorando a resposta transitória do veículo em condições como entrada de curva e mudanças rápidas de direção. Como consequência, obtêm-se maior previsibilidade e eficiência dinâmica (GILLESPIE, 1992).
- **Interação com aerodinâmica:** Em categorias nas quais há geração significativa de *downforce* (força aerodinâmica negativa), a rigidez global do chassi exerce influência direta sobre a estabilidade da plataforma aerodinâmica. Deformações estruturais sob carga aerodinâmica podem alterar parâmetros geométricos críticos,

como a altura do veículo em relação ao solo (*ride height*) e o ângulo de inclinação longitudinal (*rake*), resultando em variações não intencionais da distribuição de pressão ao longo do assoalho, do difusor e dos dispositivos aerodinâmicos. Consequentemente, a carga aerodinâmica efetiva e sua distribuição entre os eixos podem ser modificadas, afetando a previsibilidade do comportamento dinâmico e a eficiência aerodinâmica do veículo. Assim, elevados níveis de *downforce* impõem requisitos rigorosos de rigidez torcional e flexional, a fim de limitar a compliance estrutural e assegurar a consistência da resposta aerodinâmica ao longo das diferentes condições de operação.

- **Resposta vibratória:** o perfil das pistas impõe excitações periódicas associadas, por exemplo, à passagem sobre zebras, concentradas em faixas específicas de frequência. Nesse cenário, o posicionamento adequado das frequências naturais da estrutura e o nível de amortecimento estrutural influenciam diretamente os níveis de vibração, o conforto dinâmico e a integridade estrutural ao longo dos ciclos de corrida (INMAN, 2014; RAO, 2017).
- **Dimensionamento por fadiga e confiabilidade:** embora os níveis de choque sejam, em geral, inferiores aos observados em aplicações off-road, o elevado número de ciclos de carregamento torna o dimensionamento por fadiga um aspecto central do projeto. Fatores como concentração de tensões, qualidade das juntas soldadas e definição adequada de fatores de segurança são determinantes para a confiabilidade estrutural ao longo da vida útil do veículo (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016; NORTON, 2014).

Em síntese, para aplicações on-road, prevalecem requisitos associados à elevada rigidez torcional, ao controle da compliance estrutural e ao dimensionamento por fadiga sob carregamentos repetitivos, de modo a garantir desempenho dinâmico consistente, confiabilidade e eficiência aerodinâmica.

3.1.1.3. Uso recreativo e utilitário (UTVs, veículos agrícolas)

Em aplicações recreativas e utilitárias, o projeto estrutural tem como objetivos centrais o atendimento aos requisitos mínimos de segurança regulamentar, a durabilidade em serviço e a facilidade de manutenção, respeitando restrições de custo e assegurando robustez para operação prolongada em ambientes adversos. Nessas aplicações, as solicitações estruturais tendem a apresentar menor severidade instantânea quando

comparadas às categorias de competição, porém ocorrem de forma contínua ao longo da vida útil do veículo. Nesse contexto, destacam-se os seguintes aspectos:

- **Carregamentos moderados e prolongados:** a estrutura é submetida a ciclos de carga de menor amplitude, porém repetitivos, associados à operação contínua em terrenos irregulares e condições ambientais severas. Tais condições tornam relevantes os fenômenos de fadiga de longo prazo, desgaste e corrosão, os quais podem comprometer a integridade estrutural ao longo do tempo. Para componentes submetidos a carregamentos variáveis, a confiabilidade estrutural depende diretamente das tensões alternadas, da qualidade do acabamento superficial e do controle de defeitos introduzidos durante a fabricação (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016; JUVINALL; MARSHEK, 2016).
- **Eventos de capotamento de severidade variável:** embora menos frequentes e, em geral, de menor energia quando comparados a aplicações competitivas, eventos de capotamento podem ocorrer ao longo da vida útil do veículo. Nesses casos, a estrutura deve assegurar a preservação mínima do espaço do habitáculo, sendo usualmente dimensionada com base em requisitos normativos específicos e diretrizes internas de fabricantes, que consideram cenários típicos de uso e níveis aceitáveis de deformação.
- **Vibração e conforto:** em veículos recreativos, além da integridade estrutural, os níveis de vibração assumem relevância sob a ótica do conforto do operador e da proteção de componentes auxiliares. A resposta dinâmica do sistema estrutura–suspensão deve, portanto, evitar a amplificação vibratória em faixas críticas de frequência, as quais podem acelerar processos de fadiga e comprometer a confiabilidade do conjunto (INMAN, 2014; RAO, 2017).
- **Manufaturabilidade:** aspectos relacionados à produção exercem influência direta sobre o projeto estrutural. Geometrias mais simples, com menor número de juntas e maior repetibilidade dimensional, são frequentemente priorizadas com o objetivo de reduzir variabilidade, facilitar inspeções e minimizar custos de fabricação e manutenção ao longo do ciclo de vida do produto (NORTON, 2014).

De modo geral, em aplicações recreativas e utilitárias, o projeto estrutural é orientado pelo compromisso entre durabilidade, atendimento aos requisitos mínimos de

segurança e viabilidade econômica, com atenção particular aos efeitos de fadiga de longo prazo, às condições ambientais agressivas e à robustez do processo de fabricação.

3.1.2. Classificação por material

A seleção do material para a estrutura de um chassi tubular e de uma *roll cage* constitui uma etapa crítica do projeto, uma vez que influencia diretamente o comportamento estrutural, a resposta dinâmica, a capacidade de absorção de energia, a resistência à fadiga e a viabilidade de manufatura. Em aplicações veiculares, particularmente em contextos competitivos, a escolha do material deve considerar não apenas propriedades estáticas, como limite de escoamento e resistência última, mas também propriedades relacionadas à tenacidade, ductilidade, soldabilidade e desempenho sob carregamentos dinâmicos e cíclicos.

Do ponto de vista normativo, entidades como a FIA e a SAE Brasil, por meio do Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB), enfatizam que a seleção do material deve assegurar comportamento dúctil, capacidade adequada de absorção de energia até a fratura e evitar modos de falha abruptos, especialmente em estruturas destinadas à proteção do ocupante.

3.1.2.1. Aços carbono estruturais (SAE/AISI 1010–1045)

Os aços carbono estruturais de baixo e médio teor de carbono apresentam ampla aplicação em estruturas veiculares devido à sua boa soldabilidade, custo reduzido e comportamento previsível sob carregamentos estáticos e dinâmicos. Segundo Callister e Rethwisch (2016), esses materiais apresentam microestruturas predominantemente ferrítico-perlíticas, conferindo boa ductilidade e capacidade de deformação plástica antes da fratura, característica desejável em estruturas de segurança.

Sob a ótica da resistência dos materiais, esses aços oferecem desempenho satisfatório quando submetidos a esforços combinados de tração, flexão e torção, desde que adequadamente dimensionados (BEER et al., 2015; HIBBELER, 2017). Entretanto, suas limitações em termos de relação resistência/massa e resistência à fadiga tornam seu uso menos atrativo em aplicações nas quais a redução de massa é um requisito relevante, como em veículos de competição.

3.1.2.2. Aços de baixa liga de alta resistência (HSLA)

Os aços de baixa liga e alta resistência (ex.: AISI 4130 Cr–Mo, AISI 4140, Docol R8, Docol 1200) constituem a classe de materiais mais empregada em *roll cages* e chassis tubulares de competição. A adição controlada de elementos de liga, como cromo e

molibdênio, ou o uso de rotas avançadas de processamento termomecânico, resulta em elevados limites de escoamento, boa tenacidade à fratura e melhor desempenho em fadiga, mantendo níveis adequados de ductilidade (CHIAVERINI, 1986; ASM INTERNATIONAL, 2015)

Do ponto de vista do projeto estrutural, esses materiais permitem a utilização de tubos com menores espessuras de parede, contribuindo para a redução de massa sem comprometimento significativo da rigidez global, aspecto essencial para o controle da resposta dinâmica do veículo (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016; NORTON, 2014). Além disso, a maior rigidez específica influencia positivamente o posicionamento das frequências naturais da estrutura, reduzindo a suscetibilidade a fenômenos de ressonância sob excitações típicas do ambiente veicular (INMAN, 2014; RAO, 2017; MEIROVITCH, 2001).

Entretanto, a utilização desses aços exige atenção especial aos processos de soldagem, uma vez que a presença de elementos de liga pode aumentar a sensibilidade à formação de microestruturas frágeis na zona termicamente afetada, caso não sejam adotados procedimentos adequados de controle térmico (DIETER, 1988; ASM INTERNATIONAL, 2015).

3.1.2.3. Alumínio e ligas especiais

O uso de alumínio e de ligas especiais em estruturas veiculares é geralmente restrito a categorias específicas, em função de limitações normativas e de requisitos rigorosos de projeto. Embora esses materiais apresentem baixa densidade e elevada rigidez específica, suas características de menor módulo de elasticidade, comportamento distinto em fadiga e maior complexidade de soldagem impõem desafios adicionais ao projeto estrutural (ASHBY; JONES, 2019; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Além disso, conforme destacado por Juvinall e Marshek (2016), materiais com menor módulo de elasticidade podem demandar seções estruturais maiores para atender aos requisitos de rigidez, o que nem sempre resulta em ganhos efetivos de massa ou desempenho. Em estruturas de segurança, a previsibilidade do comportamento plástico e a capacidade de absorção de energia tornam-se critérios tão relevantes quanto a redução de peso, justificando o predomínio do uso de aços em *roll cages*.

3.1.3. Classificação por geometria e rigidez

A geometria da *roll cage* está diretamente relacionada à capacidade da estrutura de resistir a carregamentos de impacto e capotamento, bem como à sua contribuição para a rigidez torcional e flexional do veículo. Em estruturas de proteção, a configuração geométrica exerce papel determinante na forma como os esforços são redistribuídos ao longo dos membros tubulares, influenciando tanto a capacidade de absorção de energia quanto a preservação do espaço de sobrevivência do ocupante. Regulamentos técnicos e a literatura de dinâmica veicular e projeto estrutural ressaltam que o desempenho em eventos críticos depende fortemente da geometria adotada e da continuidade dos caminhos de carga (FIA, 2023; MILLIKEN, 1995).

Milliken (1995) destaca que a rigidez de um chassi tubular é governada essencialmente pela presença e orientação das triangulações, pela continuidade estrutural entre planos distintos e pela eficiência dos membros em resistir a esforços de tração, compressão e cisalhamento. Dessa forma, diferentes configurações geométricas de *roll cages* apresentam comportamentos distintos em termos de rigidez global, segurança estrutural, resposta dinâmica e viabilidade construtiva.

A seguir, apresentam-se as principais configurações estruturais descritas na literatura técnica.

3.1.3.1. *Space frame tradicional*

O *space frame* tradicional consiste em uma malha tridimensional de tubos interligados por nós estruturais, caracterizada pela adoção sistemática de triangulações distribuídas em múltiplos planos. Essa configuração reduz graus de liberdade indesejados, limita deformações por flexão e promove um aumento significativo da rigidez torcional global da estrutura. A presença de triangulações impede que o conjunto se comporte como uma treliça plana, favorecendo a transmissão eficiente dos esforços e aumentando a estabilidade estrutural em eventos de impacto e capotamento.

Segundo Milliken (1995), a triangulação constitui o meio mais eficaz para elevar a rigidez torcional em estruturas do tipo *space frame*, uma vez que direciona os esforços predominantemente para tração e compressão axial, reduzindo a participação de solicitações por flexão nos membros estruturais e, conseqüentemente, as deformações elásticas associadas.

Essa configuração geométrica é amplamente empregada em protótipos off-road (Baja SAE, Rally Cross e Ultra4), veículos de competição baseados em chassis tubulares,

bem como em estruturas artesanais ou de baixo volume de produção que demandam elevada rigidez estrutural e previsibilidade do comportamento mecânico.

3.1.3.2. Estruturas semi-espaciais (*semi-space frame*)

As estruturas *semi-espaciais* caracterizam-se pela integração sistemática de elementos tubulares com painéis estruturais contínuos, de modo que esses painéis passam a atuar como componentes resistentes ao cisalhamento em porções relevantes do chassi. Diferentemente dos *space frames* tubulares puros, nos quais a rigidez é predominantemente garantida por triangulação, as estruturas *semi-espaciais* exploram a ação conjunta de tubos e superfícies planas para elevar a rigidez global e reduzir deformações por flexão e torção.

Essa abordagem resulta em um nível de rigidez intermediário entre *space frames* convencionais e estruturas *monocoque*, permitindo otimizar o comportamento estrutural sem os elevados custos e a complexidade associados a *monocoques* integrais. Segundo Adams (1993), a utilização de painéis estruturais em conjunto com membros tubulares possibilita ao projetista direcionar a rigidez conforme os caminhos de carga predominantes, promovendo uma distribuição mais eficiente de material ao longo da estrutura.

As estruturas *semi-espaciais* são comumente empregadas em protótipos leves, veículos com restrições simultâneas de massa e custo e aplicações nas quais o controle da rigidez global do chassi é desejável, mantendo-se, contudo, processos construtivos relativamente simples quando comparados a soluções *monocoque*.

3.1.3.3. Estruturas monocoque com reforços tubulares

Nessa configuração, a estrutura é constituída predominantemente por painéis estruturais, metálicos ou compósitos, complementados por reforços tubulares localizados em regiões críticas, tais como pontos de ancoragem da suspensão e arcos de proteção. A célula de sobrevivência (*survival cell*) assume papel central na absorção, redistribuição e dissipação de energia durante eventos de impacto, assegurando a preservação do espaço ocupado pelo piloto.

De acordo com a FIA (2023), estruturas do tipo *monocoque* apresentam elevada rigidez específica e capacidade superior de absorção de energia, enquanto os reforços tubulares garantem resistência local adequada em regiões sujeitas a elevadas concentrações de tensões, contribuindo para a integridade estrutural e para o atendimento aos requisitos de segurança.

Essa configuração é amplamente empregada em *monocoques* de fibra de carbono, veículos de fórmula e estruturas híbridas homologadas conforme os regulamentos da FIA, especialmente em categorias que demandam elevado desempenho estrutural e rigoroso controle de massa.

3.1.3.4. X-frame, A-frame e configurações diagonais

Em estruturas tubulares automotivas, especialmente em aplicações off-road, são recorrentes variações geométricas destinadas ao reforço localizado do plano lateral e do plano superior da *roll cage*. Essas configurações têm como objetivo principal o aumento da rigidez estrutural em regiões sujeitas a carregamentos combinados, bem como o bloqueio de mecanismos de deformação indesejados.

- a. X-frame** – A configuração do tipo X-frame caracteriza-se pelo cruzamento de diagonais, formando um arranjo em “X”. Esse tipo de reforço é particularmente eficiente em regiões submetidas a carregamentos combinados de torção e compressão, uma vez que eleva a rigidez ao cisalhamento e reduz deformações no plano reforçado. A distribuição simétrica das diagonais contribui para a transferência equilibrada dos esforços, aumentando a estabilidade estrutural. Essa configuração geralmente é empregada nas laterais da roll cage, painéis traseiros e regiões associadas aos arcos principais.
- b. Single-A e Double-A** – As configurações em forma de “A”, simples (*Single-A*) ou dupla (*Double-A*), são amplamente empregadas no reforço de arcos posteriores e regiões de transição estrutural. De acordo com Gillespie (1992), diagonais inclinadas que convergem para um único nó favorecem a transferência eficiente de cargas ao longo da estrutura, reduzindo a ocorrência de solicitações por flexão e a probabilidade de flambagem e colapso progressivo dos membros tubulares.
- c. Configurações triangulares localizadas** – Triangulações localizadas, aplicadas em pontos estruturalmente críticos, como junções entre membros e regiões de elevada concentração de tensões, contribuem para a redução de deformações excessivas e para o bloqueio de mecanismos instáveis. Essas soluções geométricas aumentam a confiabilidade estrutural, especialmente em regiões sujeitas a impactos, vibrações intensas e carregamentos cíclicos, sendo amplamente adotadas em projetos que demandam robustez e segurança estrutural.

3.1.3.5. Estruturas híbridas tubulares com chapas estruturais

As estruturas híbridas tubulares com chapas estruturais distinguem-se das *semi-espaciais* por sua aplicação localizada, voltada ao reforço de regiões específicas do chassi submetidas a elevadas solicitações mecânicas. Nessa configuração, chapas metálicas — geralmente em aço ou alumínio — são incorporadas pontualmente ao chassi tubular na forma de *gussets*, placas de reforço ou painéis curtos, atuando como elementos resistentes ao cisalhamento e à flexão local.

O objetivo principal dessa abordagem não é alterar de forma significativa a rigidez global do chassi, mas aumentar a rigidez local, reduzir concentrações de tensão e melhorar a transferência de esforços em nós estruturais críticos, como pontos de ancoragem da suspensão, bases de barras estabilizadoras e regiões de fixação do habitáculo. Adams (1993) ressalta que o uso estratégico de chapas estruturais permite ganhos expressivos de rigidez e estabilidade estrutural com penalização mínima de massa, aspecto particularmente relevante em veículos de competição.

Essa solução é amplamente adotada em reforços de nós, interfaces estruturais complexas e ancoragens críticas, sendo comum tanto em veículos de competição quanto em aplicações utilitárias modernas que demandam elevada robustez, confiabilidade estrutural e durabilidade em serviço.

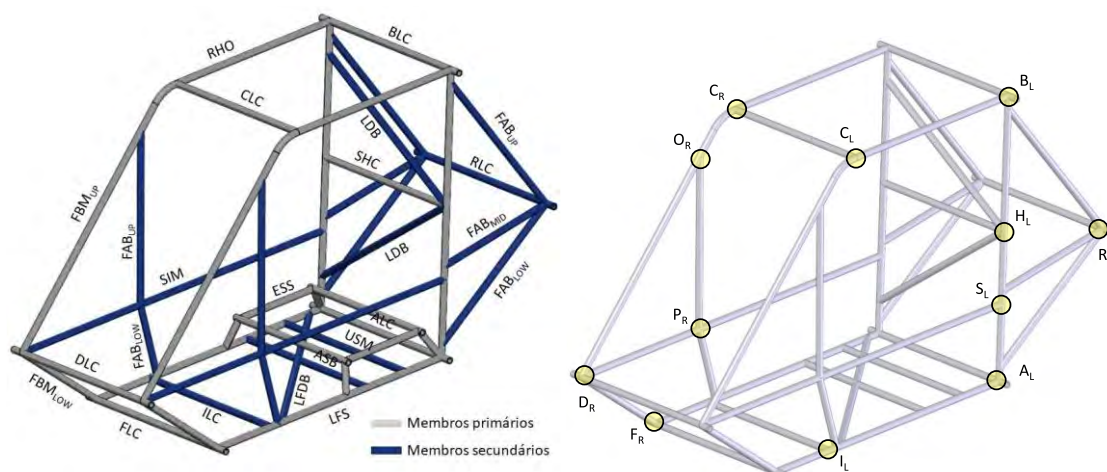
3.1.4. Gaiola de proteção – RATBSB BAJA SAE BRASIL

3.1.4.1. Classificação da geometria

De acordo com o disposto na Seção B6.2 do Regulamento Administrativo e Técnico do Baja SAE Brasil (RATBSB), para que um elemento tubular seja considerado parte integrante da gaiola de proteção (*roll cage*), este deve atender integralmente aos requisitos estabelecidos na Seção B6.2.2. Elementos que não se enquadram nessas exigências são desconsiderados quanto à sua contribuição estrutural para fins de conformidade e segurança.

Conforme definido na Seção B6.2.2 e ilustrado na Figura 3.1, adota-se como referência um chassi off-road do tipo *space frame*, fabricado em aço SAE 1018, no qual os membros da gaiola são classificados em membros primários (identificados em cinza), responsáveis pela integridade estrutural e preservação do espaço de sobrevivência, e membros secundários (identificados em azul), destinados ao travamento, reforço local e controle de deformações.

Figura 3.1 – Membros e Pontos da Gaiola de Proteção



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figuras B-20 e B-21

Os membros primários da gaiola de proteção são classificados de acordo com a nomenclatura e seções normativas do RATBSB, sendo eles: RRH (Seção B6.2.4); RHO (Seção B6.2.7); FBM (Seção B6.2.13); ALC (Seção B6.2.4.4); BLC (Seção B6.2.4.4); FLC (Seção B6.2.8.2); CLC (Seção B6.2.7.3); DLC (Seção B6.2.12.2); LFS (Seção B6.2.8); SHC (Seção B6.2.6); ASB, caso disposto longitudinalmente (B8.5.4.3); ESS, caso veículo 4x4. (Seção B6.2.15).

Os membros secundários são classificados como: LDB (Seção B6.2.5); SIM (Section B6.2.12); FAB (Seção B6.2.14); USM (Seção B6.2.10); ASB, caso disposto transversalmente. (Seção B6.2.11); LFDB (Seção B6.2.9); ILC (Seção B6.2.8.3); RLC – Rear Lateral Cross member. (Seção B6.2.14.4.9).

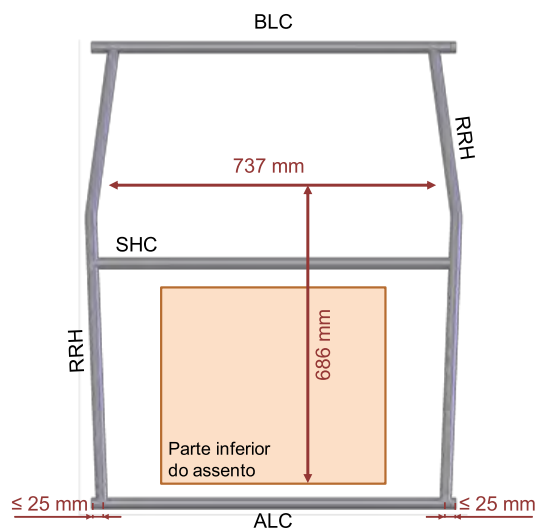
Essa classificação normativa estabelece uma distinção clara entre os elementos responsáveis pela resistência primária da estrutura e aqueles destinados ao reforço, travamento e mitigação de deformações, sendo fundamental para a correta interpretação do comportamento estrutural da gaiola de proteção e para a condução das análises de dimensionamento e validação previstas neste trabalho.

3.1.4.2. Travamentos parede corta-chamas

O arco principal traseiro (RRH), também denominado parede corta-chamas, consiste em um plano estrutural formado por membros posicionados imediatamente atrás do encosto do piloto, conforme ilustrado na Figura 3.2. De acordo com o regulamento, o piloto e o conjunto assento-cintos devem estar completamente posicionados à frente desse plano, de modo a assegurar a integridade da célula de sobrevivência. As dimensões dos membros

estruturais, bem como os espaçamentos entre eles, devem atender rigorosamente às exigências estabelecidas na Seção B6.2.4 do RATBSB.

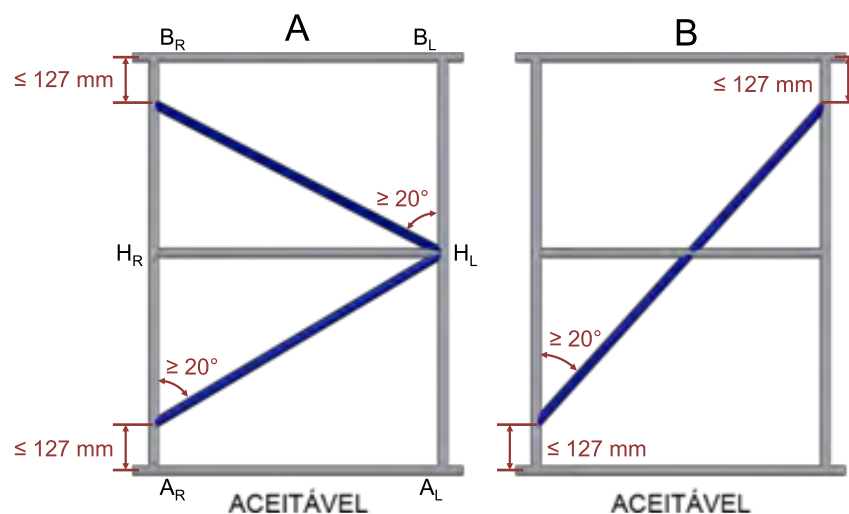
Figura 3.2 – Membros do RRH



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-22

Adicionalmente, o RRH deve ser provido de travamento diagonal, com a finalidade de aumentar a rigidez do plano e evitar mecanismos de deformação por cisalhamento e flambagem. Esse travamento, denominado LDB (Travamento diagonal lateral do arco principal traseiro), deve se estender de um montante vertical do RRH ao outro, conforme apresentado na Figura 3.3. As distâncias entre interseções, bem como os ângulos admissíveis entre os membros, são definidos pela Seção B6.2.5 do RATBSB, devendo ser estritamente observados durante a fase de projeto.

Figura 3.3 – Configurações do travamento LDB

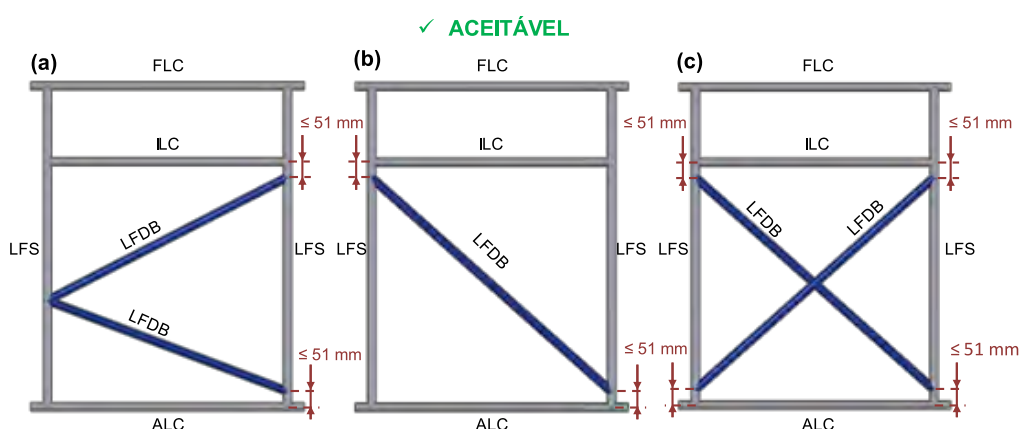


Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-23

3.1.4.3. Travamentos assoalho

De acordo com a Seção B6.2.9 do RATBSB, os membros laterais inferiores do chassi (LFS) devem ser providos de travamento diagonal, com o objetivo de aumentar a rigidez do plano do assoalho e evitar deformações excessivas sob carregamentos combinados. Esse travamento, denominado LFDB, deve se estender de um membro LFS ao outro, conforme as configurações admissíveis apresentadas na Figura 3.4.

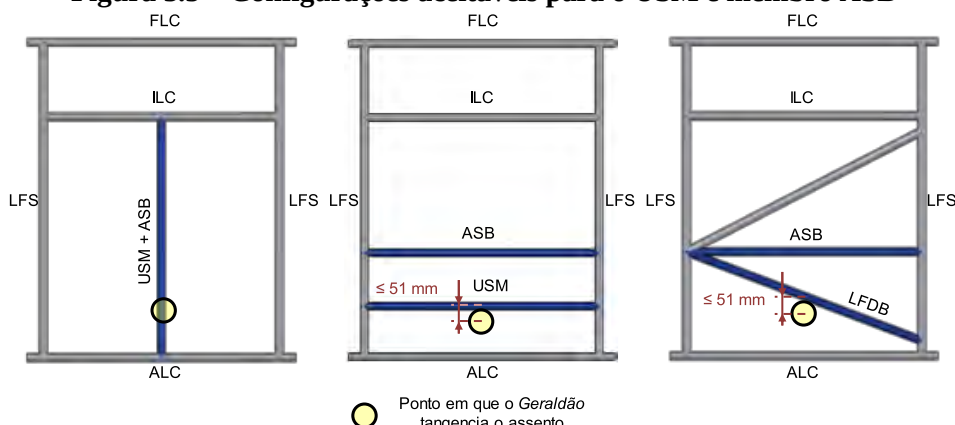
Figura 3.4 – Configurações do travamento LFDB



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-25

De maneira complementar, o plano do assoalho é constituído também pelo membro inferior ao assento (USM), conforme definido na Seção B6.2.10, o qual deve ser posicionado de modo a impedir que o piloto atravesse o plano formado pelos membros LFS no caso de falha do conjunto assento–fixações. Adicionalmente, deve ser incorporado ao plano dos membros LFS o membro de ancoragem do cinto antissubmarino (ASB), conforme estabelecido na Seção B6.2.11, destinado à fixação das tiras antissubmarinas do sistema de segurança. Na Figura 3.5 são ilustradas as configurações permitidas para a disposição dos membros USM e ASB

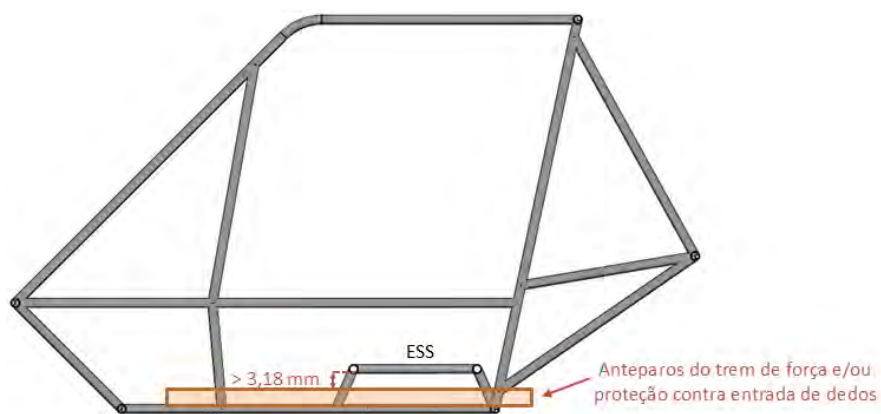
Figura 3.5 – Configurações aceitáveis para o USM e membro ASB



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-26

Conforme disposto na Seção B6.2.15, em veículos com tração nas quatro rodas, nos quais o sistema de transmissão atravessa o interior do cockpit e inviabiliza a fixação direta do assento ao plano do assoalho, o projeto deve contemplar uma elevação do assento, denominada ESS, conforme exemplificado na Figura 3.6.

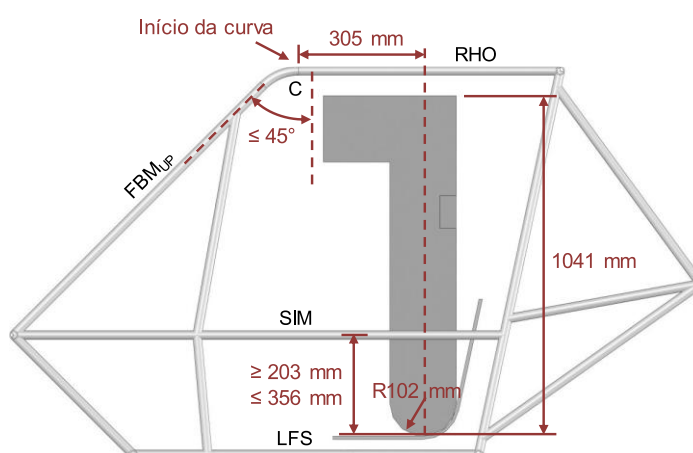
Figura 3.6 – Configuração do ESS



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-30

Em projetos que incorporam o ESS, conforme Seção B6.2.10.5, o USM deve ser conectado à estrutura do ESS. Alternativamente, nos casos em que algum membro do ESS esteja posicionado diretamente abaixo do piloto, de modo que o gabarito apresentado na Figura 3.7 tangencie o assento, com tolerância de até 51 mm à frente desse ponto, a presença do USM torna-se opcional, conforme previsto pelo regulamento.

Figura 3.7 – Alturas dos membros SIM e RHO e posição do ponto C



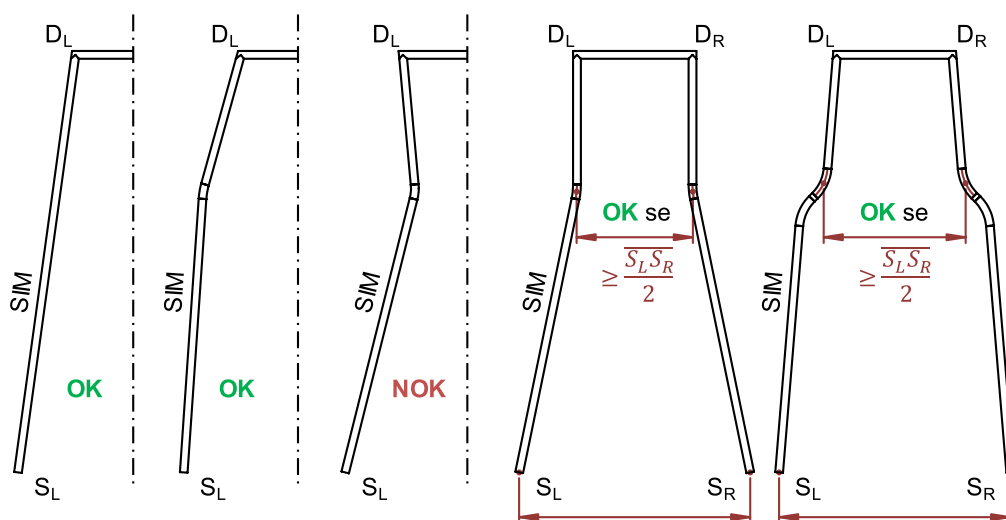
Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-24

3.1.4.4. Plano intermediário do cockpit

Os membros de impacto lateral (SIM) são conectados longitudinalmente ao RRH, definindo o ponto S, e devem se estender, no mínimo, até uma posição à frente dos pés do piloto quando este se encontra em postura normal de pilotagem. As extremidades frontais dos SIM devem ser interligadas por um membro transversal lateral (DLC). A interseção entre os membros SIM e o DLC define os pontos DR e DL, configurando um plano intermediário do cockpit, conforme ilustrado na Figura 3.8.

De acordo com a Seção B6.2.12.3 do RATBSB, os membros SIM devem ser preferencialmente retilíneos, sendo vedada qualquer curvatura que possa resultar em colapso direcionado para o interior do habitáculo. Todavia, o regulamento admite a utilização de dobras estrategicamente posicionadas, desde que não comprometam a integridade estrutural nem a segurança do piloto. Essas dobras podem ser empregadas com o objetivo de otimizar a geometria do cockpit, possibilitando, por exemplo, o aumento do volume interno na região correspondente ao tronco e aos membros superiores, bem como a adequação do espaço destinado aos membros inferiores.

Figura 3.8 – Vista superior dos SIM e configurações aceitáveis e inaceitáveis



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-27

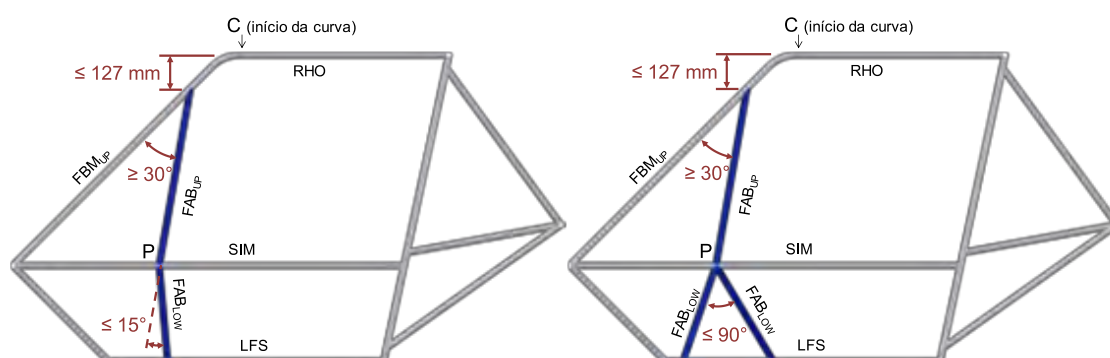
Adicionalmente, a correta configuração geométrica dos SIM pode contribuir para a redução das dimensões frontais do veículo, favorecendo a diminuição de massa estrutural. Embora aspectos aerodinâmicos apresentem influência limitada no desempenho global dos veículos Baja SAE — em função das baixas velocidades médias e das características das provas —, tais considerações podem ser incorporadas como critérios secundários de projeto, desde que respeitadas integralmente as exigências normativas e os requisitos de segurança.

3.1.4.5. Travamentos lateral e traseiro

De acordo com o disposto na Seção B6.2.14 do RATBSB, o veículo deve incorporar ao menos um dos dois sistemas de travamento previstos, destinados a garantir a integridade estrutural da região superior e traseira da gaiola de proteção em eventos de carregamento severo.

- **Travamento dianteiro** – Esse sistema tem como finalidade restringir os deslocamentos longitudinal e vertical de ambos os pontos C, assegurando, de forma indireta, a sustentação dos pontos B por meio dos membros RHO. O regulamento prevê duas configurações admissíveis para esse tipo de travamento, apresentadas na Figura 3.9. As condições geométricas, interseções, dimensões mínimas e ângulos admissíveis são estabelecidos na Seção B6.2.14.3 do RATBSB.

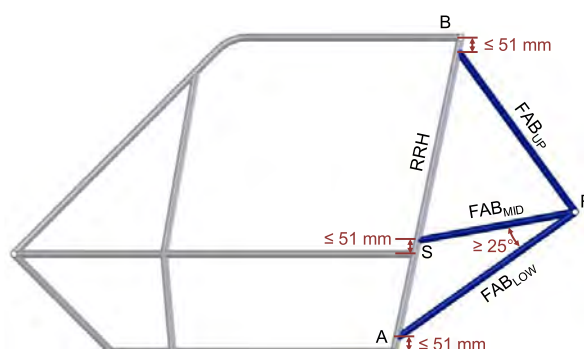
Figura 3.9 – Configurações do travamento dianteiro



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-28

- **Travamento traseiro** – Atua diretamente na restrição dos deslocamentos longitudinais dos pontos B, sendo projetado para manter a integridade estrutural da gaiola no caso de falha das juntas localizadas nos pontos C. As configurações permitidas para esse sistema, bem como os requisitos geométricos e construtivos, estão definidas na Seção B6.2.14.4 do RATBSB, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Configurações do travamento traseiro



Fonte: RATBSB BAJA SAE BRASIL – Emenda 07 – Figura B-29

No contexto das competições nacionais, observa-se a predominância da adoção do travamento dianteiro como solução de projeto. Tal escolha é justificada pela maior disponibilidade de referências técnicas e estudos aplicados que abordam essa configuração, bem como pela consolidação do conhecimento prático acumulado pelas equipes ao longo dos anos, o que contribui para maior previsibilidade construtiva e conformidade normativa.

3.1.4.6. Materiais e cálculos de equivalência

De acordo com o disposto na Seção B6.3.3 do RATBSB, o material empregado nos membros primários da gaiola de proteção deve atender a uma das seguintes especificações:

- A.** Tubo de aço de seção circular, com diâmetro externo de 25,4 mm (1 in) e espessura de parede de 3,05 mm (0,120 in), contendo teor mínimo de carbono de 0,18% em sua composição; ou
- B.** Perfil de aço, de seção circular ou não circular, que apresente rigidez à flexão e resistência à flexão superiores àquelas especificadas para o tubo definido no item (A). Nesse caso, a espessura mínima de parede deve ser igual ou superior a 1,57 mm (0,062 in) e o teor de carbono deve ser igual ou superior a 0,18%, independentemente do material e da geometria da seção transversal utilizada. A rigidez e a resistência à flexão devem ser calculadas em relação à linha neutra da seção, considerando-se os valores mínimos admissíveis.

Para os membros secundários, conforme estabelecido na Seção B6.3.4 do RATBSB, devem ser utilizados tubos com espessura mínima de parede de 0,89 mm (0,035 in), diâmetro externo ou menor dimensão externa, no caso de perfis não circulares, maior ou igual a 25,4 mm (1 in), e teor de carbono mínimo de 0,18%.

Em conformidade com a Seção B6.3.3.2, é permitida a substituição do material especificado para os tubos primários por materiais estruturalmente equivalentes, desde que sejam apresentados cálculos comprobatórios de rigidez suficiente (Seção B6.3.3.2.5) e resistência à flexão (Seção B6.3.3.2.6), demonstrando o atendimento integral às restrições estabelecidas pelo regulamento. Todos os cálculos devem ser realizados em unidades do Sistema Internacional (SI) e apresentados com três algarismos significativos para os valores nominais das dimensões dos tubos, conforme especificado nas respectivas notas fiscais.

Adicionalmente, devem ser fornecidos certificados de material ou laudos laboratoriais que comprovem quantitativamente o teor de carbono, bem como uma tensão limite de escoamento superior ao valor de referência definido na Seção B6.3.3.2.7, correspondente

ao aço SAE 1018, com tensão de escoamento mínima $S_y = 370$ MPa, a qual deve ser devidamente comprovada por documentação técnica idônea.

3.2. Caráter Ergonômico

A análise ergonômica constitui um elemento fundamental no desenvolvimento de chassis tubulares automotivos, uma vez que a geometria da estrutura influencia diretamente a postura do condutor, o acesso aos comandos, a visibilidade, a segurança passiva e o conforto durante a operação do veículo. Em aplicações de competição, como no Baja SAE, embora o desempenho estrutural e a redução de massa sejam requisitos prioritários, a ergonomia do cockpit não pode ser negligenciada, pois está diretamente associada à eficiência operacional, à fadiga do piloto e à segurança em situações críticas.

De acordo com Adams (1993), o chassi deve ser projetado de modo a acomodar o condutor em uma posição funcional e segura, assegurando alinhamento adequado entre volante, pedais e assento, sem comprometer a integridade estrutural da gaiola de proteção. O autor ressalta que decisões geométricas tomadas nas fases iniciais do projeto exercem influência direta sobre a dirigibilidade e sobre a capacidade do piloto de manter o controle do veículo em condições severas de operação.

Sob a perspectiva da engenharia automotiva, Reimpell, Stoll e Betzler (2001) destacam que a ergonomia veicular está intrinsecamente relacionada à arquitetura do chassi, uma vez que esta define os limites físicos do habitáculo e condiciona a disposição dos sistemas de comando, retenção e proteção do ocupante. Em estruturas tubulares, essa relação torna-se ainda mais crítica, visto que os próprios membros estruturais delimitam o volume disponível para o piloto.

Nesse sentido, a disposição dos cintos de segurança, do assento e dos pontos de ancoragem deve atender simultaneamente a critérios ergonômicos e normativos, assegurando que as forças geradas em desacelerações bruscas sejam corretamente transmitidas ao corpo do piloto. Reimpell, Stoll e Betzler (2001) enfatizam que a ergonomia não deve ser tratada como um aspecto isolado, mas como parte integrante do sistema de segurança veicular, em estreita relação com a arquitetura estrutural do chassi.

Adicionalmente, em aplicações off-road, o condutor está sujeito a níveis elevados de vibração e a impactos repetitivos, o que intensifica a importância do correto dimensionamento ergonômico. Uma postura inadequada ou um espaço interno mal dimensionado pode amplificar a percepção das vibrações, acelerar a fadiga muscular e comprometer o desempenho em provas de longa duração.

Dessa forma, o projeto ergonômico do chassi tubular deve buscar minimizar restrições excessivas ao movimento natural do corpo, ao mesmo tempo em que assegura contenção adequada por meio do assento e dos sistemas de retenção. A integração entre ergonomia, rigidez estrutural e posicionamento da suspensão mostra-se essencial para garantir conforto relativo, previsibilidade de condução e controle eficiente do veículo em terrenos irregulares.

3.2.1. Antropometria e definição do envelope do piloto

A análise ergonômica de um chassi tubular deve ser fundamentada em dados antropométricos representativos da população-alvo, de modo a assegurar que o cockpit seja compatível com uma ampla faixa de usuários. Normas e literaturas antropométricas estabelecem dimensões corporais estatísticas, usualmente expressas por percentis, que servem de base para o dimensionamento do espaço interno do veículo.

No contexto da engenharia automotiva, destacam-se normas internacionais amplamente empregadas na definição do espaço interno do veículo, da posição de pilotagem e da interação homem-máquina. Entre essas normas, a SAE J1100 – Motor Vehicle Dimensions estabelece critérios para a definição das dimensões internas do veículo, incluindo referências geométricas associadas ao posicionamento do assento, do volante, dos pedais e dos comandos. A norma define pontos e planos de referência, como o ponto de referência do assento (*Seating Reference Point - SRP*), que servem de base para o dimensionamento do cockpit e para a avaliação da postura do condutor em relação à estrutura do chassi.

Complementarmente, normas internacionais de ergonomia e antropometria, como a ISO 7250 (Dimensões básicas do corpo humano para projeto tecnológico), a ISO 15535 (Requisitos para bases de dados antropométricos) e a DIN 33402 (Antropometria), fornecem dados estatísticos de dimensões corporais organizados por percentis. Esses dados permitem projetar o habitáculo de modo a acomodar uma faixa representativa de usuários, reduzindo riscos de interferência entre o corpo do piloto e os membros estruturais da gaiola de proteção.

No âmbito nacional, normas da ABNT, alinhadas às diretrizes da ISO, reforçam a necessidade de considerar fatores antropométricos e ergonômicos no projeto de sistemas mecânicos e veículos, sobretudo quando há interação direta e contínua entre o operador e a estrutura.

De acordo com a Seção B1.3 do Regulamento Administrativo e Técnico do Baja SAE Brasil (RATBSB), o projeto do veículo deve ser intencionalmente concebido para acomodar condutores pertencentes a uma ampla faixa antropométrica da população, compreendendo

desde o percentil masculino 99%, correspondente a indivíduos com aproximadamente 1,90 m de estatura e 109 kg de massa corporal, até o percentil feminino 1%, com cerca de 1,45 m de estatura e 42 kg de massa corporal. Os percentis de referência adotados pelo regulamento são definidos conforme a ABNT NBR 6068, que estabelece critérios estatísticos para a representação dimensional da população humana.

Nesse contexto, o projeto ergonômico do chassi tubular deve assegurar que o condutor de maior porte seja capaz de se acomodar no cockpit em posição de condução funcional e confortável, atendendo integralmente aos requisitos de segurança impostos pelo regulamento, incluindo o uso simultâneo de todos os equipamentos obrigatórios e o respeito às distâncias mínimas em relação aos membros da gaiola de proteção. De modo análogo, o condutor de menor porte deve ser capaz de alcançar e acionar confortavelmente todos os comandos do veículo.

3.2.2. Avaliação de conforto

A postura adotada pelo piloto influencia diretamente o nível de conforto, a capacidade de controle do veículo e a resposta a estímulos dinâmicos. Em veículos off-road, é desejável uma postura que proporcione apoio lombar adequado, distribuição equilibrada das cargas no assento e posicionamento dos membros inferiores que permita atuação eficiente nos pedais, mesmo sob condições de vibração e impacto.

Adams (1993) destaca que a inclinação do assento, a altura relativa do volante e a posição dos pedais devem ser projetadas de forma integrada ao chassi, evitando posturas extremas que aumentem a fadiga muscular ou reduzam a precisão dos comandos. Em estruturas tubulares, a posição desses elementos é frequentemente condicionada pela geometria dos arcos, montantes e travamentos, reforçando a necessidade de integração entre análise ergonômica e projeto estrutural.

A avaliação do conforto e da postura do piloto pode ser realizada por meio do método RULA (*Rapid Upper Limb Assessment* – Avaliação Rápida dos Membros Superiores), amplamente empregado na análise ergonômica para estimar o nível de esforço postural e o risco potencial de desconforto ou lesões musculoesqueléticas. Embora o método tenha sido originalmente desenvolvido com foco predominante nos membros superiores, sua aplicação contempla também a avaliação do tronco, do pescoço e dos membros inferiores, os quais atuam como fatores de ajuste na pontuação final e permitem uma apreciação global da postura adotada.

No contexto do chassi tubular, o método RULA apresenta caráter qualitativo e complementar, possibilitando a análise da postura do piloto a partir da posição relativa do assento, do volante e dos pedais. Essa abordagem permite identificar ângulos articulares desfavoráveis, assimetrias posturais e configurações que possam resultar em sobrecargas localizadas durante a condução. Apesar de sua origem em ambientes industriais, a literatura reconhece a aplicabilidade do método em avaliações preliminares de postos de trabalho sentados, especialmente quando associados a condições de vibração e esforços repetitivos, como ocorre em veículos de competição off-road.

A integração do método RULA ao projeto ergonômico do chassi tubular, em conjunto com normas de dimensionamento veicular e dados antropométricos, possibilita ajustes finos na geometria do cockpit, tais como a inclinação do encosto do assento, a altura e o recuo do volante e o posicionamento dos pedais. Dessa forma, o método contribui para a redução da fadiga do piloto e para a melhoria da eficiência operacional, sem substituir análises geométricas normativas, mas atuando como ferramenta de suporte à tomada de decisão no processo de projeto.

3.3. Análise estrutural aplicada a chassis tubulares

Em veículos de competição, o chassi e, em particular, a gaiola de proteção, devem atender simultaneamente a requisitos de segurança, rigidez estrutural e massa reduzida, uma vez que o desempenho dinâmico depende diretamente do controle das deformações estruturais sob os carregamentos impostos pela suspensão, pelo trem de força e pelas excitações provenientes do terreno. A literatura especializada em chassi automotivo destaca que a rigidez global da estrutura influencia o alinhamento relativo dos pontos de ancoragem da suspensão, a repetibilidade da geometria e a previsibilidade da resposta do veículo, especialmente em regimes de aceleração lateral e em manobras transitórias (ADAMS, 1993; REIMPPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

No contexto off-road, o espectro de carregamentos caracteriza-se por elevada variabilidade e severidade, incluindo impactos e solicitações assimétricas, o que reforça a necessidade de avaliar não apenas a resistência estática, mas também efeitos associados à flexão, torção, vibração e fadiga. A integração entre rigidez estrutural e comportamento dinâmico é amplamente discutida na literatura de dinâmica veicular, na qual a compliance estrutural pode alterar a distribuição de transferência lateral de carga e influenciar a capacidade de controle do veículo (GILLESPIE, 1992; WONG, 2008; MILLIKEN, 1995).

Do ponto de vista mecânico, a análise estrutural fundamenta-se nos princípios da resistência dos materiais, abrangendo a avaliação de tensões normais e cisalhantes, deformações, estabilidade elástica e concentração de tensões em descontinuidades geométricas e regiões de união, como nós estruturais e juntas soldadas (BEER et al., 2015; HIBBELER, 2017). Em estruturas tubulares, a rigidez e a resistência são fortemente condicionadas pela geometria — incluindo comprimentos livres, triangulações e continuidade dos caminhos de carga — tornando indispensável o uso de ferramentas numéricas capazes de representar adequadamente o acoplamento entre membros e as condições de contorno do sistema (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016; NORTON, 2014).

3.3.1. Método dos elementos finitos na validação estrutural

O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma das abordagens mais consolidadas para a avaliação numérica de estruturas complexas, permitindo aproximar o comportamento contínuo de sólidos por meio da discretização do domínio em um conjunto finito de elementos interligados por nós. A formulação do método fundamenta-se nas equações de equilíbrio estático ou dinâmico, nas relações constitutivas dos materiais e nas condições de compatibilidade cinemática, resultando em um sistema algébrico que fornece deslocamentos nodais e, por derivação, campos de deformações e tensões ao longo do domínio analisado (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2013; BATHE, 1996).

Em aplicações automotivas, o MEF é amplamente empregado para a estimativa da rigidez torcional, da distribuição de tensões, dos modos de deformação e da identificação de regiões críticas associadas a concentrações de tensão. A confiabilidade das previsões obtidas está diretamente relacionada às decisões de modelagem adotadas, incluindo a seleção do tipo de elemento (viga, casca ou sólido), a estratégia de discretização da malha, a definição adequada das propriedades dos materiais, a representação de contatos e, sobretudo, a correta modelagem das condições de contorno e dos carregamentos aplicados (COOK et al., 2002; LOGAN, 2016).

No caso de chassis tubulares, é recorrente a utilização de elementos de viga ou casca, os quais permitem representar de forma eficiente o comportamento global da estrutura com reduzido custo computacional, desde que a geometria, as seções transversais e as restrições de ligação sejam capazes de reproduzir adequadamente a transferência de esforços nos nós estruturais. Em análises de rigidez, a comparação entre diferentes configurações geométricas pode ser realizada por meio de métricas como a rigidez torcional ($N \cdot m/^\circ$), definida pela razão entre o momento aplicado e a rotação angular resultante obtida no modelo, possibilitando a identificação de caminhos de carga dominantes e de mecanismos globais de deformação.

Ressalta-se, contudo, que a validade dos resultados depende da verificação da sensibilidade da resposta à malha e da coerência física das hipóteses de modelagem adotadas, conforme amplamente discutido na literatura clássica do método (BATHE, 1996; COOK et al., 2002).

3.3.2. Resposta dinâmica, vibrações e implicações estruturais

Além da resistência e rigidez estática, estruturas veiculares estão sujeitas a excitações dinâmicas provenientes do terreno e da operação, de modo que a resposta vibratória pode amplificar tensões e acelerar mecanismos de dano. A teoria de vibrações destaca que a proximidade entre frequências de excitação e frequências naturais pode induzir ressonância, elevando deslocamentos e tensões alternadas, o que se torna crítico em estruturas tubulares com múltiplos modos globais e locais (INMAN, 2014; RAO, 2017; MEIROVITCH, 2001).

Assim, a avaliação estrutural pode incluir, quando pertinente, análises modais e considerações de amortecimento estrutural, visando afastar frequências naturais de faixas de excitação predominantes e reduzir a probabilidade de amplificação dinâmica. Em projetos automotivos, esses aspectos se conectam diretamente ao desempenho e à confiabilidade, pois deformações estruturais influenciam também a consistência da geometria de suspensão e, consequentemente, a resposta dinâmica do veículo (GILLESPIE, 1992; MILLIKEN, 1995).

3.3.3. Análises estruturais aplicadas a protótipos Baja SAE

A validação estrutural de um chassi tubular destinado a veículos off-road do tipo Baja SAE requer uma abordagem integrada, capaz de avaliar não apenas a rigidez global da estrutura, mas também sua resistência, estabilidade e comportamento dinâmico sob as diversas condições de carregamento impostas durante a operação. A literatura de engenharia automotiva e de projeto estrutural enfatiza que nenhuma análise isolada é suficiente para caracterizar adequadamente o desempenho estrutural de um chassi, sendo necessária a combinação de diferentes métodos de avaliação numérica e experimental (ADAMS, 1993; REIMPPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

Nesse contexto, as principais análises estruturais aplicáveis ao desenvolvimento e validação de chassis tubulares são apresentadas a seguir.

3.3.3.1. Rigidez torcional (*Torsional stiffness*)

A rigidez torcional do chassi é definida como a razão entre o momento torsor aplicado à estrutura e a rotação angular resultante entre duas seções de referência, sendo usualmente expressa em $N \cdot m/^\circ$. Essa propriedade é considerada um dos principais parâmetros estruturais em veículos de competição, pois a deformabilidade do chassi pode introduzir

compliance estrutural adicional ao sistema veículo–suspensão, afetando a previsibilidade da resposta dinâmica e a transferência lateral de carga (GILLESPIE, 1992; MILLIKEN, 1995).

Na avaliação numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a rigidez torcional é comumente determinada pela aplicação de um binário de forças nos flanges dianteiros do chassi, mantendo-se a extremidade traseira rigidamente fixada. Para isolar a resposta estrutural, os elementos elásticos da suspensão são frequentemente representados como barras rígidas. A rotação angular é obtida a partir dos deslocamentos verticais relativos em pontos simétricos do eixo de aplicação da carga, permitindo o cálculo direto da rigidez torcional pela razão entre o momento aplicado e a rotação resultante (COOK et al., 2002; LOGAN, 2016). Esse procedimento apresenta boa eficiência computacional e adequada representação do comportamento global da estrutura.

O procedimento experimental de determinação da rigidez torcional busca reproduzir as mesmas condições impostas no modelo numérico, aplicando-se um binário conhecido na extremidade dianteira do chassi e restringindo-se a extremidade oposta. A rotação é obtida por medições de deslocamento em pontos simétricos, utilizando instrumentos de medição linear ou sistemas ópticos, sendo posteriormente convertida em ângulo por relações geométricas. Sampo et al. (2010) demonstram que a adoção desse método permite elevada correlação entre resultados numéricos e experimentais, com diferenças da ordem de poucos pontos percentuais quando as condições de contorno são adequadamente representadas.

A validação do modelo numérico é realizada pela comparação direta entre os valores de rigidez torcional obtidos experimentalmente e numericamente. De acordo com Sampo et al. (2010), diferenças inferiores a 5% indicam boa representatividade do modelo. Além disso, a interpretação do valor obtido deve considerar a relação entre a rigidez torcional do chassi e a rigidez de rolagem da suspensão, parâmetro amplamente discutido por Deakin et al. (2000). Segundo esses autores, relações superiores a 10:1 indicam que a deformação do chassi exerce influência limitada sobre a transferência lateral de carga, garantindo que os ajustes de suspensão sejam dominantes no controle do balanço dinâmico do veículo.

3.3.3.2. Análise modal

A análise modal tem como objetivo determinar as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura, os quais descrevem a forma como está tende a vibrar quando submetida a excitações dinâmicas. Em termos teóricos, a análise modal baseia-se na solução do problema de autovalores do sistema estrutural, obtido a partir das matrizes de massa e

rigidez, permitindo identificar os modos próprios e suas respectivas frequências naturais (MEIROVITCH, 2001; INMAN, 2014). Esses parâmetros são fundamentais para a avaliação da resposta dinâmica e para a prevenção de fenômenos de ressonância.

- **Análise modal de corpo livre (*Free-free modal analysis*)**

Na análise modal de corpo livre, a estrutura é avaliada sem a imposição de quaisquer vínculos ou restrições externas, representando uma condição idealizada em que o corpo não está conectado a apoios, massas concentradas ou interfaces estruturais. Nessas condições, o sistema apresenta seis modos de corpo rígido com frequência nula (ou numericamente próxima de zero), correspondentes a três modos de translação e três modos de rotação. Esses modos não estão associados a deformações estruturais, mas ao movimento global do corpo no espaço (BATHE, 1996; ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2013).

A partir do sétimo modo, passam a ser observados os modos deformacionais, relacionados à flexão, torção e combinações desses mecanismos. A análise modal de corpo livre é amplamente utilizada como uma etapa de verificação do modelo numérico, permitindo identificar inconsistências de conectividade, problemas de contato, falhas de malha ou instabilidades numéricas. Por essa razão, a literatura recomenda sua aplicação preliminar antes da realização de análises estruturais ou dinâmicas mais complexas (COOK et al., 2002; LOGAN, 2016).

- **Análise modal com vinculações (*Constrained modal analysis*)**

Na análise modal com vinculações, o modelo passa a incorporar condições de contorno representativas da aplicação real, tais como restrições nos pontos de fixação da suspensão, apoios estruturais e massas concentradas associadas ao piloto, motor e demais componentes. Nessa configuração, os modos de corpo rígido deixam de existir, e as primeiras frequências naturais passam a representar diretamente modos deformacionais da estrutura (INMAN, 2014; RAO, 2017).

Esse tipo de análise permite uma aproximação mais fiel do comportamento dinâmico do chassi em operação, sendo especialmente relevante para identificar possíveis coincidências entre frequências naturais e frequências de excitação oriundas do terreno, do sistema de suspensão ou do conjunto motopropulsor. A correta representação das vinculações é essencial para garantir a validade dos resultados, uma

vez que pequenas variações nas condições de contorno podem alterar significativamente os modos e frequências obtidos (BATHE, 1996).

No caso de chassis tubulares de veículos off-road, a análise modal permite identificar modos globais de flexão e torção, bem como avaliar a separação entre as frequências naturais da estrutura e o espectro típico de excitações impostas pelo terreno. Estruturas com frequências naturais excessivamente baixas tendem a apresentar maiores amplitudes vibratórias, elevando tensões alternadas e reduzindo a vida em fadiga (INMAN, 2014; MEIROVITCH, 2001).

A comparação entre os resultados da análise modal de corpo livre e da análise modal com vinculações fornece subsídios importantes para o processo de projeto, permitindo avaliar a coerência do modelo numérico e a influência das condições reais de aplicação sobre o comportamento dinâmico do chassi. Cabe ao projetista interpretar a relevância dos modos identificados, considerando as faixas de frequência associadas à operação do veículo e os critérios de desempenho estrutural e confiabilidade definidos para o projeto (RAO, 2017; SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016).

3.3.3.3. Análise estática linear (análise de resistência)

A análise estática linear tem como objetivo avaliar o estado de tensões e deformações desenvolvido em uma estrutura quando submetida a carregamentos representativos das condições de serviço, assumindo comportamento elástico linear dos materiais e pequenas deformações geométricas. Nessa abordagem, estabelece-se uma relação linear entre tensões e deformações, descrita pelas leis constitutivas do material, permitindo a aplicação direta dos princípios da resistência dos materiais para a verificação estrutural (BEER et al., 2015; HIBBELER, 2017).

Essa análise possibilita a determinação dos campos de tensões normais e cisalhantes, bem como dos deslocamentos globais e locais da estrutura, fornecendo subsídios para verificar se as tensões máximas permanecem inferiores ao limite de escoamento do material adotado e se os níveis de deformação atendem aos critérios de segurança, funcionalidade e integridade estrutural estabelecidos no projeto. Além disso, a avaliação dos deslocamentos é fundamental para assegurar a compatibilidade geométrica entre componentes, evitando interferências, desalinhamentos e perdas de desempenho associadas à deformabilidade excessiva da estrutura.

Em veículos Baja SAE, a análise estática linear assume papel central na avaliação de regiões estruturalmente críticas, tais como nós estruturais, pontos de ancoragem da suspensão, interfaces de soldagem e membros primários da gaiola de proteção. Essas regiões concentram esforços significativos devido à combinação de carregamentos verticais, laterais e longitudinais impostos durante a operação off-road, sendo particularmente suscetíveis a concentrações de tensão decorrentes de descontinuidades geométricas e variações de rigidez local.

A literatura de projeto de máquinas e estruturas mecânicas ressalta que a análise de tensões constitui etapa indispensável para o dimensionamento adequado dos componentes estruturais, permitindo a definição de fatores de segurança compatíveis com a severidade e a variabilidade dos carregamentos aplicados. Em aplicações sujeitas a incertezas elevadas, como no caso do Baja SAE, a adoção de fatores de segurança coerentes contribui para mitigar riscos associados a variações de fabricação, imperfeições geométricas e simplificações inerentes ao modelo numérico (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016).

Embora a análise estática linear não represente explicitamente fenômenos não lineares, como plastificação ou grandes deslocamentos, ela fornece uma base consistente para a identificação de regiões críticas e para a comparação entre diferentes configurações geométricas, sendo amplamente empregada como etapa inicial no processo de validação estrutural de chassis tubulares.

3.3.3.4. Análise de flambagem (instabilidade estrutural)

A análise de flambagem é empregada para avaliar a estabilidade elástica de membros estruturais submetidos predominantemente a esforços de compressão ou a estados combinados de flexo-compressão, nos quais pequenas imperfeições geométricas ou desvios de alinhamento podem conduzir a perdas abruptas de capacidade resistente. Diferentemente das análises baseadas apenas em critérios de resistência do material, a flambagem está associada a um fenômeno de instabilidade, no qual a estrutura pode entrar em colapso mesmo quando as tensões permanecem abaixo do limite de escoamento (BEER et al., 2015; HIBBELER, 2017).

Estruturas tubulares, como as gaiolas de proteção de veículos off-road, apresentam elevada razão de esbeltez, característica que as torna particularmente suscetíveis a esse tipo de instabilidade. Além disso, imperfeições geométricas inerentes aos processos de fabricação, como variações dimensionais, ovalização dos tubos e desalinhamentos em

juntas soldadas, reduzem a carga crítica teórica e reforçam a necessidade de avaliações específicas de flambagem no processo de projeto (HIBBELER, 2017).

No contexto de veículos Baja SAE, situações como capotamentos, impactos verticais e carregamentos assimétricos impostos pelo terreno podem gerar esforços compressivos significativos nos arcos principais, montantes e membros longitudinais da gaiola de proteção. Nesses cenários, a análise de flambagem constitui um complemento fundamental à análise estática linear, permitindo avaliar a estabilidade dos membros estruturais sob condições críticas de carregamento e identificar possíveis mecanismos de colapso por instabilidade global ou local.

A determinação das cargas críticas de flambagem, seja por formulações analíticas simplificadas ou por meio de análises numéricas via Método dos Elementos Finitos, fornece subsídios importantes para a definição de margens de segurança adicionais e para a tomada de decisões de projeto relacionadas à seleção de seções transversais, comprimentos livres entre nós, disposição geométrica dos membros e estratégias de triangulação. Conforme destacado na literatura de projeto de componentes mecânicos, a consideração adequada dos fenômenos de instabilidade contribui de forma decisiva para o aumento da robustez e da confiabilidade estrutural de sistemas submetidos a carregamentos severos e imprevisíveis, como é o caso de veículos Baja SAE (JUVINALL; MARSHEK, 2016).

3.3.3.5. Análise de fadiga

A análise de fadiga tem como objetivo avaliar a vida útil da estrutura quando submetida a carregamentos cíclicos ou variáveis no tempo, típicos de aplicações off-road. Diferentemente das análises baseadas em carregamentos estáticos, a fadiga está associada à nucleação e à propagação progressiva de trincas sob níveis de tensão inferiores ao limite de escoamento do material, podendo culminar em falhas abruptas após um determinado número de ciclos (SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016).

No contexto do Baja SAE, o espectro de excitações é caracterizado por irregularidades do terreno, impactos repetitivos, vibração contínua e variações rápidas de carga impostas pelo sistema de suspensão e pelo contato pneu-solo. Essas condições geram tensões alternadas significativas, sobretudo em regiões de concentração de tensão, como nós estruturais, mudanças de seção e juntas soldadas, que constituem locais preferenciais para o início de trincas por fadiga. A presença de soldas é particularmente crítica, uma vez que descontinuidades geométricas, tensões residuais e alterações microestruturais decorrentes do processo de soldagem tendem a reduzir a resistência à fadiga do conjunto estrutural.

Embora análises completas de fadiga exijam, em geral, a definição detalhada do histórico de carregamento, propriedades específicas do material e dados experimentais representativos, a literatura de projeto mecânico recomenda, no mínimo, a realização de avaliações qualitativas ou simplificadas durante a fase de projeto. Essas avaliações podem considerar parâmetros como o nível de tensões alternadas obtidas por análises estáticas ou dinâmicas, o acabamento superficial dos componentes, a qualidade e o tipo de junta soldada, bem como fatores de concentração de tensão associados à geometria (NORTON, 2014; ASM HANDBOOK, 2015).

A incorporação de critérios de fadiga, ainda que de forma simplificada, contribui para a identificação de regiões críticas, para o aprimoramento da geometria estrutural e para a definição de práticas construtivas mais adequadas, aumentando a confiabilidade e a durabilidade do chassi ao longo de sua vida em serviço. Em veículos Baja SAE, nos quais a ocorrência de carregamentos cíclicos severos é inerente à aplicação, essa análise representa um complemento importante às avaliações de resistência estática, rigidez e estabilidade estrutural.

3.3.4. Ensaios experimentais e correlação com o modelo numérico

A validação do modelo numérico requer a realização de ensaios experimentais capazes de reproduzir, de forma controlada, as condições de carregamento e restrição representadas no MEF. Em termos de metodologia, a correlação entre experimento e simulação fundamenta-se na comparação de grandezas equivalentes, como deslocamentos em pontos de referência, campos de deformação (quando disponível) e rigidez global estimada a partir de relações força–deslocamento ou momento–rotação. A literatura de projeto de máquinas e resistência dos materiais reforça que modelos teóricos e numéricos devem ser confrontados com medições para reduzir incertezas e elevar a confiabilidade do dimensionamento, sobretudo em estruturas com múltiplas ligações e complexidade geométrica (HIBBELER, 2017; SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016).

No caso de chassis tubulares, ensaios de rigidez torcional e rigidez à flexão são frequentemente adotados por sua capacidade de caracterizar o comportamento global da estrutura e evidenciar a efetividade de triangulações, travamentos e continuidade de caminhos de carga. A partir da correlação experimental, é possível calibrar hipóteses do modelo, tais como condições de contorno, rigidez de ligações e simplificações geométricas, reduzindo discrepâncias e fortalecendo a validade dos resultados obtidos via MEF (LOGAN, 2016; COOK et al., 2002).

3.4. Processos de conformação

Os métodos de conformação mecânica aplicados à fabricação de chassis tubulares podem ser classificados, de forma geral, em processos convencionais e processos automatizados, conforme o nível de mecanização, controle dimensional e repetibilidade envolvidos. Essa distinção está diretamente relacionada à escala de produção, aos requisitos de precisão geométrica e aos recursos tecnológicos disponíveis no ambiente fabril (DIETER, 1981; GROOVER, 2020).

Os processos convencionais caracterizam-se pela execução predominantemente manual ou semiautomatizada, com o auxílio de ferramentas e equipamentos de operação direta, como serras, esmerilhadeiras, calandras manuais e gabaritos de dobra. Tais métodos são amplamente empregados na manufatura de protótipos, em produções de baixo volume e em contextos acadêmicos ou artesanais, nos quais a flexibilidade de fabricação e o baixo investimento inicial são fatores determinantes. No entanto, esses processos tendem a apresentar maior variabilidade dimensional, exigindo margens adicionais de ajuste e retrabalho para assegurar o correto acoplamento entre os membros estruturais (ADAMS, 1993; REIMPPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

Entre os principais processos convencionais aplicados a chassis tubulares destacam-se: o corte por esmerilhamento ou serragem, geralmente realizado com a previsão de sobremetal para compensar imprecisões geométricas; a dobra a frio em calandras manuais, limitada por raios mínimos de curvatura e pela resistência do material; a dobra a quente, frequentemente associada ao enchimento interno do tubo com areia ou material granular, visando reduzir ovalização e instabilidades locais; e os ajustes geométricos das extremidades dos tubos (coping ou “boca de lobo”), necessários para garantir adequado contato nas juntas soldadas. Complementarmente, procedimentos de preparação superficial, como esmerilhamento, lixamento e limpeza interna e externa das regiões a serem soldadas, são indispensáveis para a remoção de óxidos, óleos, graxas e outros contaminantes que possam comprometer a qualidade metalúrgica da solda (DIETER, 1981; SHIGLEY; MISHKE; BUDYNAS, 2016).

Por sua vez, os processos automatizados são caracterizados pelo emprego de equipamentos controlados por sistemas CNC (Comando Numérico Computadorizado), os quais permitem maior controle geométrico, repetibilidade e precisão dimensional. Nessas condições, o corte convencional pode ser substituído por corte a laser ou plasma, capazes de produzir geometrias complexas com elevada qualidade de acabamento e tolerâncias mais restritas, reduzindo ou eliminando a necessidade de sobremetal e retrabalho posterior. De forma análoga,

as operações de dobra em máquinas CNC possibilitam o controle rigoroso de ângulos, raios e rotações no espaço, assegurando maior conformidade com o modelo de projeto e menor dispersão geométrica entre componentes fabricados (GROOVER, 2020; NORTON, 2014).

Em síntese, enquanto os processos convencionais apresentam vantagens associadas à flexibilidade e ao baixo custo inicial, os processos automatizados destacam-se pela maior precisão, repetibilidade e controle dimensional, sendo mais adequados a produções seriadas ou a aplicações que exigem elevado rigor geométrico. A escolha do método de conformação deve, portanto, considerar o volume de produção, os requisitos estruturais do chassi, as tolerâncias admissíveis e as limitações econômicas do projeto, conforme amplamente discutido na literatura de projeto e manufatura de chassis tubulares (ADAMS, 1993; REIMPPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

3.5. Soldagem

A soldagem constitui um processo de união permanente entre dois ou mais materiais, realizado por meio da aplicação de calor, pressão ou pela combinação de ambos, com ou sem adição de material. Trata-se de um dos principais processos de fabricação empregados na indústria moderna, abrangendo setores como metalurgia, construção civil, manutenção mecânica, transporte e, de forma destacada, a fabricação de estruturas automotivas. Em estruturas tubulares, como chassis e gaiolas de proteção, a soldagem exerce papel determinante na integridade estrutural, uma vez que os esforços mecânicos são transmitidos majoritariamente por meio das juntas soldadas.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2017), a soldagem apresenta elevada versatilidade tecnológica, permitindo a união de materiais metálicos com diferentes composições químicas, espessuras e geometrias, desde que sejam observados critérios adequados de projeto, seleção de processo e controle metalúrgico. Em aplicações estruturais, a qualidade da solda influencia diretamente a resistência estática, o comportamento em fadiga e a confiabilidade da estrutura ao longo da vida em serviço.

Segundo a American Welding Society (AWS), os processos de soldagem podem ser classificados em função da fonte de energia empregada, do tipo de proteção do arco e da forma de alimentação do material de adição. No contexto de chassis tubulares automotivos, destacam-se os principais processos descritos a seguir.

3.5.1. Soldagem TIG (GTAW)

A soldagem TIG utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio, com proteção gasosa inerte, normalmente argônio (Ar) ou hélio (He). O processo pode ser realizado com ou sem adição de material, oferecendo elevado controle do arco, da poça de fusão e do perfil do cordão de solda. Segundo Kou (2003) e Lancaster (1999), o processo GTAW apresenta excelente qualidade metalúrgica, baixo nível de respingos e controle preciso do aporte térmico, sendo indicado para aplicações que exigem alta integridade estrutural. Em chassis tubulares, a soldagem TIG é frequentemente empregada em regiões críticas da gaiola de proteção, especialmente quando se utilizam aços de baixa liga ou materiais de alta resistência, nos quais o controle da microestrutura e das tensões residuais é fundamental.

3.5.2. Soldagem MIG/MAG (GMAW)

A soldagem MIG/MAG caracteriza-se pelo uso de um arame contínuo como eletrodo consumível, alimentado automaticamente, associado a um gás de proteção. A distinção entre MIG e MAG está relacionada ao tipo de gás empregado:

- **MIG (Metal Inert Gas)** – utiliza gases inertes, como argônio ou hélio, que não reagem quimicamente com a poça de fusão. É amplamente aplicado na soldagem de alumínio, magnésio e ligas não ferrosas, proporcionando boa estabilidade do arco e elevada qualidade superficial.
- **MAG (Metal Active Gas)** – emprega gases ativos, como CO₂ ou misturas Ar+CO₂, que interagem com a poça de fusão, influenciando a penetração e o modo de transferência metálica. Trata-se do processo mais utilizado na soldagem de aços carbono e aços estruturais, devido à elevada produtividade e boa repetibilidade.

Marques, Modenesi e Bracarense (2017) ressaltam que o processo GMAW apresenta elevada eficiência produtiva, porém exige controle rigoroso de parâmetros, preparação adequada das juntas e proteção contra contaminações, sobretudo em estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos.

3.5.3. Soldagem por arco pulsado (Pulsed arc welding)

A soldagem por arco pulsado consiste em uma variação dos processos de soldagem por arco elétrico, na qual a corrente de soldagem não é mantida constante, mas modulada ciclicamente entre dois níveis distintos: um nível de corrente de pico e um nível de corrente de base. Essa modulação controlada permite maior estabilidade do arco e controle preciso da

transferência metálica, sendo amplamente empregada em processos como TIG pulsado (GTAW-P) e MIG/MAG pulsado (GMAW-P).

De acordo com Kou (2003), o princípio fundamental da soldagem pulsada é desacoplar a transferência de metal do aporte térmico médio, permitindo que a transferência do metal de adição ocorra durante os pulsos de corrente elevada, enquanto a manutenção do arco e o resfriamento parcial da poça de fusão são garantidos durante o período de corrente de base.

Em chassis tubulares automotivos, especialmente aqueles destinados a competições como o Baja SAE, a soldagem por arco pulsado é amplamente empregada em regiões críticas da gaiola de proteção e em nós estruturais com múltiplas interseções. Sua utilização permite atender simultaneamente aos requisitos de resistência estrutural, controle dimensional e qualidade metalúrgica, além de facilitar a conformidade com regulamentos técnicos que exigem elevado padrão de execução das soldas.

3.5.3.1. Controle das variáveis no arco pulsado

O comportamento do processo de soldagem por arco pulsado é determinado por um conjunto de variáveis controláveis, entre as quais se destacam:

- **Corrente de pico (I_p)** – responsável pela fusão do metal base e pela transferência do metal de adição. Valores adequados de corrente de pico permitem transferência controlada, frequentemente no modo “uma gota por pulso”;
- **Corrente de base (I_b)** – mantém o arco elétrico estável entre os pulsos, reduzindo o aporte térmico médio e permitindo a solidificação parcial da poça de fusão;
- **Frequência de pulso** – define o número de ciclos por segundo e influencia diretamente a estabilidade do arco, a forma do cordão e o controle da poça;
- **Razão entre tempos de pico e base (*duty cycle*)** – controla o balanço entre fusão e resfriamento, impactando diretamente o perfil térmico da junta.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017), o ajuste adequado dessas variáveis possibilita controle refinado do processo, reduzindo respingos, melhorando a penetração e assegurando repetibilidade geométrica do cordão.

3.5.3.2. Soldagem por arco pulsado em tubos de parede fina

A aplicação do arco pulsado apresenta vantagens particularmente relevantes na soldagem de tubos de parede fina, comuns em chassis tubulares e gaiolas de proteção automotivas. Entre os principais benefícios, destacam-se:

- **Redução do aporte térmico médio** – a alternância entre corrente de pico e base limita o aquecimento excessivo do material, reduzindo o risco de perfuração, colapso da parede e distorções geométricas, fenômenos críticos em tubos de pequena espessura;
- **Maior controle da poça de fusão** – o resfriamento parcial durante a corrente de base aumenta a estabilidade dimensional do cordão, facilitando o controle da soldagem em posições não planas e em geometrias complexas;
- **Menor extensão da zona termicamente afetada (ZTA)** – conforme destacado por Lancaster (1999), a redução do aporte térmico contribui para limitar alterações microestruturais indesejadas, preservando a resistência mecânica e a tenacidade do material base;
- **Melhoria do desempenho em fadiga** – cordões com perfil mais uniforme e menor concentração de tensões residuais tendem a apresentar comportamento superior sob carregamentos cíclicos, aspecto particularmente relevante em estruturas submetidas a vibração e impactos repetitivos;
- **Maior qualidade superficial e menor necessidade de retrabalho** – a estabilidade do arco pulsado reduz respingos e irregularidades do cordão, o que contribui para melhor acabamento e maior previsibilidade estrutural.

Kou (2003) ressalta que, em aplicações estruturais sensíveis ao calor, como tubos de parede fina, a soldagem por arco pulsado representa uma solução tecnológica avançada para conciliar qualidade metalúrgica, controle dimensional e eficiência produtiva.

3.5.4. Juntas e chanfros de soldagem

3.5.4.1. Juntas de soldagem em estruturas tubulares

As juntas de soldagem correspondem às regiões onde dois ou mais componentes são unidos por meio do processo de soldagem, constituindo zonas críticas do ponto de vista estrutural. Em chassis tubulares, as juntas assumem papel fundamental, uma vez que os esforços mecânicos são transmitidos entre os membros estruturais predominantemente por meio dessas regiões.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2017), a escolha adequada do tipo de junta influencia diretamente a distribuição de tensões, a rigidez local, o comportamento em fadiga e o modo de falha da estrutura. Em aplicações automotivas, especialmente em

gaiolas de proteção, é essencial que as juntas favoreçam a continuidade dos caminhos de carga e minimizem concentrações de tensão.

As configurações de juntas mais comuns em estruturas tubulares incluem:

- Junta de topo, na qual as extremidades dos tubos são alinhadas e soldadas frontalmente, permitindo boa continuidade estrutural quando corretamente dimensionada;
- Junta em “T”, amplamente utilizada em interseções entre tubos perpendiculares, comum em nós estruturais da *roll cage*;
- Junta em ângulo, aplicada quando os tubos se encontram formando ângulos diferentes de 90°, característica frequente em triangulações;
- Junta sobreposta, menos comum em chassis tubulares devido à maior concentração de tensões e ao aumento de massa;
- Junta em quina, empregada em situações específicas, geralmente associada a chapas estruturais ou reforços.

Hibbeler (2017) destaca que juntas em “T” e em ângulo estão predominantemente submetidas a esforços combinados de tração, cisalhamento e flexão, exigindo atenção especial ao dimensionamento do cordão de solda e à qualidade da execução.

3.5.4.2. Preparação das juntas e função dos chanfros

A preparação adequada das extremidades dos tubos é um fator determinante para a qualidade da solda. O chanfro consiste na remoção controlada de material nas bordas a serem soldadas, com o objetivo de permitir penetração adequada do metal de solda e garantir fusão completa ao longo da espessura do material.

Segundo Lancaster (1999) e Kou (2003), a ausência de preparação adequada pode resultar em defeitos como falta de penetração, falta de fusão e inclusões, comprometendo severamente a resistência mecânica da junta, sobretudo em solicitações dinâmicas e em fadiga.

Em tubos de pequena espessura, como os utilizados em chassis tubulares automotivos, a necessidade de chanfro deve ser avaliada com cautela. Para espessuras reduzidas, a soldagem pode ser realizada sem chanfro (solda de topo simples), desde que o processo e os parâmetros garantam penetração total. Entretanto, à medida que a espessura aumenta ou quando há interseção complexa entre tubos (juntas em “T” e nós múltiplos), a preparação por chanfro torna-se essencial.

Os principais tipos de chanfro aplicáveis à soldagem estrutural incluem:

- Chanfro em “V”, amplamente utilizado em juntas de topo, proporcionando boa penetração e acesso adequado ao arco;
- Chanfro em “V duplo”, empregado em materiais de maior espessura, reduzindo distorções e equilibrando o aporte térmico;
- Chanfro em “U”, menos comum em estruturas tubulares devido à maior complexidade de usinagem, porém eficiente na redução do volume de metal de adição;
- Chanfro parcial ou preparação por boca de lobo, típico em juntas tubulares, no qual a extremidade do tubo é conformada para se ajustar perfeitamente à superfície cilíndrica do tubo adjacente.

Marques, Modenesi e Bracarense (2017) ressaltam que, em juntas tubulares, a preparação do tipo “boca de lobo” é fundamental para garantir contato adequado entre as superfícies, uniformidade do cordão e transferência eficiente de esforços entre os membros estruturais.

A correta execução dos chanfros exerce influência direta sobre o desempenho estrutural das juntas soldadas, pois favorece a penetração adequada do metal de adição e assegura a continuidade metalúrgica entre os componentes unidos. Além disso, a preparação apropriada das bordas contribui para a redução de concentrações de tensão, particularmente na região da raiz da solda, onde descontinuidades geométricas tendem a atuar como pontos de início de falha. Esse cuidado reflete-se também em um comportamento mais favorável sob carregamentos cíclicos, uma vez que a eliminação de entalhes e transições abruptas melhora a resistência à fadiga da junta. Como consequência, obtém-se maior previsibilidade do modo de falha, favorecendo a ruptura no material base em detrimento da junta soldada. Nesse contexto, Lancaster (1999) resalta que, para estruturas submetidas a solicitações cíclicas, a geometria da junta e a qualidade da preparação por chanfros são fatores tão relevantes quanto a própria resistência mecânica do material base.

3.5.5. Aspectos metalúrgicos

O ciclo térmico inerente ao processo de soldagem promove alterações microestruturais no metal de base, com destaque para a Zona Termicamente Afetada (ZTA), além de induzir tensões residuais e favorecer a ocorrência de descontinuidades internas. Conforme abordado na apostila de Tecnologia da Soldagem e discutido por Lancaster (1999), tais modificações podem

afetar de maneira significativa a resistência mecânica, a ductilidade e a vida em fadiga das juntas soldadas, sobretudo quando não há controle adequado dos parâmetros do processo.

Nesse contexto, a obtenção de juntas com desempenho estrutural satisfatório depende do controle integrado de diversos fatores tecnológicos, entre os quais se destacam: o controle do aporte térmico, fundamental para limitar a extensão da ZTA e evitar a formação de microestruturas frágeis; a seleção adequada do consumível, assegurando compatibilidade metalúrgica e resistência equivalente ou superior à do material base; a preparação correta das superfícies, visando à remoção de contaminantes que possam originar defeitos; a escolha apropriada do gás de proteção, que influencia a estabilidade do arco e a integridade da poça de fusão; e a execução do processo conforme procedimentos de soldagem qualificados, garantindo repetibilidade, rastreabilidade e conformidade com os requisitos normativos aplicáveis.

3.5.6. Controle tecnológico e qualidade da soldagem

A soldagem aplicada a chassis tubulares automotivos exige controle tecnológico rigoroso em todas as etapas do processo, desde a definição dos parâmetros operacionais até a inspeção final das juntas. Em estruturas destinadas a veículos de competição, pequenas variações geométricas ou defeitos metalúrgicos podem gerar concentrações de tensão significativas, comprometendo a resistência mecânica, a rigidez global e a vida em fadiga da estrutura. Conforme destaca Okumura (1982), o desempenho estrutural das uniões soldadas está diretamente associado à padronização dos procedimentos, à correta seleção dos parâmetros de soldagem e à qualificação dos soldadores, fatores que asseguram repetibilidade e confiabilidade ao processo.

A garantia da qualidade das juntas soldadas é complementada pela aplicação sistemática de métodos de inspeção e controle dimensional. Ensaios não destrutivos, como inspeção visual, líquido penetrante e ultrassom, permitem a identificação de descontinuidades superficiais e internas sem comprometer a integridade da estrutura, enquanto ensaios destrutivos em corpos de prova possibilitam a verificação da resistência e da qualidade da penetração da solda. Adicionalmente, técnicas de metrologia óptica tridimensional contribuem para a avaliação de deformações e desalinhamentos resultantes do processo de soldagem. A integração dessas práticas é essencial para assegurar conformidade normativa, confiabilidade estrutural e segurança em chassis tubulares automotivos.

3.6. Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos constituem um conjunto de métodos utilizados para avaliar o comportamento de materiais quando submetidos a esforços específicos, permitindo determinar

propriedades como resistência, ductilidade, tenacidade, rigidez e resposta a carregamentos estáticos ou dinâmicos. Segundo Chiaverini (1986), esses ensaios têm por finalidade caracterizar o desempenho mecânico dos materiais, estabelecendo parâmetros que orientam sua seleção e aplicação em componentes estruturais.

Os ensaios são conduzidos por meio de arranjos experimentais que buscam reproduzir, de forma controlada, as condições às quais o material ou componente estará submetido durante o uso. Callister e Rethwisch (2020) destacam que a análise mecânica pode ser realizada tanto em protótipos, representando versões preliminares ou reduzidas de um sistema real, quanto em corpos de prova, amostras normalizadas com dimensões e geometrias definidas por normas técnicas, como as ASTM E8/E8M, ASTM E9 e ISO 6892.

A literatura tradicionalmente classifica os ensaios mecânicos em Ensaios Destrutivos (ED) e Ensaios Não Destrutivos (END), conforme o efeito produzido no corpo de prova após o procedimento experimental.

3.6.1. Ensaios destrutivos (ED)

Os ensaios destrutivos são aqueles que modificam permanentemente as características físicas ou geométricas da amostra ensaiada. Mesmo quando o corpo de prova não se torna inutilizável, há alteração na sua integridade, impedindo seu uso posterior. Chiaverini (1986) aponta que esses ensaios são essenciais para determinar propriedades fundamentais, como limite de resistência, escoamento, dureza, tenacidade ao impacto, fluência e resistência à fadiga.

Dentre os principais ensaios destrutivos, destacam-se:

- Tração (ASTM E8/E8M): determina resistência, ductilidade e módulo de elasticidade;
- Compressão (ASTM E9);
- Cisalhamento;
- Flexão / dobramento;
- Torsão;
- Dureza (Rockwell, Brinell, Vickers — ASTM E18, E10 e E384);
- Impacto Charpy (ASTM E23);
- Fluência (ASTM E139);
- Fadiga (ASTM E466, E606).

Segundo Dieter (1988), os ensaios destrutivos fornecem a base para entender a resposta dos materiais a diferentes modos de carregamento, sendo indispensáveis na avaliação de segurança e confiabilidade estrutural.

3.6.2. Ensaios não destrutivos (END)

Por sua vez, os Ensaios Não Destrutivos têm como objetivo avaliar a integridade do material sem comprometer sua utilização. São amplamente aplicados na inspeção de componentes acabados, semifabricados ou em serviço. De acordo com a ASNT (2015), esses métodos permitem identificar trincas, descontinuidades internas, falhas de soldagem, porosidade e alterações superficiais sem remover o componente de operação.

Os principais END incluem:

- Inspeção visual (VT);
- Líquido penetrante (PT) — ASTM E165;
- Partículas magnéticas (MT) — ASTM E1444;
- Ultrassom (UT) — ASTM E213;
- Radiografia industrial (RT) — ASTM E94;
- Correntes parasitas (ET).

A ASME (2019) reforça que os ensaios não destrutivos são ferramentas essenciais para garantir a confiabilidade e a vida útil de componentes críticos, especialmente em estruturas soldadas, vasos de pressão e equipamentos sujeitos a fadiga.

3.6.3. Aplicação no contexto automotivo e estrutural

Para estruturas tubulares automotivas, como a roll cage dos veículos do tipo Baja SAE, a seleção e a aplicação adequadas dos ensaios mecânicos constituem etapas essenciais para o controle de qualidade da manufatura e para a verificação da integridade estrutural. Lancaster (1999) observa que processos de soldagem podem gerar tensões residuais, descontinuidades internas e alterações microestruturais, tornando indispensável o uso de END (especialmente PT e UT) em conjunto com ED aplicados em corpos de prova representativos a fim assegurar a confiabilidade das juntas.

De acordo com essa abordagem, o Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB) estabelece, na Seção B6.3.2 – Verificação do processo de soldagem, que todo soldador responsável por unir membros primários da gaiola de proteção deve produzir duas amostras utilizando os mesmos materiais, dimensões e procedimentos empregados na fabricação da estrutura. A norma determina ainda que os tubos usados nas amostras sejam

idênticos aos membros primários da *roll cage* e que todas as amostras devem ser entregues à Inspeção de Conformidade Técnica, devidamente identificadas e documentadas na Ficha de Especificação da Gaiola.

A primeira amostra é destinada a um ensaio destrutivo, composto por uma união em “T” a 90°, cujo objetivo é levar a junta à ruptura sob tração ou flexão, demonstrando que a falha ocorre preferencialmente no material de base e não na solda. A segunda amostra corresponde à inspeção destrutiva, realizada por meio do seccionamento do conjunto soldado a 30°, permitindo avaliar a penetração, continuidade e uniformidade da solda ao longo de todo o comprimento. Ambas as amostras devem ser registradas por meio de fotografias de alta resolução, conforme exigido pelo regulamento.

Dessa forma, os procedimentos prescritos pelo RATBSB reforçam a necessidade de inspeção rigorosa das juntas soldadas e a importância da aplicação conjunta de ensaios destrutivos, voltados à verificação de resistência, e ensaios não destrutivos, utilizados para identificar descontinuidades superficiais e internas. Tais exigências asseguram que a gaiola de proteção atenda aos requisitos mínimos de segurança, desempenho estrutural e confiabilidade durante a operação do veículo.

3.7. Metrologia Óptica

A crescente complexidade geométrica dos chassis tubulares, associada às exigências de precisão dimensional, repetibilidade e controle de qualidade estrutural, tem impulsionado a adoção de técnicas de metrologia óptica tridimensional nos processos de manufatura e validação geométrica. Diferentemente dos métodos de medição por contato, a metrologia óptica baseia-se na interação da radiação eletromagnética com a superfície do objeto, permitindo a aquisição rápida e não intrusiva de informações geométricas e topográficas (JONES; CHEN, 2015).

Em estruturas tubulares automotivas, a aplicação da metrologia óptica é particularmente relevante devido à presença de dobras espaciais, juntas soldadas, desvios angulares acumulados e variações geométricas introduzidas pelos processos de conformação e soldagem. Sistemas ópticos tridimensionais possibilitam a reconstrução digital da geometria real do chassi, permitindo a comparação direta com o modelo nominal de projeto (CAD) e a quantificação objetiva de desvios dimensionais, desalinhamentos e deformações residuais (SCHWIEGER; NEUGEBAUER, 2020).

Entre as técnicas mais empregadas destacam-se os sistemas de escaneamento 3D por luz estruturada, triangulação a laser e fotogrametria, os quais apresentam elevada densidade de

pontos e precisão compatível com aplicações de engenharia estrutural. Segundo Leach (2011), esses métodos permitem capturar tanto a geometria global quanto características locais da superfície, sendo adequados para a avaliação de ovalização de tubos, irregularidades em regiões soldadas e desvios geométricos em planos estruturais críticos.

No contexto da validação de chassis tubulares, a metrologia óptica desempenha papel fundamental na verificação pós-manufatura, possibilitando identificar discrepâncias entre o projeto e a estrutura construída antes da realização de ensaios experimentais ou da aplicação de carregamentos operacionais. A correlação entre o modelo digital obtido por escaneamento e o modelo numérico empregado em análises via Método dos Elementos Finitos contribui para reduzir incertezas associadas à geometria real, elevando a confiabilidade das simulações estruturais subsequentes (JONES; CHEN, 2015).

Adicionalmente, a literatura aponta que a metrologia óptica é uma ferramenta eficaz para o controle de qualidade em processos de soldagem, uma vez que permite avaliar deformações globais induzidas por ciclos térmicos, retrações diferenciais e desalinhamentos entre membros estruturais. Schwieger e Neugebauer (2020) ressaltam que a inspeção óptica tridimensional fornece subsídios objetivos para ajustes de gabaritos, revisão de sequências de soldagem e otimização do processo construtivo, reduzindo a variabilidade geométrica entre unidades fabricadas.

Em síntese, a metrologia óptica aplicada a chassis tubulares constitui uma etapa estratégica no ciclo de desenvolvimento estrutural, atuando como elo entre projeto, manufatura e validação. Sua aplicação permite assegurar conformidade dimensional, apoiar a correlação entre modelos numéricos e estruturas reais e contribuir para a robustez estrutural e funcional do chassi, especialmente em aplicações de alto rigor técnico, como veículos de competição e protótipos experimentais.

3.8. Análise de Custos

Na indústria automobilística, a análise de custos é tratada como parte integrante do processo de desenvolvimento do produto, sendo aplicada de forma sistemática desde as fases iniciais de concepção até a produção e validação final. Diferentemente de abordagens meramente contábeis, o setor automotivo adota ferramentas de custeio orientadas ao projeto, ao processo e ao ciclo de vida, com o objetivo de garantir competitividade, previsibilidade financeira e aderência às metas de desempenho e qualidade.

Uma das abordagens mais empregadas é o Custeio Baseado em Atividades (*ABC – Activity-Based Costing*), amplamente difundido na indústria automotiva por sua capacidade de relacionar custos aos processos efetivamente executados. Segundo Hansen e Mowen (2011), o método ABC permite identificar com maior precisão os direcionadores de custo associados a atividades como corte, dobra, soldagem, inspeção e retrabalho, aspectos diretamente relacionados à manufatura de chassis tubulares. Essa abordagem é particularmente relevante em estruturas de baixa escala produtiva, como protótipos e veículos de competição, nas quais a mão de obra e o tempo de fabricação exercem papel predominante no custo final.

No contexto do desenvolvimento automotivo, destaca-se também o custeio orientado ao projeto (*Design-to-Cost*), no qual metas de custo são definidas ainda na fase de concepção, influenciando decisões de geometria, seleção de materiais e processos produtivos. De acordo com Hansen e Mowen (2011), essa abordagem busca equilibrar desempenho técnico e viabilidade econômica, evitando soluções estruturalmente eficientes, porém incompatíveis com as restrições orçamentárias do projeto. No caso de chassis tubulares, essa filosofia se reflete na escolha entre diferentes aços estruturais, no número de dobras, na complexidade geométrica e no nível de automação da fabricação.

Outra ferramenta amplamente utilizada na indústria automobilística é a análise de custo ao longo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost – LCC*), que considera não apenas os custos de fabricação, mas também aqueles associados à inspeção, manutenção, falhas e retrabalhos ao longo da vida útil do componente. Conforme Martins (2022), decisões tomadas na fase de projeto exercem influência direta sobre custos futuros, de modo que investimentos iniciais em qualidade dimensional, controle de soldagem e escolha adequada de materiais podem reduzir significativamente custos indiretos associados a falhas estruturais e perda de desempenho.

No ambiente industrial automotivo, a análise de custos é frequentemente integrada a ferramentas de engenharia simultânea, como DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*), que visa simplificar geometrias, reduzir o número de componentes e minimizar operações de fabricação. A aplicação desses princípios em chassis tubulares incentiva a redução do número de juntas soldadas, a padronização de diâmetros e espessuras de tubos e a adoção de geometrias que facilitem o posicionamento em gabaritos, contribuindo para a redução do tempo de montagem e da variabilidade do processo.

Além disso, a indústria automotiva utiliza amplamente estimativas paramétricas de custo, nas quais relações empíricas entre massa, tipo de material, comprimento total de tubos, número de dobras e horas de soldagem são empregadas para prever o custo estrutural ainda nas

fases iniciais do projeto. Essa prática permite comparações objetivas entre alternativas de chassi, apoiando decisões de engenharia com base em critérios técnicos e econômicos de forma integrada.

Em aplicações como o Baja SAE, embora em escala reduzida, essas ferramentas mantêm sua relevância conceitual. A limitação orçamentária imposta pelo contexto acadêmico e competitivo reforça a necessidade de adotar metodologias de análise de custos alinhadas às práticas da indústria automobilística, garantindo que as soluções estruturais propostas sejam não apenas tecnicamente robustas, mas também economicamente justificáveis.

Dessa forma, a análise de custos aplicada a chassis tubulares deve ser entendida como um processo estruturado, apoiado por ferramentas consolidadas do setor automotivo, tais como o custeio baseado em atividades, o design-to-cost, a análise de custo do ciclo de vida e princípios de DFMA. A integração dessas abordagens ao desenvolvimento estrutural contribui para a obtenção de projetos equilibrados, compatíveis com as exigências técnicas, regulatórias e econômicas do ambiente automotivo contemporâneo.

3.9 Lacunas da Literatura e Justificativa da Metodologia Proposta

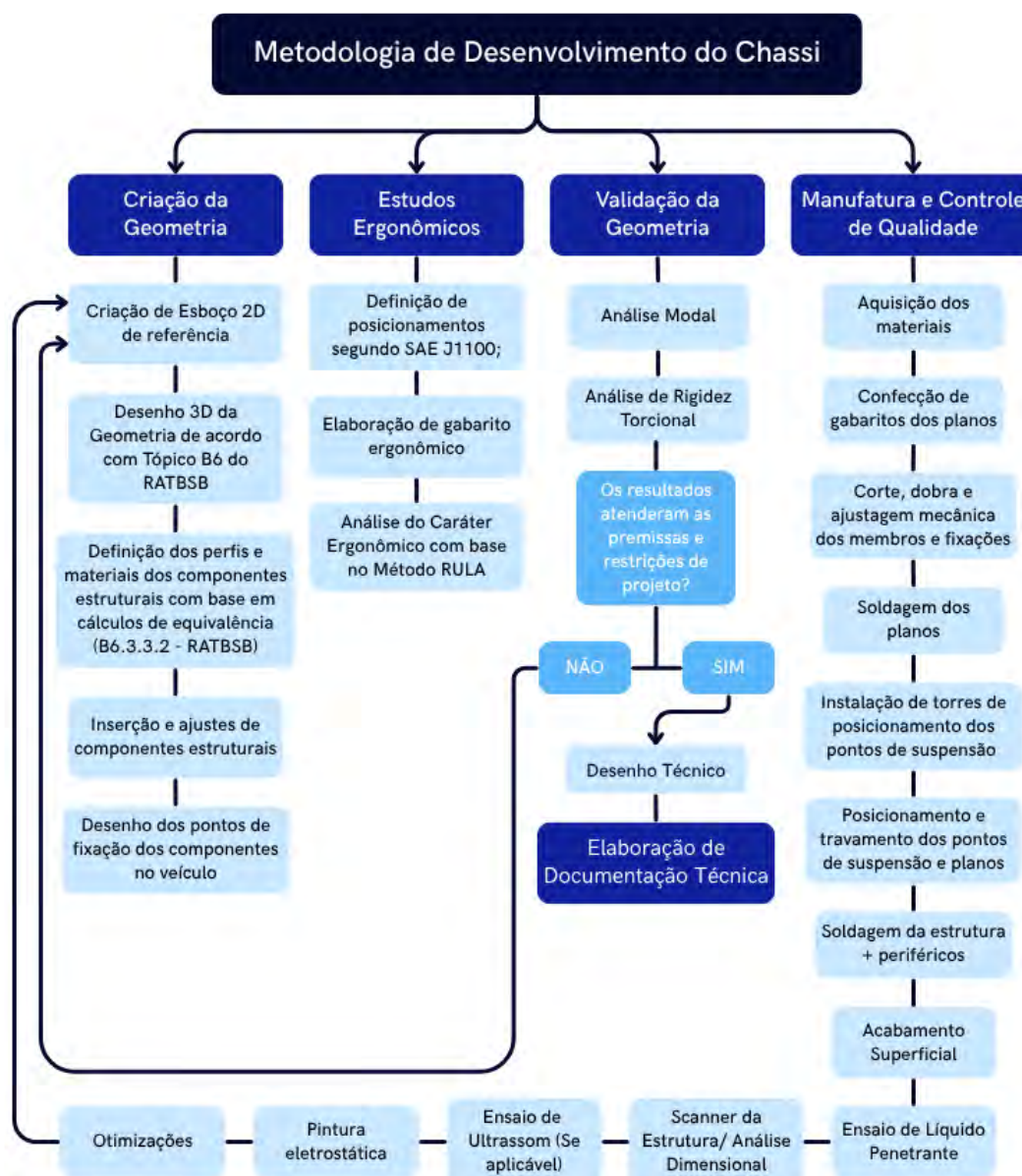
De modo geral, a literatura consultada apresenta contribuições relevantes e, em muitos casos, consolidadas para o desenvolvimento de estruturas tubulares automotivas, abordando temas específicos como projeto estrutural, simulação numérica via MEF, processos de conformação e soldagem, ensaios mecânicos, metrologia óptica e análise de custos. Observa-se, entretanto, que essas contribuições são majoritariamente tratadas de forma segmentada, sem a proposição de um fluxo metodológico único capaz de integrar, de maneira rastreável, as etapas de projeto, manufatura, inspeção dimensional e avaliação econômico-estratégica no contexto de veículos off-road de pequeno porte, como os protótipos do tipo Baja SAE.

Nesse sentido, identifica-se a necessidade de aplicar os princípios da Engenharia Simultânea para organizar essas decisões em um processo integrado, reproduzível e tecnicamente fundamentado, articulando requisitos de segurança, desempenho dinâmico, qualidade geométrica, viabilidade de manufatura e análise de custos em um único ambiente de desenvolvimento. A metodologia e o Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI) propostos neste trabalho buscam minimizar essa lacuna ao estruturar um fluxo de desenvolvimento de chassi tubular que conecta projeto estrutural, processos de fabricação, controle de qualidade e avaliação econômica em uma abordagem única, sistematizada e alinhada às práticas da indústria automotiva.

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido a partir do projeto da estrutura tubular da equipe CEFAST BAJA SAE (CEFET/MG), referente ao primeiro protótipo com tração nas quatro rodas da equipe, denominado CB12. A metodologia adotada ao longo do desenvolvimento do trabalho é sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 4.1, o qual organiza de forma sequencial as etapas de concepção do projeto, análise estrutural, manufatura e validação experimental do protótipo. Cada uma dessas etapas foi estruturada em subdivisões metodológicas, correspondentes a procedimentos específicos e interdependentes, considerados essenciais para a condução do estudo e para a obtenção de resultados consistentes e tecnicamente fundamentados.

Figura 4.1 – Metodologia de Desenvolvimento do Chassi

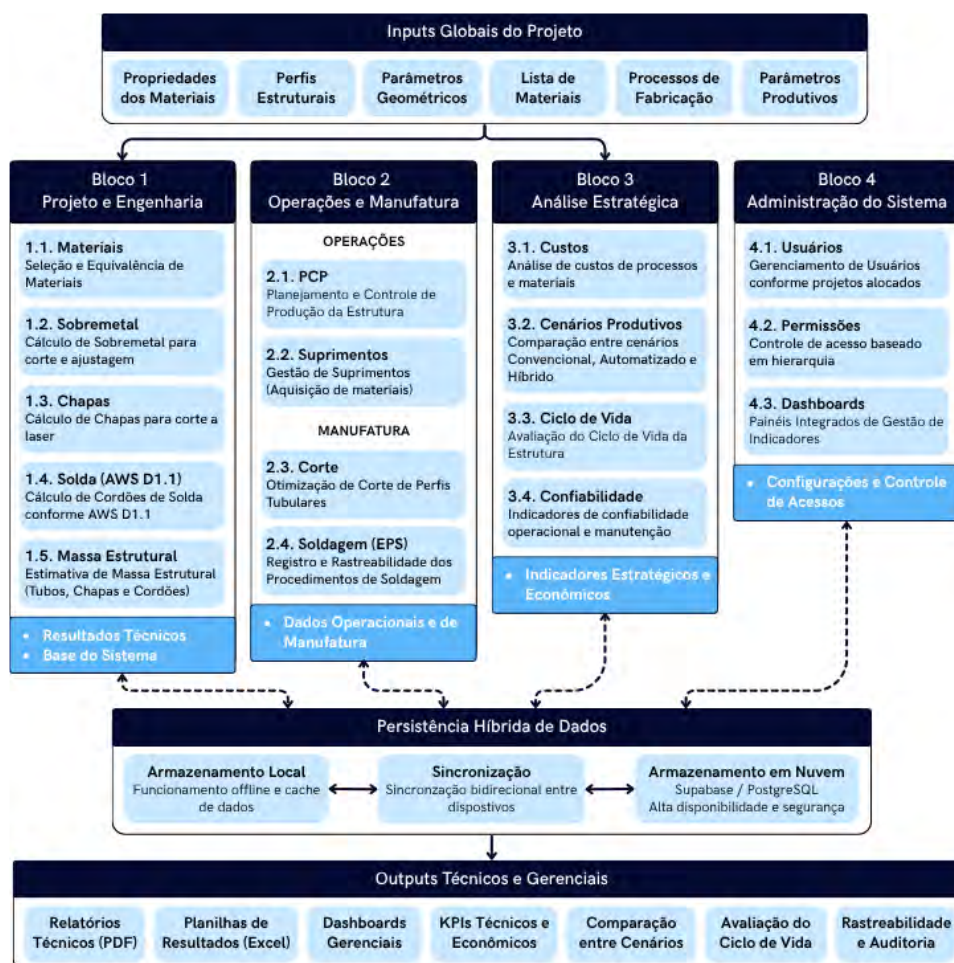


Fonte: Elaborado pelo Autor / CEFAST BAJA SAE

Como parte complementar desta pesquisa, foi desenvolvido o Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), uma plataforma computacional modular concebida para apoiar a implantação, integração e validação da metodologia proposta para o desenvolvimento estrutural e manufatura de estruturas tubulares. O sistema foi estruturado com o objetivo de centralizar informações técnicas, operacionais e estratégicas em um único ambiente digital, promovendo rastreabilidade, padronização e integração sistêmica entre as diferentes etapas do ciclo de desenvolvimento do produto.

Nesse contexto, o Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI) atua como uma ferramenta computacional de suporte metodológico, promovendo a articulação entre as etapas de engenharia, manufatura, análise econômica e avaliação do ciclo de vida do protótipo. Conforme apresentado na Figura 4.2, a plataforma foi estruturada em quatro grandes blocos funcionais — Projeto e Engenharia, Operações e Manufatura, Análise Estratégica e Administração do Sistema — evidenciando o fluxo de integração entre módulos, o processamento das informações e os mecanismos de persistência e sincronização de dados.

Figura 4.2 – Arquitetura funcional e fluxo de integração do Sistema SDI



Fonte: Elaborado pelo Autor

A arquitetura do SDI foi desenvolvida como uma aplicação web modular baseada em componentes independentes e interconectados, utilizando tecnologias modernas de frontend e backend, incluindo React 18, TypeScript, Tailwind CSS e integração em nuvem via Supabase/PostgreSQL. O sistema adota um modelo de fluxo unidirecional de dados, no qual as informações produzidas em cada etapa alimentam automaticamente os módulos subsequentes, reduzindo redundâncias, inconsistências e retrabalhos ao longo do processo de desenvolvimento. Adicionalmente, a plataforma incorpora uma estratégia de persistência híbrida, baseada em armazenamento local combinado com sincronização em nuvem, permitindo funcionamento offline, sincronização entre dispositivos e maior confiabilidade na integridade dos dados.

A arquitetura do sistema inicia-se a partir das entradas globais do projeto, compostas por dados de propriedades de materiais, perfis estruturais, parâmetros geométricos, lista de materiais, processos de fabricação e parâmetros produtivos, os quais alimentam inicialmente o Bloco 1 — Projeto e Engenharia. Nesse bloco são realizadas as análises técnicas relacionadas à seleção e equivalência de materiais, cálculo de sobremetal, cálculo de chapas, cálculo de cordões de solda conforme os critérios da AWS D1.1 e estimativa de massa estrutural. Os resultados obtidos constituem a base técnica do sistema, fornecendo dados consolidados para as etapas subsequentes de planejamento e manufatura.

Posteriormente, as informações são transferidas ao Bloco 2 — Operações e Manufatura, no qual as atividades operacionais são conduzidas pelo Planejamento e Controle da Produção (PCP) e pela Gestão de Suprimentos, enquanto os processos de manufatura são suportados pela otimização de corte e rastreabilidade dos procedimentos de soldagem (EPS). Essa integração permite correlacionar diretamente as decisões de engenharia com seus impactos produtivos, operacionais e logísticos.

Na sequência, os dados processados alimentam o Bloco 3 — Análise Estratégica, responsável pelas análises econômicas e operacionais do projeto, incluindo estudos de custos, comparação entre cenários produtivos convencionais, automatizados e híbridos, além da avaliação do ciclo de vida e confiabilidade estrutural do protótipo. O sistema permite ainda a obtenção de indicadores associados à sustentabilidade, confiabilidade operacional e manutenção ao longo da vida útil do produto.

De modo complementar, o Bloco 4 — Administração do Sistema concentra funcionalidades de gerenciamento de usuários, permissões e dashboards integrados, utilizando

um modelo RBAC (Role-Based Access Control), no qual diferentes níveis de acesso são atribuídos aos usuários conforme suas responsabilidades técnicas e administrativas.

Do ponto de vista metodológico, o SDI não se restringe a um ambiente computacional de cálculo, configurando-se como uma ferramenta integrada de implantação e validação da metodologia proposta, capaz de centralizar variáveis de engenharia, promover rastreabilidade das decisões técnicas, padronizar informações, automatizar parcialmente análises e gerar relatórios técnicos e indicadores gerenciais. Dessa forma, o sistema constitui um subproduto tecnológico diretamente associado à presente pesquisa, atuando simultaneamente como plataforma de integração multidisciplinar, ferramenta de apoio à tomada de decisão e ambiente computacional para validação dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do protótipo.

4.1. Criação da Geometria

O desenvolvimento geométrico do chassi constituiu uma das etapas centrais do projeto, exigindo elevado nível de detalhamento e organização do modelo CAD. Nesse contexto, tornou-se fundamental a adoção de uma metodologia estruturada para identificação e gerenciamento dos diferentes elementos da estrutura, tais como esboços, tubos primários e secundários, travamentos, pontos de ancoragem da suspensão dianteira e traseira, bases de fixação e demais componentes estruturais, organizados em subgrupos e pastas específicas. Essa abordagem favorece a compreensão global da constituição geométrica do chassi, além de facilitar análises posteriores, ajustes dimensionais e eventuais modificações ao longo do desenvolvimento do projeto.

4.1.1. Definições de projeto

A etapa de concepção da geometria do chassi foi desenvolvida no software SolidWorks®, tendo como referência os pontos de fixação da suspensão dianteira e traseira, o conjunto do trem de força previamente definido e as restrições geométricas e estruturais estabelecidas na Seção B6 do RATBSB. Inicialmente, foi elaborado um esboço bidimensional (2D) contendo o posicionamento preliminar dos membros estruturais, respeitando as distâncias mínimas e os limites geométricos impostos pelo regulamento e normas antropométricas, bem como as definições decorrentes da integração dos conjuntos mecânicos. A partir desse esboço de referência, procedeu-se à modelagem tridimensional (3D) dos membros estruturais do chassi.

4.1.2. Definições de materiais

No que diz respeito a definição de materiais, foram analisados os perfis geométricos e os materiais dos componentes estruturais com base nos cálculos de equivalência previstos na Seção B6.3.3.2 do RATBSB, conforme Apêndice A, assegurando conformidade normativa quanto à rigidez e à resistência dos tubos empregados. A estrutura final foi então obtida por meio da inserção, posicionamento e ajuste dos elementos tubulares, incluindo membros primários, secundários e travamentos adicionais. Por fim, foram incorporados ao modelo os pontos de fixação dos demais componentes do veículo, tais como suspensão, sistemas auxiliares e subconjuntos estruturais.

4.1.3. Estimativa de massa da estrutura

Paralelamente ao desenvolvimento geométrico da estrutura, realizou-se a análise de massa do chassi por meio do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), conforme Apêndice B4, considerando os perfis tubulares, chapas estruturais e cordões de solda previstos no projeto. O cálculo da massa dos cordões de solda foi realizado com base no perímetro das uniões soldadas e na quantidade de juntas presentes na estrutura, adotando-se como referência o dimensionamento mínimo estabelecido pela norma AWS D1.1.

A metodologia empregada permitiu estimar a contribuição individual de cada componente estrutural na massa total do chassi, fornecendo suporte para análises comparativas e otimizações geométricas ao longo do desenvolvimento do projeto. Posteriormente, a massa real da estrutura manufaturada foi aferida por meio de uma balança industrial Toledo®, modelo 2098, com faixa de medição entre 0,4 e 120 kg e resolução de 0,02 kg, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva do modelo analítico empregado na estimativa de massa da estrutura.

4.2. Estudos Ergonômicos

O desenvolvimento ergonômico do cockpit foi realizado com base em referências geométricas automotivas obtidas a partir da SAE J1100 e nas restrições dimensionais estabelecidas pela Seção B1.3 do regulamento Baja SAE Brasil. Esses parâmetros foram utilizados como referência para definição preliminar do posicionamento do assento, volante, pedais, encosto de cabeça e sistema de retenção do piloto, buscando garantir condições adequadas de conforto, acessibilidade e segurança operacional durante a condução do veículo.

4.2.1. Gabarito físico

Com o objetivo de validar preliminarmente a acomodação do piloto no interior do cockpit, foi desenvolvido um gabarito físico em madeira para reprodução das condições reais de posicionamento do operador. O mock-up permitiu simular a geometria interna do cockpit e

avaliar aspectos relacionados à distância dos pedais de aceleração e freio, posicionamento do volante, localização do assento, geometria do encosto de cabeça, alinhamento das tiras do cinto de segurança e espaço disponível para movimentação dos membros superiores e inferiores. Além disso, o gabarito possibilitou a realização de testes de entrada e saída do veículo, permitindo identificar antecipadamente possíveis limitações ergonômicas ainda durante a fase conceitual do projeto.

4.2.2. Análise ergonômica

Após a validação preliminar por meio do mock-up físico, a geometria do chassi foi importada para o ambiente CAD do software CATIA®. A análise foi conduzida utilizando o módulo de modelagem humana digital do software, por meio da inserção de manequins antropométricos representativos do público-alvo do veículo. Foram considerados pilotos pertencentes a diferentes percentis antropométricos previstos pelo regulamento da competição, permitindo avaliar a compatibilidade dimensional do cockpit com diferentes perfis de usuários.

Durante a modelagem digital foram avaliados parâmetros relacionados ao posicionamento do piloto, alcance ao volante, acionamento dos pedais, inclinação do tronco, alinhamento cervical, posicionamento dos membros superiores e inferiores e espaço interno disponível no cockpit. A postura operacional adotada durante a condução simulada foi utilizada como condição de referência para realização das análises biomecânicas e ergonômicas do sistema. A avaliação biomecânica foi conduzida utilizando o método RULA, aplicado diretamente no ambiente ergonômico do CATIA®. O método permitiu analisar a postura dos membros superiores, antebraços, punhos, pescoço, tronco e membros inferiores, além da influência do esforço muscular e da aplicação de carga sobre o operador. A análise foi realizada considerando condição estática de condução representativa da operação do veículo Baja SAE.

Além da pontuação RULA, foram avaliados ângulos articulares específicos relacionados à postura de condução do piloto. Os intervalos de referência utilizados foram definidos com base em literatura ergonômica automotiva, princípios biomecânicos de acomodação humana e parâmetros geométricos empregados em projetos veiculares. A comparação entre os valores obtidos e os intervalos de referência foi utilizada como critério complementar para validação ergonômica preliminar do cockpit desenvolvido.

4.3. Validação Estrutural da Geometria

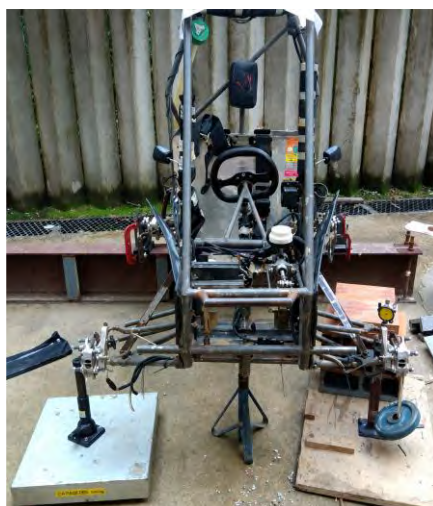
A validação estrutural do chassi tubular foi conduzida por meio de análises numéricas via Método dos Elementos Finitos (MEF), associadas à utilização de uma metodologia experimental previamente validada pela equipe em protótipos desenvolvidos anteriormente.

Dessa forma, o presente estudo não teve como objetivo o desenvolvimento de um novo procedimento experimental para determinação da rigidez torcional, mas sim a aplicação de uma metodologia já consolidada e experimentalmente verificada, empregada como referência para validação e calibração do modelo computacional utilizado no desenvolvimento do protótipo objeto deste estudo.

4.3.1. Análise de rigidez torcional

A metodologia experimental adotada pela equipe em protótipos anteriores consistiu na fixação dos flanges traseiros da suspensão em uma estrutura rígida, bem como na substituição dos amortecedores por barras rígidas, com o objetivo de minimizar interferências associadas à deformabilidade do sistema de suspensão, conforme Figura 4.3. Em seguida, foram aplicadas cargas verticais opostas nos pontos dianteiros da suspensão, reproduzindo um binário torcional equivalente ao empregado na análise numérica. Os deslocamentos verticais induzidos foram medidos em pontos específicos da estrutura por meio de instrumentos de medição apropriados, permitindo a determinação do deslocamento angular do conjunto estrutural e, conseqüentemente, da rigidez torcional do chassi.

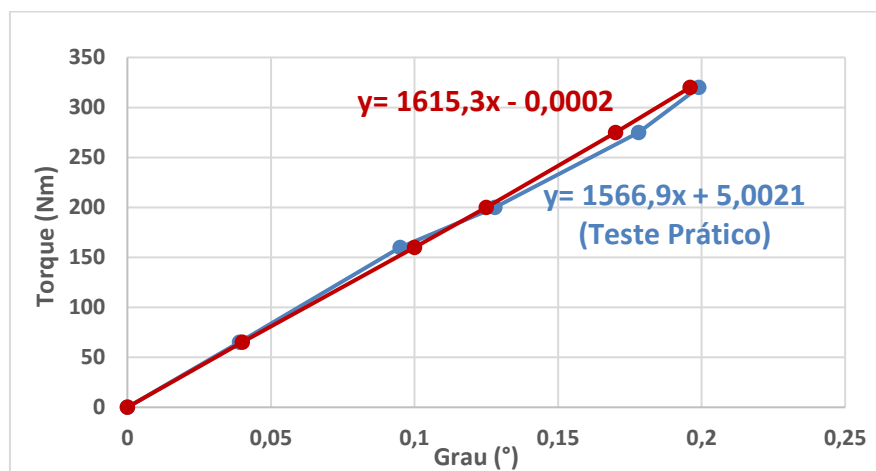
Figura 4.3 – Análise experimental de rigidez torcional realizada em protótipo anterior



Fonte: CEFAS BAJA SAE

Em aplicações anteriores dessa metodologia, a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos numericamente apresentou diferença aproximada de 3%, evidenciando adequada representatividade do modelo computacional e validando o procedimento numérico empregado pela equipe para análises estruturais de chassis tubulares, conforme Figura 4.4. Dessa forma, no presente estudo, optou-se pela utilização exclusivamente da análise numérica, adotando-se a metodologia previamente validada como referência para a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 4.4 – Comparativo entre análise teórica e teste prático da rigidez torcional



Fonte: CEFAST BAJA SAE

Inicialmente, o modelo tridimensional do chassi foi desenvolvido em ambiente CAD e posteriormente importado para o software ANSYS® Workbench, no qual foram realizados o pré-processamento, a discretização da malha e a definição das condições de contorno da análise. A estrutura foi predominantemente modelada por elementos unidimensionais do tipo viga (BEAM), fundamentados na teoria de Euler–Bernoulli, considerados adequados para representar os esforços atuantes nos membros tubulares do chassi. A adoção dessa abordagem possibilitou significativa redução do custo computacional quando comparada à utilização de elementos de casca ou sólidos, mantendo adequada fidelidade na representação do comportamento estrutural global da estrutura.

Para a análise de rigidez torcional em ambiente numérico, os pontos de fixação traseiros da suspensão foram rigidamente restringidos, enquanto um binário de forças opostas foi aplicado nos flanges dianteiros da estrutura, promovendo a torção controlada do chassi. Os amortecedores foram representados como barras rígidas, com o objetivo de minimizar interferências decorrentes da deformabilidade do sistema de suspensão e concentrar a análise na resposta estrutural da gaiola tubular. A rigidez torcional da estrutura foi determinada a partir da relação entre o torque aplicado e o deslocamento angular resultante entre as extremidades do chassi. O torque torcional aplicado à estrutura foi obtido por meio do produto entre a força vertical aplicada em cada extremidade da suspensão dianteira e a bitola completa entre os pontos de aplicação da carga, conforme apresentado na Equação (5.1):

$$T = F \cdot b \quad (\text{Eq. 5.1})$$

em que T corresponde ao torque aplicado, F representa a força vertical aplicada e b corresponde à bitola entre os pontos de aplicação das cargas.

O deslocamento angular total da estrutura foi determinado a partir dos deslocamentos verticais medidos nos lados esquerdo e direito do chassi. Para o cálculo do ângulo de torção, adotou-se a meia bitola ($b/2$) como braço geométrico de referência, uma vez que os deslocamentos angulares foram avaliados em relação ao plano longitudinal central da estrutura. Dessa forma, o ângulo total de torção foi obtido conforme a Equação (5.2):

$$\theta_{total} = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_E}{b/2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\delta_D}{b/2} \right) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

em que δ_E e δ_D correspondem aos deslocamentos verticais medidos nos lados esquerdo e direito da estrutura, respectivamente.

Por fim, a rigidez torcional da estrutura foi calculada conforme a Equação (5.3):

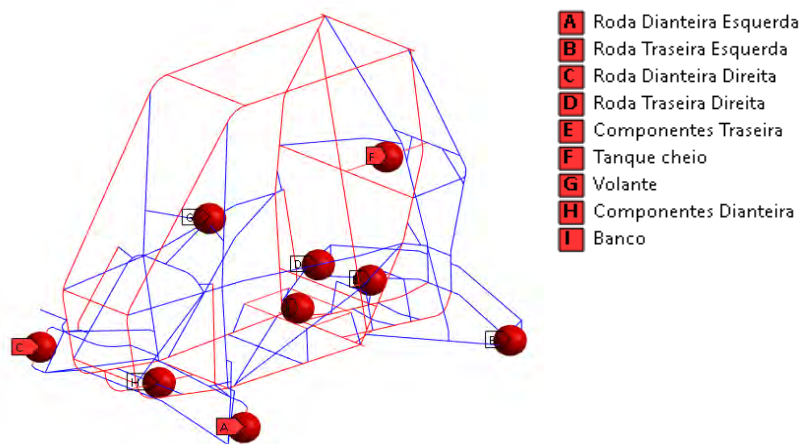
$$k = \frac{F \cdot b}{\tan^{-1} \left(\frac{\delta_E}{b/2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\delta_D}{b/2} \right)} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

em que k representa a rigidez torcional do chassi. Para a obtenção dos resultados em $\text{N} \cdot \text{m}/^\circ$, o deslocamento angular calculado em radianos foi posteriormente convertido para graus.

4.3.2. Análise modal

Para a análise modal, considerou-se o veículo apoiado sobre as rodas, incluindo a representação das principais massas suspensas e não suspensas relevantes para a resposta dinâmica estrutural. A análise teve como objetivo determinar as frequências naturais e os modos predominantes de vibração da estrutura, permitindo avaliar possíveis aproximações entre as frequências naturais do chassi e as frequências de excitação provenientes do conjunto motriz e das condições operacionais do veículo.

Figura 4.5 – Condições de contorno – Análise Modal



Fonte: CEFAST BAJA SAE

4.4. Manufatura

4.4.1. Planejamento e controle de produção/ Suprimentos

Após a validação da geometria final do chassi, foram elaborados os desenhos técnicos de fabricação, bem como o levantamento quantitativo dos materiais e insumos necessários à manufatura da estrutura. Para o dimensionamento da matéria-prima, adotou-se um sobremetal compatível com os processos de fabricação empregados, considerando as perdas e variações inerentes às operações de corte, dobra e ajustagem dos membros tubulares, conforme apresentado nos Apêndices B1 e B2. Adicionalmente, foi estimado o consumo de material de adição de solda, considerando os comprimentos dos cordões, os parâmetros geométricos das juntas e os critérios de dimensionamento adotados, conforme apresentado no Apêndice B3.

Com o objetivo de avaliar a influência dos processos produtivos no tempo de fabricação e nos custos associados à manufatura da estrutura, foram definidos dois cenários de produção: convencional e automatizado. Essa abordagem permitiu comparar diferentes níveis de automação aplicados às etapas de fabricação do chassi, possibilitando a análise de seus impactos sobre produtividade, precisão dimensional, consumo de materiais, necessidade de retrabalho e custos operacionais, conforme apresentado no Apêndice C.

Para a análise comparativa, considerou-se um lote unitário de fabricação, contemplando as etapas de corte de tubos, corte de chapas, dobra, ajustagem mecânica, montagem de gabaritos, soldagem, inspeção e pintura. Os parâmetros e variáveis de processo foram ajustados conforme as características de cada cenário produtivo analisado, permitindo representar de forma mais adequada as diferenças entre métodos convencionais, processos automatizados e configurações híbridas de manufatura. O dimensionamento dos materiais, a estimativa dos tempos de fabricação e a avaliação dos custos associados aos processos produtivos foram realizados com o suporte do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), utilizando como referência dados provenientes de literatura técnica, catálogos de fabricantes, parâmetros internos de processo e análises de mercado.

4.4.2. Corte e dobra

Com os materiais disponíveis, no processo convencional, os tubos e chapas foram inicialmente cortados com comprimentos superiores aos especificados em projeto, com base no Cálculo de Sobremetal, de modo a mitigar variações inerentes aos processos subsequentes de conformação e ajuste dimensional. No processo automatizado, os membros tubulares e elementos de fixação foram considerados como cortados por máquina de corte a laser, já nas

dimensões finais de projeto, visando reduzir variações dimensionais e aumentar a precisão dos componentes fabricados.

Para o planejamento dos cortes, empregou-se a ferramenta de Otimização de Corte desenvolvida no Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), conforme Apêndice D1, responsável pela geração dos planos de corte das barras comerciais a partir dos comprimentos dos elementos estruturais definidos em projeto, considerando os respectivos sobremetais quando aplicável. A ferramenta considerou parâmetros relacionados ao agrupamento por perfil estrutural, ao comprimento comercial das barras, à minimização de retalhos e à maximização do aproveitamento de material, permitindo maior eficiência no consumo de matéria-prima e redução de desperdícios ao longo do processo produtivo.

Na sequência, foram realizadas as operações de dobra dos tubos conforme os ângulos e rotações definidos em projeto. Para o cenário convencional, foram considerados os métodos de dobra a frio em calandra manual e de dobra a quente. Neste último, empregou-se o preenchimento interno dos tubos com areia apropriada, associado ao aquecimento controlado da região de dobra e à utilização de gabaritos físicos como referência geométrica. Para o cenário automatizado, considerou-se a execução das dobras por meio de calandra CNC, visando maior repetibilidade geométrica, controle dimensional e padronização do processo de fabricação.

4.4.3. Ajustagem mecânica

No processo convencional, as extremidades dos tubos foram posteriormente ajustadas de acordo com os encaixes requeridos entre os membros estruturais, por meio da execução de bocas de lobo e da preparação de chanfros adequados para soldagem. Em seguida, procedeu-se à limpeza externa e interna das regiões a serem soldadas, com o objetivo de eliminar impurezas que pudessem comprometer a qualidade das juntas, tais como óxidos, óleos, graxas, resíduos de tinta e demais contaminantes superficiais.

Para o processo automatizado, a etapa de ajustagem dos encaixes foi considerada significativamente reduzida, uma vez que o corte a laser permite recortar as extremidades e superfícies dos membros tubulares de forma compatível com a geometria definida em projeto. Dessa forma, essa etapa passa a demandar menor intervenção manual, contribuindo para a redução do tempo de preparação, maior repetibilidade dimensional e melhor padronização dos encaixes estruturais.

4.4.4. Montagem de gabaritos

Paralelamente às etapas de preparação dos membros estruturais, foram confeccionados gabaritos em MDF com espessura de 20 mm, cortados a laser, correspondentes aos planos estruturais previamente definidos em projeto. Esses dispositivos tiveram como objetivo auxiliar no posicionamento dos tubos e permitir a montagem modular da estrutura, inicialmente por meio da união dos membros em subestruturas planas, posteriormente integradas à geometria global do chassi.

Para a união dos planos pré-montados, bem como para a inserção de membros e travamentos estruturais, foram utilizados gabaritos adicionais em MDF associados a torres de aço, responsáveis por restringir deslocamentos e minimizar distorções induzidas durante o processo de soldagem. Adicionalmente, com o objetivo de assegurar o posicionamento dos pontos críticos de fixação da suspensão, foi desenvolvido um gabarito metálico em perfil metalon, empregado para limitar deslocamentos e rotações desses pontos durante a montagem.

Nos cenários produtivos convencional e automatizado, considerou-se a utilização de gabaritos equivalentes, uma vez que essa etapa apresenta elevada dependência da geometria do chassi, exige controle dimensional rigoroso e possui menor margem de automação quando comparada às operações de corte, dobra e ajustagem. Dessa forma, a montagem de gabaritos foi tratada como uma etapa comum aos cenários avaliados, variando principalmente quanto aos recursos, tempos e custos associados à sua execução.

4.4.5. Soldagem

O processo de soldagem convencional adotado foi o TIG (Tungstênio Inerte a Gás), selecionado em função da complexidade geométrica da estrutura e do elevado nível de precisão requerido para a união dos membros tubulares. Para aprimorar o controle das variáveis do processo, reduzir a ocorrência de perfurações e minimizar a extensão da Zona Termicamente Afetada (ZTA), empregou-se a técnica de arco pulsado, associada à limpeza frequente dos cordões de solda por meio de escova de aço rotativa. Como referência para a seleção do material de adição e para a estimativa das quantidades utilizadas nas uniões estruturais, adotou-se a norma AWS D1.1 — *Structural Welding Code — Steel*. Para o cenário automatizado, considerou-se a utilização de um robô de soldagem industrial com processo MIG, visando maior repetibilidade operacional, padronização dos cordões e redução da variabilidade associada à execução manual.

Com o intuito de padronizar o processo de manufatura e minimizar empenamentos e distorções térmicas, foram elaboradas Especificações do Processo de Soldagem (EPS),

conforme apresentado no Apêndice D2, contendo os parâmetros operacionais do equipamento, as características das juntas soldadas e as especificações dos consumíveis empregados. Além disso, foram definidos Procedimentos Operacionais Padrão (POP), com instruções detalhadas para a fabricação, montagem e controle dimensional dos gabaritos.

Adicionalmente, a estrutura foi segmentada em seções, e a sequência de união dos membros tubulares e dos pontos de fixação foi previamente definida, com o objetivo de controlar a distribuição térmica e reduzir deformações durante a soldagem. Por fim, realizou-se o rastreamento dos pontos soldados por cada soldador, permitindo a identificação direcionada de regiões que demandassem inspeção, correção ou reforço adicional em caso de falhas prematuras associadas a desvios operacionais.

4.4.6. Ensaios mecânicos

Após a conclusão das uniões soldadas, realizou-se o acabamento superficial dos tubos por meio da utilização de lixas manuais, escovas de aço e discos de acabamento específicos, com o objetivo de remover irregularidades superficiais, respingos e resíduos provenientes do processo de soldagem.

A validação da qualidade das soldas no cenário convencional foi conduzida por meio de ensaio não destrutivo por líquido penetrante, selecionado em razão de sua simplicidade operacional, baixo custo relativo e facilidade de interpretação dos resultados, seguindo as orientações da ABENDI — Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. Para o cenário automatizado, considerou-se a utilização de inspeção dimensional por escaneamento 3D da estrutura, com o objetivo de verificar a conformidade geométrica, identificar desvios dimensionais e avaliar a repetibilidade do processo de fabricação.

Adicionalmente, foram realizados ensaios destrutivos conforme previsto na Seção B6.3.2.5 — Amostra 1 do regulamento. Para a confecção do corpo de prova, utilizou-se o mesmo material empregado nos membros primários da gaiola, unido em ângulo de 90°, configurando uma junta em “T”. Uma das extremidades do conjunto foi rigidamente fixada em uma morsa acoplada à calandra, enquanto a extremidade oposta foi submetida à aplicação de momento fletor por meio de um tubo auxiliar de maior diâmetro e comprimento, com o objetivo de ampliar o braço de alavanca. A força foi aplicada manualmente até a ocorrência de falha ou deformação significativa. Para a Seção B6.3.2.6 — Amostra 2, realizou-se a inspeção destrutiva de uma junta composta por dois tubos unidos a 30°, com comprimento mínimo de 150 mm a partir do centro da união. A avaliação foi conduzida por meio de corte transversal completo da

amostra, permitindo a análise da penetração da solda na região da junta e a verificação da integridade da união soldada.

4.4.7. Pintura

Para a etapa de pintura da estrutura, no cenário convencional, considerou-se inicialmente a preparação superficial dos membros tubulares e dos pontos de fixação por meio de lixamento, remoção de irregularidades, limpeza de resíduos e acabamento das regiões soldadas. Após essa preparação, foi prevista a aplicação da pintura com pistola alimentada por compressor, caracterizando o método convencional adotado para proteção superficial da estrutura. No cenário automatizado, considerou-se a preparação superficial por meio de jateamento completo da estrutura, seguida da aplicação de pintura eletrostática. Esse procedimento foi adotado como referência para representar um processo com maior nível de padronização e controle operacional em relação ao método convencional, permitindo sua inclusão na análise comparativa dos cenários produtivos considerados na metodologia.

4.5. Análise de variações entre o modelo numérico e real

Com o objetivo de avaliar as variações geométricas entre o modelo CAD e a estrutura manufaturada, foi realizado um procedimento de verificação dimensional baseado na comparação entre os pontos de ancoragem da suspensão definidos em projeto e suas respectivas posições na estrutura real. Para essa finalidade, adotou-se um método convencional de inspeção dimensional, utilizando instrumentos de medição mecânica, incluindo paquímetro Starrett®, com faixa de medição de 0 a 300 mm e resolução de 0,05 mm, e escala graduada Starrett®, com faixa de medição de 0 a 500 mm e resolução de 0,5 mm.

Como referência para o sistema de medição, adotou-se o centro geométrico do membro DLC, localizado na região dianteira do chassi e definido como o elemento estrutural mais externo dessa região. A partir desse referencial, foram realizadas medições das distâncias entre o centro do chassi e os pontos de fixação da suspensão dianteira e traseira, permitindo comparar as dimensões da estrutura manufaturada com os valores estabelecidos no modelo geométrico de projeto.

A adoção do método convencional de medição foi motivada por sua simplicidade operacional, baixo custo de implementação e facilidade de aplicação durante as diferentes etapas da manufatura, possibilitando o acompanhamento dimensional da estrutura sem a necessidade de equipamentos especializados de metrologia óptica.

4.6. Ciclo de Vida

A análise de ciclo de vida da estrutura foi conduzida por meio do módulo Ciclo de Vida do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), conforme Apêndice E1, com o objetivo de acompanhar o desempenho operacional do chassi ao longo de sua vida útil prevista. A metodologia integra ferramentas de confiabilidade, gestão da manutenção, análise de risco e controle de custos, relacionando registros de falhas, matriz FMEA, plano de ação 5W2H com priorização GUT, eventos operacionais e custos de manutenção. A vida consumida da estrutura foi determinada a partir da relação entre as horas efetivamente operadas e a vida útil planejada, permitindo estimar as horas restantes e projetar o fim de vida operacional do protótipo.

Para a avaliação dos modos de falha, foi empregada a ferramenta FMEA, conforme diretrizes da IEC 60812 e da MIL-STD-1629A, atribuindo-se índices de severidade, ocorrência e detecção para o cálculo do número de prioridade de risco (RPN). Os modos de falha identificados foram classificados por faixas de criticidade, possibilitando distinguir riscos aceitáveis, situações que exigem mitigação e casos que demandam ação corretiva imediata. As ações resultantes foram priorizadas por meio da matriz GUT e estruturadas em plano 5W2H, estabelecendo a relação entre causa raiz, nível de risco, responsável, ação proposta, prazo e custo associado.

Complementarmente, foram avaliados indicadores de confiabilidade operacional, como MTBF e MTTR, além da distribuição temporal das falhas e da análise de Pareto por causa raiz. O módulo também permitiu registrar os custos de manutenção por data, categoria, horímetro, fornecedor e valor, possibilitando acompanhar o custo acumulado, a evolução mensal dos gastos e a concentração de despesas corretivas. Dessa forma, a metodologia adotada permitiu integrar dados de operação, falhas, risco, ações corretivas e custos em um fluxo único de acompanhamento, contribuindo para a gestão da confiabilidade estrutural e para o planejamento de inspeções, manutenções e melhorias do chassi tubular.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Criação da Geometria

5.1.1. Definições de projeto

Visando à adequação do projeto às exigências de um veículo com tração integral (4×4), a altura da estrutura foi elevada em 100 mm em decorrência da incorporação dos membros ESS (*Elevated Seat Support*), necessários para acomodar o sistema de transmissão no interior do cockpit. Essa modificação permitiu a integração do conjunto mecânico sem comprometer o volume de segurança da gaiola de proteção nem as condições ergonômicas previstas em projeto.

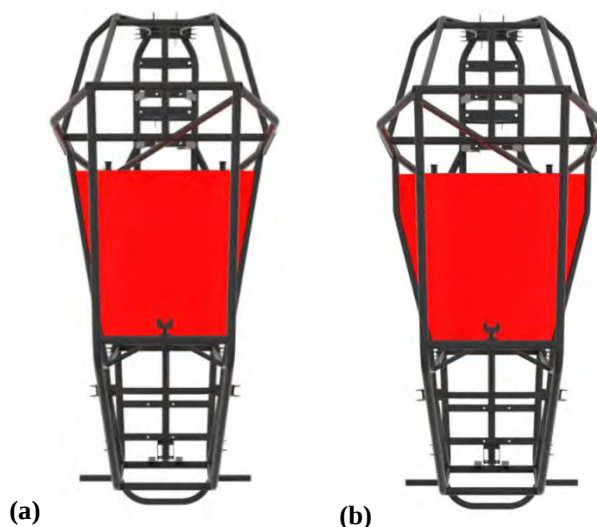
Conforme discutido na Seção 3.1.4.2 – *Travamentos Parede Corta-Chamas*, adotou-se a configuração B para o travamento diagonal lateral do arco principal traseiro (LDB), em razão de sua maior simplicidade geométrica associada ao menor comprimento do membro estrutural. Essa configuração proporcionou uma redução de 36,29% na massa do componente, correspondente a 271,46 g, quando comparada à alternativa remanescente prevista pelo regulamento. Para a Seção 3.1.4.3 – *Travamentos Assoalho*, foi igualmente selecionada a configuração B para o travamento diagonal do LFS (LFDB), por apresentar melhor relação entre eficiência estrutural e redução de massa, resultando em uma diminuição de 20,17% (179,13 g) em comparação à segunda alternativa mais leve (Opção A), em conjunto com a utilização do membro ASB como travamento transversal.

Considerando que o projeto incorpora os membros ESS, o membro USM tornou-se opcional conforme estabelecido pelo regulamento. Dessa forma, optou-se por sua remoção, com o objetivo de reduzir a massa da estrutura em 253,09 g, além de eliminar duas uniões soldadas adicionais, reduzindo potenciais concentrações de tensão e distorções associadas ao processo de fabricação. Em conformidade com a Seção 3.1.4.4 – *Plano Intermediário do Cockpit*, a geometria do cockpit foi otimizada por meio da adoção de dobras estrategicamente posicionadas, favorecendo o aumento do volume interno na região correspondente ao tronco e aos membros superiores do piloto, com redução gradual da seção transversal em direção à extremidade dianteira, onde se localizam os membros inferiores, conforme ilustrado na Figura 5.1b. Essa otimização resultou em um aumento de 9,33% no volume interno do cockpit, equivalente a $8,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, enquanto o acréscimo de massa foi limitado a apenas 0,55% (11,29 g) em relação à configuração sem otimizações geométricas (Figura 5.1a).

No que se refere à Seção 3.1.4.5 – *Travamentos Lateral e Traseiro*, adotou-se a configuração de travamento dianteiro, uma vez que essa solução proporciona maior flexibilidade geométrica para o desenvolvimento do subchassi traseiro e para a integração dos

sistemas mecânicos do veículo. Em contrapartida, a utilização do travamento traseiro impõe restrições geométricas adicionais ao projeto estrutural da região posterior do veículo.

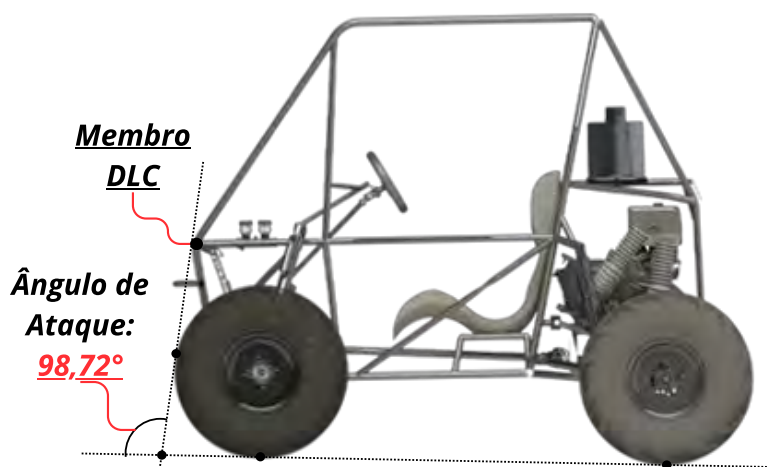
Figura 5.1 – Otimização do volume interno do cockpit



Fonte: Elaborado pelo Autor / CEFAS BAJA SAE

Adicionalmente, definiu-se um ângulo de ataque das rodas de $98,72^\circ$ em relação ao membro DLC, com o objetivo de reduzir a probabilidade de colisões da estrutura dianteira com obstáculos durante a operação do veículo. Essa configuração geométrica favorece o deslocamento inicial dos pneus em relação ao ponto mais externo da dianteira do chassi, conforme ilustrado na Figura 5.2. Considerando que ângulos de ataque superiores a 90° posicionam o pneu à frente da extremidade estrutural dianteira, a solução adotada contribui para melhorar a capacidade de transposição de obstáculos e reduzir solicitações de impacto diretamente sobre os membros estruturais frontais.

Figura 5.2 – Modificações estruturais na gaiola



Fonte: Elaborado pelo Autor / CEFAS BAJA SAE

5.1.2. Definições de materiais

Conforme estabelecido na Seção B6.3.3.1, item (B), do Regulamento Administrativo e Técnico do Baja SAE Brasil (RATBSB), os materiais empregados nos membros primários da gaiola de proteção, mesmo quando apresentam valores de rigidez e resistência à flexão superiores ao material de referência especificado pelo regulamento — aço com teor mínimo de carbono de 0,18%, diâmetro externo de 25,4 mm e espessura de parede de 3,05 mm — devem respeitar as restrições mínimas de espessura de parede igual a 1,57 mm e teor de carbono mínimo de 0,18%.

Essa limitação normativa representa um fator restritivo à utilização de ligas especiais de aço com propriedades mecânicas superiores, capazes de atender aos requisitos de rigidez e resistência à flexão estabelecidos pelo regulamento com menor espessura de parede e, consequentemente, menor massa estrutural. Dessa forma, ainda que materiais de alta resistência apresentem potencial para redução significativa de massa, a espessura mínima imposta pelo regulamento limita parcialmente os ganhos estruturais obtidos por meio da substituição de materiais convencionais.

A partir da comparação entre diferentes seções dos materiais SAE 4130 — amplamente utilizado por equipes Baja SAE no cenário nacional —, Docol R8 — empregado em estruturas tubulares de veículos de alto desempenho, como os utilizados na Stock Car — e aço SAE 1018, é possível observar, na Tabela 5.1, os respectivos teores de carbono e as dimensões avaliadas para cada configuração estrutural analisada.

Tabela 5.1 – Informações gerais das ligas de aço (% de C e dimensões)

DIMENSÕES/ MATERIAL	Aço 1018	Aço SAE 4130 (a)	Aço SAE 4130 (b)	Aço SAE 4130 (c)	Docol R8
Teor de carbono (%)	0,18%	0,30%	0,30%	0,30%	0,15%
Diâmetro Externo (De)	25,40 mm	30 mm	31,75 mm	34,93 mm	31,75 mm
Diâmetro Externo (Di)	19,30 mm	26,80 mm	29,27 mm	32,89 mm	29,27 mm
Espessura (e)	3,05 mm	1,60 mm	1,24 mm	1,016 mm	1,24 mm
Raio externo (c)	12,70 mm	15 mm	15,88 mm	17,46 mm	15,88 mm

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

A Tabela 5.2 apresenta um comparativo das propriedades mecânicas dos diferentes materiais e especificações avaliadas, considerando os cálculos de equivalência estabelecidos na Seção B6.3.3.2 do RATBSB, obtidos por meio do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), conforme apresentado no Apêndice A.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas das ligas de aço

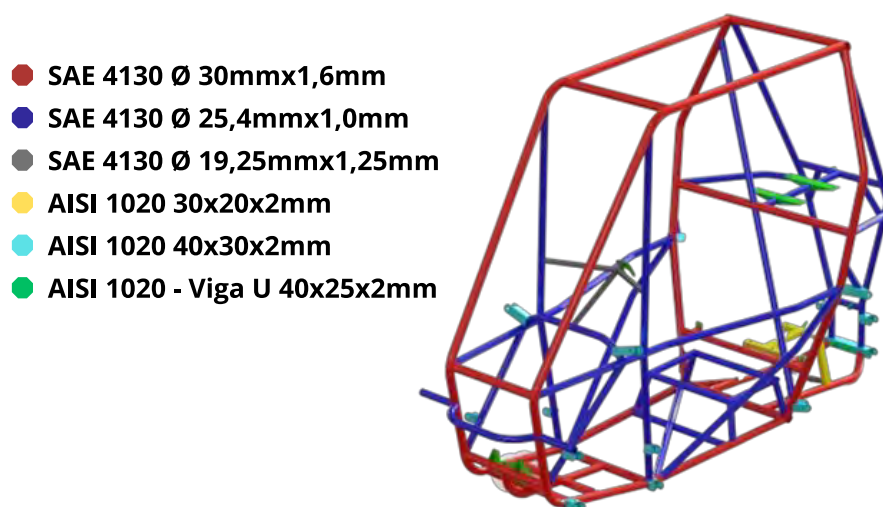
DIMENSÕES/ MATERIAL	Aço 1018	Aço SAE 4130 (a)	Aço SAE 4130 (b)	Aço SAE 4130 (c)	Docol R8
Módulo de Young (E)	205 GPa	205 GPa	205 GPa	205 GPa	210 GPa
Limite de Escoamento (Sy)	370 MPa	510 MPa	510 MPa	510 MPa	700 MPa
Momento de Inércia (I)	$1,3622 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$1,4438 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$1,3852 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$1,5578 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	$1,3852 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
Rigidez	2792,60 Nm ²	2959,80 Nm ²	2839,70 Nm ²	3193,40 Nm ²	2909,00 Nm ²
Resistência a Flexão (Mf)	396,87 Nm	490,90 Nm	445,02 Nm	454,88 Nm	610,81 Nm

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

Com base nos resultados dos cálculos de equivalência apresentados na Tabela 5.2, observa-se que a utilização de ligas especiais associadas a seções distintas da geometria padrão do aço SAE 1018 possibilita atender aos requisitos mínimos de rigidez e resistência à flexão estabelecidos pelo regulamento. Dentre as configurações analisadas, o aço SAE 4130 (a) atende simultaneamente aos requisitos dimensionais mínimos e às propriedades mecânicas exigidas. Por outro lado, as configurações SAE 4130 (b), SAE 4130 (c) e Docol R8 satisfazem os critérios de resistência e rigidez à flexão, porém não atendem às restrições mínimas de espessura definidas pelo regulamento. Adicionalmente, observa-se que o Docol R8 apresenta elevada resistência à flexão quando comparado aos demais materiais avaliados, inclusive aqueles com teor de carbono superior a 0,18%. Entretanto, o material não satisfaz o requisito mínimo de teor de carbono estabelecido na Seção B6.3.3.1, item (B), do RATBSB.

Considerando os requisitos normativos relativos à espessura mínima, teor de carbono e resistência mecânica dos membros primários da gaiola de proteção, definiu-se a utilização do aço SAE 4130 com diâmetro externo de 30 mm e espessura de parede de 1,6 mm. Essa configuração apresentou valores de rigidez à flexão e resistência à flexão 6% e 23,7% superiores, respectivamente, em relação à configuração de referência estabelecida pelo regulamento, além de proporcionar uma redução de massa de 33,34%. As especificações dos materiais empregados na estrutura são apresentadas na Figura 5.3.

Figura 5.3. – Divisão dos aços utilizados na estrutura



Fonte: Elaborado pelo Autor / CEFAST BAJA SAE

5.1.3. Estimativa de massa da estrutura

A partir da metodologia de cálculo implementada no SDI, obteve-se uma massa estimada de 38,269 kg para os membros tubulares, 3,235 kg para as chapas estruturais e 2,038 kg para os cordões de solda, totalizando uma massa prevista de 43,542 kg para a estrutura completa, conforme apresentado no Apêndice B. A massa real do chassi manufaturado foi de 42,663 kg.

A comparação entre os valores analítico e experimental indicou uma variação negativa de 2,02%, correspondente a aproximadamente 0,879 kg. Essa diferença é considerada coerente com as simplificações inerentes ao modelo de previsão de massa e com os ajustes geométricos realizados durante a manufatura, especialmente em função da elevada complexidade geométrica da estrutura. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram boa concordância entre o modelo analítico e a estrutura fabricada, evidenciando a adequação do método empregado como ferramenta complementar para estimativa e verificação de massa em chassis tubulares automotivos.

5.2. Estudos Ergonômicos

5.2.1. Gabarito físico

Durante os testes realizados no gabarito físico, verificou-se que os pilotos apresentaram posicionamento satisfatório em relação aos principais comandos do veículo, possibilitando avaliar experimentalmente o alcance aos pedais de aceleração e freio, o posicionamento do volante, a acomodação do assento, a geometria do encosto de cabeça e o alinhamento das tiras do cinto de segurança. Além disso, observou-se que as condições de entrada e saída do cockpit permaneceram compatíveis com as limitações dimensionais do veículo e com os requisitos estabelecidos pelo regulamento da competição. A utilização do mock-up físico mostrou-se importante durante o processo de desenvolvimento ergonômico, permitindo identificar antecipadamente possíveis interferências entre o piloto e os elementos estruturais do cockpit ainda na fase conceitual do projeto, contribuindo para redução da necessidade de modificações posteriores na estrutura tubular definitiva.

5.2.2. Análise ergonômica

A análise biomecânica realizada no ambiente ergonômico do software CATIA® resultou em score final RULA igual a 3 para o maior percentil avaliado (P99 masculino), conforme apresentado na Figura 5.4. Segundo a classificação do método, esse resultado indica condição postural aceitável, com baixo risco ergonômico e necessidade apenas de investigação complementar e possíveis refinamentos futuros. Considerando as limitações geométricas inerentes a veículos Baja SAE, caracterizados por cockpits compactos e elevada restrição dimensional, o valor obtido pode ser considerado bastante satisfatório, principalmente por representar a condição crítica de acomodação associada ao maior percentil antropométrico previsto no regulamento da competição.

A avaliação individual dos segmentos corporais demonstrou que membros superiores, pescoço, tronco e membros inferiores apresentaram pontuações compatíveis com baixo risco ergonômico, sendo observado maior nível de atenção apenas na região dos punhos e na interação braço-punho, comportamento associado principalmente à limitação de espaço típica desse tipo de veículo. Além disso, destaca-se que os melhores níveis de conforto e acomodação tendem a ocorrer para pilotos pertencentes aos percentis antropométricos intermediários, uma vez que estes apresentam maior compatibilidade dimensional com a geometria otimizada do cockpit, desenvolvida para atender simultaneamente uma ampla faixa de usuários sem comprometer os requisitos estruturais e regulamentares do veículo.

Figura 5.4 – Resultado P99 masculino - Método RULA - Software CATIA®

Fonte: CEFAST BAJA SAE

Além da pontuação RULA, foram avaliados ângulos articulares relacionados à postura de condução do piloto. A Tabela 5.3 apresenta os intervalos de referência adotados e os resultados obtidos durante a análise ergonômica.

Tabela 5.3 – Ângulos articulares avaliados na análise ergonômica do cockpit e respectivos intervalos de referência biomecânica baseados na SAE J1100 e no método RULA

Ângulo	Referência Ergonômica	Faixa de Referência	Resultado Obtido
A	Flexão joelho-coxa	$90^\circ < A < 120^\circ$	82,84°
B	Relação tronco-coxa	$95^\circ < B < 120^\circ$	120,75°
C	Ângulo do tornozelo	$85^\circ < C < 100^\circ$	88,68°
D	Inclinação do tronco	$15^\circ < D < 45^\circ$	37,37°
E	Flexão do cotovelo	$80^\circ < E < 160^\circ$	135,8°
F	Alinhamento braço-antebraço	$170^\circ < F < 190^\circ$	184,69°
G	Flexão do braço em relação ao tronco	$0^\circ < G < 45^\circ$	29,16°
H	Inclinação cervical	$-85^\circ < H < 0^\circ$	-27,9°

Fonte: CEFAST BAJA SAE

Os resultados demonstraram que a maior parte dos parâmetros avaliados permaneceu dentro das faixas ergonomicamente aceitáveis. Os ângulos C, D, E, F, G e H apresentaram conformidade com os intervalos de referência adotados, indicando adequado alinhamento postural e alcance funcional durante a condução simulada. O ângulo A apresentou valor inferior ao limite mínimo estabelecido, indicando maior flexão dos membros inferiores, comportamento associado às limitações dimensionais características do cockpit compacto de veículos Baja SAE. Entretanto, não foram relatados desconfortos significativos durante os testes realizados no mock-up físico. O ângulo B apresentou valor ligeiramente superior ao limite máximo adotado, porém a diferença observada foi inferior a 1°, sendo considerada desprezível frente às

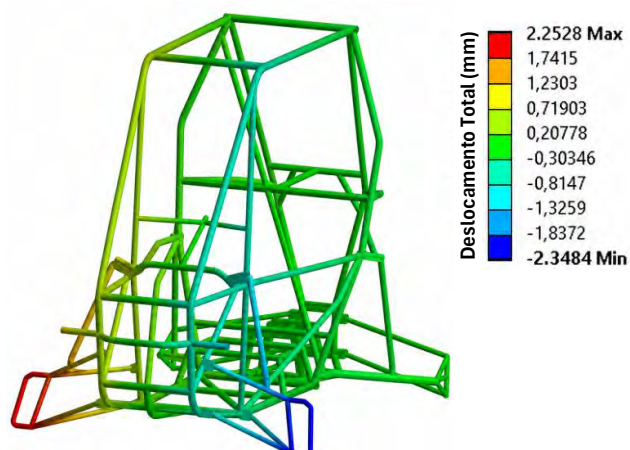
tolerâncias da modelagem CAD e às variações antropométricas dos pilotos avaliados. De forma geral, os resultados indicaram que a geometria proposta para o cockpit apresentou compatibilidade satisfatória com os critérios ergonômicos adotados no projeto, proporcionando adequada acomodação do piloto, acessibilidade aos comandos e conforto operacional preliminar do veículo.

5.3. Validação da geometria

5.3.1. Análise de rigidez torcional

Os resultados obtidos na análise de rigidez torcional indicaram comportamento estrutural compatível com o esperado para chassis tubulares do tipo *space frame* aplicados a veículos off-road. A distribuição de deformações evidenciou maior deslocamento relativo nas regiões dianteiras submetidas ao binário torcional, enquanto a região traseira apresentou comportamento compatível com as restrições impostas no modelo, demonstrando adequada continuidade dos caminhos de carga e eficiência dos travamentos estruturais empregados, conforme Figura 5.5. A Tabela 5.4 lista os resultados de rigidez obtidos para cada setup de carga (binário) analisado.

Figura 5.5 – Resultado Rigidez Torcional – Software Ansys Workbench®



Fonte: CEFAS BAJA SAE

A partir da relação entre o torque aplicado e o deslocamento angular resultante, obteve-se uma rigidez torcional equivalente a $1553,72 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$. O valor obtido demonstra que a estrutura apresenta rigidez suficiente para minimizar deformações torcionais excessivas durante a operação do veículo, contribuindo para maior previsibilidade dinâmica, melhor controle da geometria da suspensão e redução da influência da deformabilidade estrutural sobre a transferência lateral de carga.

Tabela 5.4 – Resultados de Rigidez Torcional obtidos para cada setup avaliado

Setups/ Parâmetros		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Input	Força [N]	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00
	Deslocamento esquerdo [m]	2,2592 E-04	4,5185 E-04	6,7731 E-04	9,0304 E-04	1,1281 E-03	1,3536 E-03	1,5784 E-03	1,8035 E-03	2,0280 E-03	2,2528 E-03
	Deslocamento direito[m]	2,3412 E-04	4,6861 E-04	7,0282 E-04	9,3773 E-04	1,1722 E-03	1,4074 E-03	1,6421 E-03	1,8776 E-03	2,1127 E-03	2,3484 E-03
	Bitola [m]	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Output	Y1+Y2 [m]	0,00046	0,00092	0,00138	0,00184	0,00230	0,00276	0,00322	0,00368	0,00414	0,00460
	θ Total [°]	0,04118	0,08240	0,12356	0,16479	0,20593	0,24718	0,28831	0,32955	0,37069	0,41191
	Torque [N·m]	64,00	128,00	192,00	256,00	320,00	384,00	448,00	512,00	576,00	640,00
	Rigidez [N·m/°]	1553,97	1553,33	1553,96	1553,46	1553,91	1553,55	1553,87	1553,65	1553,86	1553,72

Fonte: CEFAST BAJA SAE

Adicionalmente, verificou-se uma relação aproximada de 19:1 entre a rigidez torcional do chassi e a rigidez do sistema de suspensão. Conforme os critérios discutidos por Deakin et al. (2000), relações superiores a 10:1 indicam que a deformação estrutural exerce influência reduzida sobre o comportamento dinâmico do veículo, permitindo que os parâmetros da suspensão sejam predominantes no controle da transferência lateral de carga e da resposta dinâmica do conjunto.

A relação de rigidez obtida, significativamente superior ao valor mínimo recomendado na literatura, também evidencia a existência de margem para futuros estudos de otimização estrutural. Nesse contexto, torna-se possível avaliar refinamentos geométricos voltados à redução de massa, por meio da reconfiguração ou remoção de determinados travamentos estruturais permitidos pelo regulamento, sem comprometer significativamente a relação de rigidez entre o chassi e o sistema de suspensão, bem como o desempenho estrutural global da gaiola de proteção.

5.3.2. Análise modal

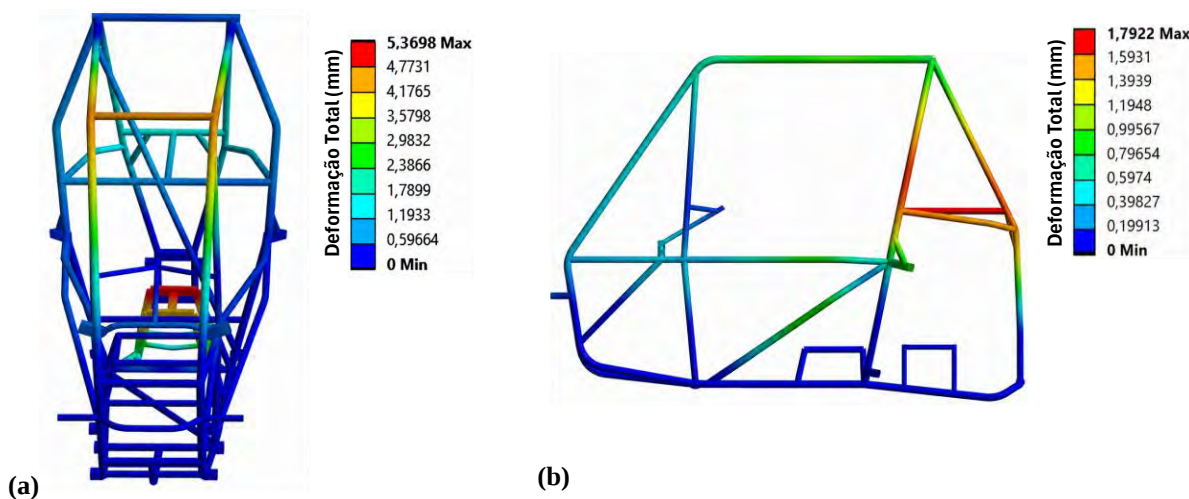
Na análise modal, foram identificadas frequências naturais aproximadas de 38,43 Hz para o modo torcional predominante da estrutura, associado à torção global do chassi em torno do eixo Z (Figura 5.6a), e de 50,93 Hz para o modo associado à flexão global do chassi no eixo X (Figura 5.6b). As principais frequências de excitação relacionadas ao funcionamento do conjunto motriz Honda® GX390 foram avaliadas em diferentes regimes de rotação, conforme apresentado na Tabela 5.5. Para essa avaliação, consideraram-se a frequência de combustão do motor de quatro tempos, a frequência fundamental de rotação do virabrequim e suas segunda e terceira harmônicas.

Tabela 5.5 – Frequências de excitação do conjunto motriz Honda® GX390 em diferentes regimes de rotação

Frequência (Hz)/ Rotação (rpm)	Combustão - Motor 4T (Hz)	Rotação do Virabrequim (Hz)	2ª Harmônica (Hz)	3ª Harmônica (Hz)
1800	15,00	30,00	60,00	90,00
2100	17,50	35,00	70,00	105,00
3900	32,50	65,00	130,00	195,00

Fonte: CEFAST BAJA SAE

Figura 5.6 – Resultado Análise Modal – Software Ansys Workbench®



Fonte: CEFAST BAJA SAE

Em relação à frequência de combustão, observa-se afastamento entre as frequências excitadoras avaliadas e os modos naturais da estrutura. No cenário mais próximo, o modo torcional apresentou diferença aproximada de 15% em relação à frequência de combustão a 3900 rpm, enquanto o modo de flexão global apresentou diferença aproximada de 36% na mesma rotação. Para a frequência fundamental de rotação do virabrequim, verifica-se maior proximidade entre as frequências excitadoras e os modos naturais, com diferença aproximada de 9% para o modo torcional a 2100 rpm e de 28% para o modo de flexão global a 3900 rpm.

No que se refere à segunda harmônica, o cenário mais próximo ocorre para o modo de flexão global a 1800 rpm, com diferença aproximada de 18%, enquanto, para o modo torcional, o menor afastamento identificado foi de aproximadamente 56% a 1800 rpm. Já para a terceira harmônica, as frequências naturais permaneceram mais afastadas das excitações avaliadas, com diferença superior a 77% no cenário mais crítico.

Conforme os valores apresentados, observa-se que os modos naturais de vibração da estrutura se encontram dentro da faixa associada à frequência fundamental de rotação do virabrequim. Os pontos de maior atenção ocorrem em aproximadamente 2306 rpm para o modo torcional e 3056 rpm para o modo de flexão global, rotações nas quais a frequência fundamental do motor se aproxima diretamente das frequências naturais obtidas. No entanto, considerando o perfil operacional do veículo, essas rotações tendem a ocorrer predominantemente em condições transitórias de aceleração ou retomada, não sendo mantidas de forma permanente durante a operação. Dessa forma, embora exista possibilidade de acoplamento dinâmico em regimes específicos, a probabilidade de ocorrência de ressonância sustentada e de amplificação dinâmica significativa das vibrações estruturais é reduzida.

Ressalta-se, entretanto, que a ocorrência efetiva de ressonância depende não apenas da proximidade entre frequências naturais e frequências excitadoras, mas também da amplitude da excitação, do amortecimento estrutural, da rigidez dos apoios do conjunto motriz, das massas acopladas, das condições de fixação e da interação do veículo com o solo.

5.4. Manufatura

5.4.1. Planejamento e controle de produção/ Suprimentos

A análise comparativa entre os cenários convencional e automatizado permitiu avaliar a influência do nível de automação sobre a composição dos tempos e custos de manufatura da estrutura. Para isso, os resultados foram organizados em três categorias principais — mão de obra, equipamentos e insumos —, possibilitando identificar a participação relativa de cada recurso no processo produtivo.

Os resultados detalhados das análises de tempo e custo são apresentados no Apêndice C, enquanto a síntese geral é consolidada nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, correspondentes, respectivamente, às categorias de mão de obra, equipamentos e insumos. Esses resultados fornecem a base para a comparação entre os cenários produtivos e para a identificação das etapas de maior impacto operacional e econômico na manufatura da estrutura tubular.

Tabela 5.6 – Comparativo de tempo e custo com mão de obra por cenário produtivo

Etapa	Convencional		Automatizado	
	Tempo (h)	Custo (R\$)	Tempo (h)	Custo (R\$)
Corte de Tubos	7,875	R\$ 708,75	2,742	R\$ 191,92
Corte de Chapas	2,243	R\$ 246,68	0,789	R\$ 67,05
Dobras	10,208	R\$ 1.020,83	3,063	R\$ 245,00
Ajustagem	37,188	R\$ 4.090,63	5,590	R\$ 419,27
Montagem de Gabarito	43,021	R\$ 7.098,44	39,813	R\$ 5.971,88
Soldagem	23,576	R\$ 3.064,86	18,351	R\$ 1.743,33
Inspeção	12,639	R\$ 1.769,44	8,507	R\$ 935,76
Pintura	6,308	R\$ 567,72	2,428	R\$ 182,12
Total	143,057	R\$ 18.567,35	81,282	R\$ 9.756,32

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

Tabela 5.7 – Comparativo de tempo e custo com equipamentos por cenário produtivo

Etapa	Convencional		Automatizado	
	Tempo (h)	Custo (R\$)	Tempo (h)	Custo (R\$)
Corte de Tubos	7,875	R\$ 196,88	2,742	R\$ 493,50
Corte de Chapas	2,243	R\$ 134,55	0,789	R\$ 220,86
Dobras	10,208	R\$ 408,33	3,063	R\$ 367,50
Ajustagem	37,188	R\$ 557,81	5,590	R\$ 447,22
Montagem de Gabarito	43,021	R\$ 430,21	39,813	R\$ 1.592,50
Soldagem	23,576	R\$ 825,16	18,351	R\$ 4.037,17
Inspeção	12,639	R\$ 252,78	8,507	R\$ 1.276,04
Pintura	6,308	R\$ 189,24	2,428	R\$ 388,52
Total	143,057	R\$ 2.994,95	81,282	R\$ 8.823,32

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

Tabela 5.8 – Comparativo de custo com insumos por cenário produtivo

Etapas	Convencional		Automatizado	
Estrutural	R\$	6.404,04	R\$	6.211,92
Montagem de Gabarito	R\$	577,50	R\$	577,50
Inspeção	R\$	484,70	R\$	484,70
Pintura	R\$	450,52	R\$	372,43
Soldagem	R\$	284,53	R\$	222,21
Corte	R\$	245,52	R\$	31,68
Ajustagem	R\$	70,68	R\$	31,84
Chapa	R\$	37,20	R\$	36,45
Dobra	R\$	36,02	R\$	36,02
Total	R\$	8.590,71	R\$	8.004,76

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

Conforme observado nas Tabelas 5.6 e 5.7, o cenário automatizado apresentou ganho expressivo de tempo produtivo em relação ao cenário convencional, considerando a fabricação de uma estrutura completa, desde o corte dos materiais até a pintura final. A redução obtida foi de 43,18%, equivalente a 61,78 h, resultado associado à maior otimização dos recursos produtivos, à redução de atividades manuais e à utilização de equipamentos com maior capacidade de repetibilidade e produtividade.

No que se refere ao custo de mão de obra (Tabela 5.6), o cenário convencional apresentou valor 90,31% superior ao automatizado, correspondendo a uma diferença de R\$ 8.811,03. Esse resultado está diretamente relacionado à maior dependência de operadores nas etapas de corte, dobra, ajustagem, soldagem, acabamento e pintura, características de processos com menor nível de automação.

Em contrapartida, o custo associado aos equipamentos (Tabela 5.7) foi 194,61% superior no cenário automatizado, representando um acréscimo de R\$ 5.828,37 em relação ao convencional. Esse comportamento é coerente com a substituição parcial da mão de obra direta por equipamentos especializados, como máquinas CNC, sistemas automatizados de corte, soldagem robotizada e processos de acabamento com maior controle operacional.

Em relação aos insumos (Tabela 5.8), observou-se pequena variação entre os cenários, com custo 7,32% superior no cenário convencional, equivalente a R\$ 585,95. Essa diferença pode ser atribuída ao maior consumo de materiais auxiliares em processos manuais, como abrasivos, ferramentas de acabamento, consumíveis e recursos de apoio, enquanto os processos automatizados tendem a favorecer maior controle de aplicação e melhor aproveitamento dos insumos ao longo da manufatura.

Por fim, conforme apresentado na Tabela 5.9, observa-se que, no cenário convencional, a maior parcela dos custos está associada à mão de obra, correspondendo a 61,58% do custo total, seguida pelos insumos, com 28,49%, e pelos equipamentos, com 9,93%. Esse comportamento evidencia a maior dependência de atividades manuais no processo convencional, principalmente nas etapas de ajustagem, soldagem, acabamento e pintura.

No cenário automatizado, por sua vez, a distribuição dos custos apresenta maior equilíbrio entre as categorias analisadas, sendo 36,70% direcionados à mão de obra, 33,19% aos equipamentos e 30,11% aos insumos. Essa composição indica uma transferência parcial da representatividade dos custos de mão de obra para os equipamentos, característica esperada em processos com maior nível de automação. Além disso, a maior uniformidade dos custos sugere maior padronização do processo produtivo e menor concentração de recursos em uma única categoria operacional.

Tabela 5.9 – Comparativo de custo por categoria por cenário produtivo

Categoria	Convencional	Automatizado
Mão de Obra	R\$ 18.567,35	R\$ 9.756,32
Equipamentos	R\$ 2.994,95	R\$ 8.823,32
Insumos	R\$ 8.590,71	R\$ 8.004,76
Total	R\$ 30.153,02	R\$ 26.584,39

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

5.4.2. Corte e dobra

Para o processo de corte de tubos, observou-se que o cenário convencional apresentou tempo e custo superiores ao processo automatizado em 187,23% e 7,51%, respectivamente. Esse resultado indica que, embora a diferença de custo entre os cenários seja relativamente moderada, a automação proporciona ganho expressivo de produtividade nessa etapa, principalmente em função da maior velocidade de execução, da melhor padronização dos cortes e da redução da dependência de operações manuais.

No corte de chapas, o cenário convencional também apresentou desempenho inferior ao automatizado, com tempo 184,30% superior e custo 59,08% maior. Nesse caso, os resultados evidenciam uma vantagem operacional e econômica mais acentuada do processo automatizado, associada à maior precisão dimensional, à redução de retrabalhos e à maior eficiência na execução dos cortes quando comparado ao processo convencional ou semiautomatizado.

Para as operações de dobra, o processo convencional apresentou tempo 233,33% superior e custo 125,93% maior em relação ao processo de dobra CNC. Esse comportamento

evidencia o elevado impacto da automação nessa etapa, uma vez que a dobra CNC permite maior repetibilidade geométrica, menor tempo de preparação e maior controle dos parâmetros de conformação.

De modo geral, os indicadores analisados sugerem que a automação se apresenta como a alternativa mais eficiente para as etapas de corte e dobra, especialmente quando considerados os ganhos de produtividade, redução de variabilidade dimensional e menor dependência de intervenções manuais ao longo da manufatura da estrutura tubular.

5.4.3. Ajustagem mecânica

No que diz respeito à ajustagem mecânica, o processo automatizado se destaca como a alternativa mais eficiente, uma vez que o corte a laser dos tubos permite a obtenção das extremidades e superfícies de encaixe em conformidade com a geometria definida em projeto. Dessa forma, a etapa de ajustagem é significativamente reduzida, restringindo-se, em geral, à limpeza de impurezas, à preparação superficial e a pequenos ajustes prévios à soldagem.

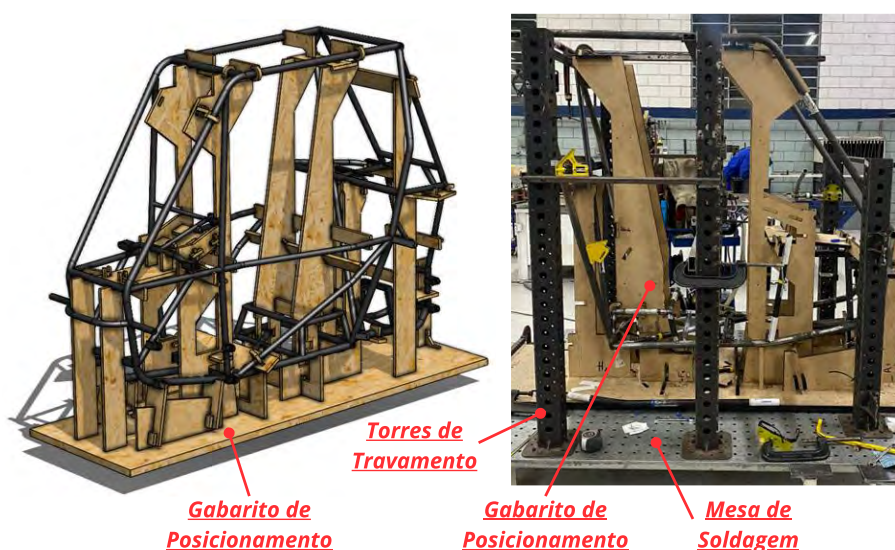
No processo convencional, por outro lado, a ajustagem mecânica constitui uma das etapas mais críticas e morosas da manufatura, em razão da necessidade de execução manual de bocas de lobo, chanfros, correções dimensionais e adequações de encaixe entre os membros estruturais. Nesse cenário, a etapa foi responsável por aproximadamente 26,00% do tempo total de fabricação, equivalente a 37,19 h, e por 15,65% do custo total, correspondente a R\$ 4.719,12. Esses resultados evidenciam a elevada influência da ajustagem manual sobre o tempo produtivo e o custo de manufatura da estrutura tubular.

5.4.4. Montagem de gabaritos

Do ponto de vista da montagem de gabaritos, observa-se que essa etapa apresentou elevada representatividade nos dois cenários analisados, em razão de sua maior morosidade operacional e da menor margem de automação quando comparada às etapas de corte, dobra e ajustagem. No cenário convencional, o tempo de execução foi 8,06% superior em relação ao automatizado, enquanto, no cenário automatizado, o custo foi apenas 0,44% superior, diferença associada à maior complexidade dos recursos, equipamentos e atividades de preparação necessários à sua execução. Diante da pequena variação entre os indicadores de tempo e custo, a montagem de gabaritos apresenta comportamento semelhante nos dois cenários. No entanto, considerando que o ganho de tempo proporcionado pelo cenário automatizado é reduzido e vem acompanhado de custo ligeiramente superior, o processo convencional, nesse caso específico, apresenta-se como a alternativa mais viável para a execução dessa etapa.

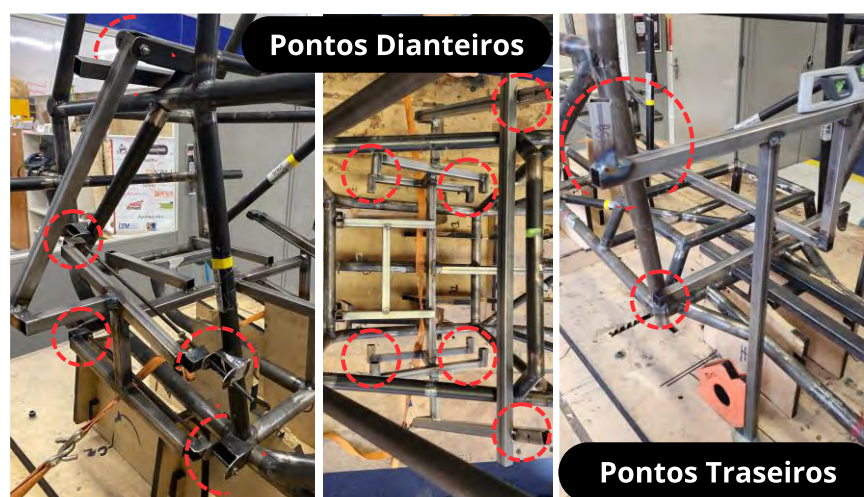
Além disso, a utilização de gabaritos de posicionamento, torres de travamento e dispositivos dedicados aos pontos de suspensão, conforme ilustrado nas Figuras 5.7 e 5.8, permitiu maior controle geométrico da estrutura durante a montagem e a soldagem. Esses recursos contribuíram para restringir deslocamentos e rotações dos membros tubulares, reduzindo a ocorrência de distorções e empenamentos provenientes dos ciclos térmicos do processo de soldagem.

Figura 5.7 – Gabaritos destinados a manufatura da estrutura



Fonte: CEFAST BAJA SAE

Figura 5.8 – Gabaritos destinados a manufatura dos pontos de suspensão



Fonte: CEFAST BAJA SAE

5.4.5. Soldagem

No que tange ao processo de soldagem, observa-se menor variação de tempo entre os cenários convencional e automatizado quando comparado às demais etapas com potencial de automatização. Esse comportamento está associado à elevada complexidade geométrica da

estrutura, à presença de uniões envolvendo múltiplos membros tubulares e às dificuldades de acesso em determinadas regiões do chassi, fatores que limitam parcialmente os ganhos proporcionados pela automação.

Nesse contexto, o tempo de execução do processo convencional foi 28,47% superior ao automatizado, enquanto o custo do processo automatizado foi 43,79% superior ao convencional. Embora a automação proporcione redução no tempo de soldagem, o aumento de custo associado à utilização de equipamentos especializados e à complexidade de programação e operação do sistema automatizado reduz sua atratividade para este caso específico. Dessa forma, considerando a geometria analisada, o volume unitário de fabricação e a diferença entre os indicadores de tempo e custo, o processo convencional apresenta-se como a alternativa mais indicada para a etapa de soldagem neste cenário.

5.4.6. Ensaios mecânicos

Sob a perspectiva do processo de inspeção mecânica, verifica-se que o cenário convencional, representado pelo ensaio por Líquido Penetrante, apresentou tempo 48,57% superior ao processo automatizado, realizado por Scanner 3D. Em contrapartida, o custo do processo automatizado foi 7,56% maior. Embora tais métodos possam ser considerados complementares, justificando sua utilização conjunta para uma avaliação mais abrangente da estrutura, a análise isolada dos critérios de tempo, custo e complexidade operacional indica maior consistência do processo convencional. Esse resultado se deve, sobretudo, à sua simplicidade de execução, menor exigência tecnológica e menor custo associado.

Em consonância com os ensaios destrutivos previstos no regulamento, foram realizados o ensaio destrutivo e a inspeção destrutiva dos corpos de prova correspondentes aos dois soldadores avaliados. Conforme apresentado na Figura 5.9, no ensaio de torção, a falha ocorreu no material de base, e não no cordão de solda, evidenciando a adequada resistência da união soldada e a integridade da junta em relação ao carregamento aplicado. Na Figura 5.10, por sua vez, observa-se a seção da junta soldada submetida à inspeção destrutiva, na qual é possível verificar a qualidade do cordão de solda e a adequada penetração do material de adição na região da união. Esses resultados indicam domínio técnico dos soldadores quanto à execução do processo, à regulação dos parâmetros da máquina, ao controle térmico e às demais variáveis operacionais associadas à soldagem da estrutura tubular.

Figura 5.9 – Resultado do Ensaio de Flexão – Corpo de Prova com União em 90°



Fonte: CEFAS BAJA SAE

Figura 5.10 – Inspeção Destrutiva (Aspecto externo do cordão e Corte para visualização da penetração da solda) – Corpo de Prova com União em 30°



Fonte: CEFAS BAJA SAE

5.4.7. Pintura

No que concerne à etapa de pintura, o processo convencional apresentou tempo e custo superiores ao processo automatizado em 159,77% e 28,04%, respectivamente. Esse resultado indica vantagem significativa do cenário automatizado, no qual a preparação superficial por jateamento, seguida da aplicação de pintura eletrostática, contribui para maior eficiência operacional e redução do tempo de execução. Além disso, a adoção do processo automatizado representa uma alternativa mais adequada para essa etapa, uma vez que permite maior padronização da preparação superficial, melhor controle da aplicação do revestimento e maior uniformidade do acabamento, quando comparada ao método convencional de lixamento e pintura com pistola alimentada por compressor.

5.4.8. Manufatura híbrida

Com base na análise de tempo e custo realizada para cada etapa da manufatura, os resultados indicam que a adoção de uma estratégia híbrida apresenta maior equilíbrio entre produtividade e viabilidade econômica, uma vez que permite combinar os processos mais vantajosos de cada cenário produtivo analisado. Dessa forma, tornou-se possível integrar operações convencionais e automatizadas de acordo com o melhor desempenho observado em cada etapa, considerando simultaneamente critérios de produtividade, custo operacional, complexidade de execução e disponibilidade de recursos. Assim, a Tabela 5.10 apresenta a composição do cenário híbrido otimizado, estruturado a partir da seleção das alternativas mais eficientes para a fabricação da estrutura tubular.

Tabela 5.10 – Composição do cenário híbrido otimizado por tempo e categorias de custo

Etapa	Tempo (h)	Mão de Obra		Equipamento		Insumos		Total
Corte de Tubos (Auto.)	2,742	R\$	191,92	R\$	493,50	R\$	6.227,76	R\$ 6.913,17
Corte de Chapas (Auto.)	0,789	R\$	67,05	R\$	220,86	R\$	52,29	R\$ 340,20
Dobras (Auto.)	3,063	R\$	245,00	R\$	367,50	R\$	36,02	R\$ 648,52
Ajustagem (Auto.)	5,590	R\$	419,27	R\$	447,22	R\$	31,84	R\$ 898,33
Montagem de Gabarito (Conv.)	43,021	R\$	7.098,44	R\$	430,21	R\$	577,50	R\$ 8.106,15
Soldagem (Conv.)	23,576	R\$	3.064,86	R\$	825,16	R\$	284,53	R\$ 4.174,55
Inspeção (Conv.)	12,639	R\$	1.769,44	R\$	252,78	R\$	484,70	R\$ 2.506,93
Pintura (Auto.)	2,428	R\$	182,12	R\$	388,52	R\$	372,43	R\$ 943,07
Total	93,847	R\$	13.038,10	R\$	3.425,75	R\$	8.067,08	R\$ 24.530,92

Fonte: Elaborado pelo Autor – Sistema SDI

Em termos gerais, a adoção do cenário híbrido proporcionou redução de 34,40% no tempo total de fabricação e de 18,65% no custo total do processo, correspondente a uma economia de R\$ 5.622,09 em relação ao cenário convencional. Em comparação ao cenário totalmente automatizado, o cenário híbrido apresentou redução de custo de 7,72%, equivalente a R\$ 2.053,47, associada a um aumento de 15,46% no tempo total de fabricação.

Dessa forma, observa-se que o cenário híbrido apresenta melhor relação entre custo e produtividade quando comparado ao processo convencional, ao passo que o cenário automatizado se destaca pela maior redução no tempo de fabricação, tornando-se mais vantajoso em situações nas quais a produtividade constitui fator prioritário e existe margem para absorção de maiores custos operacionais.

5.5. Análise de variações entre o modelo numérico e real

A comparação entre as dimensões obtidas experimentalmente e os valores definidos no modelo geométrico de projeto permitiu avaliar os desvios dimensionais introduzidos durante as

etapas de fabricação, montagem e soldagem da estrutura tubular. Os resultados indicaram uma variação dimensional aproximada de 2,93% entre o modelo numérico e a estrutura manufaturada, considerando as distâncias entre o centro geométrico do chassi e os respectivos pontos de ancoragem da suspensão. As diferenças observadas são atribuídas predominantemente às deformações térmicas induzidas durante o processo de soldagem, bem como às tolerâncias inerentes às operações de corte, dobra, ajustagem e posicionamento dos membros estruturais. Ainda assim, os resultados demonstraram adequada repetibilidade geométrica da estrutura manufaturada, evidenciando que a utilização de gabaritos, dispositivos de travamento e controle dimensional contribuiu significativamente para a redução de empenamentos e desvios geométricos ao longo do processo manufatureiro.

5.6. Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida do protótipo CB12 permitiu consolidar indicadores operacionais, de confiabilidade e de manutenção, fornecendo uma visão integrada da condição geral do veículo ao final do seu período de utilização, conforme Apêndice E1. O protótipo apresentou score de saúde de 72/100, com 145,3 horas operadas em relação às 192 horas planejadas, correspondendo a 75,7% da vida útil consumida e aproximadamente 47 horas restantes. Esses resultados indicam que o veículo manteve condição operacional satisfatória ao longo do ciclo analisado, ainda que sua utilização tenha sido encerrada após dois anos, em conformidade com o regulamento aplicável.

No que se refere à confiabilidade, o histórico registrou apenas duas falhas relevantes: a fixação da haste da antena, associada ao subdimensionamento do componente, e o reboque dianteiro, decorrente de colisão com obstáculo. As ações corretivas correspondentes totalizaram R\$ 500,00, contemplando a manufatura de uma nova fixação e de um novo reboque dianteiro. A análise FMEA indicou RPN máximo de 50, enquanto o plano 5W2H + GUT apresentou criticidade máxima de 40, ambos relacionados à fixação da haste da antena, evidenciando que os principais modos de falha foram identificados, priorizados e tratados de forma estruturada.

De modo geral, os resultados evidenciam que o módulo de Ciclo de Vida do SDI contribuiu para a sistematização das ocorrências, o controle dos custos de manutenção e o acompanhamento técnico da vida operacional do protótipo. Embora o encerramento de sua utilização tenha ocorrido por critério regulamentar, os indicadores obtidos demonstram estabilidade operacional, reduzida incidência de intervenções corretivas e a relevância do módulo como ferramenta de apoio à gestão, rastreabilidade e documentação técnica do ciclo de vida.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar uma metodologia integrada para o desenvolvimento de um chassi tubular aplicado a veículo off-road do tipo Baja, contemplando as etapas de concepção geométrica, validação estrutural, seleção de materiais, manufatura, soldagem, controle de qualidade, análise de custos e acompanhamento do ciclo de vida. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o objetivo geral foi atendido, uma vez que foi estruturado um fluxo metodológico capaz de articular etapas tradicionalmente conduzidas de forma segmentada, promovendo maior organização das informações, rastreabilidade técnica e consistência no processo de desenvolvimento da estrutura.

As principais conclusões deste estudo são:

- O Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI) mostrou-se adequado como ferramenta de apoio à metodologia proposta, ao centralizar informações de projeto, materiais, perfis estruturais, manufatura, soldagem, custos, inspeção e ciclo de vida. Sua aplicação contribuiu para reduzir a fragmentação das informações, fortalecer a rastreabilidade técnica e preservar o conhecimento gerado ao longo do desenvolvimento do chassi.
- A concepção geométrica do chassi permitiu compatibilizar os requisitos do RATBSB, a integração dos subsistemas mecânicos e as condições funcionais do cockpit. As principais decisões geométricas incluíram a elevação da estrutura em 100 mm para acomodação do sistema de transmissão, a otimização dos travamentos estruturais e o aumento de 9,33% no volume interno do cockpit, com acréscimo de massa limitado a 0,55%.
- A seleção de materiais, conduzida com base nos critérios de equivalência do RATBSB, indicou o aço SAE 4130 com diâmetro externo de 30 mm e espessura de 1,6 mm como solução adequada para os membros primários da gaiola. Essa configuração atendeu aos requisitos regulamentares e proporcionou ganhos de 6% em rigidez à flexão, 23,7% em resistência à flexão e redução de massa de 33,34% em relação à configuração de referência.
- A metodologia de estimativa de massa implementada no SDI apresentou boa correspondência com a estrutura fabricada. A massa prevista foi de 43,542 kg, enquanto a massa real aferida foi de 42,663 kg, resultando em variação de -2,02%. Esse resultado indica boa capacidade de previsão do modelo analítico e reforça sua

aplicação como ferramenta complementar de verificação no desenvolvimento de chassis tubulares.

- A validação ergonômica demonstrou que a geometria proposta apresentou compatibilidade com os requisitos de segurança, conforto e operação do veículo. A aplicação das referências da SAE J1100, dos requisitos do RATBSB e da análise postural pelo método RULA resultou em score 3 para o percentil crítico P99 masculino, indicando condição postural aceitável e baixo risco ergonômico.
- A validação estrutural numérica indicou rigidez torcional de 1553,72 N·m/°, valor compatível com a aplicação em chassis tubulares do tipo *space frame*. A relação aproximada de 19:1 entre a rigidez do chassi e a rigidez do sistema de suspensão demonstrou que a deformabilidade estrutural tende a exercer influência reduzida sobre a resposta dinâmica do veículo.
- A análise modal indicou frequências naturais de 38,43 Hz para o modo torcional predominante e 50,93 Hz para o modo de flexão global. Esses valores apresentaram afastamento adequado em relação à frequência de combustão do conjunto motriz, embora tenha sido identificada maior proximidade com a frequência fundamental de rotação do virabrequim em regimes específicos. Dessa forma, embora exista possibilidade de acoplamento dinâmico em determinadas faixas de operação, a ocorrência de ressonância sustentada tende a ser reduzida, considerando o caráter predominantemente transitório desses regimes durante a operação do veículo.
- A análise dos cenários de manufatura demonstrou que a melhor alternativa não é necessariamente aquela com maior nível de automação. O cenário convencional apresentou tempo total de 143,057 h e custo de R\$ 30.153,02; o cenário automatizado reduziu o tempo para 81,282 h e o custo para R\$ 26.584,39; enquanto o cenário híbrido apresentou 93,847 h e custo de R\$ 24.530,92, configurando-se como a alternativa de menor custo global entre os cenários avaliados.
- A avaliação dimensional entre o modelo CAD e a estrutura manufaturada indicou variação aproximada de 2,93% nos pontos de ancoragem da suspensão. Esse resultado foi associado às tolerâncias dos processos de corte, dobra, ajustagem, posicionamento e às deformações térmicas decorrentes da soldagem, permanecendo dentro de uma faixa compatível com a complexidade construtiva da estrutura tubular.
- O acompanhamento do ciclo de vida pelo SDI permitiu integrar registros operacionais, falhas, ações corretivas, indicadores de confiabilidade e custos de

manutenção. O protótipo apresentou score de saúde de 72/100, 145,3 horas operadas, 75,7% da vida útil consumida, RPN máximo de 50, criticidade GUT máxima de 40 e custo corretivo acumulado de R\$ 500,00, indicando estabilidade operacional ao longo do período avaliado.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta, apoiada pelo Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), mostrou-se tecnicamente consistente para orientar o desenvolvimento de chassis tubulares aplicados a veículos Baja SAE. A integração entre projeto, validação estrutural, ergonomia, manufatura, controle de qualidade, custos e ciclo de vida permitiu transformar decisões antes fragmentadas em um fluxo estruturado, rastreável e reproduzível. Assim, o estudo contribui para fortalecer a rastreabilidade das decisões, a gestão do conhecimento e a melhoria contínua, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de futuros protótipos e para a tomada de decisão em novos ciclos de projeto.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de um dispositivo de medição dimensional baseado em sensor inercial, composto por acelerômetro e giroscópio, capaz de fornecer coordenadas nos eixos X, Y e Z dos pontos analisados da estrutura. Essa alternativa pode representar uma solução intermediária entre os métodos convencionais de medição e os sistemas de metrologia tridimensional, como scanners 3D. Sua adoção se justifica pela maior versatilidade, menor custo de aquisição, menor tempo de treinamento do operador e possibilidade de aplicação desde as etapas iniciais da manufatura, especialmente durante o travamento preliminar dos pontos de suspensão. Dessa forma, o dispositivo poderia contribuir para o acompanhamento dimensional em tempo real, permitindo identificar desvios geométricos antes da soldagem definitiva da estrutura.

Outra possibilidade de aprofundamento consiste na realização de uma análise comparativa entre gabaritos manufaturados em MDF e em chapa metálica, com o objetivo de avaliar a influência do material do dispositivo de montagem sobre a precisão dimensional da estrutura final. Essa investigação permitiria verificar as variações entre a geometria projetada e a geometria fabricada em diferentes condições de rigidez, estabilidade dimensional, resistência térmica e repetibilidade de posicionamento. A comparação entre os dois tipos de gabarito poderia fornecer critérios mais objetivos para a escolha do dispositivo de montagem, considerando custo, facilidade de fabricação, durabilidade, precisão e influência sobre os desvios geométricos gerados durante o processo de soldagem.

Sugere-se, ainda, a realização de uma análise experimental comparativa entre tubos de aço SAE 4130 e Docol R8, considerando ensaios mecânicos, avaliação de soldabilidade, resistência estrutural e comportamento em condições representativas de aplicação em veículos Baja SAE. Embora os resultados analíticos indiquem elevado potencial mecânico do Docol R8, sua aplicação nos membros primários da gaiola de proteção é limitada pelos requisitos normativos atualmente estabelecidos no regulamento. Assim, estudos experimentais mais robustos poderiam subsidiar tecnicamente a discussão sobre sua viabilidade estrutural e, futuramente, apoiar propostas de revisão regulamentar para a utilização de materiais avançados de alta resistência em estruturas tubulares de veículos Baja.

Adicionalmente, a realização de uma análise modal numérico-experimental da estrutura, com o objetivo de validar e aprimorar os resultados obtidos na etapa numérica. Para isso, sugere-se a instrumentação do chassi por meio de acelerômetros e a realização de ensaios de excitação controlada, como impacto por martelo instrumentado ou excitação harmônica,

permitindo a identificação experimental das frequências naturais, modos de vibração e níveis de amortecimento estrutural. A correlação entre os resultados experimentais e o modelo em elementos finitos possibilitaria o ajuste das condições de contorno, propriedades de massa, rigidez das uniões soldadas e representações dos pontos de fixação, contribuindo para maior precisão do modelo numérico e para uma avaliação mais robusta do comportamento dinâmico do chassi tubular.

Por fim, recomenda-se a evolução do Sistema de Dimensionamento Integrado (SDI), ampliando sua aplicação para novos ciclos de desenvolvimento e para os demais subsistemas do veículo, de modo a permitir uma análise integrada do protótipo completo. O aumento da base de dados, a consolidação de históricos de projeto, manufatura, custos, inspeções, falhas e manutenção podem contribuir para validar a ferramenta em diferentes contextos e fortalecer sua capacidade de suporte à tomada de decisão. Em etapas futuras, a incorporação de recursos de aprendizado de máquina pode permitir a identificação de padrões, previsão de custos, estimativa de desvios geométricos, priorização de falhas e recomendação de alternativas de projeto, tornando o SDI uma plataforma mais robusta para gestão técnica, econômica e operacional de veículos Baja SAE.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI. **Associação Brasileira de Ensaos Não Destrutivos e Inspeção**. São Paulo: ABENDI, [s.d.].

ABNT. **ABNT NBR 6068: veículos rodoviários — massas e dimensões de adultos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, [s.d.].

ADAMS, Herb. **Chassis engineering: chassis design, building & tuning for high performance handling**. New York: HP Books, 1993.

ASHBY, Michael F.; JONES, David R. H. **Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design**. 5. ed. Oxford: Elsevier, 2019.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook. Materials Park: ASM International, 2015. (vols. 1 – Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys; 4 – Heat Treating)**.

ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section V: Nondestructive Examination**. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2019.

ASNT. **Nondestructive Testing Handbook**. 3. ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E10: standard test method for Brinell hardness of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E139: standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1444/E1444M: standard practice for magnetic particle testing**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E165/E165M: standard practice for liquid penetrant testing for general industry**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E18: standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E213: standard practice for ultrasonic testing of metal pipe and tubing**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E23: standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384: standard test method for microindentation hardness of materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E466: standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E606/E606M: standard test method for strain-controlled fatigue testing**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E8/E8M: standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E9: standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E94: standard guide for radiographic examination using industrial radiographic film**. West Conshohocken: ASTM International, [s.d.].

AWS. **American Welding Society**. Miami: American Welding Society, [s.d.].

AWS. **AWS D1.1/D1.1M: structural welding code — steel**. Miami: American Welding Society, [s.d.].

BAJA SAE BRASIL. **Regulamento técnico e administrativo Baja SAE Brasil 2025 (RATBSB – Emenda 7)**. São Paulo: SAE Brasil, 2025. Disponível em: <https://portal.saebrasil.org.br>.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite element procedures**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Resistência dos materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1986.

COOK, Robert D.; MALKUS, David S.; PLESHA, Michael E.; WITT, Robert J. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4. ed. New York: Wiley, 2002.

DEAKIN, A. et al. **The effect of chassis stiffness on race car handling balance**. SAE Paper No. 2000-01-3554, 2000.

DEGARMO, E. Paul; BLACK, J. T.; KOHSER, Ronald A. **Materials and processes in manufacturing**. 11. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

DIETER, George E. **Mechanical Metallurgy**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica: processos de conformação**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DIN. **DIN 33402: ergonomics — human body dimensions**. Berlin: Deutsches Institut für Normung, [s.d.].

EURO NCAP. **Assessment protocol – adult occupant protection. Brussels: European New Car Assessment Programme, 2024**. Disponível em: <https://www.euroncap.com/en/>. Acesso em: 17 out. 2025.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila de Tecnologia da Soldagem**. Volume 2 – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Mecânica DEM – Campus II – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

FIA – FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE L'AUTOMOBILE. **International Sporting Code** – Appendix J, Article 253: Safety Structures. Paris: FIA, 2024.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

HANSEN, Don R.; MOWEN, Maryanne M. **Gestão de custos: contabilidade e controle**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

- HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- IHS – INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY. **Crashworthiness evaluation protocol: structure and occupant compartment integrity**. Arlington, VA: IIHS, 2023. Disponível em: <https://www.iihs.org/>. Acesso em: 17 out. 2025.
- INMAN, Daniel J. **Engineering vibration**. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.
- ISO. **ISO 15535: general requirements for establishing anthropometric databases**. Geneva: International Organization for Standardization, [s.d.].
- ISO. **ISO 6892: metallic materials — tensile testing**. Geneva: International Organization for Standardization, [s.d.].
- ISO. **ISO 7250: basic human body measurements for technological design**. Geneva: International Organization for Standardization, [s.d.].
- JONES, R. Stuart; CHEN, Xiang. **Optical metrology: principles and applications**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2015.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentals of machine component design**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2016.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing processes for engineering materials**. 6. ed. Boston: Pearson, 2014.
- KOU, Sindo. **Welding metallurgy**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2003.
- LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 6. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999.
- LATIN NCAP. **Frontal and side impact testing protocol: adult occupant protection**. Montevideo: Latin NCAP, 2023. Disponível em: <https://www.latinncap.com/en/>. Acesso em: 17 out. 2025.
- LEACH, Richard. **Optical measurement of surface topography**. Berlin: Springer, 2011.
- LOGAN, Daryl L. **A first course in the finite element method**. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2016.
- MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.
- MARTINS, Eliseu. **Contabilidade de custos**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- MEIROVITCH, Leonard. **Fundamentals of vibrations**. New York: McGraw-Hill, 2001.
- MILLKEN, William F.; MILLKEN, Douglas L. **Race car vehicle dynamics**. Warrendale: SAE International, 1995.
- NORTON, Robert L. **Machine design: an integrated approach**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.
- OKUMURA, Toshie. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.; Tóquio: The Association for International Promotion, 1982.
- PARK, Chan S. **Contemporary engineering economics**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- PMI – PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)**. 7. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2021.

- RAO, Singiresu S. **Mechanical vibrations**. 6. ed. Boston: Pearson, 2017.
- REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. **The automotive chassis: engineering principles**. Warrendale: SAE International, 2001.
- SAE BRASIL. **Manual de boas práticas para equipes Baja SAE Brasil**. São Paulo: SAE Brasil, 2022.
- SAE INTERNATIONAL. **Baja SAE rules 2025**. Warrendale: SAE International, 2025. Disponível em: <https://www.bajasae.net> .
- SAE INTERNATIONAL. **SAE J1100: motor vehicle dimensions**. Warrendale: SAE International, [s.d.].
- SAE INTERNATIONAL. **Technical inspection and safety requirements for Baja SAE and Formula SAE vehicles**. Warrendale: SAE International, 2023.
- SAE. J404: **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels and Alloy Steels**. Warrendale: SAE International, última ed.
- SAMPO, E. et al. **Rigidez torsional do chassi: análise da influência na dinâmica do veículo**. SAE Technical Paper 2010-01-0094, 2010.
- SCHWIEGER, Volker; NEUGEBAUER, Peter. **Optical 3D metrology for engineering applications**. Berlin: Springer, 2020.
- SHIGLEY, Joseph E.; MISHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Operations management**. 6. ed. Harlow: Pearson Education, 2010.
- SORIANO, Hélio Luiz. **Introdução ao método dos elementos finitos**. São Paulo: Érica, 2004.
- SSAB. Docol R8 – **Advanced High Strength Steel for Roll Cage Applications**. Borlänge: SSAB AB, 2021. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/ssab-docol/automotive-steel-grades/tube/r8>. Acesso em: 17 out. 2025.
- UNITED STATES. National Highway Traffic Safety Administration. **Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS 208–214): occupant crash protection and side impact protection**. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2023. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/>. Acesso em: 17 out. 2025.
- WONG, J. Y. **Theory of ground vehicles**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2008.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method: its basis and fundamentals**. 7. ed. Oxford: Elsevier, 2013.

9. APÊNDICES

APÊNDICE A1 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (a) (Ø30x1,6mm) – SDI

Equivalência Estrutural de Materiais

Aço SAE 1018 (referência) vs Aço SAE 4130 (alternativa)

RIGIDEZ E·I 106,0% alt / ref · ≥100% atende	FLEXÃO Mf 123,7% alt / ref · ≥100% atende	INÉRCIA I 106,0% alt / ref	PARECER TÉCNICO EQUIVALENTE Substituição aprovada
--	--	---	--

DADOS DE ENTRADA

Propriedade	Referência	Alternativa
Material	Aço SAE 1018	Aço SAE 4130
Norma	SAE/AISI 1018	SAE/AISI 4130
Condição	Laminado a Quente	Normalizado
Perfil	TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm	TUBO REDONDO 30,00x1,60 mm
De – Diâm. externo (mm)	25,4	30
Di – Diâm. interno (mm)	19,299	26,8
e – Espessura (mm)	3,05	1,6
c – Raio externo (mm)	12,7	15
E – Módulo de Young (GPa)	205	205
σy – Lim. escoamento (MPa)	370	510

RESULTADOS DO CÁLCULO ESTRUTURAL (UNIDADES SI)

Grandeza	Fórmula	Referência	Alternativa	Δ%	Status
Momento de Inércia (I)	$\pi(De^4 - Di^4)/64$	1,362e-8 m ⁴	1,444e-8 m ⁴	+6,0%	OK
Rigidez (E·I)	$E \times I$	2,793e+3 N·m ²	2,960e+3 N·m ²	+6,0%	ATENDE
Resistência à Flexão (Mf)	$\sigma_y \cdot I / c$	3,969e+2 N·m	4,909e+2 N·m	+23,7%	ATENDE

CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

- E·I_{alt} ≥ E·I_{ref} (rigidez à flexão)
 - Mf_{alt} ≥ Mf_{ref} (resistência à flexão)
- ATENDE

ATENDE

PARECER TÉCNICO

O material/perfil alternativo "Aço SAE 4130 / TUBO REDONDO 30,00x1,60 mm" é ESTRUTURALMENTE EQUIVALENTE ao de referência "Aço SAE 1018 / TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm". Rigidez E·I = 106,0% e resistência Mf = 123,7% atendem aos critérios mínimos. Substituição tecnicamente aprovada.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Cálculos baseados nas fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais para seções tubulares circulares.
- Valores em unidades SI; entradas em unidades técnicas (mm, GPa, MPa).

APÊNDICE A2 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (b) (Ø31,75x1,24mm) – SDI

Equivalência Estrutural de Materiais

Aço SAE 1018 (referência) vs Aço SAE 4130 (alternativa)

RIGIDEZ E·I 101,7% alt / ref - ≥100% atende	FLEXÃO Mf 112,1% alt / ref - ≥100% atende	INÉRCIA I 101,7% alt / ref	PARECER TÉCNICO EQUIVALENTE Substituição aprovada
--	--	---	--

DADOS DE ENTRADA

Propriedade	Referência	Alternativa
Material	Aço SAE 1018	Aço SAE 4130
Norma	SAE/AISI 1018	SAE/AISI 4130
Condição	Laminado a Quente	Normalizado
Perfil	TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm	TUBO REDONDO 31,75x1,24 mm
De – Diâm. externo (mm)	25,4	31,75
Di – Diâm. interno (mm)	19,299	29,27
e – Espessura (mm)	3,05	1,24
c – Raio externo (mm)	12,7	15,875
E – Módulo de Young (GPa)	205	205
σy – Lim. escoamento (MPa)	370	510

RESULTADOS DO CÁLCULO ESTRUTURAL (UNIDADES SI)

Grandeza	Fórmula	Referência	Alternativa	Δ%	Status
Momento de Inércia (I)	$\pi(De^4 - Di^4)/64$	1,362e-8 m ⁴	1,385e-8 m ⁴	+1,7%	OK
Rigidez (E·I)	$E \times I$	2,793e+3 N·m ²	2,840e+3 N·m ²	+1,7%	ATENDE
Resistência à Flexão (Mf)	$\sigma_y \cdot I / c$	3,969e+2 N·m	4,450e+2 N·m	+12,1%	ATENDE

CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

- E·I_{alt} ≥ E·I_{ref} (rigidez à flexão)
 - Mf_{alt} ≥ Mf_{ref} (resistência à flexão)
- ATENDE
ATENDE

PARECER TÉCNICO

O material/perfil alternativo "Aço SAE 4130 / TUBO REDONDO 31,75x1,24 mm" é ESTRUTURALMENTE EQUIVALENTE ao de referência "Aço SAE 1018 / TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm". Rigidez E·I = 101,7% e resistência Mf = 112,1% atendem aos critérios mínimos. Substituição tecnicamente aprovada.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Cálculos baseados nas fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais para seções tubulares circulares.
- Valores em unidades SI; entradas em unidades técnicas (mm, GPa, MPa).

APÊNDICE A3 – Cálculos de Equivalência Aço 4130 (a) (Ø34,93x1,016mm) – SDI

Equivalência Estrutural de Materiais

Aço SAE 1018 (referência) vs Aço SAE 4130 (alternativa)

RIGIDEZ E·I 114,4% alt / ref · ≥100% atende	FLEXÃO MF 114,6% alt / ref · ≥100% atende	INÉRCIA I 114,4% alt / ref	PARECER TÉCNICO EQUIVALENTE Substituição aprovada
--	--	---	--

DADOS DE ENTRADA

Propriedade	Referência	Alternativa
Material	Aço SAE 1018	Aço SAE 4130
Norma	SAE/AISI 1018	SAE/AISI 4130
Condição	Laminado a Quente	Normalizado
Perfil	TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm	TUBO REDONDO 34,93x1,016 mm
De — Diâm. externo (mm)	25,4	34,93
Di — Diâm. interno (mm)	19,299	32,8979
e — Espessura (mm)	3,05	1,016
c — Raio externo (mm)	12,7	17,465
E — Módulo de Young (GPa)	205	205
σy — Lim. escoamento (MPa)	370	510

RESULTADOS DO CÁLCULO ESTRUTURAL (UNIDADES SI)

Grandeza	Fórmula	Referência	Alternativa	Δ%	Status
Momento de Inércia (I)	$\pi(De^4 - Di^4)/64$	1,362e-8 m ⁴	1,558e-8 m ⁴	+14,4%	OK
Rigidez (E·I)	$E \times I$	2,793e+3 N·m ²	3,193e+3 N·m ²	+14,4%	ATENDE
Resistência à Flexão (Mf)	$\sigma_y \cdot I / c$	3,969e+2 N·m	4,549e+2 N·m	+14,6%	ATENDE

CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

- E·I_{alt} ≥ E·I_{ref} (rigidez à flexão)
 - Mf_{alt} ≥ Mf_{ref} (resistência à flexão)
- ATENDE
ATENDE

PARECER TÉCNICO

O material/perfil alternativo "Aço SAE 4130 / TUBO REDONDO 34,93x1,016 mm" é ESTRUTURALMENTE EQUIVALENTE ao de referência "Aço SAE 1018 / TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm". Rigidez E·I = 114,4% e resistência Mf = 114,6% atendem aos critérios mínimos. Substituição tecnicamente aprovada.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Cálculos baseados nas fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais para seções tubulares circulares.
- Valores em unidades SI; entradas em unidades técnicas (mm, GPa, MPa).

APÊNDICE A4 – Cálculos de Equivalência Aço Docol R8 (Ø31,75x1,24mm) – SDI

Equivalência Estrutural de Materiais

Aço SAE 1018 (referência) vs Aço Docol R8 (alternativa)

RIGIDEZ E·I 104,2% alt / ref · ≥100% atende	FLEXÃO MF 153,9% alt / ref · ≥100% atende	INÉRCIA I 101,7% alt / ref	PARECER TÉCNICO EQUIVALENTE Substituição aprovada
--	--	---	--

DADOS DE ENTRADA

Propriedade	Referência	Alternativa
Material	Aço SAE 1018	Aço Docol R8
Norma	SAE/AISI 1018	ABNT NBR 6591 / EN 10305-3
Condição	Laminado a Quente	Tubo trefilado soldado / conformado a frio
Perfil	TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm	TUBO REDONDO 31,75x1,24 mm
De — Diâm. externo (mm)	25,4	31,75
Di — Diâm. interno (mm)	19,299	29,27
e — Espessura (mm)	3,05	1,24
c — Raio externo (mm)	12,7	15,875
E — Módulo de Young (GPa)	205	210
σy — Lim. escoamento (MPa)	370	700

RESULTADOS DO CÁLCULO ESTRUTURAL (UNIDADES SI)

Grandeza	Fórmula	Referência	Alternativa	Δ%	Status
Momento de Inércia (I)	$\pi(De^4 - Di^4)/64$	1,362e-8 m ⁴	1,385e-8 m ⁴	+1,7%	OK
Rigidez (E·I)	$E \times I$	2,793e+3 N·m ²	2,909e+3 N·m ²	+4,2%	ATENDE
Resistência à Flexão (Mf)	$\sigma_y \cdot I / c$	3,969e+2 N·m	6,108e+2 N·m	+53,9%	ATENDE

CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO

- E·I_{alt} ≥ E·I_{ref} (rigidez à flexão)
 - Mf_{alt} ≥ Mf_{ref} (resistência à flexão)
- ATENDE
ATENDE

PARECER TÉCNICO

O material/perfil alternativo "Aço Docol R8 / TUBO REDONDO 31,75x1,24 mm" é ESTRUTURALMENTE EQUIVALENTE ao de referência "Aço SAE 1018 / TUBO REDONDO 25,40x3,05 mm". Rigidez E·I = 104,2% e resistência Mf = 153,9% atendem aos critérios mínimos. Substituição tecnicamente aprovada.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Cálculos baseados nas fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais para seções tubulares circulares.
- Valores em unidades SI; entradas em unidades técnicas (mm, GPa, MPa).

APÊNDICE B1 – Cálculos de Materiais e Sobremetais – SDI

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: Cálculo de Materiais e Sobremetais

REL-SDI-2026-020

Emissão: 10/05/2026 22:00

Emissor: Edivaldo Souza

Cálculo de Materiais e Sobremetais

Processo Convencional · Nv4 (Avançado) · 10 mm/membro · % Retrabalho 10%

ITENS

66

configurações

MEMBROS

100

peças

COMP. FINAL P/ COMPRA

49.667 mm

Σ L Final (c/ sobremetal + retrab.)

BARRAS 6 M

12

estimativa

SOBRA VS PROJETO

45,0%

sobra + L projeto

SOBRA VS COMPRADO

31,0%

sobra + barras 6 m

PARÂMETROS DE CÁLCULO

- Processo: Convencional
- Nível: Nv4 (Avançado)
- Sobremetal fixo: 10 mm por membro
- % Retrabalho aplicado: 10%
- Total de pontos de solda: 298
- Sobremetal total acumulado: 4.500 mm

LISTA DETALHADA DE MATERIAIS

Item	Descrição	Qty	Perfil	Comp. (mm)	Material	Sobr.* (mm)	C. total* (mm)	Dobras	Tot. dobras	Tipo dobra
TB01	RHO + FBM-UP	2	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	1.828	4130	220	3.876	1	2	Deslocada (+100mm)
TB02	FBM-LOW + LFS	2	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	1.512	4130	420	3.445	2	4	Deslocada (+100mm)
TB03	RRH	2	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	1.317	4130	420	3.054	2	4	Deslocada (+100mm)
TB04	ALC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	480	4130	10	490	0	0	—
TB05	BLC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	524	4130	10	534	0	0	—
TB06	CLC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	440	4130	10	450	0	0	—
TB07	DLC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	361	4130	10	371	0	0	—
TB08	FLC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	352	4130	10	362	0	0	—
TB09	ILC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	374	4130	10	384	0	0	—
TB10	SHC	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	750	4130	10	760	0	0	—
TB11	PEITO DE PROTEÇÃO	1	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	525	4130	160	685	1	1	Extremidade
TOTAIS		100				4.500	45.151		30	

Item	Descrição	Qtd	Perfil	Comp. (mm)	Material	Sobr.* (mm)	C. total* (mm)	Dobras	Tot. dobras	Tipo dobra
										(+150mm)
TB12	TRENÓ	2	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	631	4130	320	1.582	1	2	Extremidade (+150mm)
TB13	TRAVAMENTO TRENÓ	2	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	167	4130	20	354	0	0	—
TB14	FAB-UP	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	713	4130	20	1.446	0	0	—
TB15	FAB-LOW	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	467	4130	20	953	0	0	—
TB16	SIM	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	1.259	4130	420	2.938	2	4	Deslocada (+100mm)
TB17	TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	858	4130	220	1.936	1	2	Deslocada (+100mm)
TB18	LDB (1)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	563	4130	10	573	0	0	—
TB19	LDB (2)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	649	4130	10	659	0	0	—
TB20	LFDB (1)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	409	4130	10	419	0	0	—
TB21	LFDB (2)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	313	4130	10	323	0	0	—
TB22	ASB	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	402	4130	10	412	0	0	—
TB23	ESS (COLUNAS DIANTERAS)	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	130	4130	20	279	0	0	—
TB24	ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	125	4130	20	269	0	0	—
TB25	ESS (TUBOS LONGITUDINAIS)	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	255	4130	20	531	0	0	—
TB26	ESS (TUBOS TRANVERSAIS)	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	375	4130	20	771	0	0	—
TB27	REBOQUE DIANTEIRO	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	422	4130	310	732	2	2	Extremidade (+150mm)
TB28	APOIO LATERAL	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	142	4130	20	304	0	0	—
TB29	COLUNA TRASEIRA	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	1.313	4130	420	3.046	2	4	Deslocada (+100mm)
TB30	TUBO ANTI-RESPINGO	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	499	4130	320	1.318	1	2	Extremidade (+150mm)
TB31	RLC	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	370	4130	10	380	0	0	—
TB32	TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	168	4130	20	355	0	0	—
TB33	TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	130	4130	10	140	0	0	—
TB34	TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	410	4130	10	420	0	0	—
TOTAIS		100				4.500	45.151		30	

Item	Descrição	Qty	Perfil	Comp. (mm)	Material	Sobr.* (mm)	C. total* (mm)	Dobras	Tot. dobras	Tipo dobra
	COMBUSTÍVEL									
TB35	TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	458	4130	310	768	2	2	Extremidade (+150mm)
TB36	TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	444	4130	20	908	0	0	—
TB37	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (1)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	40	4130	10	50	0	0	—
TB38	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (2)	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	40	4130	10	50	0	0	—
TB39	TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA	1	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	543	4130	10	553	0	0	—
TB40	TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS	2	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	104	4130	20	228	0	0	—
TB41	TUBO CENTRAL DO VOLANTE	1	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	243	4130	10	253	0	0	—
TB42	TRAVAMENTO DO VOLANTE	2	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	241	4130	20	501	0	0	—
TB43	TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS	1	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	221	4130	160	381	1	1	Extremidade (+150mm)
TB44	TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	250	1020	10	260	0	0	—
TB45	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	60	1020	20	140	0	0	—
TB46	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	114	1020	20	249	0	0	—
TB47	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILING-ARM	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	65	1020	20	150	0	0	—
TB48	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	99	1020	20	217	0	0	—
TB49	ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	64	1020	20	148	0	0	—
TB50	ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	48	1020	20	115	0	0	—
TB51	ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	72	1020	20	165	0	0	—
TB52	ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	55	1020	20	130	0	0	—
TOTAIS		100				4.500	45.151		30	

Item	Descrição	Qty	Perfil	Comp. (mm)	Material	Sobr.* (mm)	C. total* (mm)	Dobras	Tot. dobras	Tipo dobra
TB53	COLUNA DIANTEIRA	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	160	1020	20	340	0	0	—
TB54	COLUNA TRASEIRA	2	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	1.313	1020	20	2.646	0	0	—
TB55	TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	165	1020	10	175	0	0	—
TB56	TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	166	1020	10	176	0	0	—
TB57	TUBO CENTRAL	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	170	1020	10	180	0	0	—
TB58	BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	2	VIGA U - 25,00x40,00x2,00	216	1020	20	452	0	0	—
TB59	FIXAÇÃO DIANTEIRA	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	358	1020	10	368	0	0	—
TB60	FIXAÇÃO TRASEIRA	1	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	370	1020	10	380	0	0	—
TB61	FIXAÇÃO DA MANCAIS DA DIREÇÃO	2	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	90	1020	20	200	0	0	—
TB62	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 DIANTEIRO	2	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	40	1020	20	100	0	0	—
TB63	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 TRASEIRO	1	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	40	1020	10	50	0	0	—
TB64	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - DIANTEIRO	2	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	80	1020	20	180	0	0	—
TB65	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - TRASEIRO	1	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	35	1020	10	45	0	0	—
TB66	FIXAÇÃO HASTE DA BANDEIRA	1	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	35	1020	10	45	0	0	—
TOTAIS		100				4.500	45.151		30	



RESUMO POR MATERIAL

Material / Perfil	L Total (mm)	Qtd peças	L Médio (mm)	% Retrab.	Pçs c/ Retrab.	Retrab. (mm)	L Final (m)	Barras 6 m
TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	16.345,47	18	908,08	10%	1,8	1.634,55	17,980	3
TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	20.760,07	41	506,34	10%	4,1	2.076,01	22,836	4
TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	1.135,72	4	283,93	10%	0,4	113,57	1,249	Considerar 1
BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	1.573,40	17	92,55	10%	1,7	157,34	1,731	Considerar 1
BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	4.264,94	9	473,88	10%	0,9	426,49	4,691	Considerar 1
VIGA U - 25,00x40,00x2,00	451,80	2	225,90	10%	0,2	45,18	0,497	Considerar 1
VIGA U - 25,00x20,00x2,00	620,00	9	68,89	10%	0,9	62,00	0,682	Considerar 1

PARECER TÉCNICO

A sobra de 45,0% em relação ao L Projeto (equivalente a 31,0% das 12 barra(s) comercial(is) de 6 m compradas) está em nível CRÍTICO (acima de 30%). Recomenda-se fortemente revisar o plano de cortes: substituir barras de 6 m por comprimentos comerciais menores e/ou utilizar retalhos (sobras) de outras manufaturas. A aba “Otimização de Corte” apresenta a análise completa e a simulação dos ganhos.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Sobremetal por nível de experiência: Nv5 5 mm · Nv4 10 mm · Nv3 12 mm · Nv2 15 mm · Nv1 18 mm.
- Dobras adicionam acréscimos por membro: extremidade +150 mm; deslocada +100 mm.
- Comp. total = (Sobremetal + Comprimento) × Quantidade de membros.
- Resumo por material agrupa pelo perfil completo. L Final = (L Total + Retrabalho) ÷ 1000.
- Barras 6 m = L Final ÷ 6 ; valores ≤ 1 são apresentados como “Considerar 1”.
- % Sobra vs Projeto = (Σ Barras 6 m × 6000 – Σ L Final) ÷ Σ L Final. Indica quanto de matéria-prima foi adquirida além do necessário ao projeto.
- % Sobra vs Comprado = (Σ Barras 6 m × 6000 – Σ L Final) ÷ (Σ Barras 6 m × 6000). Indica a fração das barras compradas que sobrou. Faixas (ambos): <15% Ótimo · 15–30% Aceitável · >30% Crítico. Sobras não são perdas — são retalhos aproveitáveis em outras manufaturas (ver aba “Otimização de Corte”).

APÊNDICE B2 – Cálculo de Chapas – SDI

Cálculo de Chapas

ITENS
35

PEÇAS
115

ÁREA TOTAL (M²)
0,273

MASSA TOTAL (KG)
3,235

PERÍMETRO SOLDA (M)
4,09

PENDÊNCIAS
0

Resumo executivo

Itens cadastrados	35
Total de peças	115
Área total acumulada (m²)	0,273
Espessura média ponderada (mm)	3,05
Massa total (kg)	3,235
Perímetro total de solda (m)	4,09
Linhas com pendência	0

Lista detalhada de chapas

Item	Descrição	Qtd	Esp. (mm)	Área (m²)	Material	Perim. solda (m)	Massa unit. (kg)	Massa total (kg)
CH1	Fixação do Pedal de Freio	1	3,00	0,0063	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,13	0,089	0,089
CH2	Fixação do Cilindro Mestre	1	3,00	0,0213	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,19	0,185	0,185
CH3	Fixação do Pedal do Acelerador	1	3,00	0,0063	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,13	0,089	0,089
CH4	Fixação do Volante	1	5,00	0,0041	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,09	0,061	0,061
CH5	Fixação Painel de Assistência	2	3,00	0,0018	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,014	0,029
CH6	Fixação Painel de Controle	2	3,00	0,0018	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,014	0,029
CH7	Fixação Chave de Emergência	2	3,00	0,0016	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,04	0,015	0,029
CH8	Fixação Superior Encosto de Cabeça	1	3,00	0,0028	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,026	0,026

Item	Descrição	Qty	Esp. (mm)	Área (m²)	Material	Perím. solda (m)	Massa unit. (kg)	Massa total (kg)
CH9	Fixação Inferior Encosto de Cabeça	1	3,00	0,0027	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,021	0,021
CH10	Fixação Superior Encosto do Banco	1	3,00	0,0028	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,026	0,026
CH11	Fixação Inferior Encosto do Banco	1	3,00	0,0027	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,021	0,021
CH12	Fixação Inferior do Banco	1	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,004
CH13	Fixação da Barra Estabilizadora	2	5,00	0,0041	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,09	0,061	0,122
CH14	Fixação Superior da Cx. Acoplamento	2	3,00	0,0024	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,13	0,020	0,041
CH15	Fixação Inferior da Cx. Acoplamento	2	3,00	0,0012	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,06	0,009	0,019
CH16	Fixação Dianteira Cx. Redução	2	3,00	0,0012	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,04	0,010	0,020
CH17	Fixação Traseira Cx. Redução	2	3,00	0,0017	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,06	0,015	0,030
CH18	Fixação Inferior da Cx. Redução	2	3,00	0,0013	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,04	0,010	0,021
CH19	Fixação Proteção Transmissão Traseira	1	3,00	0,0020	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,03	0,018	0,018
CH20	Fixação Roldana Cabo do Acelerador	2	3,00	0,0040	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,07	0,031	0,062
CH21	Fixação Snorkel de Entrada CVT	2	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,008
CH22	Fixação Snorkel de Saída CVT	2	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,008
CH23	Fixação Reboque Traseiro	2	3,00	0,0014	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,07	0,011	0,023
CH24	Fixação Luz de Freio	1	3,00	0,0016	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,04	0,015	0,015
CH25	Fixação dos Faróis	2	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,008
CH26	Fixação Antenas	2	3,00	0,0014	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,07	0,011	0,023
CH27	Fixação Bateria	2	3,00	0,0018	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,014	0,029
CH28	Fixação Carrenagem	34	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,138
CH29	Fixação Assoalho	15	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,061
CH30	Fixação Corta Fogo	12	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,049
CH31	Fixação Anti-Respingo	4	3,00	0,0006	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,01	0,004	0,016
CH32	Fixação Tiras Superiores do Cinto de Segurança	2	3,00	0,0141	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,09	0,069	0,139
CH33	Fixação Tiras Laterais do Cinto de Segurança	2	3,00	0,0119	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,18	0,124	0,249



Item	Descrição	Qty	Esp. (mm)	Área (m²)	Material	Perím. solda (m)	Massa unit. (kg)	Massa total (kg)
CH34	Fixação Tiras Anti-Submarinas	2	3,00	0,0109	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,11	0,115	0,230
CH35	Proteção Inferior Sistema Transmissão Dianteiro	1	3,00	0,0551	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,66	1,297	1,297
TOTAIS		115		0,273		4,09		3,235

Materiais utilizados

Distribuição agregada por material (resolvido na Biblioteca de Materiais).

Material	Peças	Área (m²)	Massa (kg)
Aço SAE 1045	115	0,273	3,235

Conclusão

O conjunto de chapas catalogado totaliza 115 peças, 0,273 m² de área, 3,235 kg de massa estrutural e 4,09 m de perímetro soldável, integrando-se automaticamente aos módulos de Cordões de Solda, Massa da Estrutura e EPS – Soldagem.

APÊNDICE B3 – Cálculo de Cordões de Solda – SDI

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: Cálculo de Cordões de Solda

REL-SDI-2026-027

Emissão: 10/05/2026 22:09

Emissor: Edivaldo Souza

Cálculo de Cordões de Solda

Processo TIG (GTAW) · Adição ER70S-3 · ρ 7.850 kg/m³ · Perna global 5 mm

ITENS

101

cordões

Σ JUNTAS

297

uniões

MASSA TOTAL

2,038 kg

consumo de adição

PERÍMETRO TOTAL

20,77 m

Σ (perím. × juntas)

% CONFORMES

100,0%

101/101 atendem AWS

% ABAIXO DO MÍN.

0,0%

0 item(ns) crítico(s)

PARÂMETROS DE CÁLCULO

- Processo de soldagem: TIG (GTAW)
- Material de adição: ER70S-3
- Densidade do metal de adição: 7.850 kg/m³
- Modo de aplicação da perna: Global (5 mm)
- Norma de referência: AWS D1.1 — Structural Welding Code – Steel
- Itens com dados incompletos: 0

LISTA DETALHADA DE CORDÕES

ITEM	Descrição	Perfil	Material	Perím. (m)	Perna (mm)	Juntas	Massa (kg)	Status AWS
TB01	RHO + FBM-UP	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	4	0,037	Acima do mínimo
TB02	FBM-LOW + LFS	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB03	RRH	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	4	0,037	Acima do mínimo
TB04	ALC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB05	BLC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB06	CLC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB07	DLC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB08	FLC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB09	ILC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB10	SHC	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB11	PEITO DE PROTEÇÃO	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB12	TRENÓ	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	4	0,037	Acima do mínimo
TOTAIS						297	2,038	

ITEM	Descrição	Perfil	Material	Perím. (m)	Perna (mm)	Juntas	Massa (kg)	Status AWS
TB13	TRAVAMENTO TRENÔ	TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0942	5,0	4	0,037	Acima do mínimo
TB14	FAB-UP	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB15	FAB-LOW	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB16	SIM	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB17	TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB18	LDB (1)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB19	LDB (2)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB20	LFDB (1)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB21	LFDB (2)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB22	ASB	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB23	ESS (COLUNAS DIANTERAS)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB24	ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB25	ESS (TUBOS LONGITUDINAIS)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB26	ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB27	REBOQUE DIANTEIRO	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB28	APOIO LATERAL	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB29	COLUNA TRASEIRA	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB30	TUBO ANTI-RESPINGO	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB31	RLC	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB32	TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB33	TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB34	TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB35	TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB36	TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB37	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TOTAIS						297	2,038	

ITEM	Descrição	Perfil	Material	Perím. (m)	Perna (mm)	Juntas	Massa (kg)	Status AWS
	ESTABILIZADORA (1)							
TB38	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (2)	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	2	0,016	Acima do mínimo
TB39	TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB40	TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS	TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0798	5,0	4	0,031	Acima do mínimo
TB41	TUBO CENTRAL DO VOLANTE	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0598	5,0	2	0,012	Acima do mínimo
TB42	TRAVAMENTO DO VOLANTE	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0598	5,0	4	0,023	Acima do mínimo
TB43	TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS	TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	ACO-4130 — Aço SAE 4130	0,0598	5,0	2	0,012	Acima do mínimo
TB44	TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB45	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB46	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB47	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILLING-ARM	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB48	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB49	ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB50	ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB51	ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB52	ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1400	5,0	2	0,027	Acima do mínimo
TB53	COLUNA DIANTEIRA	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	4	0,039	Acima do mínimo
TB54	COLUNA TRASEIRA	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	4	0,039	Acima do mínimo
TB55	TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	2	0,020	Acima do mínimo
TOTAIS						297	2,038	

ITEM	Descrição	Perfil	Material	Perím. (m)	Perna (mm)	Juntas	Massa (kg)	Status AWS
TB56	TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	2	0,020	Acima do mínimo
TB57	TUBO CENTRAL	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	2	0,020	Acima do mínimo
TB58	BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	VIGA U - 25,00x40,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1300	5,0	4	0,051	Acima do mínimo
TB59	FIXAÇÃO DIANTEIRA	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	2	0,020	Acima do mínimo
TB60	FIXAÇÃO TRASEIRA	BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,1000	5,0	2	0,020	Acima do mínimo
TB61	FIXAÇÃO DA MANCAIS DA DIREÇÃO	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	4	0,035	Acima do mínimo
TB62	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 DIANTEIRO	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	4	0,035	Acima do mínimo
TB63	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 TRASEIRO	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB64	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - DIANTEIRO	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	4	0,035	Acima do mínimo
TB65	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - TRASEIRO	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
TB66	FIXAÇÃO HASTE DA BANDEIRA	VIGA U - 25,00x20,00x2,00	ACO-1020 — Aço SAE 1020	0,0900	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
CH1	Fixação do Pedal de Freio	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,1308	5,0	1	0,013	Acima do mínimo
CH2	Fixação do Cilindro Mestre	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,1900	5,0	1	0,019	Acima do mínimo
CH3	Fixação do Pedal do Acelerador	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,1308	5,0	1	0,013	Acima do mínimo
CH4	Fixação do Volante	CHAPA 5,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0948	5,0	1	0,009	Acima do mínimo
CH5	Fixação Painel de Assistência	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH6	Fixação Painel de Controle	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH7	Fixação Chave de Emergência	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0400	5,0	2	0,008	Acima do mínimo
CH8	Fixação Superior Encosto de Cabeça	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0140	5,0	1	0,001	Acima do mínimo
CH9	Fixação Inferior Encosto de Cabeça	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0140	5,0	1	0,001	Acima do mínimo
CH10	Fixação Superior Encosto do Banco	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0140	5,0	1	0,001	Acima do mínimo
CH11	Fixação Inferior Encosto do Banco	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0140	5,0	1	0,001	Acima do mínimo
CH12	Fixação Inferior do Banco	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0080	5,0	1	0,001	Acima do mínimo
CH13	Fixação da Barra Estabilizadora	CHAPA 5,00 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	0,0948	5,0	2	0,019	Acima do mínimo
TOTAIS						297	2,038	

ITEM	Descrição	Perfil	Material	Perím. (m)	Perna (mm)	Juntas	Massa (kg)	Status AWS
CH14	Fixação Superior da Cx. Acoplamento	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,1320	5,0	2	0,026	Acima do mínimo
CH15	Fixação Inferior da Cx. Acoplamento	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0577	5,0	2	0,011	Acima do mínimo
CH16	Fixação Dianteira Cx. Redução	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0447	5,0	2	0,009	Acima do mínimo
CH17	Fixação Traseira Cx. Redução	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0589	5,0	2	0,012	Acima do mínimo
CH18	Fixação Inferior da Cx. Redução	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0351	5,0	2	0,007	Acima do mínimo
CH19	Fixação Proteção Transmissão Traseira	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0280	5,0	1	0,003	Acima do mínimo
CH20	Fixação Roldana Cabo do Acelerador	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0728	5,0	2	0,014	Acima do mínimo
CH21	Fixação Snorkel de Entrada CVT	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH22	Fixação Snorkel de Saída CVT	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH23	Fixação Reboque Traseiro	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0735	5,0	2	0,014	Acima do mínimo
CH24	Fixação Luz de Freio	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0400	5,0	1	0,004	Acima do mínimo
CH25	Fixação dos Faróis	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH26	Fixação Antenas	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0735	5,0	2	0,014	Acima do mínimo
CH27	Fixação Bateria	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	2	0,002	Acima do mínimo
CH28	Fixação Carrenagem	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	34	0,027	Acima do mínimo
CH29	Fixação Assoalho	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	15	0,012	Acima do mínimo
CH30	Fixação Corta Fogo	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	12	0,009	Acima do mínimo
CH31	Fixção Anti-Respingo	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0080	5,0	4	0,003	Acima do mínimo
CH32	Fixação Tiras Superiores do Cinto de Segurança	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,0942	5,0	2	0,018	Acima do mínimo
CH33	Fixação Tiras Laterais do Cinto de Segurança	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,1813	5,0	2	0,036	Acima do mínimo
CH34	Fixação Tiras Anti-Submarinas	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,1064	5,0	2	0,021	Acima do mínimo
CH35	Proteção Inferior Sistema Transmissão Dianteiro	CHAPA 3,00 mm	ACO-1045 – Aço SAE 1045	0,6640	5,0	1	0,065	Acima do mínimo
TOTAIS						297	2,038	

RESUMO POR PERFIL

Tipo padronizado	Itens	Juntas	Perím. total (m)	Perna média (mm)	Massa (kg)	Status predominante
Tubo Redondo	43	124	10,23	5,0	1,003	Acima do mínimo
Barra Retangular	51	151	8,41	5,0	0,825	Acima do mínimo
Viga U	7	22	2,14	5,0	0,210	Acima do mínimo

RESUMO POR MATERIAL ASSOCIADO

Material	Itens	Σ Juntas	Massa de ER70S-3 (kg)	% do total
ACO-4130 — Aço SAE 4130	43	124	1,003	49,2%
ACO-1020 — Aço SAE 1020	23	58	0,634	31,1%
ACO-1045 — Aço SAE 1045	35	115	0,401	19,7%

PARECER TÉCNICO

Os 101 cordões avaliados atingiram 100% de conformidade com a AWS D1.1 (100,0% Atende ou Acima do mínimo). O dimensionamento das pernas está adequado às espessuras dos materiais base e o consumo total estimado é de 2,038 kg de ER70S-3. Recomenda-se manter o plano de soldagem proposto.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Norma: AWS D1.1 — Structural Welding Code — Steel.
- Mínimos AWS por espessura do metal base: $t \leq 6 \text{ mm}$ $3 \text{ mm} \cdot 6 < t \leq 12$ $5 \text{ mm} \cdot 12 < t \leq 20$ $6 \text{ mm} \cdot t > 20$ 8 mm .
- Área da solda (filete triangular): $A = a^2 / 2$, onde a é a perna em metros.
- Volume: $V = A \times P \times n$, onde P é o perímetro (m) e n é a quantidade de juntas.
- Massa: $M = V \times \rho$, com ρ em kg/m^3 .
- Origem do perímetro: Importado (vem do Sobremetal) · Calculado (a partir do perfil) · Manual (editado).
- Origem das juntas: Importado (TOTAL PTS do Sobremetal) · Manual (editado) · Pendente (sem informação).
- Status: Atende (perna = mínimo) · Acima do mínimo (perna > mínimo) · Abaixo do mínimo (perna < mínimo) · Dados incompletos.

APÊNDICE B4 – Cálculo de Massa da Estrutura – SDI

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 · Protótipo: CB12 v2023

Módulo: Cálculo de Massa da Estrutura

MAS-2026-028

Emissão: 10/05/2026 22:38

Emissor: Edivaldo Souza

Cálculo de Massa da Estrutura

101 item(ns) · 215 peça(s) · Massa real informada: 42,663 kg

ITENS

101

linhas

Σ PEÇAS

215

membros

MASSA TUBOS

41,503 kg

perfis estruturais

MASSA SOLDA

2,038 kg

cordões vinculados

MASSA TOTAL

43,542 kg

tubos + solda

Δ REAL - TEÓRICA

-2,02%

-0,879 kg

PARÂMETROS DE CÁLCULO

- Fonte da densidade: Biblioteca de Materiais (p em g/cm³)
- Massa unitária = A[mm²] × L[mm] × ρ[g/cm³] × 1×10⁻⁶ (resultado em kg)
- Massa total por item = massa unitária × quantidade + massa de solda vinculada (módulo /solda)
- Massa real informada: 42,663 kg
- Itens com dimensões incompletas: 0
- Itens sem material vinculado: 0
- Aferição — Equipamento: Toledo Modelo 2098
- Aferição — Range: 0.4–120 kg · Precisão: 0,02
- Aferição — Operador: EJS · Data: 2026-05-01

CONFERÊNCIA POR TIPO DE PERFIL

Tipo de perfil	Linhas	Massa (kg)	% do total
Tubo Redondo	43	28,112	67,7%
Barra Retangular	16	8,961	21,6%
Viga U	7	1,196	2,9%
Chapa	35	3,235	7,8%
Outro	0	0,000	0,0%

MEMORIAL DE CÁLCULO DE MASSA

Item	Descrição	Perfil	Material	Qtde	L (mm)	A (mm²)	ρ (g/cm³)	Massa tubo (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)
TB01	RHO + FBM-UP	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	1.827,96	142,75	7,850	4,0969	0,0370	4,1339
TB02	FBM-LOW + LFS	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	1.512,25	142,75	7,850	3,3893	0,0185	3,4078
TB03	RRH	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	1.317,00	142,75	7,850	2,9517	0,0370	2,9887
TB04	ALC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	479,68	142,75	7,850	0,5375	0,0185	0,5560
TB05	BLC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	523,50	142,75	7,850	0,5866	0,0185	0,6051
TB06	CLC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	440,00	142,75	7,850	0,4931	0,0185	0,5116
TB07	DLC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	360,78	142,75	7,850	0,4043	0,0185	0,4228
TB08	FLC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	351,96	142,75	7,850	0,3944	0,0185	0,4129
TB09	ILC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	374,15	142,75	7,850	0,4193	0,0185	0,4378
TB10	SHC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	750,00	142,75	7,850	0,8405	0,0185	0,8590
TB11	PEITO DE PROTEÇÃO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	525,00	142,75	7,850	0,5883	0,0185	0,6068
TB12	TRENÓ	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	631,00	142,75	7,850	1,4142	0,0370	1,4512
TB13	TRAVAMENTO TRENÓ	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	166,99	142,75	7,850	0,3743	0,0370	0,4113
TB14	FAB-UP	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	712,80	76,65	7,850	0,8578	0,0313	0,8892
TB15	FAB-LOW	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	466,72	76,65	7,850	0,5617	0,0313	0,5930
TB16	SIM	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	1.259,00	76,65	7,850	1,5152	0,0313	1,5465
TB17	TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	858,00	76,65	7,850	1,0326	0,0313	1,0639
TB18	LDB (1)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	562,52	76,65	7,850	0,3385	0,0157	0,3542
TB19	LDB (2)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	648,67	76,65	7,850	0,3903	0,0157	0,4060
TB20	LFDB (1)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	409,22	76,65	7,850	0,2462	0,0157	0,2619
TB21	LFDB (2)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	312,53	76,65	7,850	0,1881	0,0157	0,2037
TB22	ASB	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	402,06	76,65	7,850	0,2419	0,0157	0,2576
TB23	ESS (COLUNAS DIANTERAS)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	129,68	76,65	7,850	0,1561	0,0313	0,1874
TB24	ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	124,69	76,65	7,850	0,1501	0,0313	0,1814
TB25	ESS (TUBOS LONGITUDINAIS)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	255,40	76,65	7,850	0,3074	0,0313	0,3387
TOTAIS				215				41,5032	2,0385	43,5417

Item	Descrição	Perfil	Material	Qtde	L (mm)	A (mm²)	ρ (g/cm³)	Massa tubo (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)
TB26	ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	375,40	76,65	7,850	0,4518	0,0313	0,4831
TB27	REBOQUE DIANTEIRO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	422,00	76,65	7,850	0,2539	0,0157	0,2696
TB28	APOIO LATERAL	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	142,02	76,65	7,850	0,1709	0,0157	0,1866
TB29	COLUNA TRASEIRA	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	1.313,00	76,65	7,850	1,5802	0,0313	1,6115
TB30	TUBO ANTI-RESPINGO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	499,00	76,65	7,850	0,6005	0,0313	0,6319
TB31	RLC	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	369,92	76,65	7,850	0,2226	0,0157	0,2383
TB32	TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	167,60	76,65	7,850	0,2017	0,0313	0,2330
TB33	TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	130,00	76,65	7,850	0,0782	0,0157	0,0939
TB34	TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	409,89	76,65	7,850	0,2466	0,0157	0,2623
TB35	TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	458,00	76,65	7,850	0,2756	0,0157	0,2913
TB36	TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	443,94	76,65	7,850	0,5343	0,0313	0,5656
TB37	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (1)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	40,00	76,65	7,850	0,0241	0,0157	0,0397
TB38	TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (2)	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	40,00	76,65	7,850	0,0241	0,0157	0,0397
TB39	TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	543,16	76,65	7,850	0,3268	0,0313	0,3582
TB40	TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	103,80	76,65	7,850	0,1249	0,0313	0,1562
TB41	TUBO CENTRAL DO VOLANTE	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	243,40	69,90	7,850	0,1336	0,0117	0,1453
TB42	TRAVAMENTO DO VOLANTE	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	2	240,66	69,90	7,850	0,2641	0,0235	0,2876
TB43	TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS	TUBO CIRCULAR	Aço SAE 4130	1	221,00	69,90	7,850	0,1213	0,0117	0,1330
TB44	TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	250,00	264,00	7,870	0,5194	0,0275	0,5469
TB45	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	60,00	264,00	7,870	0,2493	0,0275	0,2768
TB46	ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	114,30	264,00	7,870	0,4750	0,0275	0,5024
TOTAIS				215				41,5032	2,0385	43,5417

Item	Descrição	Perfil	Material	Qtde	L (mm)	A (mm²)	ρ (g/cm³)	Massa tubo (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)
	AMORTECEDORES TRASEIROS									
TB47	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILING-ARM	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	64,88	264,00	7,870	0,2696	0,0275	0,2971
TB48	ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	98,54	264,00	7,870	0,4095	0,0275	0,4369
TB49	ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	64,01	264,00	7,870	0,2660	0,0275	0,2935
TB50	ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	47,69	264,00	7,870	0,1982	0,0275	0,2256
TB51	ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	72,28	264,00	7,870	0,3003	0,0275	0,3278
TB52	ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	55,00	264,00	7,870	0,2285	0,0275	0,2560
TB53	COLUNA DIANTEIRA	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	160,02	184,00	7,870	0,4634	0,0393	0,5027
TB54	COLUNA TRASEIRA	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	2	1.313,00	184,00	7,870	3,8027	0,0393	3,8419
TB55	TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	165,37	184,00	7,870	0,2395	0,0196	0,2591
TB56	TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	165,66	184,00	7,870	0,2399	0,0196	0,2595
TB57	TUBO CENTRAL	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	170,28	184,00	7,870	0,2466	0,0196	0,2662
TB58	BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	VIGA U	Aço SAE 1020	2	215,90	180,00	7,870	0,6117	0,0510	0,6627
TB59	FIXAÇÃO DIANTEIRA	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	357,92	184,00	7,870	0,5183	0,0196	0,5379
TB60	FIXAÇÃO TRASEIRA	BARRA RETANGULAR	Aço SAE 1020	1	369,67	184,00	7,870	0,5353	0,0196	0,5549
TB61	FIXAÇÃO DA MANCAIS DA DIREÇÃO	VIGA U	Aço SAE 1020	2	90,00	140,00	7,870	0,1983	0,0353	0,2336
TB62	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 DIANTEIRO	VIGA U	Aço SAE 1020	2	40,00	140,00	7,870	0,0881	0,0353	0,1235
TB63	FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 TRASEIRO	VIGA U	Aço SAE 1020	1	40,00	140,00	7,870	0,0441	0,0177	0,0617
TB64	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - DIANTEIRO	VIGA U	Aço SAE 1020	2	80,00	140,00	7,870	0,1763	0,0353	0,2116
TB65	FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - TRASEIRO	VIGA U	Aço SAE 1020	1	35,00	140,00	7,870	0,0386	0,0177	0,0562
TB66	FIXAÇÃO HASTE DA BANDEIRA	VIGA U	Aço SAE 1020	1	35,00	140,00	7,870	0,0386	0,0177	0,0562
TOTAIS				215				41,5032	2,0385	43,5417

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: Cálculo de Massa da Estrutura

MAS-2026-028

Emissão: 10/05/2026 22:38

Emissor: Ediwaldo Souza

Item	Descrição	Perfil	Material	Qtde	L (mm)	A (mm²)	ρ (g/cm³)	Massa tubo (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)
CH1	Fixação do Pedal de Freio	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	6.293,49	4,719	0,0891	0,0128	0,1019
CH2	Fixação do Cilindro Mestre	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	21.289,75	2,903	0,1854	0,0186	0,2040
CH3	Fixação do Pedal do Acelerador	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	6.293,49	4,719	0,0891	0,0128	0,1019
CH4	Fixação do Volante	Chapa 5 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	4.078,53	3,000	0,0612	0,0093	0,0705
CH5	Fixação Painel de Assistência	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.774,33	2,709	0,0288	0,0016	0,0304
CH6	Fixação Painel de Controle	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.774,33	2,709	0,0288	0,0016	0,0304
CH7	Fixação Chave de Emergência	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.618,00	3,008	0,0292	0,0079	0,0371
CH8	Fixação Superior Encosto de Cabeça	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	2.811,56	3,067	0,0259	0,0014	0,0272
CH9	Fixação Inferior Encosto de Cabeça	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	2.665,67	2,617	0,0209	0,0014	0,0223
CH10	Fixação Superior Encosto do Banco	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	2.811,56	3,067	0,0259	0,0014	0,0272
CH11	Fixação Inferior Encosto do Banco	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	2.665,67	2,617	0,0209	0,0014	0,0223
CH12	Fixação Inferior do Banco	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	564,48	2,397	0,0041	0,0008	0,0048
CH13	Fixação da Barra Estabilizadora	Chapa 5 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	4.078,53	3,000	0,1224	0,0186	0,1410
CH14	Fixação Superior da Cx. Acoplamento	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	2.385,63	2,838	0,0406	0,0259	0,0665
CH15	Fixação Inferior da Cx. Acoplamento	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.167,03	2,665	0,0187	0,0113	0,0300
CH16	Fixação Dianteira Cx. Redução	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.193,90	2,834	0,0203	0,0088	0,0291
CH17	Fixação Traseira Cx. Redução	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.685,95	3,005	0,0304	0,0116	0,0420
CH18	Fixação Inferior da Cx. Redução	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.267,78	2,734	0,0208	0,0069	0,0277
CH19	Fixação Proteção Transmissão Traseira	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	1.961,68	2,996	0,0176	0,0027	0,0204
CH20	Fixação Roldana Cabo do Acelerador	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	3.969,44	2,617	0,0623	0,0143	0,0766
CH21	Fixação Snorkel de Entrada CVT	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	564,48	2,397	0,0081	0,0016	0,0097
CH22	Fixação Snorkel de Saída CVT	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	564,48	2,397	0,0081	0,0016	0,0097
CH23	Fixação Reboque Traseiro	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.401,59	2,685	0,0226	0,0144	0,0370
CH24	Fixação Luz de Freio	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	1.618,00	3,008	0,0146	0,0039	0,0185
CH25	Fixação dos Faróis	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	564,48	2,397	0,0081	0,0016	0,0097
CH26	Fixação Antenas	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.401,59	2,685	0,0226	0,0144	0,0370
CH27	Fixação Bateria	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	1.774,33	2,709	0,0288	0,0016	0,0304
TOTAIS				215				41,5032	2,0385	43,5417

Item	Descrição	Perfil	Material	Qtde	L (mm)	A (mm²)	ρ (g/cm³)	Massa tubo (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)
CH28	Fixação Carrenagem	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	34	0,00	564,48	2,397	0,1380	0,0267	0,1647
CH29	Fixação Assoalho	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	15	0,00	564,48	2,397	0,0609	0,0118	0,0727
CH30	Fixação Corta Fogo	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	12	0,00	564,48	2,397	0,0487	0,0094	0,0581
CH31	Fixção Anti-Respingo	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	4	0,00	564,48	2,397	0,0162	0,0031	0,0194
CH32	Fixação Tiras Superiores do Cinto de Segurança	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	14.124,99	1,638	0,1389	0,0185	0,1574
CH33	Fixação Tiras Laterais do Cinto de Segurança	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	11.858,44	3,499	0,2489	0,0356	0,2845
CH34	Fixação Tiras Anti-Submarinas	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	2	0,00	10.949,55	3,507	0,2304	0,0209	0,2513
CH35	Proteção Inferior Sistema Transmissão Dianteiro	Chapa 3 mm	ACO-1045 — Aço SAE 1045	1	0,00	55.080,00	7,850	1,2971	0,0652	1,3623
TOTAIS				215				41,5032	2,0385	43,5417

RESUMO POR MATERIAL

Material	Itens	Σ Peças	Massa tubos (kg)	Massa solda (kg)	Massa total (kg)	% do total
Aço SAE 4130 (ACO-4130)	43	63	28,112	1,003	29,115	66,9%
Aço SAE 1020 (ACO-1020)	23	37	10,157	0,634	10,791	24,8%
ACO-1045 — Aço SAE 1045	35	115	3,235	0,401	3,636	8,3%

PARECER TÉCNICO

Aderência EXCELENTE entre massa real (42,663 kg) e teórica (43,542 kg) — divergência de -2,02% ($\leq 2,5\%$). O memorial está coerente com a estrutura fabricada e pode ser liberado como referência de projeto. Comportamento dentro do esperado: a massa real inferior à teórica é compatível com ajustes de fabricação (usinagem, recortes, tolerâncias dimensionais e variação de densidade dos materiais).



OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Tubo Redondo: $A = (\pi/4) \times (D^2 - d^2)$, com $d = D - 2t$.
- Barra Retangular: $A = B \cdot H - (B - 2t) \cdot (H - 2t)$.
- Viga U: $A = 2 \cdot H \cdot t + B \cdot t$.
- Massa unitária [kg] = $A[mm^2] \times L[mm] \times \rho[g/cm^3] \times 1 \times 10^{-6}$.
- Massa de solda por item: importada do módulo Cordões de Solda (/solda) e somada à massa do tubo.
- Status "OK": dimensões e material válidos. "Material/Densidade não encontrados": vincule o material na Biblioteca. "Dimensões incompletas": revisar D, H, B, t e comprimento.
- Massa real: medição em campo persistida por protótipo. Tolerância sugerida: $\leq 2,5\%$ excelente, $\leq 5\%$ aceitável, $> 5\%$ requer atenção em dados de projeto, métodos de medição e memorial de cálculo.

APÊNDICE C1 – Planejamento e Controle de Produção (PCP) – SDI

Planejamento e Controle de Produção

1 estrutura(s) por lote · Lead time 2 2 dias úteis · Solda calculada por juntas

LEAD TIME CONV
2 d
143,1 h

LEAD TIME AUTO
2 d
81,3 h

CUSTO CONV
R\$ 21.562,31
MO R\$ 18.567,35 · Eq

CUSTO AUTO
R\$ 18.579,64
MO R\$ 9.756,32 · Eq

ECONOMIA
R\$ 2.982,67
13,8% do convencional

REDUÇÃO EFETIVO
17 9
~8 pessoa(s)

CAPACID. CONV
4%
Gargalo: Montagem de

CAPACID. AUTO
4%
Gargalo: Montagem de

PARÂMETROS DO LOTE

- Quantidade de estruturas por lote: 1
- Dias disponíveis: 30 d · Horas/turno: 8 h · Nº turnos: 1
- Eficiência: 80% · Ociosidade: 10% · Contingência: 5%
- Modo de cálculo da Solda: juntas

VOLUMES IMPORTADOS DO PROJETO

Volume	Valor	Volume	Valor
Cortes	132	Pontos de solda (juntas)	297
Dobras	18	Massa de solda (kg)	2,038
Peças	100	Massa da estrutura (kg)	43,542
Membros	66	Última leitura do Projeto	29/05/2026, 08:59:56

ETAPAS PRODUTIVAS – CONVENCIONAL x AUTOMATIZADO

Etapa / Driver	Volume	T.Conv (min/un)	T.Auto (min/un)	Setup Conv (min/lote)	Setup Auto (min/lote)	Op.C onv	Op.A uto	R\$/h Op.Conv	R\$/h Op.Auto	R\$/h Eq.Conv	R\$/h Eq.Auto	Horas Conv	Horas Auto	Custo Conv	Custo Auto	Δ %
Corte cortes	132	2,00	0,40	60,0	60,0	2	1	R\$ 45,00	R\$ 70,00	R\$ 25,00	R\$ 180,00	7,875	2,742	R\$ 905,63	R\$ 685,42	-24,3%
Corte de Chapas m corte chapa	4	3,00	0,60	80,0	30,0	2	1	R\$ 55,00	R\$ 85,00	R\$ 60,00	R\$ 280,00	2,243	0,789	R\$ 381,23	R\$ 287,91	-24,5%
Dobra dobras	18	20,00	2,00	60,0	90,0	2	1	R\$ 50,00	R\$ 80,00	R\$ 40,00	R\$ 120,00	10,208	3,063	R\$ 1.429,17	R\$ 612,50	-57,1%
Ajustagem peças	100	15,00	2,00	30,0	30,0	2	1	R\$ 55,00	R\$ 75,00	R\$ 15,00	R\$ 80,00	37,188	5,590	R\$ 4.648,44	R\$ 866,49	-81,4%
Montagem de	1	0,00	0,00	1.440,0	idem	3	2	R\$ 55,00	R\$ 75,00	R\$ 10,00	R\$ 40,00	43,021	39,813	R\$ 7.528,65	R\$ 7.564,38	+0,5%
TOTAIS												143,057	81,282	R\$ 21.562,31	R\$ 18.579,64	-13,8%

Etapa / Driver	Volume	T.Conv (min/un)	T.Auto (min/un)	Setup Conv (min/lot)	Setup Auto (min/lot)	Op.C onv	Op.A uto	R\$/h Op.Conv	R\$/h Op.Auto	R\$/h Eq.Conv	R\$/h Eq.Auto	Horas Conv	Horas Auto	Custo Conv	Custo Auto	Δ %
Gabarito memb.+setup																
Solda juntas	297	3,06	1,53	60,0	300,0	2	1	R\$ 65,00	R\$ 95,00	R\$ 35,00	R\$ 220,00	23,576	18,351	R\$ 3.890,02	R\$ 5.780,50	+48,6%
Inspeção qtde	100	5,00	2,50	20,0	100,0	2	1	R\$ 70,00	R\$ 110,00	R\$ 20,00	R\$ 150,00	12,639	8,507	R\$ 2.022,22	R\$ 2.211,81	+9,4%
Pintura m²	44	4,58	0,92	60,0	60,0	2	1	R\$ 45,00	R\$ 75,00	R\$ 30,00	R\$ 160,00	6,308	2,428	R\$ 756,96	R\$ 570,64	-24,6%
TOTAIS												143,057	81,282	R\$ 21.562,31	R\$ 18.579,64	-13,8%

CONFRONTO CONVENCIONAL × AUTOMATIZADO

Indicador	Convencional	Automatizado	Δ (Auto – Conv)	Δ %
Horas totais	143,057 h	81,282 h	-61,775 h	-43,2%
Custo de mão de obra	R\$ 18.567,35	R\$ 9.756,32	-R\$ 8.811,03	-47,5%
Custo de equipamentos	R\$ 2.994,95	R\$ 8.823,32	R\$ 5.828,37	+194,6%
Custo total do lote	R\$ 21.562,31	R\$ 18.579,64	-R\$ 2.982,67	-13,8%
Custo por estrutura	R\$ 21.562,31	R\$ 18.579,64	-R\$ 2.982,67	-13,8%

GARGALOS E CAPACIDADE PRODUTIVA

Indicador	Convencional	Automatizado
Gargalo (etapa crítica)	Montagem de Gabarito (30%)	Montagem de Gabarito (49%)
Capacidade disponível (h)	4.080	2.160
Carga necessária (h)	143	81
Capacidade utilizada	4%	4%
Custo médio por hora	R\$ 150,73/h	R\$ 228,58/h
Lead time (dias úteis)	2 d	2 d
Efetivo necessário (pessoas)	17	9

ALERTAS DO PLANEJAMENTO

[WARN] Montagem de Gabarito é o gargalo principal: 30% do tempo total convencional.

PARECER TÉCNICO

Cenário com OPORTUNIDADES MODERADAS: economia de R\$ 2.982,67 por lote (13,8%) e lead time 2 2 d. Capacidade utilizada Auto = 4% (atenção: acima de 85% reduz flexibilidade para retrabalho e picos). Reavalie tempos da etapa "Montagem de Gabarito" e validade dos volumes importados antes de aprovar o investimento.

OBSERVAÇÕES TÉCNICAS

- Tempo da etapa = (T_setup_lote + T_unit x volume) x fator de eficiência. O setup é executado uma única vez por lote, independentemente da quantidade produzida.
- Etapa Gabarito: Tfixo_global + Q x M x Tmembro. O setup global é compartilhado entre Conv e Auto (mesmo gabarito físico) e amortizado pelo número de estruturas.
- Economia de escala: quanto maior o lote, menor o custo unitário, pois o setup é diluído por mais unidades. O efeito é mais expressivo no cenário Automatizado, que tipicamente possui setups maiores (programação CNC, calibração de robô) e tempo unitário menor.
- Etapa Solda: driver = juntas (PT) ou massa de solda (kg) conforme parâmetro do projeto.
- Lead time (dias úteis) = horas totais ÷ (horas/turno x nº turnos x efetivo aplicado), com eficiência e contingência já embutidas no tempo.
- Capacidade utilizada = carga necessária ÷ capacidade disponível. Verde ≤ 85%, atenção 85–100%, crítico > 100%.
- Δ% < 0 indica vantagem da automação (custo ou tempo menor); > 0 indica desvantagem no volume avaliado.
- Volumes vêm dos módulos 1.5 Sobremetal, 1.6 Cordões de Solda e 1.7 Massa da Estrutura — Planejamento é apenas consumidor.

APÊNDICE C2 – Gestão de Suprimentos – SDI

Gestão de Suprimentos

CUSTO TOTAL CONV.
R\$ 8.590,71

CUSTO TOTAL AUTO.
R\$ 8.004,76

ECONOMIA AUTOMAÇÃO
R\$ 585,95 (6,8%)

CUSTO / ESTRUTURA (CONV.)
R\$ 8.590,71

ITENS CLASSE A
4

ESTOQUE CRÍTICO
0

Resumo executivo

Análise de 30 regra(s) de consumo sobre 34 insumo(s) cadastrado(s), aplicada a 1 estrutura(s) do lote. Custo variável total no cenário convencional: R\$ 8.590,71; no cenário automatizado: R\$ 8.004,76.

A automação reduz o custo variável em R\$ 585,95 (6,8%) por lote.

Processo mais custoso: Estrutural (R\$ 6.404,04 · 74,5% do total).

Maior insumo individual: Tubo Redondo 25,4x1 mm · Aço SAE 4130 (R\$ 3.217,81).

Necessidade líquida de compra estimada: R\$ 8.590,71.

Volumes-base do projeto (drivers)

Quantidades consolidadas para o lote completo de estruturas.

Estruturas no lote	1
Cortes (lote)	132
Dobras (lote)	18
Peças (lote)	100
Membros (lote)	66
Pontos de solda (lote)	297
kg de solda (lote)	2,04
kg estrutura (lote)	43,54
Custo / estrutura (Conv.)	R\$ 8.590,71
Custo / estrutura (Auto.)	R\$ 8.004,76



Custo por processo

Processo	Custo Conv.	Custo Auto.	Δ R\$	Δ %	% do total Conv.
Estrutural	R\$ 6.404,04	R\$ 6.211,92	-R\$ 192,12	-3,0%	74,5%
Montagem de Gabarito	R\$ 577,50	R\$ 577,50	R\$ 0,00	0,0%	6,7%
Inspeção	R\$ 484,70	R\$ 484,70	R\$ 0,00	0,0%	5,6%
Pintura	R\$ 450,52	R\$ 372,43	-R\$ 78,09	-17,3%	5,2%
Soldagem	R\$ 284,53	R\$ 222,21	-R\$ 62,32	-21,9%	3,3%
Corte	R\$ 245,52	R\$ 31,68	-R\$ 213,84	-87,1%	2,9%
Ajustagem	R\$ 70,68	R\$ 31,84	-R\$ 38,84	-55,0%	0,8%
Chapa	R\$ 37,20	R\$ 36,45	-R\$ 0,74	-2,0%	0,4%
Dobra	R\$ 36,02	R\$ 36,02	R\$ 0,00	0,0%	0,4%
TOTAL	R\$ 8.590,71	R\$ 8.004,76	-R\$ 585,95	-6,8%	100%

Consumo técnico detalhado

Cenários convencional × automatizado por insumo. Custo total = custo unitário × necessidade líquida.

Processo	Insumo	Driver	Vol.	Fator C.	Fator A.	Cons. C.	Cons. A.	R\$/un C.	R\$/un A.	Necess. Líq.	Custo Conv.	Custo Auto.	Δ %	ABC
Estrutural	Tubo Redondo 25,4x1 mm · Aço SAE 4130	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	20,76	20,14	R\$ 155,00	R\$ 155,00	20,76	R\$ 3.217,81	R\$ 3.121,28	-3,0%	A
Estrutural	Tubo Redondo 30x1,6 mm · Aço SAE 4130	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	16,35	15,86	R\$ 180,00	R\$ 180,00	16,35	R\$ 2.942,18	R\$ 2.853,92	-3,0%	A
Estrutural	Tubo Redondo 19,05x1,25 mm · Aço SAE 4130	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	1,14	1,10	R\$ 125,00	R\$ 125,00	1,14	R\$ 141,97	R\$ 137,71	-3,0%	B
Estrutural	Barra Retangular 30x20x2 mm · Aço SAE 1020	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	4,26	4,14	R\$ 13,32	R\$ 13,32	4,26	R\$ 56,82	R\$ 55,11	-3,0%	C
Estrutural	Barra Retangular 30x40x2 mm · Aço SAE 1020	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	1,57	1,53	R\$ 19,11	R\$ 19,11	1,57	R\$ 30,07	R\$ 29,17	-3,0%	C
Estrutural	Viga U 25x40x2 mm · Aço SAE 1020	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	0,45	0,44	R\$ 17,14	R\$ 17,14	0,45	R\$ 7,74	R\$ 7,51	-3,0%	C
Estrutural	Viga U 25x20x2 mm · Aço SAE 1020	por m de perfil	0,0	1,000	0,970	0,62	0,60	R\$ 12,00	R\$ 12,00	0,62	R\$ 7,44	R\$ 7,22	-3,0%	C
Corte	Disco de corte abrasivo 14"	por corte	132,0	0,030	0,000	3,96	0,00	R\$ 50,00	R\$ 50,00	3,96	R\$ 198,00	R\$ 0,00	-100,0%	B
Corte	Lâmina serra fita bimetálica	por corte	132,0	0,002	0,000	0,26	0,00	R\$ 180,00	R\$ 180,00	0,26	R\$ 47,52	R\$ 0,00	-100,0%	C

Processo	Insumo	Driver	Vol.	Fator C.	Fator A.	Cons. C.	Cons. A.	R\$/un C.	R\$/un A.	Necess. Liq.	Custo Conv.	Custo Auto.	Δ %	ABC
Corte	Gás de assistência laser (N ₂)	por corte	132,0	0,000	0,020	0,00	2,64	R\$ 12,00	R\$ 12,00	0,00	R\$ 0,00	R\$ 31,68	0,0%	C
Dobra	Matriz de dobra de tubo	por dobra	18,0	1,000	1,000	18,00	18,00	R\$ 2,00	R\$ 2,00	18,00	R\$ 36,02	R\$ 36,02	0,0%	C
Ajustagem	Disco desbaste 7"	por peça	100,0	0,015	0,005	1,50	0,50	R\$ 14,00	R\$ 14,00	1,50	R\$ 21,00	R\$ 7,00	-66,7%	C
Ajustagem	Escova de aço copo	por membro	66,0	0,010	0,005	0,66	0,33	R\$ 28,00	R\$ 28,00	0,66	R\$ 18,48	R\$ 9,24	-50,0%	C
Ajustagem	Disco flap 4½" grão 80	por peça	100,0	0,020	0,010	2,00	1,00	R\$ 9,00	R\$ 9,00	2,00	R\$ 18,00	R\$ 9,00	-50,0%	C
Ajustagem	Disco acabamento 4½"	por peça	100,0	0,012	0,006	1,20	0,60	R\$ 11,00	R\$ 11,00	1,20	R\$ 13,20	R\$ 6,60	-50,0%	C
Montagem de Gabarito	MDF 18mm 2,75×1,83m	por estrutura	1,0	1,000	1,000	1,00	1,00	R\$ 330,00	R\$ 330,00	1,00	R\$ 330,00	R\$ 330,00	0,0%	A
Montagem de Gabarito	Parafuso M10 cabeça interna	por membro	66,0	1,500	1,500	99,00	99,00	R\$ 2,50	R\$ 2,50	99,00	R\$ 247,50	R\$ 247,50	0,0%	B
Soldagem	Vareta TIG ER70S-3 ø2,4mm	por kg de solda	2,0	1,050	1,020	2,14	2,08	R\$ 78,00	R\$ 78,00	2,14	R\$ 166,95	R\$ 162,18	-2,9%	B
Soldagem	Eletrodo tungstênio EWLa-1.5	por ponto de solda	297,0	0,005	0,002	1,49	0,59	R\$ 38,00	R\$ 38,00	1,49	R\$ 56,43	R\$ 22,57	-60,0%	C
Soldagem	Gás Argônio puro 99,99%	por kg de solda	2,0	0,350	0,250	0,71	0,51	R\$ 45,00	R\$ 45,00	0,71	R\$ 32,11	R\$ 22,93	-28,6%	C
Soldagem	Escova de aço inox	por membro	66,0	0,020	0,010	1,32	0,66	R\$ 22,00	R\$ 22,00	1,32	R\$ 29,04	R\$ 14,52	-50,0%	C
Inspeção	Líquido penetrante vermelho	por ponto de solda	297,0	0,005	0,005	1,49	1,49	R\$ 160,00	R\$ 160,00	1,49	R\$ 237,60	R\$ 237,60	0,0%	B
Inspeção	Cleaner removedor	por ponto de solda	297,0	0,006	0,006	1,78	1,78	R\$ 72,00	R\$ 72,00	1,78	R\$ 128,30	R\$ 128,30	0,0%	B
Inspeção	Revelador branco	por ponto de solda	297,0	0,004	0,004	1,19	1,19	R\$ 100,00	R\$ 100,00	1,19	R\$ 118,80	R\$ 118,80	0,0%	B
Pintura	Tinta pó epoxi preto fosco	por kg de estrutura	43,5	0,080	0,070	3,48	3,05	R\$ 92,00	R\$ 92,00	3,48	R\$ 320,47	R\$ 280,41	-12,5%	A
Pintura	Areia para jateamento G-40	por kg de estrutura	43,5	0,500	0,400	21,77	17,42	R\$ 3,20	R\$ 3,20	21,77	R\$ 69,67	R\$ 55,73	-20,0%	B
Pintura	Fita de mascaramento alta temp.	por estrutura	1,0	2,000	1,000	2,00	1,00	R\$ 18,00	R\$ 18,00	2,00	R\$ 36,00	R\$ 18,00	-50,0%	C
Pintura	Solvente de limpeza	por kg de estrutura	43,5	0,020	0,015	0,87	0,65	R\$ 28,00	R\$ 28,00	0,87	R\$ 24,38	R\$ 18,29	-25,0%	C
Chapa	Chapa 3 mm · Aço SAE 1045	por kg de estrutura	43,5	1,000	0,980	3,05	2,99	R\$ 11,50	R\$ 11,50	3,05	R\$ 35,09	R\$ 34,39	-2,0%	C

Processo	Insumo	Driver	Vol.	Fator C.	Fator A.	Cons. C.	Cons. A.	R\$/un C.	R\$/un A.	Necess. Liq.	Custo Conv.	Custo Auto.	Δ %	ABC
Chapa	Chapa 5 mm · Aço SAE 1045	por kg de estrutura	43,5	1,000	0,980	0,18	0,18	R\$ 11,50	R\$ 11,50	0,18	R\$ 2,11	R\$ 2,07	-2,0%	C
TOTAL											R\$ 8.590,71	R\$ 8.004,76	-6,8%	

Curva ABC — insumos por custo (Conv.)

30 insumo(s) com custo > 0 · Classe A: 4 · B: 8 · C: 18.

#	Insumo	Processo	Custo Conv.	Custo Auto.	% do total	% acumulado	Classe
1	Tubo Redondo 25,4x1 mm · Aço SAE 4130	Estrutural	R\$ 3.217,81	R\$ 3.121,28	37,5%	37,5%	A
2	Tubo Redondo 30x1,6 mm · Aço SAE 4130	Estrutural	R\$ 2.942,18	R\$ 2.853,92	34,2%	71,7%	A
3	MDF 18mm 2,75x1,83m	Montagem de Gabarito	R\$ 330,00	R\$ 330,00	3,8%	75,5%	A
4	Tinta pó epoxi preto fosco	Pintura	R\$ 320,47	R\$ 280,41	3,7%	79,3%	A
5	Parafuso M10 cabeça interna	Montagem de Gabarito	R\$ 247,50	R\$ 247,50	2,9%	82,2%	B
6	Líquido penetrante vermelho	Inspeção	R\$ 237,60	R\$ 237,60	2,8%	84,9%	B
7	Disco de corte abrasivo 14"	Corte	R\$ 198,00	R\$ 0,00	2,3%	87,2%	B
8	Vareta TIG ER70S-3 ø2,4mm	Soldagem	R\$ 166,95	R\$ 162,18	1,9%	89,2%	B
9	Tubo Redondo 19,05x1,25 mm · Aço SAE 4130	Estrutural	R\$ 141,97	R\$ 137,71	1,7%	90,8%	B
10	Cleaner removedor	Inspeção	R\$ 128,30	R\$ 128,30	1,5%	92,3%	B
11	Revelador branco	Inspeção	R\$ 118,80	R\$ 118,80	1,4%	93,7%	B
12	Areia para jateamento G-40	Pintura	R\$ 69,67	R\$ 55,73	0,8%	94,5%	B
13	Barra Retangular 30x20x2 mm · Aço SAE 1020	Estrutural	R\$ 56,82	R\$ 55,11	0,7%	95,2%	C
14	Eletrodo tungstênio EWLa-1.5	Soldagem	R\$ 56,43	R\$ 22,57	0,7%	95,8%	C
15	Lâmina serra fita bimetálica	Corte	R\$ 47,52	R\$ 0,00	0,6%	96,4%	C
16	Matriz de dobra de tubo	Dobra	R\$ 36,02	R\$ 36,02	0,4%	96,8%	C
17	Fita de mascaramento alta temp.	Pintura	R\$ 36,00	R\$ 18,00	0,4%	97,2%	C
18	Chapa 3 mm · Aço SAE 1045	Chapa	R\$ 35,09	R\$ 34,39	0,4%	97,6%	C
19	Gás Argônio puro 99,99%	Soldagem	R\$ 32,11	R\$ 22,93	0,4%	98,0%	C
20	Gás de assistência laser (N ₂)	Corte	R\$ 0,00	R\$ 31,68	0,0%	100,0%	C

#	Insumo	Processo	Custo Conv.	Custo Auto.	% do total	% acumulado	Classe
21	Barra Retangular 30x40x2 mm · Aço SAE 1020	Estrutural	R\$ 30,07	R\$ 29,17	0,4%	98,4%	C
22	Escova de aço inox	Soldagem	R\$ 29,04	R\$ 14,52	0,3%	98,7%	C
23	Solvente de limpeza	Pintura	R\$ 24,38	R\$ 18,29	0,3%	99,0%	C
24	Disco desbaste 7"	Ajustagem	R\$ 21,00	R\$ 7,00	0,2%	99,2%	C
25	Escova de aço copo	Ajustagem	R\$ 18,48	R\$ 9,24	0,2%	99,4%	C
26	Disco flap 4½" grão 80	Ajustagem	R\$ 18,00	R\$ 9,00	0,2%	99,6%	C
27	Disco acabamento 4½"	Ajustagem	R\$ 13,20	R\$ 6,60	0,2%	99,8%	C
28	Viga U 25x40x2 mm · Aço SAE 1020	Estrutural	R\$ 7,74	R\$ 7,51	0,1%	99,9%	C
29	Viga U 25x20x2 mm · Aço SAE 1020	Estrutural	R\$ 7,44	R\$ 7,22	0,1%	100,0%	C
30	Chapa 5 mm · Aço SAE 1045	Chapa	R\$ 2,11	R\$ 2,07	0,0%	100,0%	C
	TOTAL		R\$ 8.590,71	R\$ 8.004,76	100,0%		

Necessidade de compra (cenário convencional)

Quantidades líquidas (consumo – estoque) que precisam ser adquiridas.

Insumo	Unidade	Estoque	Necess. Líq.	R\$/un	Subtotal
Tubo Redondo 25,4x1 mm · Aço SAE 4130	m	0,00	20,76	R\$ 155,00	R\$ 3.217,81
Tubo Redondo 30x1,6 mm · Aço SAE 4130	m	0,00	16,35	R\$ 180,00	R\$ 2.942,18
MDF 18mm 2,75x1,83m	un	0,00	1,00	R\$ 330,00	R\$ 330,00
Tinta pó epoxi preto fosco	kg	0,00	3,48	R\$ 92,00	R\$ 320,47
Parafuso M10 cabeça interna	un	0,00	99,00	R\$ 2,50	R\$ 247,50
Líquido penetrante vermelho	L	0,00	1,49	R\$ 160,00	R\$ 237,60
Disco de corte abrasivo 14"	un	0,00	3,96	R\$ 50,00	R\$ 198,00
Vareta TIG ER70S-3 ø2,4mm	kg	0,00	2,14	R\$ 78,00	R\$ 166,95
Tubo Redondo 19,05x1,25 mm · Aço SAE 4130	m	0,00	1,14	R\$ 125,00	R\$ 141,97
Cleaner removedor	L	0,00	1,78	R\$ 72,00	R\$ 128,30
Revelador branco	L	0,00	1,19	R\$ 100,00	R\$ 118,80
Areia para jateamento G-40	kg	0,00	21,77	R\$ 3,20	R\$ 69,67



Insumo	Unidade	Estoque	Necess. LÍq.	R\$/un	Subtotal
Barra Retangular 30x20x2 mm · Aço SAE 1020	m	0,00	4,26	R\$ 13,32	R\$ 56,82
Eletrodo tungstênio EWLa-1.5	un	0,00	1,49	R\$ 38,00	R\$ 56,43
Lâmina serra fita bimetálica	un	0,00	0,26	R\$ 180,00	R\$ 47,52
Fita de mascaramento alta temp.	un	0,00	2,00	R\$ 18,00	R\$ 36,00
Chapa 3 mm · Aço SAE 1045	kg	0,00	3,05	R\$ 11,50	R\$ 35,09
Gás Argônio puro 99,99%	m³	0,00	0,71	R\$ 45,00	R\$ 32,11
Barra Retangular 30x40x2 mm · Aço SAE 1020	m	0,00	1,57	R\$ 19,11	R\$ 30,07
Escova de aço inox	un	0,00	1,32	R\$ 22,00	R\$ 29,04
Solvente de limpeza	L	0,00	0,87	R\$ 28,00	R\$ 24,38
Disco desbaste 7"	un	0,00	1,50	R\$ 14,00	R\$ 21,00
Escova de aço copo	un	0,00	0,66	R\$ 28,00	R\$ 18,48
Disco flap 4½" grão 80	un	0,00	2,00	R\$ 9,00	R\$ 18,00
Disco acabamento 4½"	un	0,00	1,20	R\$ 11,00	R\$ 13,20
Viga U 25x40x2 mm · Aço SAE 1020	m	0,00	0,45	R\$ 17,14	R\$ 7,74
Viga U 25x20x2 mm · Aço SAE 1020	m	0,00	0,62	R\$ 12,00	R\$ 7,44
Chapa 5 mm · Aço SAE 1045	kg	0,00	0,18	R\$ 11,50	R\$ 2,11
TOTAL					R\$ 8.554,69

Itens amortizáveis (CAPEX rateado)

Insumo	Valor aquisição	Vida útil (ciclos)	R\$/un amortizado	Custo Conv.
Matriz de dobra de tubo	R\$ 3.000,00	1.499	R\$ 2,0013	R\$ 36,02

Alertas e observações

- [ATENÇÃO] Estrutural concentra 75% do custo variável convencional.
- [INFO] Maior insumo de custo: Tubo Redondo 25,4x1 mm · Aço SAE 4130 (37% do total).
- [INFO] Necessidade de compra estimada: R\$ 8.591.

Conclusão

Recomenda-se priorizar a estratégia automatizada, com economia estimada de R\$ 585,95 (6,8%) por lote de 1 estrutura(s). 4 item(ns) classe A concentram a maior parte do custo — focar negociação e controle de estoque nesses insumos.

APÊNDICE D1 – Otimização de Cortes – SDI

Otimização de Corte de Tubos

Convencional

GRUPOS OTIMIZADOS
7

PEÇAS TOTAIS
100

COMPRIMENTO TOTAL
45,15 m

BARRAS USADAS
12 / 12
vs. estimativa

EFICIÊNCIA GLOBAL
89,9%

SOBRA TOTAL
4.805 mm

PERDA DE SERRA
264 mm

GRUPOS CRÍTICOS
0

RETALHOS GERADOS
2

Resumo executivo

Plano de corte gerado para 7 grupo(s) de perfis no cenário Convencional usando estratégia "Menor desperdício". Total de 100 peça(s) somando 45,15 m de material. Eficiência global de aproveitamento de barra: 89,9% (45.151 mm úteis em 12 barra(s) × comprimento médio).

Parâmetros operacionais

Configuração aplicada ao plano de corte vigente.

Cenário de produção	Convencional
Estratégia de otimização	Menor desperdício
Kerf da serra	3,0 mm
Retalho mínimo reaproveitável	300 mm
Limite de sucata	100 mm
Tolerância dimensional	± 2,00 mm
Permitir barras adicionais	Sim

Resumo por grupo

Perfil	Material	Barra	Peças	Barras	Δ Imp.	Útil	Sobra	Sucata	Reaprov.	Serra	Eficiência	Classe
TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	4130	6.000 mm	41	4	0	20.760 mm	3.129 mm	0 mm	3.129 mm	111 mm	86,5%	Muito bom
TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	4130	6.000 mm	18	3	0	16.345 mm	1.610 mm	0 mm	1.610 mm	45 mm	90,8%	Muito bom
BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	1020	1.650 mm	17	1	0	1.573 mm	29 mm	0 mm	29 mm	48 mm	95,4%	Excelente
VIGA U - 25,00x20,00x2,00	1020	650 mm	9	1	0	620 mm	6 mm	0 mm	6 mm	24 mm	95,4%	Excelente
VIGA U - 25,00x40,00x2,00	1020	470 mm	2	1	0	452 mm	15 mm	0 mm	15 mm	3 mm	96,1%	Excelente
TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	4130	1.150 mm	4	1	0	1.136 mm	5 mm	0 mm	5 mm	9 mm	98,8%	Excelente
BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	1020	4.300 mm	9	1	0	4.265 mm	11 mm	0 mm	11 mm	24 mm	99,2%	Excelente
TOTAL			100	12	0	45.151 mm	4.805 mm	0 mm	4.805 mm	264 mm	89,9%	

Plano de corte detalhado

Distribuição de peças por barra (sequência sugerida pela estratégia).

BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00 · 1020 · barra 4.300 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	COLUNA TRASEIRA 2× 1323 + FIXAÇÃO TRASEIRA 380 + FIXAÇÃO DIANTEIRA 368 + TUBO CENTRAL 180 + TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO 176 + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO 175 + COLUNA DIANTEIRA 2× 170	4.265 mm	24 mm	11 mm	99,2%	Excelente
TOTAL	9 peça(s)	4.265 mm	24 mm	11 mm	99,2%	

BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00 · 1020 · barra 1.650 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES 260 + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS 2× 124 + ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO 2× 109 + ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES) 2× 82 + ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILLING-ARM 2× 75 + ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES) 2× 74 + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES 2× 70 + ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES) 2× 65 + ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES) 2× 58	1.573 mm	48 mm	29 mm	95,4%	Excelente
TOTAL	17 peça(s)	1.573 mm	48 mm	29 mm	95,4%	

TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25 · 4130 · barra 1.150 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS 381 + TUBO CENTRAL DO VOLANTE 253 + TRAVAMENTO DO VOLANTE 2× 251	1.136 mm	9 mm	5 mm	98,8%	Excelente
TOTAL	4 peça(s)	1.136 mm	9 mm	5 mm	98,8%	

TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00 · 4130 · barra 6.000 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	COLUNA TRASEIRA 2× 1523 + SIM 2× 1469	5.984 mm	9 mm	7 mm	99,7%	Excelente
2	TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT 2× 968 + TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS 768 + REBOQUE DIANTEIRO 732 + FAB-UP 2× 723 + TUBO ANTI-RESPINGO 659 + TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL 420	5.960 mm	21 mm	19 mm	99,3%	Excelente
3	TUBO ANTI-RESPINGO 659 + LDB (2) 659 + LDB (1) 573 + TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA 553 + FAB-LOW 2× 477 + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO 2× 454 + LFDB (1) 419 + ASB 412 + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) 2× 385 + TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (1) 50	5.957 mm	36 mm	7 mm	99,3%	Excelente
4	RLC 380 + LFDB (2) 323 + ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) 2× 265 + TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO 2× 178 + APOIO LATERAL 2× 152 + TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO 140 + ESS (COLUNAS DIANTERAS) 2× 140 + ESS (COLUNAS TRASEIRAS) 2× 135 + TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS 2× 114 + TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (2) 50	2.859 mm	45 mm	3.096 mm	47,7%	Reaproveitável
TOTAL	41 peça(s)	20.760 mm	111 mm	3.129 mm	86,5%	

TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60 · 4130 · barra 6.000 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	RHO + FBM-UP 2× 1938 + FBM-LOW + LFS 1722 + ILC 384	5.982 mm	9 mm	9 mm	99,7%	Excelente
2	FBM-LOW + LFS 1722 + RRH 2× 1527 + TRENÓ 791 + DLC 371	5.938 mm	12 mm	50 mm	99,0%	Excelente
3	TRENÓ 791 + SHC 760 + PEITO DE PROTEÇÃO 685 + BLC 534 + ALC 490 + CLC 450 + FLC 362 + TRAVAMENTO TRENÓ 2× 177	4.425 mm	24 mm	1.551 mm	73,8%	Reaproveitável
TOTAL	18 peça(s)	16.345 mm	45 mm	1.610 mm	90,8%	

VIGA U - 25,00x20,00x2,00 · 1020 · barra 650 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	FIXAÇÃO DA MANCAIS DA DIREÇÃO 2× 100 + FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - DIANTEIRO 2× 90 + FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 DIANTEIRO 2× 50 + FIXAÇÃO DO ARCO DE SEGURANÇA 4X4 TRASEIRO 50 + FIXAÇÃO DA PROTEÇÃO 4X4 COCKIT - TRASEIRO 45 + FIXAÇÃO HASTE DA BANDEIRA 45	620 mm	24 mm	6 mm	95,4%	Excelente
TOTAL	9 peça(s)	620 mm	24 mm	6 mm	95,4%	



VIGA U - 25,00x40,00x2,00 · 1020 · barra 470 mm

Barra #	Cortes (peça × mm)	Útil	Perda serra	Sobra final	Aproveit.	Classe
1	BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL 2x 226	452 mm	3 mm	15 mm	96,1%	Excelente
TOTAL	2 peça(s)	452 mm	3 mm	15 mm	96,1%	

Análise de eficiência industrial

Diagnóstico técnico e status funcional sugerido por grupo.

Perfil	Status funcional	Efic. atual	Efic. teórica máx.	Sobra evit.	Sobra inevit.	Recomendação
BARRA RETANGULAR - 30,00x20,00x2,00	Otimizado	99,2%	99,2%	0 mm	35 mm	Plano adequado para produção.
BARRA RETANGULAR - 30,00x40,00x2,00	Otimizado	95,4%	95,4%	0 mm	77 mm	Plano adequado para produção.
TUBO CIRCULAR - 19,05x1,25	Otimizado	98,8%	98,8%	0 mm	14 mm	Plano adequado para produção.
TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	Otimizado	86,5%	86,5%	0 mm	3.240 mm	Plano adequado para produção.
TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	Otimizado	90,8%	90,8%	0 mm	1.655 mm	Plano adequado para produção.
VIGA U - 25,00x20,00x2,00	Otimizado	95,4%	95,4%	0 mm	30 mm	Plano adequado para produção.
VIGA U - 25,00x40,00x2,00	Otimizado	96,1%	96,1%	0 mm	18 mm	Plano adequado para produção.

Estoque de retalhos gerado

2 retalho(s) · 4,65 m totais — disponíveis para reaproveitamento.

Perfil	Material	Origem	Comprimento	Data
TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	4130	Barra #4 · TUBO CIRCULAR - 25,40x1,00	3.096 mm	31/05/2026
TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	4130	Barra #3 · TUBO CIRCULAR - 30,00x1,60	1.551 mm	31/05/2026
TOTAL		2 item(ns)	4.647 mm	

Conclusão

Consumo de barras alinhado com a estimativa do Sobremetal. Aproveitamento global excelente (89,9%) — manter parâmetros atuais. 2 retalho(s) reaproveitáveis foram identificados e devem alimentar o estoque técnico.

APÊNDICE D2 – Especificação do Processo de Soldagem (EPS) – SDI

EPS – Especificação do Processo de Soldagem

EPS CADASTRADAS
1

MEMBROS IMPORTADOS
101

UNIÕES TOTAIS
145

PONTOS OBRIGATÓRIOS
32 / 32
inspecionados

APROVADAS
145

REPROVADAS
0

REFORÇO NECESSÁRIO
0

AGUARDANDO INSPEÇÃO
0

SOLDADORES ATIVOS
3

Resumo executivo
Documento consolidado de 1 EPS, 145 união(ões) soldada(s), 3 soldador(es) qualificado(s) e 145 registro(s) de inspeção.
Processo dominante: TIG (GTAW) (1 EPS de 1).
Cobertura de inspeção em pontos obrigatórios: 100,0% (32/32).

EPS cadastradas – visão consolidada

Código	Rev.	Processo	Norma	Material base	Posição	Espessura (mm)	Energia (kJ/mm)
EPS-CB12-2023	00	TIG (GTAW)	AWS D1.1	ER70S-3	Múltiplas posições	1 a 1.6	–

EPS EPS-CB12-2023 · Rev. 00 – dados gerais

Projeto	CB12
Protótipo	CB12
Data de criação	31/05/2026
Responsável técnico	EJS
Processo	TIG (GTAW)
Norma de referência	AWS D1.1



Material base	ER70S-3
Espessura (mm)	1 a 1.6
Posição de soldagem	Múltiplas posições
Tipo de junta	Múltiplas juntas
Tipo de chanfro	V
Gás de proteção	Argônio
Observações	—

EPS EPS-CB12-2023 · Rev. 00 — equipamento

Equipamento	Máquina de solda inversora TIG AC/DC · WELD VISION · INV200AC/DC
Patrimônio	-
Corrente (A)	5 a 200
Tensão (V)	10 a 14
Polaridade	DCEN (-)
Tipo de corrente	CC
Velocidade de avanço	—
Energia linear de soldagem	—
Observações	—

Soldadores qualificados

Nome	Matrícula	Qualificação	Processo autorizado	Validade
RDG	MT002	N/A	TIG	2028-08-01
MYC	MT003	N/A	TIG	2028-08-01
EJS	MT001	N/A	TIG	2028-08-01

Mapa de uniões soldadas

Aprovada: 145

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
1	U-001	União entre RRH e BLC (Ponto BR) – RRH + BLC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
2	U-002	União entre RRH e ALC (Ponto AL) – RRH + ALC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
3	U-003	União entre RRH e BLC (Ponto BL) – RRH + BLC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
4	U-004	União entre RRH e ALC (Ponto AR) – RRH + ALC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
5	U-005	União entre RRH e SHC (Ponto HR) – RRH + SHC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
6	U-006	União entre RRH e SHC (Ponto HL) – RRH + SHC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
7	U-007	União entre RRH e LDB(1) (Ponto Superior Direito) – RRH + LDB (1)	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Opcional	Visual
8	U-008	União entre SHC E LDB(1) (Ponto Superior Central) – LDB (1) + SHC	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Opcional	Visual
9	U-009	União entre SHC E LDB(2) (Ponto Inferior Central) – SHC + LDB (2)	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Opcional	Visual
10	U-010	União entre RRH e LDB(2) (Ponto Inferior Esquerdo) – RRH + LDB (2)	EPS-CB12-2023	Tubular	RDG	2023-08-01	Aprovada	Opcional	Visual
11	U-011	União entre RRH e FBM-LOW+LFS (Ponto AR) – RRH + FBM-LOW + LFS	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-02	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
12	U-012	União entre RRH e FBM-LOW+LFS (Ponto AL) – FBM-LOW + LFS + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-02	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
13	U-013	União entre ILC e FBM-LOW+LFS (Ponto IR) – FBM-LOW + LFS + ILC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-02	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
14	U-014	União entre ILC e FBM-LOW+LFS (Ponto FL) – FBM-LOW + LFS + FLC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-02	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
15	U-015	União entre ILC e FBM-LOW+LFS (Ponto IL) – FBM-LOW + LFS + ILC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-02	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
16	U-016	União entre ILC e FBM-LOW+LFS (Ponto FR) – FBM-LOW + LFS + FLC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-03	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
17	U-017	União entre RRH e FBM-LOW+LFS (Ponto BR) – RRH + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-03	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: EPS – Especificação do Processo de Soldagem

REL-SDI-2026-088

Emissão: 02/06/2026 22:31

Emissor: Edivaldo Souza

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
18	U-018	União entre RHO+FBM-UP e FBM-LOW+LFS (Ponto DR) – FBM-LOW + LFS + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-03	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
19	U-019	União entre RRH e FBM-LOW+LFS (Ponto BL) – RRH + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-03	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
20	U-020	União entre RHO+FBM-UP e FBM-LOW+LFS (Ponto DL) – FBM-LOW + LFS + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-03	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
21	U-021	União entre CLC e FBM-LOW+LFS (Ponto CR) – RHO + FBM-UP + CLC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-04	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
22	U-022	União entre DLC e FBM-LOW+LFS (Ponto DL) – FBM-LOW + LFS + DLC + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-04	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
23	U-023	União entre CLC e FBM-LOW+LFS (Ponto CL) – RHO + FBM-UP + CLC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-04	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
24	U-024	União entre DLC e FBM-LOW+LFS (Ponto DR) – FBM-LOW + LFS + DLC + RHO + FBM-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-04	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
25	U-025	União entre ASB e FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + ASB	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-04	Aprovada	Opcional	Visual
26	U-026	União entre ASB e FBM-LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + ASB	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-05	Aprovada	Opcional	Visual
27	U-027	União entre FBM-LOW+LFS e LFDB(2) (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + LFDB (2)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-05	Aprovada	Opcional	Visual
28	U-028	União entre LFDB(2) e ASB (Ponto Central) – ASB + LFDB (2)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-05	Aprovada	Opcional	Visual
29	U-029	União entre ASB e LFDB(1) (Ponto Central) – ASB + LFDB (1)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-05	Aprovada	Opcional	Visual
30	U-030	União entre LFDB(1) e FBM-LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + LFDB (1)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-05	Aprovada	Opcional	Visual
31	U-031	União entre EES (TUBOS LONGITUDINAIS) e EES (TUBOS TRANSVERSAIS) (Ponto Traseiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-06	Aprovada	Opcional	Visual
32	U-032	União entre EES (TUBOS LONGITUDINAIS) e EES (TUBOS TRANSVERSAIS) (Ponto Dianteiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-06	Aprovada	Opcional	Visual
33	U-033	União entre EES (TUBOS LONGITUDINAIS) e EES (TUBOS TRANSVERSAIS) (Ponto Traseiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-06	Aprovada	Opcional	Visual
34	U-034	União entre EES (TUBOS LONGITUDINAIS) e EES (TUBOS TRANSVERSAIS) (Ponto Dianteiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-06	Aprovada	Opcional	Visual
35	U-035	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Inferior Traseiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-06	Aprovada	Opcional	Visual
36	U-036	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Inferior Dianteiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS DIANTERAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-07	Aprovada	Opcional	Visual

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
37	U-037	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Inferior Traseiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-07	Aprovada	Opcional	Visual
38	U-038	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Inferior Dianteiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS DIANTERAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-07	Aprovada	Opcional	Visual
39	U-039	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Superior Traseiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-07	Aprovada	Opcional	Visual
40	U-040	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Superior Dianteiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS DIANTERAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-07	Aprovada	Opcional	Visual
41	U-041	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Superior Traseiro Esquerdo) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS TRASEIRAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-08	Aprovada	Opcional	Visual
42	U-042	União entre EES (PLANO) e EES (COLUNAS TRASEIRAS) (Ponto Superior Dianteiro Direito) – ESS (TUBOS LONGITUDINAIS) + ESS (TUBOS TRANSVERSAIS) + ESS (COLUNAS DIANTERAS)	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-08	Aprovada	Opcional	Visual
43	U-043	União entre PEITO DE PROTEÇÃO e ILC (Ponto Traseiro) – ILC + PEITO DE PROTEÇÃO	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-08	Aprovada	Opcional	Visual
44	U-044	União entre PEITO DE PROTEÇÃO e FLC (Ponto Dianteiro) – PEITO DE PROTEÇÃO + FLC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-08	Aprovada	Opcional	Visual
45	U-045	União entre SIM e DEMAIS MEMBROS (Ponto DR) – FBM-LOW + LFS + DLC + RHO + FBM-UP + SIM	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-08	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
46	U-046	União entre SIM e RRH (Ponto SR) – SIM + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-09	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
47	U-047	União entre FAB-UP e RHO+FBM-UP (Ponto OR) – RHO + FBM-UP + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-09	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
48	U-048	União entre FAB-UP e SIM (Ponto PR) – SIM + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-09	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
49	U-049	União entre FAB-LOW e SIM (Ponto PR) – SIM + FAB-LOW	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-09	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
50	U-050	União entre FAB-LOW e DEMAIS MEMBROS (Ponto IR) – FBM-LOW + LFS + FAB-LOW + ILC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-09	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
51	U-051	União entre SIM e DEMAIS MEMBROS (Ponto DL) – FBM-LOW + LFS + DLC + RHO + FBM-UP + SIM	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-10	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
52	U-052	União entre SIM e RRH (Ponto SL) – SIM + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-10	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
53	U-053	União entre FAB-UP e RHO+FBM-UP (Ponto OL) – RHO + FBM-UP + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-10	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
54	U-054	União entre FAB-UP e SIM (Ponto PL) – SIM + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-10	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
55	U-055	União entre FAB-LOW e SIM (Ponto PL) – SIM + FAB-LOW	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-10	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
56	U-056	União entre FAB-LOW e DEMAIS MEMBROS (Ponto IL) – FBM-LOW + LFS + FAB-LOW + ILC	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-11	Aprovada	Obrigatório	Líquido penetrante
57	U-057	União entre TRAV. TRASV. COCKPIT e SIM (Ponto Superior Traseiro Direito) – SIM + TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-11	Aprovada	Opcional	Visual
58	U-058	União entre TRAV. TRASV. COCKPIT e SIM (Ponto Inferior Dianteiro Direito) – SIM + TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-11	Aprovada	Opcional	—
59	U-059	União entre TRAV. TRASV. COCKPIT e SIM (Ponto Superior Traseiro Esquerdo) – SIM + TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-11	Aprovada	Opcional	Visual
60	U-060	União entre TRAV. TRASV. COCKPIT e SIM (Ponto Inferior Dianteiro Esquerdo) – SIM + TRAVAMENTO TRANSVERSAL COCKPIT	EPS-CB12-2023	Tubular	MYC	2023-08-11	Aprovada	Opcional	Visual
61	U-061	União entre REBOQUE DIANTEIRO e FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + REBOQUE DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-08	Aprovada	Opcional	Visual
62	U-062	União entre REBOQUE DIANTEIRO e FBM-LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + REBOQUE DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-08	Aprovada	Opcional	Visual
63	U-063	União entre APOIO LATERAL e FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + APOIO LATERAL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-08	Aprovada	Opcional	Visual
64	U-064	União entre APOIO LATERAL e FBM-LOW+LFS (Ponto ESQUERDO) – FBM-LOW + LFS + APOIO LATERAL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-09	Aprovada	Opcional	Visual
65	U-065	União entre TB. FIX. LEQUES SUP. DIANTEIROS e SIM (Ponto Superior Direito) – SIM + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-09	Aprovada	Opcional	Visual
66	U-066	União entre TB. FIX. LEQUES SUP. DIANTEIROS e FBM-LOW+LFS (Ponto Inferior Direito) – FBM-LOW + LFS + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-09	Aprovada	Opcional	Visual
67	U-067	União entre TB. FIX. LEQUES SUP. DIANTEIROS e SIM (Ponto Superior Esquerdo) – SIM + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-10	Aprovada	Opcional	Visual
68	U-068	União entre TB. FIX. LEQUES SUP. DIANTEIROS e FBM-LOW+LFS (Ponto Inferior Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-10	Aprovada	Opcional	Visual
69	U-069	União entre TRAV. AMORT. DIANTEIROS e SIM (Ponto Direito) – TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS + SIM	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-11	Aprovada	Opcional	Visual
70	U-070	União entre TRAV. AMORT. DIANTEIROS e SIM (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS + SIM	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-11	Aprovada	Opcional	Visual
71	U-071	União entre TB. CENTRAL DO VOLANTE e TRAV. AMORT. DIANTEIROS (Ponto Inferior) – TUBO CENTRAL DO VOLANTE + TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-11	Aprovada	Opcional	Visual

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: EPS – Especificação do Processo de Soldagem

REL-SDI-2026-088

Emissão: 02/06/2026 22:31

Emissor: Edivaldo Souza

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
72	U-072	União entre TRAV. TB. CENTRAL DO VOLANTE e FBM-UP (Ponto Direito) – TRAVAMENTO DO VOLANTE + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-12	Aprovada	Opcional	Visual
73	U-073	União entre TRAV. TB. CENTRAL DO VOLANTE e FBM-UP (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO DO VOLANTE + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-12	Aprovada	Opcional	Visual
74	U-074	União entre TRAV. TB. CENTRAL DO VOLANTE e TB. CENTRAL DO VOLANTE (Ponto Direito) – TRAVAMENTO DO VOLANTE + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-12	Aprovada	Opcional	Visual
75	U-075	União entre TRAV. TB. CENTRAL DO VOLANTE e TB. CENTRAL DO VOLANTE (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO DO VOLANTE + FAB-UP	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-13	Aprovada	Opcional	Visual
76	U-076	União entre TRENÓ e ALC (Ponto Direito) – TRENÓ + ALC	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-13	Aprovada	Opcional	Visual
77	U-077	União entre TRENÓ e ALC (Ponto Esquerdo) – TRENÓ + ALC	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-14	Aprovada	Opcional	Visual
78	U-078	União entre TRENÓ e TRAVAMENTO TRANSVERSAL (Ponto Direito) – TRENÓ + TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-14	Aprovada	Opcional	Visual
79	U-09	União entre TRENÓ e TRAVAMENTO TRANSVERSAL (Ponto Esquerdo) – TRENÓ + TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-14	Aprovada	Opcional	Visual
80	U-080	União entre TRAV. TRENÓ e ALC (Ponto Direito) – ALC + TRAVAMENTO TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-15	Aprovada	Opcional	Visual
81	U-081	União entre TRAV. TRENÓ e TRENÓ (Ponto Direito) – TRAVAMENTO TRENÓ + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-15	Aprovada	Opcional	Visual
82	U-082	União entre TRAV. TRENÓ e ALC (Ponto Esquerdo) – ALC + TRAVAMENTO TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-15	Aprovada	Opcional	Visual
83	U-083	União entre TRAV. TRENÓ e TRENÓ (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO TRENÓ + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-16	Aprovada	Opcional	Visual
84	U-084	União entre COLUNA TRASEIRA e TRAVAMENTO TRANSVERSAL (Ponto Direito) – TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-16	Aprovada	Opcional	Visual
85	U-085	União entre COLUNA TRASEIRA e BLC (Ponto Direito) – COLUNA TRASEIRA + BLC	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-17	Aprovada	Opcional	Visual
86	U-086	União entre COLUNA TRASEIRA e TRAVAMENTO TRANSVERSAL (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-17	Aprovada	Opcional	Visual
87	U-087	União entre COLUNA TRASEIRA e BLC (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO TRANSVERSAL + FIXAÇÃO LINKS TRASEIROS INFERIORES + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-17	Aprovada	Opcional	Visual
88	U-088	União entre TB. ANTI-RESPINGO e RRH (Ponto Direito) – RRH + TUBO ANTI-RESPINGO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-18	Aprovada	Opcional	Visual
89	U-089	União entre TB. ANTI-RESPINGO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Direito) – TUBO ANTI-RESPINGO + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-18	Aprovada	Opcional	Visual
90	U-090	União entre TB. ANTI-RESPINGO e RRH (Ponto Esquerdo) – RRH + TUBO ANTI-RESPINGO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-18	Aprovada	Opcional	Visual
91	U-091	União entre TB. ANTI-RESPINGO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Esquerdo) – TUBO ANTI-RESPINGO + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-19	Aprovada	Opcional	Visual

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: EPS – Especificação do Processo de Soldagem

REL-SDI-2026-088

Emissão: 02/06/2026 22:31

Emissor: Edivaldo Souza

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
92	U-092	União entre RLC e COLUNA TRASEIRA (Ponto Direito) – COLUNA TRASEIRA + RLC	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-19	Aprovada	Opcional	Visual
93	U-093	União entre TB. TRANSV. TRASEIRO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Esquerdo) – COLUNA TRASEIRA + TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-20	Aprovada	Opcional	Visual
94	U-094	União entre RLC e COLUNA TRASEIRA (Ponto Esquerdo) – COLUNA TRASEIRA + RLC	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-20	Aprovada	Opcional	Visual
95	U-095	União entre TB. TRANSV. TRASEIRO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Direito) – COLUNA TRASEIRA + TRAVAMENTO TRANSVERSAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-20	Aprovada	Opcional	Visual
96	U-096	União entre TB. DIAGONAL TRASEIRO e RLC (Ponto Superior Direito) – RLC + TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-21	Aprovada	Opcional	Visual
97	U-097	União entre TB. DIAGONAL TRASEIRO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Inferior Direito) – TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-21	Aprovada	Opcional	Visual
98	U-098	União entre TB. DIAGONAL TRASEIRO e RLC (Ponto Superior Esquerdo) – RLC + TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-21	Aprovada	Opcional	Visual
99	U-099	União entre TB. DIAGONAL TRASEIRO e COLUNA TRASEIRA (Ponto Inferior Esquerdo) – TRAVAMENTO DIAGONAL TRASEIRO + COLUNA TRASEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-22	Aprovada	Opcional	Visual
100	U-100	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e RLC (Ponto Dianteiro) – SHC + TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-22	Aprovada	Opcional	Visual
101	U-101	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e RLC (Ponto Traseiro) – SHC + TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-23	Aprovada	Opcional	Visual
102	U-102	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e BRAÇO (Ponto Traseiro Externo) – TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL + BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-23	Aprovada	Opcional	Visual
103	U-103	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e BRAÇO (Ponto Dianteiro Externo) – TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL + BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-23	Aprovada	Opcional	Visual
104	U-104	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e BRAÇO (Ponto Traseiro Interno) – TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL + BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-24	Aprovada	Opcional	Visual
105	U-105	União entre TB. FIX. TANQUE COMBUSTÍVEL e BRAÇO (Ponto Dianteiro Interno) – TUBO DE FIXAÇÃO TANQUE DE COMBUSTÍVEL + BRAÇO DE FIXAÇÃO DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-24	Aprovada	Opcional	Visual
106	U-106	União entre TB. BASE BARRA ESTABILIZADORA e RRH (Ponto Direito) – TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-24	Aprovada	Opcional	Visual
107	U-107	União entre TB. BASE BARRA ESTABILIZADORA e RRH (Ponto Esquerdo) – TUBO DA BASE BARRA ESTABILIZADORA + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-25	Aprovada	Opcional	Visual
108	U-108	União entre TB. FIXAÇÃO B.E. E TB. BASE B.E. (Ponto Direito) – RRH + TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (1)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-25	Aprovada	Opcional	Visual
109	U-109	União entre TB. FIXAÇÃO B.E. E TB. BASE B.E. (Ponto Esquerdo) – RRH + TUBO DE FIXAÇÃO BARRA ESTABILIZADORA (1)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-26	Aprovada	Opcional	Visual

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
110	U-110	União entre TB TRANSV. TRASEIRO B.M. E TB. CENTRAL B.M. (Ponto Traseiro) – TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO + TUBO CENTRAL	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-26	Aprovada	Opcional	Visual
111	U-111	União entre TB TRANSV. DIANTEIRO B.M. E TB. CENTRAL B.M. (Ponto Dianteiro) – TUBO CENTRAL + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-26	Aprovada	Opcional	Visual
112	U-112	União entre COLUNA TRASEIRA B.M. E TRENÓ (Ponto Inferior Traseiro Direito) – COLUNA TRASEIRA + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-27	Aprovada	Opcional	Visual
113	U-113	União entre COLUNA DIANTEIRA B.M. E TRENÓ (Ponto Inferior Dianteiro Esquerdo) – COLUNA DIANTEIRA + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-27	Aprovada	Opcional	Visual
114	U-114	União entre COLUNA TRASEIRA B.M. E TRENÓ (Ponto Inferior Traseiro Esquerdo) – COLUNA TRASEIRA + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-27	Aprovada	Opcional	Visual
115	U-115	União entre COLUNA DIANTEIRA B.M. E TRENÓ (Ponto Inferior Dianteiro Direito) – COLUNA DIANTEIRA + TRENÓ	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-28	Aprovada	Opcional	Visual
116	U-116	União entre COLUNA TRASEIRA B.M. E BASE MOTOR (Ponto Inferior Traseiro Direito) – TUBO CENTRAL + COLUNA TRASEIRA + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO + TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-28	Aprovada	Opcional	Visual
117	U-117	União entre COLUNA DIANTEIRA B.M. E BASE MOTOR (Ponto Inferior Dianteiro Esquerdo) – TUBO CENTRAL + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO + TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO + COLUNA DIANTEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-29	Aprovada	Opcional	Visual
118	U-118	União entre COLUNA TRASEIRA B.M. E BASE MOTOR (Ponto Inferior Traseiro Esquerdo) – TUBO CENTRAL + COLUNA TRASEIRA + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO + TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-29	Aprovada	Opcional	Visual
119	U-119	União entre COLUNA DIANTEIRA B.M. E BASE MOTOR (Ponto Inferior Dianteiro Direito) – TUBO CENTRAL + TUBO TRANSVERSAL DIANTEIRO + TUBO TRANSVERSAL TRASEIRO + COLUNA DIANTEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-29	Aprovada	Opcional	Visual
120	U-120	União entre TB. PROTEÇÃO DISCOS E TRENÓ (Ponto Direito) – TRENÓ + TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-30	Aprovada	Opcional	Visual
121	U-121	União entre TB. PROTEÇÃO DISCOS E TRENÓ (Ponto Esquerdo) – TRENÓ + TUBO DE PROTEÇÃO DISCOS DE FREIO TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-30	Aprovada	Opcional	Visual
122	U-122	União entre FIX. TRASEIRA C.T. E FBM_LOW+LFS (Ponto Direito) – FIXAÇÃO TRASEIRA + FBM-LOW + LFS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-09-30	Aprovada	Opcional	Visual
123	U-123	União entre FIX. DIANTEIRA C.T. E FBM_LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + FIXAÇÃO DIANTEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-01	Aprovada	Opcional	Visual
124	U-124	União entre FIX. DIANTEIRA C.T. E FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + FIXAÇÃO DIANTEIRA	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-01	Aprovada	Opcional	Visual
125	U-125	União entre FIX. TRASEIRA C.T. E FBM_LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FIXAÇÃO TRASEIRA + FBM-LOW + LFS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-02	Aprovada	Opcional	Visual

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: CB12 - Protótipo: CB12 v2023

Módulo: EPS – Especificação do Processo de Soldagem

REL-SDI-2026-088

Emissão: 02/06/2026 22:31

Emissor: Edivaldo Souza

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
126	U-126	União entre OR. FIX. AMORT. DIANTEIROS E TRAV. AMORT DIANTEIROS (Ponto Direito) – ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO + TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-02	Aprovada	Opcional	Visual
127	U-127	União entre OR. TRAS. LEQUE SUP. E FAB-LOW (Ponto Direito) – FAB-LOW + ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-02	Aprovada	Opcional	Visual
128	U-128	União entre OR. DIANT. LEQUE SUP. E TB. FIX. LEQUE SUP. DIANT. (Ponto Direito) – ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES) + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-03	Aprovada	Opcional	Visual
129	U-129	União entre OR. TRAS. LEQUE INF. E FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-03	Aprovada	Opcional	Visual
130	U-130	União entre OR. DIANT. LEQUE INF. E FBM-LOW+LFS (Ponto Direito) – FBM-LOW + LFS + ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-03	Aprovada	Opcional	Visual
131	U-131	União entre OR. FIX. AMORT. DIANTEIROS E TRAV. AMORT DIANTEIROS (Ponto Esquerdo) – ORELINHA DE FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR DIANTEIRO + TRAVAMENTO DOS AMORTECEDORES DIANTEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-04	Aprovada	Opcional	Visual
132	U-132	União entre OR. TRAS. LEQUE SUP. E FAB-LOW (Ponto Esquerdo) – FAB-LOW + ORELINHA TRASEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-04	Aprovada	Opcional	Visual
133	U-133	União entre OR. DIANT. LEQUE SUP. E TB. FIX. LEQUE SUP. DIANT. (Ponto Esquerdo) – ORELINHA DIANTEIRA SUPERIOR (LEQUES SUPERIORES) + TUBO DE FIXAÇÃO LEQUE SUPERIOR DIANTEIRO	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-05	Aprovada	Opcional	Visual
134	U-134	União entre OR. TRAS. LEQUE INF. E FBM-LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + ORELINHA TRASEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-05	Aprovada	Opcional	Visual
135	U-135	União entre OR. DIANT. LEQUE INF. E FBM-LOW+LFS (Ponto Esquerdo) – FBM-LOW + LFS + ORELINHA DIANTEIRA INFERIOR (LEQUES INFERIORES)	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-05	Aprovada	Opcional	Visual
136	U-136	União entre OR. FIX. AMORT. TRASEIROS E RRH (Ponto Direito) – RRH + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-06	Aprovada	Opcional	Visual
137	U-137	União entre OR. FIX. TRAILLING-ARM. E RRH (Ponto Direito) – RRH + ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILLING-ARM	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-06	Aprovada	Opcional	Visual
138	U-138	União entre TRAV. AMORT. TRAS. E RRH (Ponto Direito) – TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-06	Aprovada	Opcional	Visual
139	U-139	União entre TRAV. AMORT. TRAS. E OR. FIX. AMORT. TRASEIROS (Ponto Direito) – TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-07	Aprovada	Opcional	Visual
140	U-140	União entre OR. FIX. LINKS TRAS. SUP. E COLUNA TRASEIRA (Ponto Direito) – COLUNA TRASEIRA + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-07	Aprovada	Opcional	Visual
141	U-141	União entre OR. FIX. AMORT. TRASEIROS E RRH (Ponto Esquerdo) – RRH + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-08	Aprovada	Opcional	Visual

Ord.	Código	Descrição / Membros	EPS	Junta	Soldador	Data	Status	Classificação	Inspecção
142	U-142	União entre OR. FIX. TRAILLING-ARM. E RRH (Ponto Esquerdo) – RRH + ORELINHA DE FIXAÇÃO DO TRAILLING-ARM	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-08	Aprovada	Opcional	Visual
143	U-143	União entre TRAV. AMORT. TRAS. E RRH (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS + RRH	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-08	Aprovada	Opcional	Visual
144	U-144	União entre TRAV. AMORT. TRAS. E OR. FIX. AMORT. TRASEIROS (Ponto Esquerdo) – TRAVAMENTO AMORTECEDORES TRASEIROS + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES TRASEIROS	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-09	Aprovada	Opcional	Visual
145	U-145	União entre OR. FIX. LINKS TRAS. SUP. E COLUNA TRASEIRA (Ponto Esquerdo) – COLUNA TRASEIRA + ORELINHA DE FIXAÇÃO DOS LINKS TRASEIROS SUPERIORES	EPS-CB12-2023	Tubular	EJS	2023-10-09	Aprovada	Opcional	Visual

Plano de inspeção

União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-001	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-002	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-003	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-004	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-005	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-006	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-007	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-008	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-010	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-009	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-011	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-012	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-013	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-015	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-018	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-022	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-017	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado



União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-019	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-020	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-014	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-016	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-024	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-021	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-023	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-025	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-026	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-027	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-028	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-029	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-030	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-031	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-032	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-033	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-034	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-035	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-036	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-037	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-038	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-039	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-040	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-041	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-042	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-043	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado



União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-044	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-045	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-046	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-047	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-048	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-049	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-050	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-051	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-052	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-053	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-054	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-055	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-056	Obrig.	Líquido penetrante	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-057	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-058	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-059	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-060	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-061	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-062	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-063	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-064	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-065	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-066	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-067	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-068	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-069	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado



União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-070	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-071	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-072	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-073	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-074	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-075	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-076	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-077	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-078	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-09	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-080	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-082	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-081	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-083	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-084	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-085	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-086	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-087	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-088	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-089	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-090	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-091	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-092	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-094	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-093	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-095	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado



União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-096	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-097	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-098	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-099	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-100	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-101	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-102	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-103	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-104	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-105	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-106	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-107	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-108	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-109	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-110	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-111	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-112	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-113	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-114	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-115	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-116	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-117	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-118	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-119	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-120	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-121	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado



União	Classificação	Métodos	Inspetor	Data	Resultado
U-122	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-123	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-124	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-125	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-126	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-127	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-128	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-129	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-130	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-131	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-132	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-133	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-134	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-135	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-136	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-137	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-140	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-138	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-139	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-141	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-142	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-143	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-144	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado
U-145	Não obrig.	Visual	EJS	2023-10-11	Aprovado



Conclusão

Cobertura de inspeção em pontos obrigatórios é integral (32/32).

APÊNDICE E1 – Análise de Ciclo de Vida – SDI

SDI

SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO INTEGRADO

Projeto: SDI · Protótipo: CB12

Módulo: Análise · Ciclo de Vida

REL-CV-2026-089

Emissão: 02/06/2026 22:46

Emissor: Edivaldo Souza

Análise · Ciclo de Vida

Saúde, falhas, FMEA e plano de ação 5W2H+GUT

SCORE SAÚDE

72/100

HORAS OPERADAS

145.3 h

41 eventos

HORAS PLANEJADAS

192 h

VIDA CONSUMIDA

75.7%

47 h restantes

FALHAS (12M)

0

RPN MÁXIMO

50

GUT MÁXIMO

40

CUSTO MANUTENÇÃO

R\$ 500,00

2 registros

MELHOR POSIÇÃO

4º

0 pódio(s)

Histórico de Falhas

Data	Etapa	Descrição	Sev	MTBF(h)	MTTR(h)	Causa Raiz
2023-10-22	Operação	Fixação da Haste da Antena	5	1	0.5	Fixação subdimensionada
2025-03-30	Operação	Reboque Dianteiro	1	0	3.0	Colisão com obstáculo

Custos com Manutenção

Data	Categoria	Descrição	Horímetro (h)	Fornecedor	Valor (R\$)
2023-10-25	Corretiva	Manufatura de uma nova Fixação da Banderira	6.8	-	R\$ 150,00
2025-04-05	Corretiva	Manufatura de um novo Reboque Dianteiro	131.8	-	R\$ 350,00

Testes & Competições

Tipo	Data	Evento	Local	Categoria	Ano	Duração(h)	Pos.	Pontos
Competição	2023-10-22	16ª Competição Baja SAE BRASIL - Etapa Sudeste	São João Del Rei/MG	Regional	2023	6.8	12º	247.95
Competição	2024-03-24	29ª Competição Baja SAE BRASIL	São José dos Campos/SP	Nacional	2024	7.3	24º	408.45

Tipo	Data	Evento	Local	Categoria	Ano	Duração(h)	Pos.	Pontos
Competição	—	17ª Competição Baja SAE BRASIL - Etapa Sudeste	São João Del Rei/MG	Regional	2024	7.5	12º	130.68
Competição	—	30ª Competição Baja SAE BRASIL	São José dos Campos/SP	Nacional	2025	7.7	14º	591.41
Competição	—	18ª Competição Baja SAE BRASIL - Etapa Sudeste	Piracicaba/SP	Regional	2025	7.9	4º	623.7
Validação	2023-11-04	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2023	1.2	—	0
Treino	2023-11-18	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2023	4.3	—	0
Validação	2023-12-02	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2023	1.5	—	0
Teste	2023-12-16	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2023	4.6	—	0
Validação	2024-01-13	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.4	—	0
Treino	2024-01-27	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.8	—	0
Validação	2024-02-10	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.1	—	0
Teste	2024-02-24	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.4	—	0
Validação	2024-03-09	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.7	—	0
Treino	2024-03-23	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.5	—	0
Validação	2024-04-06	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.3	—	0
Teste	2024-04-20	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.7	—	0
Validação	2024-05-04	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.6	—	0
Treino	2024-05-18	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.2	—	0
Validação	2024-06-01	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.9	—	0
Teste	2024-06-15	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.9	—	0
Validação	2024-06-29	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.2	—	0
Treino	2024-07-13	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.6	—	0
Validação	2024-07-27	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.5	—	0
Teste	2024-08-10	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.3	—	0
Validação	2024-08-24	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.8	—	0
Treino	2024-09-07	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.4	—	0
Validação	2024-09-21	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.1	—	0

Tipo	Data	Evento	Local	Categoria	Ano	Duração(h)	Pos.	Pontos
Teste	2024-10-05	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.8	—	0
Validação	2024-10-19	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.6	—	0
Treino	2024-11-02	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2024	4.7	—	0
Validação	2024-11-16	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.4	—	0
Teste	2024-11-30	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2024	4.5	—	0
Validação	2024-12-14	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2024	1.9	—	0
Treino	2025-01-11	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2025	4.2	—	0
Validação	2025-01-25	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2025	1.3	—	0
Teste	2025-02-08	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2025	4.6	—	0
Validação	2025-02-22	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2025	1.7	—	0
Treino	2025-03-15	Treino (Macacos)	Macacos/MG	Teste	2025	4.8	—	0
Validação	2025-04-12	Validação (Campus II)	CEFET Campus II, Nova Gameleira	Teste	2025	1.2	—	0
Teste	2025-05-10	Teste (Trilhas)	Santa Luzia/MG	Teste	2025	4.4	—	0

FMEA

Item	Modo	Efeito	Causa	S	O	D	RPN	Ação	Resp.	Status
Operação	Fixação da Haste da Antena	Incapacidade de Utilização do Veículo;	Fixação subdimensionada	10	1	5	50	Desenvolvimento de uma fixação capaz de garantir maior confiabilidade	EJS	Concluído
Operação	Reboque Dianteiro	Reboque inutilizável	Colisão com obstáculo	2	1	5	10	Manutenção corretiva do reboque (Manufatura de um novo reboque)	JVP	Concluído

Plano 5W2H + GUT

What	Why	Where	When	Who	How	Custo	G	U	T	GUT	Status
Desenvolvimento de uma fixação capaz de garantir maior confiabilidade	Mitigar modo de falha: Fixação da Haste da Antena	Oficina	2023-10-25	EJS	Fixação subdimensionada	R\$ 150	5	2	4	40	Concluído
Manutenção corretiva do reboque (Manufatura de um novo reboque)	Mitigar modo de falha: Reboque Dianteiro	Oficina	2025-04-05	JVP	Colisão com obstáculo	R\$ 350	2	2	4	16	Concluído



Conclusão

Protótipo apresenta saúde geral ALTA. Manter rotina preventiva e revisar itens FMEA com RPN > 100.