

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO – MESTRADO PROFISSIONAL

Tiago Muner Zilio

APLICAÇÃO DE MÉTODOS E FERRAMENTAS DE GESTÃO
DIMENSIONAL EM COMPONENTES DE CARROCERIAS DE ÔNIBUS

Passo Fundo

2014

Tiago Muner Zilio

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS E FERRAMENTAS DE GESTÃO
DIMENSIONAL EM COMPONENTES DE CARROCERIAS DE ÔNIBUS**

Orientador: Prof. Dr. Marcio Walber.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2014

Tiago Muner Zilio

APLICAÇÃO DE MÉTODOS E FERRAMENTAS DE GESTÃO DIMENSIONAL EM COMPONENTES DE CARROCERIAS DE ÔNIBUS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: Dia 07 de Agosto de 2014.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Prof. Dr. Marcio Walber

Orientador

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Universidade de Passo Fundo – PPGPPF

Prof. Dr. Gustavo Daniel Donatelli

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr. Nilson Luiz Maziero

Universidade de Passo Fundo – PPGPPF

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família. Meus pais Airton José Zilio e Rosemari Terezinha Muner Zilio, e aos meus irmãos Diego Muner Zilio e Marina Muner Zilio, por toda compreensão e apoio durante este trabalho.

Ao meu orientador Marcio Walber, pelo empenho e dedicação oferecidos durante toda a trajetória deste trabalho.

Agradecer, também a empresa Comil Ônibus S/A e aos colegas de trabalho, Carlos Viero, Marcio Paviani, André Petry, Oséias Esmelindro, Thiago Sottili, Roberto Busetto, Matias Pasqualotto e Marlos Link, por toda a colaboração e incentivo.

RESUMO

O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) deve ocorrer de forma rápida e eficaz, atendendo as necessidades impostas pelos mais variados mercados, em um curto espaço de tempo. Entretanto, sabe-se que os projetos de engenharia consideram informações matematicamente simplificadas que, em muitos casos, não representam fielmente a realidade, elevando, assim, o risco de falhas na concepção dos produtos. Considerando que grande parte dos projetos passa por uma etapa de especificação dimensional, o presente documento tem como foco o conceito de projeto para o controle dimensional e sua aplicação em uma fábrica de ônibus. Para atingir os objetivos propostos, foram abordados os conceitos e ferramentas necessários para a utilização do método, tendo como foco sua aplicação no produto ônibus. Por meio da compreensão de todos os aspectos descritos, o método é detalhado sistematicamente, com ênfase conceitual. É realizada, em seguida, uma validação, baseada em uma aplicação real no produto. Os resultados obtidos satisfizeram os objetivos propostos, validando a mesma perante o contexto organizacional na qual foi inserida.

Palavras-chave: Projeto para Controle Dimensional. Processo de Desenvolvimento de Produtos. Ônibus.

ABSTRACT

The product development process (PDP) must occur quickly and effectively, addressing the needs imposed by the various markets, in a short time. However, we know that engineering designs consider mathematically simplified information, which in many cases do not accurately represent reality, raising the risk of failure in product design. Whereas most projects go through a stage of dimensional specification, this document focuses on the concept Design Dimensional Control (DDC) and its application in a bus factory. To achieve the objective proposed, concepts and tools required to use the method were discussed, being applied on the buses application. Understanding all aspects described, the method is detailed systematically, with conceptual emphasis. After it is performed a validation based on a real product application. The results met the proposed objectives, validating the same in the organizational context in which it was inserted.

Key-words: Design for Dimensional Control. Product Development Process. Bus.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAT	<i>Computer Aided Tolerance</i>
CEP	Controle Estatístico de Processos
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DD	<i>Double Deck</i>
DDC	<i>Design Dimensional Control</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
FMEA	<i>Failure Mode Effect Analysis</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Weld</i>
HD	<i>High Deck</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIE	Limite Inferior Especificado
LINT	Limite Inferior Natural
LSE	Limite Superior Especificado
LSNT	Limite Superior Natural
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
QFD	<i>Quality function deployment</i>
RCP	Razão da Capacidade do Processo
RSS	<i>Root-sum-square</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um sistema estrutural de Ônibus.	18
Figura 2 - Projeto de um casulo.	19
Figura 3 - Distribuição das dimensões críticas para transmissões.	20
Figura 4 - O conceito Seis Sigma da Motorola.	22
Figura 5 - Gráfico de controle dimensional e curva normal (Gauss).	23
Figura 6 - Índices de capacidade dos processos.	25
Figura 7 - Relação entre C_p e C_{pk}	26
Figura 8 - Sistema de dimensionamento e uso de tolerâncias por coordenadas.	29
Figura 9 - Elementos geométricos de uma peça.	32
Figura 10 - Zonas de tolerância tridimensionais.	33
Figura 11 - Sistema geométrico de dimensionamento e uso de tolerâncias.	34
Figura 12 - Tolerância de posição real do elemento.	35
Figura 13 - Exemplo de definição dos referenciais geométricos.	35
Figura 14 - Seis graus de liberdade de uma peça.	36
Figura 15 - Princípio de localização 3-2-1.	36
Figura 16 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 2.	40
Figura 17 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 4.	41
Figura 18 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 5.	41
Figura 19 - Resultado da análise de tolerâncias pelo pior caso.	42
Figura 20 - Resultado da análise de tolerâncias pelo método RSS.	45
Figura 21 - Análise no <i>software</i> Siemens VisVSA.	47
Figura 22 - Requisito para análise de tolerâncias - Seal GAP.	47
Figura 23 - Distorção após soldagem GMAW em chapas de Alumínio.	48
Figura 24 - Perfil do cordão de solda na união de chapas de Alumínio.	49
Figura 25 - Exemplo de aplicação do <i>software</i> ESI Weld Planner.	51
Figura 26 - Anel de palhetas utilizado na indústria aeroespacial.	51
Figura 27 - Módulo palheta constituído de três peças,	52
Figura 28 - Variação no sistema de fixação para soldagem dos módulos de palhetas.	52
Figura 29 - Principais áreas de atuação do método.	53
Figura 30 - Fluxograma para desenvolvimento do método.	59
Figura 31 - Conjunto Montante aplicado a carroceria de ônibus.	60

Figura 32 - Variações dimensionais do conjunto montante.	61
Figura 33 - Degrau constituído Montante no interior do veículo.....	62
Figura 34 - Modelo tridimensional do conjunto Montante.	64
Figura 35 - Distribuição dos cordões no PSP do conjunto Montante.	65
Figura 36 - Modelo de malha em elementos finitos do conjunto Montante.	66
Figura 37 - Disposição dos pontos de localização das peças sobre o conjunto.	67
Figura 38 - Disposição dos pontos de fixação das peças sobre o conjunto.....	67
Figura 39 - Pré-deformação aplicada de 8 mm.	68
Figura 40 - Esquema de posicionamento dos cortes.	69
Figura 41 - Ensaio macrográfico da seção dos cordões de solda.	69
Figura 42 - Curva tensão x deformação.	70
Figura 43 - Orientação do dispositivo favorecendo a localização dos componentes.	71
Figura 44 - Acessos para o processo de soldagem da face posterior.	71
Figura 45 - Posição dos localizadores e fixadores para pré-deformação.	72
Figura 46 - Esquema de montagem do conjunto sobre o dispositivo.....	73
Figura 47 - Posicionamento dos localizadores móveis antes da pré-deformação.	73
Figura 48 - Referenciais geométricos e tolerâncias VisVSA.	74
Figura 49 - Dimensões de interesse apresentadas no projeto.....	75
Figura 50 - Peças produzidas.	76
Figura 51 - Dispositivo produzido.	76
Figura 52 - Braço de Medição 3D Portátil FARO EDGE.....	77
Figura 53 - Comparação da nuvem de pontos com o modelo 3D CAD.....	78
Figura 54 - Processo de soldagem dos conjuntos sobre o dispositivo.	79
Figura 55 - Processo de inspeção dimensional do conjunto Montante.	79
Figura 56 - Resultados dimensionais dos localizadores do dispositivo.	81
Figura 57 - Resultado da simulação de soldagem sem pré-deformação.	82
Figura 58 - Resultado da simulação de soldagem com pré-deformação.....	82
Figura 59 - Resultados obtidos com a Simulação Dimensional.....	83
Figura 60 - Resumo do processo de Simulação Dimensional Medida 2415.....	84
Figura 61 - Resumo do processo de Simulação Dimensional Medida 275.....	84
Figura 62 - Principais contribuidores para variação da largura 2415 mm.	85
Figura 63 - Principais contribuidores para variação da altura 275 mm.	85
Figura 64 - Resultados obtidos com a Simulação Dimensional Hipotética.	86
Figura 65 - Índices de capacidade Plano 1.....	87

Figura 66 - Índices de capacidade Largura_L2_275.....	88
Figura 67 - Influência das distorções na etapa de Simulação Dimensional.	90
Figura 68 - Efeito da distorção de soldagem na direção longitudinal.	91
Figura 69 - Índices de capacidade para o Perfil de Superfície 5.....	93
Figura 70 - Distorção gerada pelo curvamento das peças.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais controles para características geométricas de uma peça.....	33
Tabela 2 - Lista de requisitos do conjunto Montante.....	63
Tabela 3 - Índices de capacidade dos componentes.....	80
Tabela 4 - Índices de capacidade do conjunto Montante.....	87
Tabela 5 - Comparação dos índices C_p e C_{pk} simulados e inspecionados.....	90
Tabela 6 - Macrografias em cada região de solda.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Perguntas da Pesquisa	15
1.4	Metodologia da Pesquisa	15
1.5	Definição do Problema	16
1.6	Estrutura do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Apresentação do Produto Ônibus	18
2.2	Conceitos para a Qualidade	19
2.2.1	Seis Sigma Motorola	21
2.2.2	Controle estatístico de Processos	23
2.3	Projeto para Controle Dimensional	26
2.3.1	Linguagem do Projeto para Controle Dimensional	28
2.3.2	Análise de Tolerâncias	37
2.4	Distorções no Processo de Soldagem	48
2.4.1	Perfil do cordão de solda	49
2.4.2	ESI Weld Planner	50
3	MÉTODO DE TRABALHO	53
3.1	Etapas do Método	53
3.1.1	Requisitos	53
3.1.2	Projeto de Produto	54
3.1.3	Projeto de Soldagem	55
3.1.4	Projeto de Dispositivo	56
3.1.5	Procedimento	57
3.1.6	Dimensional	57
3.1.7	Protótipo	58
3.2	Método Proposto	59
4	ESTUDO DE CASO	60
4.1	Requisitos do Projeto	62

4.2	Projeto do Produto	64
4.3	Plano de Solda do Produto.....	65
4.4	Simulação de Soldagem.....	66
4.5	Projeto de Dispositivos	70
4.6	Procedimento Operacional Padrão.....	72
4.7	Simulação Dimensional	74
4.8	Protótipo.....	75
4.8.1	Fabricação dos Componentes.....	76
4.8.2	Inspeção Dimensional dos Componentes	77
4.8.3	Processo de fabricação do Conjunto Montante.....	78
4.8.4	Inspeção Dimensional dos Conjuntos.....	79
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO.....	80
5.1	Resultados Dimensionais dos Componentes	80
5.2	Resultados da Simulação de Soldagem.....	81
5.3	Resultados da Simulação Dimensional	83
5.4	Resultados Dimensionais dos Conjuntos	86
6	DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
6.1	Engenharia Dimensional.....	89
6.2	Engenharia de Soldagem	92
6.3	Aspectos Gerais.....	95
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
7.1	Conclusões	97
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	99
	APÊNDICE A - Projetos do Produto	104
	APÊNDICE B - Plano de Solda do Produto	109
	APÊNDICE C - Sequência de Soldagem.....	110
	APÊNDICE D - Projeto do Dispositivo	111
	APÊNDICE E - Procedimento Operacional Padrão.....	112

1 INTRODUÇÃO

O principal desafio da engenharia na atualidade é o desenvolvimento de projetos voltados para a obtenção de bons produtos.

Segundo Campbell (2003), a melhor maneira de levar um produto ao mercado é projetá-lo por meio de um sistema totalmente integrado. O sucesso do mesmo é proveniente da antecipação das interações ainda nas fases de projeto, quando as mudanças são economicamente viáveis.

Seguindo nessa direção, as organizações manufatureiras e de desenvolvimento de produtos buscam reunir esforços na utilização de metodologias e na aplicação de recursos dos mais variados tipos.

Nickolaisen (1999) salienta que a engenharia, como uma ciência e uma filosofia, passou por uma série de mudanças que explicam e justificam a necessidade de um novo sistema de gestão de atividades, sendo estas guiadas pela busca da qualidade.

Assim, pode-se considerar o presente momento como uma fase transitória, em que as indústrias de ônibus estão empregando sua energia na busca de novas alternativas de solução para os problemas gerados pela falta de informação.

Visto o cenário transitório apresentado pelas indústrias de ônibus, é possível afirmar que a utilização de processos de desenvolvimento sem uso de métodos, juntamente com o emprego de novos recursos tecnológicos, pode oferecer um elevado risco aos produtos desenvolvidos.

Sob o ponto de vista das atuais soluções de engenharia, é possível salientar inúmeras ferramentas que têm a função de auxiliar as indústrias manufatureiras na obtenção de bons produtos. Entretanto, mesmo com a aplicação dessas soluções no processo de desenvolvimento de produto, o mesmo ainda está suscetível a desvios de outras naturezas, pois a utilização de ferramentas sem o apoio de método, impossibilita o domínio total sobre o processo a ser desenvolvido.

1.1 Justificativa

A indústria de ônibus brasileira encontra-se em um momento de transição, em que o uso de novas tecnologias vem agindo como o combustível desta mudança. No entanto, quando comparadas às indústrias automotivas, as indústrias de ônibus ainda estão distantes, em um grande abismo cultural e tecnológico.

Levando em consideração que o estudo comparativo entre unidades produtivas de automóveis e de ônibus não faz parte do escopo do presente trabalho, torna-se imprescindível salientar o motivo para tal comparação: o fator direcional da mudança.

Conforme ocorrido nas indústrias do setor automotivo, as características e tendências tecnológicas também avançaram significativamente na indústria de ônibus, assim como os níveis de qualidade aceitos pelos consumidores.

Dessa forma, ações isoladas e não sistematizadas, em busca da solução para os problemas gerados com o ascendente desenvolvimento, não têm a capacidade de impacto necessária para o alcance de novos patamares de *design* ou mesmo manufatura agora exigidos.

Assim, torna-se evidente a necessidade de utilização de métodos e ferramentas, com foco na gestão da qualidade dimensional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo a aplicação de métodos e ferramentas de gestão dimensional em um componente da carroceria de ônibus.

1.2.2 Objetivos específicos

Buscando a elucidação dos benefícios, oriundos da aplicação dos métodos e ferramentas de gestão dimensional, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Aplicar, os métodos e ferramentas da gestão dimensional, em uma empresa de carrocerias de ônibus, englobando todos os aspectos necessários para tal.
- Prover, mediante a aplicação, o entendimento necessário para utilização da linguagem de GD&T nos projetos da organização.
- Fornecer condições de análise e redução das distorções dimensionais, oriundas do processo de soldagem utilizado pela empresa.

1.3 Perguntas da Pesquisa

O processo de desenvolvimento de produtos, com a aplicação dos métodos e ferramentas de gestão dimensional, é adequado frente ao contexto competitivo em que a empresa está inserida? Quais são os pontos positivos e negativos apresentados, quando este é aplicado em uma indústria de carrocerias de ônibus?

1.4 Metodologia da Pesquisa

A presente pesquisa é de natureza aplicada, pois visa a produzir conhecimentos para a aplicação prática, voltada para solução de problemas específicos.

Os procedimentos técnicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa foram a pesquisa bibliográfica, cuja elaboração decorreu da utilização de materiais já publicados em livros, artigos científicos em periódicos e materiais da internet.

Diante disso, foram abordados como referências teóricas os temas relacionados ao desenvolvimento de uma metodologia para desenvolvimento de produto, sob o aspecto da

gestão dimensional, na qual foram incluídos todos os fatores determinantes, conceitos e ferramentas necessárias para atingir o objetivo da pesquisa, que se estendeu para a esfera experimental prática, por meio da aplicação dos conceitos em uma indústria de carrocerias de ônibus.

1.5 Definição do Problema

Tomando-se como referência a indústria automobilística, salienta-se o elevado índice de qualidade de seus produtos, juntamente com avançadas características de *Design*.

Attingir este patamar de qualidade somente foi possível por meio da utilização de métodos e ferramentas para a criação e gestão de especificações, durante todo o processo de desenvolvimento do produto.

Abstraindo-se da realidade das organizações automobilísticas e remontando-nos ao cenário apresentado pelas indústrias de ônibus, percebe-se uma grande lacuna a ser preenchida.

Produtos desenvolvidos sem a incorporação de métodos e ferramentas robustas para gestão dimensional, podem apresentar falhas de caráter grave em determinadas fases de sua concepção.

São elogiáveis os esforços demonstrados pelas equipes de engenharia em busca da solução dos problemas dimensionais apresentados. Porém, a falta de métodos e ferramentas focados nos resultados, torna o encontro de uma possível solução para esses problemas, uma tarefa árdua.

1.6 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é composto por:

- Capítulo 1. Introdução: na qual foi feita a contextualização do problema;

- Capítulo 2. Revisão da Literatura: serão abordados neste capítulo os temas relacionados a gestão dimensional de produtos, juntamente com as ferramentas e conceitos utilizados para a realização do objetivo da presente pesquisa;
- Capítulo 3. Metodo de Trabalho: será apresentado o método utilizado no presente trabalho, juntamente com as ferramentas e meios envolvidos;
- Capítulo 4. Estudo de Caso: demonstra a aplicação do método na empresa;
- Capítulo 5. Apresentação dos resultados: serão apresentados os resultados obtidos através da aplicação do método;
- Capítulo 6. Discussão e análise dos resultados: visa a discutir os aspectos conceituais e técnicos, evidenciados por meio dos resultados;
- Capítulo 7. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo demonstra a fundamentação teórica utilizada como referência para a realização do presente trabalho, sendo esta dividida em quatro principais seções.

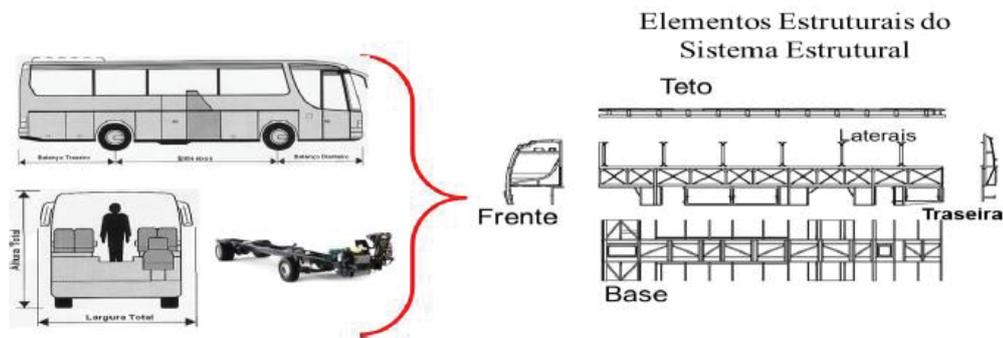
2.1 Apresentação do Produto Ônibus

Objetivando apresentar, em linhas gerais, o produto-alvo deste trabalho, a presente seção irá abordar o Ônibus, com ênfase em suas características construtivas.

Segundo Viero (2013, p.71), “Para um melhor entendimento de um sistema estrutural de uma carroceria de ônibus é fundamental entender que, inicialmente, para ser um ônibus é necessário fazer o acoplamento entre a carroceria e o chassi”.

A Figura 1 representa esquematicamente a abordagem demonstrada por Viero (2013).

Figura 1 - Esquema de um sistema estrutural de Ônibus.



Fonte: Viero (2013).

Desta forma, o presente documento terá como alvo a carroceria que compõe o ônibus, pois esta é produzida e posteriormente acoplada ao chassi, produzido externamente.

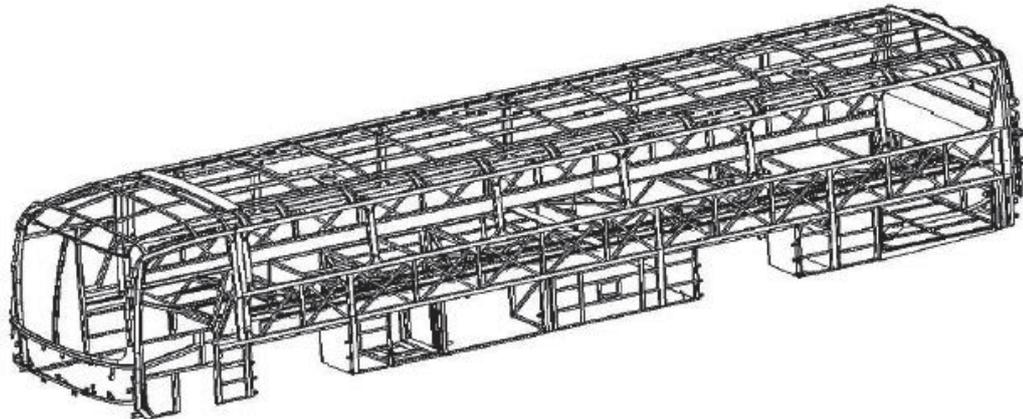
Inicialmente, a carroceria de ônibus é composta de uma estrutura metálica, denominada de casulo. Segundo Walber (2009), o casulo de uma carroceria pode ser dividido em sete componentes estruturais, sendo os seguintes:

- Frente;
- Traseira;
- Lateral Direita;

- Lateral Esquerda;
- Base Superior;
- Base Inferior;
- Teto.

A Figura 2 demonstra o casulo de uma carroceria.

Figura 2 - Projeto de um casulo.



Fonte: Viero (2013).

O projeto de um casulo é constituído com elementos de relativa simplicidade, tais como chapas e tubos metálicos retangulares de diferentes espessuras. Entretanto, a complexidade é significativamente aumentada, visto o grande número de peças, conjuntos e subconjuntos, criados a partir dos elementos anteriormente citados.

Após o acoplamento do casulo sobre o chassi, o ônibus está composto em sua forma primitiva. Nele são montados todos os componentes, tais como portas, janelas e bancos, juntamente com os revestimentos e acabamentos, internos e externos. Este processo de montagem termina com a obtenção do produto em sua forma final.

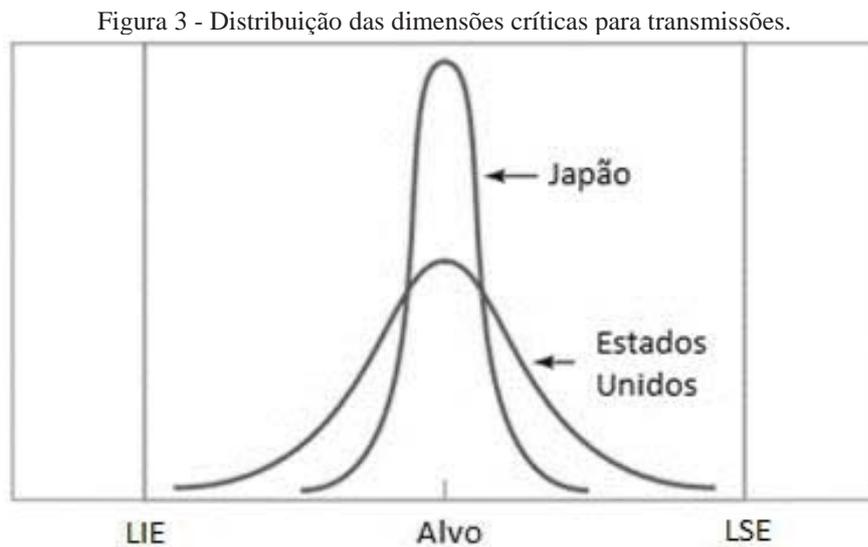
2.2 Conceitos para a Qualidade

Objeto de busca em muitas organizações, a qualidade apresenta-se como fator determinante na abordagem escolhida para este trabalho, pois o mesmo visa, paralelamente, por meio dos seus objetivos, a aumentar os níveis de qualidade obtidos para os produtos de uma empresa.

Entretanto, ao iniciar a presente seção, torna-se necessária a definição acerca do termo qualidade. Segundo Montgomery (2009), a qualidade é uma entidade multifacetada, sendo que sua definição tradicional baseia-se no ponto de vista de que produtos e serviços devem apresentar as especificações exigidas por aqueles que os usam.

De forma alternativa, Montgomery (2009) apresenta que a qualidade também pode ser determinada por uma definição moderna, a qual diz que a mesma é inversamente proporcional à variabilidade. Esta definição implica no seguinte: se a variabilidade nas características importantes de um produto decresce, a qualidade do produto aumenta.

O autor exemplifica a eficácia operacional desta definição por meio do comparativo entre transmissões de automóveis fabricadas em uma fábrica doméstica americana e as fornecidas por um fabricante japonês. A Figura 3 demonstra a distribuição das dimensões críticas para as transmissões de cada fabricante.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2009).

Percebe-se que a distribuição das características críticas para as transmissões do fabricante americano ocupou 75% da amplitude das especificações, ficando entre os limites superior e inferior especificados, o que mostra que muito poucas unidades fora do padrão foram produzidas.

Entretanto, as características críticas para as transmissões do fabricante japonês ocuparam apenas 25% da faixa de especificação. Também puderam ser evidenciados ganhos de qualidade, relacionados à funcionalidade do produto, menos reparos e termos de garantia, provando, dessa forma, que qualidade é, realmente, inversamente proporcional à variabilidade.

Montgomery (2009) também apresenta o motivo pelo qual a empresa japonesa, citada no comparativo acima, obteve melhores resultados, a saber, o fato de que a mesma se manteve em um sistema focado na melhoria da qualidade, tida como a redução da variabilidade.

Como a variabilidade pode ser descrita em termos estatísticos, os métodos estatísticos desempenham um papel central para a melhoria da qualidade.

2.2.1 Seis Sigma Motorola

Montgomery (2009) apresentou o programa Seis Sigma, desenvolvido pela Motorola nos anos 80, como sendo a alternativa encontrada pela organização na busca pela redução na variabilidade de seus produtos e, conseqüentemente, aumento na qualidade dos mesmos.

Inicialmente, Montgomery (2009) demonstra o conceito de desempenho da qualidade três-sigma. Este pode ser observado na Figura 4(a), sendo que a probabilidade de se produzir um produto dentro destas especificações é de 0,9973, o que corresponde a 2.700 partes por milhão (ppm) de defeituosos.

Este resultado aparenta ser satisfatório quando considerado individualmente. Entretanto, considerando-se um conjunto ou montagem com 100 componentes ou partes, em que todas estas 100 partes devem ser não defeituosas, a probabilidade de uma unidade específica do produto ser não defeituosa é apresentada pela equação 1:

$$(0,9973)^{100} = 0,7631 \quad (1)$$

Pode-se afirmar que 23,7% dos produtos produzidos sob a qualidade três-sigma serão defeituosos, correspondendo a uma situação indesejável para as organizações.

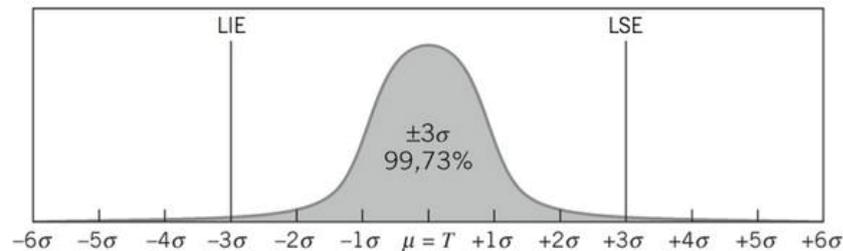
Já o conceito Seis Sigma baseia-se na redução da variabilidade do processo, de modo que os limites de especificação estejam a seis desvios padrão da média. Desta forma, como demonstra a Figura 4(a), a probabilidade de que uma unidade específica do produto seja não defeituosa é de 0,9999998, ou 0,2 ppm, caracterizando uma situação confortável para a produção.

De acordo com Montgomery (2009), também foram consideradas variações da média em 1,5 desvios padrão para longe do alvo, demonstradas pela Figura 4(b), considerando,

assim, uma suposição de que a média ainda estaria sujeita a perturbações, quando o processo alcançasse o nível de qualidade Seis Sigma.

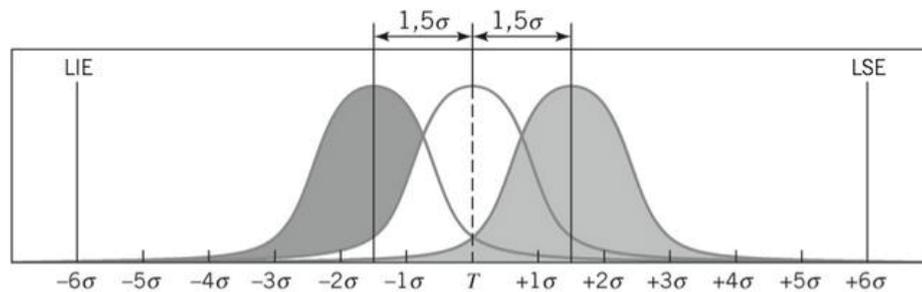
Entretanto, variações na média não são desejáveis, pois somente são possíveis predições sobre o desempenho do processo, se este estiver estável.

Figura 4 - O conceito Seis Sigma da Motorola.



Limites espec.	Porcentagem dentro espec.	ppm Defeituosas
± 1 Sigma	68,27	317300
± 2 Sigma	95,45	45500
± 3 Sigma	99,73	2700
± 4 Sigma	99,9937	63
± 5 Sigma	99,999943	0,57
± 6 Sigma	99,999998	0,002

(a) Distribuição normal centrada no alvo (T)



Limites espec.	Porcentagem dentro espec.	ppm Defeituosas
± 1 Sigma	30,23	697700
± 2 Sigma	69,13	608700
± 3 Sigma	93,32	66810
± 4 Sigma	99,3790	6210
± 5 Sigma	99,97670	233
± 6 Sigma	99,999660	3,4

(b) Distribuição normal com média deslocada de $1,5\sigma$ do alvo

Fonte: Montgomery (2009).

Sob um aspecto conceitual, Ruthes, Ceretta e Sonza (2006) descrevem que a disciplina Seis Sigma começa esclarecendo que medidas são a chave para avaliar o desempenho dos negócios. Depois, aplicam-se dados e análises de modo a se construir um entendimento das variáveis-chave e a otimizar resultados, reduzindo a variabilidade.

Neste contexto, é enfatizada a utilização do controle estatístico de processos, abordado na seção seguinte.

2.2.2 Controle estatístico de Processos

O controle estatístico de processos (CEP) relaciona-se com as medidas de capacidade e desempenho dos processos. Segundo Camargo (2010), a capacidade se refere ao potencial que um processo tem em atingir uma certa meta, indicando o poder do processo em ser exato e preciso, na eventual remoção da variabilidade decorrente das causas especiais ou visíveis.

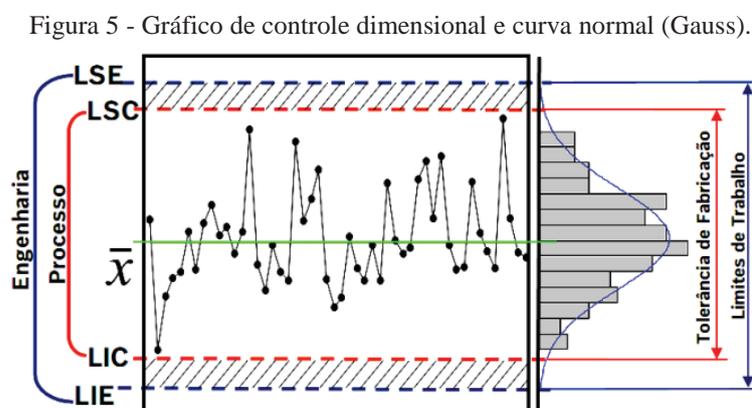
Já o desempenho se refere ao que efetivamente ocorre com o processo ao se tentar atingir uma meta, dentro de especificações dadas, considerando a variabilidade proveniente de todas as causas.

Ainda segundo este autor, utilizando a média e o desvio padrão estimado e conhecendo os limites de especificação do produto, pode-se avaliar o comportamento do processo em termos de sua possibilidade de atender às especificações e atingir metas, considerando apenas a variabilidade originada de causas comuns ou ocultas.

Para Montgomery (2009), o controle estatístico de processos é uma poderosa coleção de ferramentas de resolução de problemas, útil na obtenção da estabilidade do processo e na melhoria da capacidade por meio da redução da variabilidade.

Entre todas as ferramentas citadas, é destacada pelo autor a importância dos gráficos de controle de Shewhart.

A Figura 5 demonstra o conceito criado por Shewhart.



Fonte: Camargo (2010).

Onde:

LSE - Limite Superior Especificado;

LIE - Limite Inferior Especificado;

LSC - Limite Superior de Controle;

LIC - Limite Inferior de Controle;

\bar{x} - Média amostral.

A média amostral, entregue pelo processo, visa atingir o alvo, tido como o valor médio da tolerância. Por meio dela é possível identificar a centralização do processo, pois os dados do processo tendem a ser distribuídos ao redor da média da tolerância. Já a amplitude do mesmo pode ser verificada pelo desvio padrão.

Ao considerarmos ambos os limites de especificação, superior e inferior, como distantes três desvios padrão da média, pode-se afirmar que um processo normal, nestas condições, apresentaria aproximadamente 3 partes de 1.000, como demonstrado na Figura 4(a).

Os gráficos de controle podem ser usados, também, para estimar os parâmetros de um processo de produção e, com esta informação, determinar a capacidade desse processo.

Conforme Montgomery (2009), a razão ou índice da capacidade do processo (RCP) C_p é definida através dos limites superior e inferior da especificação, conforme demonstra a equação 2:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (2)$$

Onde:

C_p - Índice da capacidade potencial do processo;

LSE - Limite Superior Especificado;

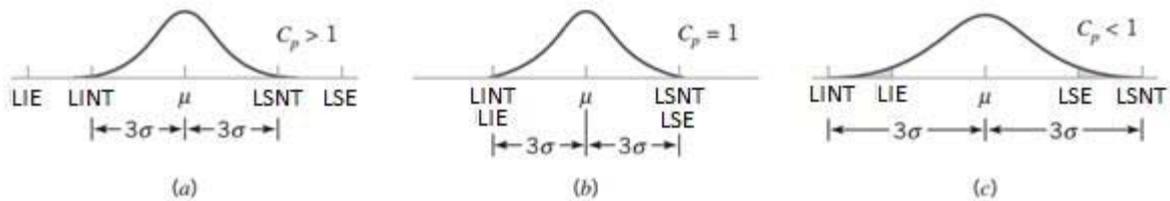
LIE - Limite Inferior Especificado;

$\hat{\sigma}$ - Desvio padrão estimado.

Resumindo, o índice de capacidade potencial é definido como a amplitude da tolerância dividida pela capacidade do processo, sem preocupar-se com a centralização. (CAMARGO, 2010).

A Figura 6 apresenta os índices de capacidade dos processos, relacionando-os aos limites de especificação superior e inferior.

Figura 6 - Índices de capacidade dos processos.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2009).

Assim, tem-se que:

- $C_p > 1,00$ Processo capaz (a);
- $C_p = 1,00$ Processo aceitável (b);
- $C_p < 1,00$ Processo incapaz (c).

Considerando a centralização do processo, Camargo (2010) afirma que a mesma é definida como o mínimo entre C_{ps} (índice de capacidade superior) e o C_{pi} (índice de capacidade inferior), originando o índice de capacidade C_{pk} .

Conforme demonstrado pelas equações 3, 4 e 5:

$$C_{pi} = \frac{\bar{x} - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad (3)$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \bar{x}}{3\hat{\sigma}} \quad (4)$$

$$C_{pk} = \min(C_{ps}; C_{pi}) \quad (5)$$

Onde:

C_{pi} - Capacidade inferior;

C_{ps} - Capacidade superior;

C_{pk} - Índice de Capacidade do Processo;

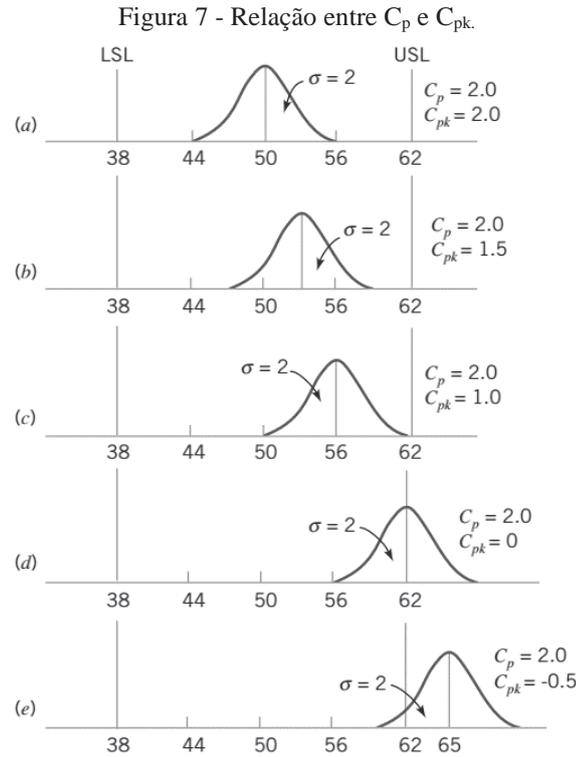
\bar{x} - Média amostral;

$\hat{\sigma}$ - Desvio padrão estimado;

LSE - Limite Superior Especificado;

LIE - Limite Inferior Especificado.

A relação entre os índices C_p e C_{pk} é demonstrada pela Figura 7.



Fonte: Montgomery (2009).

Nesta foram fixados os limites de especificação superior e inferior, juntamente com o desvio padrão. Pode-se perceber que à medida que a distribuição se afasta da média (50), o valor atribuído ao índice C_{pk} é reduzido gradativamente, indicando a descentralização do processo.

Assim, tem-se que:

- $C_p = C_{pk}$ Processo centralizado;
- $C_p > C_{pk}$ Processo não centralizado.

2.3 Projeto para Controle Dimensional

O objetivo da presente seção é apresentar os elementos conceituais inclusos na utilização do método e suas ferramentas, sob o aspecto da gestão dimensional.

Inicialmente serão descritos os aspectos gerais atrelados à técnica e utilização da metodologia de gestão dimensional, com foco principal nas áreas de engenharia de desenvolvimento de produtos, manufatura e qualidade.

Costuma-se descrever os processos de engenharia sob um ponto de vista imaginário perfeito. Entretanto, as condições reais de manufatura não demonstram tal nível de perfeição, devido ao aparecimento das variações, intrínsecas a tais processos.

Esta é a principal causa para que os produtos manufaturados não atendam aos requisitos previamente esperados para eles. Quando acumuladas, as variações podem resultar em produtos que não atendem aos quesitos funcionalidade, estética ou mesmo às condições de montagem anteriormente determinadas.

Infelizmente, tais problemas são normalmente expostos muito tarde, durante o processo de desenvolvimento. Dessa forma, os custos de alteração, nesse estágio, são drasticamente amplificados.

Uma maneira de gerenciar as variações é acrescentar a elas limites permissíveis, denominados tolerâncias. Segundo Agostinho *et al.* (2001), estas são caracterizadas em dois tipos: Tolerância Dimensional e Tolerância Geométrica. O enfoque utilizado pelo autor às tolerâncias será demonstrado com mais detalhes na seção 2.3.1 do presente trabalho.

Entretanto, ao utilizar os limites de tolerância, torna-se importante balancear os aspectos funcionais e de qualidade, contra os aspectos de custo e limitações da manufatura. (SÖDERBERG, 2006 apud OMBASIC; ZARE, 2013).

Segundo Huang (1996), o projeto para controle dimensional refere-se à disciplina de controle dimensional total do produto, que reconhece e trata as variações durante o projeto, manufatura e montagem. Tem como objetivo atender as expectativas de qualidade dos consumidores pela aparência e funcionalidade, sem a necessidade de excessiva precisão nas operações no chão de fábrica, manufatura e montagem.

A metodologia faz parte de um grande e crescente campo, que engloba uma diversidade de ferramentas e técnicas, juntamente com a organização dos esforços de engenharia, afetando a estrutura organizacional como um todo, consistido nos princípios da engenharia simultânea.

Huang (1996) também observa que os maiores elementos causadores dos custos de produção são oriundos do não entendimento da metodologia proposta para controle dimensional dos projetos, ou *Design for Dimensional Control* (DDC). O alvo da metodologia DDC não é a eliminação das variações dimensionais, uma vez que é possível geri-las.

Em muitos casos, o não gerenciamento das variações intrínsecas a uma linha de produção pode não afetá-la significativamente. Este fato faz com que o nível de *expertise* dos operadores seja relativamente elevado, visto que os mesmos deverão desenvolver habilidades

visando a absorver as variações apresentadas pelo processo. Desta forma são geradas as “fábricas ocultas”.

Conforme Huang (1996), a proposta da metodologia é, basicamente, prover ferramentas e técnicas de gerenciamento para transferir a responsabilidade das “fábricas ocultas” para as áreas de engenharia de produto e manufatura. DDC deve ser visto como uma metodologia de engenharia combinada com ferramentas computacionais, usadas para impor qualidade e reduzir custos por meio de variações controladas, obtendo, assim, um projeto robusto.

2.3.1 Linguagem do Projeto para Controle Dimensional

Conhecidos os principais fundamentos da metodologia de gestão dimensional de produtos, juntamente com as principais formas de possíveis variações encontradas nestes, é apresentado então um novo ponto de vista a ser considerado: o mundo real e imperfeito da manufatura. Este aspecto, agora incluso nas abordagens de engenharia, manufatura e controle, demanda grandes esforços com foco na comunicação clara e consistente.

Assim, é imprescindível o uso de uma linguagem robusta, capaz de transportar todas as informações necessárias para o produto, durante o ciclo de desenvolvimento do mesmo. Esta linguagem deverá ser capaz de contemplar os parâmetros a serem utilizados na especificação do produto, produção e controle, considerando os aspectos da manufatura imperfeita e suas variações.

Huang (1996) afirma que a metodologia DDC foi construída com base nesta linguagem e a evolução de suas normas, tais como ASME, ANSI, BSI, DIN e ISO. Para Huang (1996), o propósito dessa forma de comunicação baseia-se em definir e tolerar com clareza elementos geométricos de uma determinada peça ou montagem. Tal processo deverá levar a instruções passíveis de uma única interpretação, podendo esta ser efetuada por pessoas sem o conhecimento funcional da peça ou montagem detalhada.

Projetos com uma linguagem imprecisa ou, muitas vezes, incompleta podem levar a grandes problemas durante o ciclo de desenvolvimento de produtos. Tal condição normalmente culmina na geração de custos elevados de alteração e atrasos significativos nos prazos de entrega dos produtos, pois em muitos casos, o problema é somente descoberto nas etapas finais de desenvolvimento.

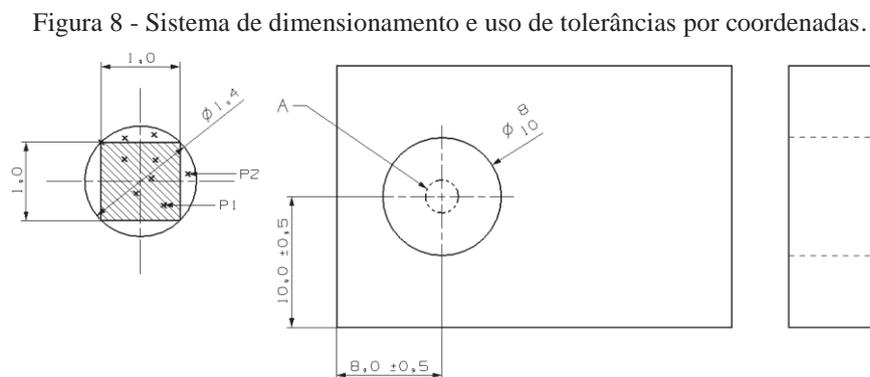
São conhecidas diversas linguagens de dimensionamento e uso de tolerâncias. As duas próximas seções apresentarão os principais sistemas de dimensionamento e uso de tolerâncias, normalmente utilizados pela indústria de ônibus: *Coordinate Tolerancing* e *Geometric Dimensioning and Tolerancing* (GD&T).

2.3.1.1 Sistema de Dimensionamento e uso de Tolerâncias por Coordenadas

Segundo Krulikowski (1997), o sistema de dimensionamento e uso de tolerâncias por coordenadas, é um sistema em que a peça é localizada ou definida por dimensões retangulares, sendo que nestas são dadas tolerâncias. Para o autor, o sistema, denominado por ele “*Coordinate Tolerancing*”, obteve sucesso no passado, quando as organizações eram pequenas e a comunicação entre as áreas era relativamente fácil.

Com o passar dos anos, e as organizações aumentando em tamanho, peças e conjuntos começaram a ser obtidos de diversas fontes e a habilidade de comunicação entre os projetistas e as diversas áreas diminuiu. Assim, os problemas relacionados a esse sistema tornaram-se evidentes, pois o mesmo não é capaz de transmitir com precisão todos os requisitos de uma determinada peça.

A Figura 8 representa uma determinada peça, dimensionada utilizando-se o método por coordenadas. Observa-se a utilização de tolerâncias de mais ou menos atreladas às dimensões cartesianas, visando ao posicionamento e ao dimensionamento do furo de diâmetro 9.0 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Graficamente, a zona de tolerância que define os limites para os possíveis desvios de posição do furo pelo método de coordenadas, pode ser representada por um quadrado com dimensões de 1.0 mm, conforme demonstra a área hachurada apresentada pela Figura 8.

Pode-se verificar que a ocorrência de peças com furos posicionados dentro da área hachurada estaria em conformidade com uma inspeção dimensional, utilizando-se o projeto desenvolvido pelo sistema cartesiano de dimensionamento, conforme demonstra o ponto P1, apresentado na Figura 8.

Entretanto, a incoerência representativa entre a zona de tolerância adotada e o elemento responsável pela função da peça é facilmente percebida, ou seja, o sistema de coordenadas cartesiano, representa zonas de tolerância quadradas ou retangulares, mesmo para elementos cilíndricos.

Segundo Krulikowski (1997), uma abordagem mais lógica e funcional seria permitir as mesmas tolerâncias para a localização do furo em todas as direções, criando uma zona de tolerância cilíndrica.

Avaliando uma nova peça com o furo posicionado em P2, utilizando-se o mesmo projeto já demonstrado, teríamos a rejeição desta, pois o ponto P2 encontra-se fora da zona de tolerância para o método de coordenadas cartesianas.

Porém, ao medir a distância apresentada pelo ponto P2, em relação à posição nominal do furo, percebe-se que a mesma não é maior que a metade da diagonal do quadrado, que representa a zona de tolerâncias pelas coordenadas cartesianas. Assim, apesar da rejeição eminente, a peça em questão poderia ser utilizada sem restrições.

Segundo Fisher (2011), o problema é resultado de um desenho que não é capaz de comunicar com clareza, aos inspetores ou responsáveis pela manufatura, quais são as superfícies ou pontos que devem tocar os dispositivos de inspeção e produção. Para o autor, quando utilizado o método de coordenadas cartesianas, normalmente devem ser usadas notas adicionais aos desenhos, para maior clareza das informações.

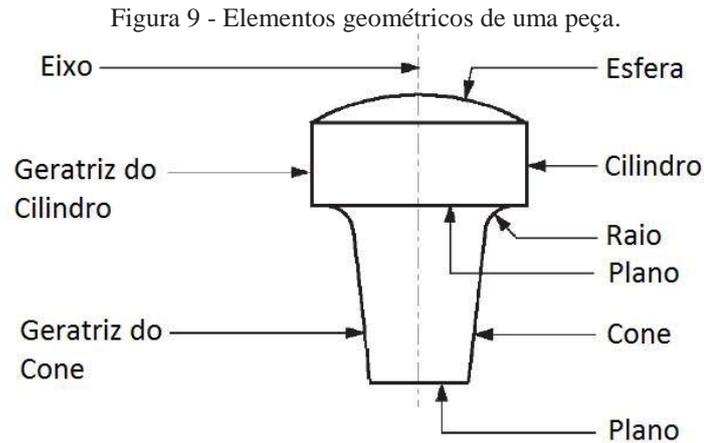
2.3.1.2 Sistema Geométrico de Dimensionamento e uso de Tolerâncias

Existem várias definições para o sistema geométrico de dimensionamento e uso de tolerâncias, sendo neste documento abordadas algumas delas, como apresentado pelos seguintes autores:

- Krulikowski (1997) – *Geometric Dimensioning and Tolerancing* (GD&T) é uma linguagem internacional, usada pelas áreas de engenharia para descrever com precisão peças e conjuntos. Consiste basicamente em um conjunto de símbolos, regras, definições e convenções. GD&T é uma linguagem matemática precisa que pode ser usada para descrever tamanho, forma, orientação e localização de peças e conjuntos;
- Drake (1999) – *Geometric Dimensioning and Tolerancing* (GD&T) é a linguagem para comunicação das especificações de projeto da engenharia. GD&T inclui todos os símbolos, definições, fórmulas matemáticas e regras de aplicação necessárias para incorporar uma linguagem de engenharia viável. Como o próprio nome indica, ela transmite as dimensões nominais (geometria ideal) e as tolerâncias para a peça. GD&T é expressa usando linhas, símbolos e números arábicos nos desenhos, sendo que pessoas em qualquer lugar conseguem ler, escrever e entender, independentemente de suas línguas nativas;
- Cogorno (2011) – *Geometric Dimensioning and Tolerancing* (GD&T) é uma linguagem simbólica. É usada para especificar tamanho, forma, orientação e localização dos elementos em uma peça. Elementos e suas tolerâncias, sob a forma da linguagem GD&T, refletem o real relacionamento entre eles e peças de uma montagem. GD&T foi criado para garantir montagens apropriadas entre as peças, aumentando a qualidade e reduzindo os custos.

Basicamente, o sistema de dimensionamento e uso de tolerâncias, denominado GD&T, utiliza elementos geométricos simples, presentes nas diferentes peças, como forma de referência para o estabelecimento dos limites de tolerâncias permissíveis para as mesmas. Tais elementos são considerados suscetíveis a diversas formas de variações, sendo, por este motivo, elementos de estudo deste trabalho.

Considerando desta forma os elementos relacionados à geometria da peça, Henzold (2006) apresenta os mesmos como se pode ver na Figura 9. Esta visão deverá ser efetuada quando realizado o projeto utilizando-se da metodologia GD&T. Todas as peças devem ser divididas e classificadas de acordo com seus elementos geométricos.



Fonte: Adaptado de Henzold (2006).

Deve-se salientar que nem todos os elementos de uma peça são funcionais. Desta forma, torna-se importante subdividi-los quanto à funcionalidade ou não dos mesmos. Tal tarefa se torna necessária, pois somente estes elementos funcionais deverão ser controlados por meio das tolerâncias específicas. Elementos que não possuem características funcionais devem seguir regras e faixas de tolerâncias gerais, possivelmente mais brandas.

Entretanto, deve-se, necessariamente, elucidar a denominação “funcional” utilizada para classificar elementos de uma determinada peça. Normalmente, os elementos funcionais de uma peça são os elementos responsáveis pelo relacionamento da mesma com as demais peças de uma montagem, ou mesmo com elementos responsáveis diretos pela função preestabelecida anteriormente para tal peça ou conjunto (sistema). Superfícies que se tocam, furos concêntricos, entre outros elementos, podem receber esta categorização.

Vistos os elementos funcionais de uma determinada peça, é possível, assim, a utilização da linguagem proposta pelo GD&T. Conforme já mencionado anteriormente, a linguagem da presente metodologia utiliza-se de símbolos e números, formando, dessa forma, algo como o “alfabeto” utilizado para traduzir as possíveis variações dimensionais de uma peça.

Utilizada como base para o desenvolvimento do presente trabalho, a norma ASME 14.5 Y (2009) apresenta uma síntese dos principais símbolos utilizados para controlar a geometria dos componentes a serem desenvolvidos (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais controles para características geométricas de uma peça.

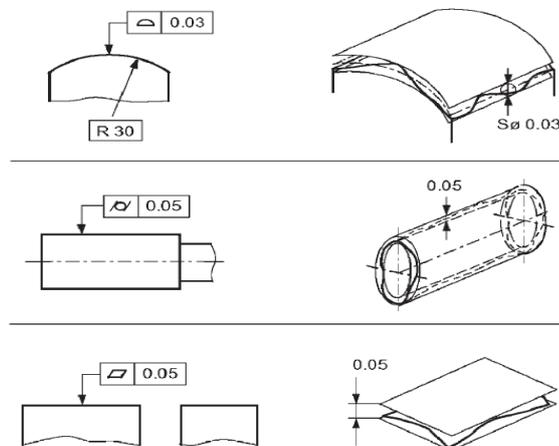
APLICAÇÃO	TIPO DE TOLERÂNCIA	CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS	FORMA	RETILINIDADE	—
		PLANICIDADE	▭
		CIRCULARIDADE	○
		CILINDRICIDADE	∅
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS OU RELACIONADAS	PERFIL	PERFIL DE LINHA	⤿
		PERFIL DE SUPERFÍCIE	⤿
CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS	ORIENTAÇÃO	ANGULARIDADE	∠
		PERPENDICULARIDADE	⊥
		PARALELISMO	∥
	LOCALIZAÇÃO	POSIÇÃO REAL	⊕
		CONCENTRICIDADE	⊙
		SIMETRIA	≡
	BATIMENTO	BATIMENTO CIRCULAR	↗
BATIMENTO TOTAL		↗↗	

Fonte: Adaptado de ASME 14.5 Y (2009).

Para que seja iniciado o processo de dimensionamento, por meio do uso da presente linguagem, é de grande importância o entendimento de alguns aspectos imprescindíveis para o correto uso da mesma. Conforme demonstrado no decorrer da presente seção, a linguagem GD&T aborda os desvios ou variações das peças sobre sua forma bidimensional ou tridimensional. Igualmente, as tolerâncias e suas zonas dimensionais também são consideradas em 2D e 3D.

A Figura 10 demonstra algumas zonas de tolerâncias tridimensionais em diferentes elementos (lado direito) e a sua forma de marcação nos projetos detalhados (lado esquerdo).

Figura 10 - Zonas de tolerância tridimensionais.

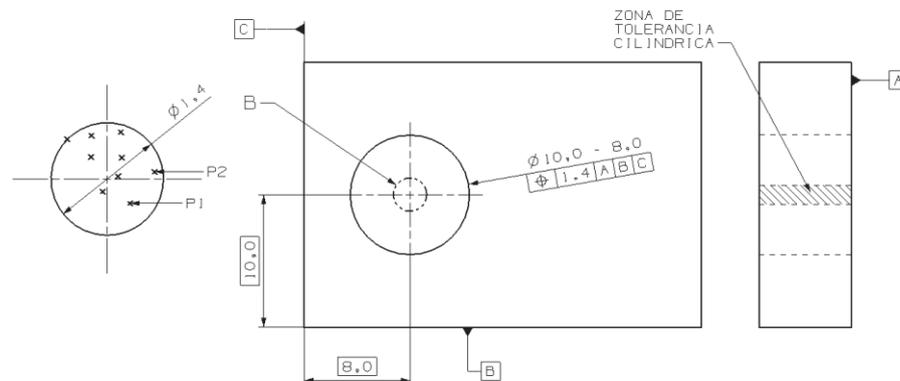


Fonte: Adaptado de Henzold (2006).

Assim, é facilmente percebida a capacidade de comunicação da linguagem GD&T, gerada pela utilização dos conceitos de funcionalidade, símbolos normatizados e representações tridimensionais dos mesmos, nas peças e seus projetos de engenharia. A interpretação dos limites e zonas de tolerâncias geométricas deve sempre ser realizada na sua forma espacial, conforme as boas práticas apresentadas pela norma ASME 14.5 Y ou demais normatizações específicas.

A Figura 11 demonstra a aplicação do sistema GD&T na mesma peça anteriormente apresentada com a utilização do sistema cartesiano.

Figura 11 - Sistema geométrico de dimensionamento e uso de tolerâncias.

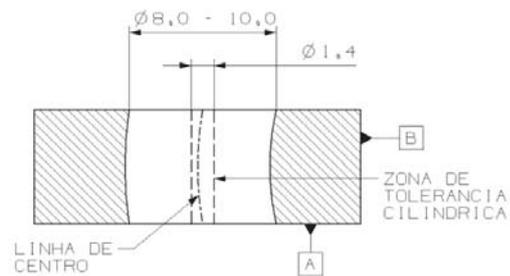


Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizando um panorama comparativo entre os sistemas cartesiano e geométrico, observa-se que, com a aplicação do sistema geométrico e a utilização de zonas de tolerância tridimensionais deste, o furo de diâmetro 9.0 mm tem seus limites definidos, entretanto agora de uma forma clara e, principalmente, considerando sua função. Salienta-se, também, a eliminação das tolerâncias antes atreladas às dimensões, sendo agora inclusas no elemento funcional da peça.

A linguagem proposta pelo sistema GD&T consegue descrever, além do tamanho das peças, informações como forma, posição e localização das mesmas. Assim, considerando esta capacidade descritiva, a Figura 12 representa, esquematicamente, a forma de interpretação, que agora deve ser bidimensional e tridimensional. Observa-se também uma combinação entre o dimensionamento cartesiano e o sistema GD&T.

Figura 12 - Tolerância de posição real do elemento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

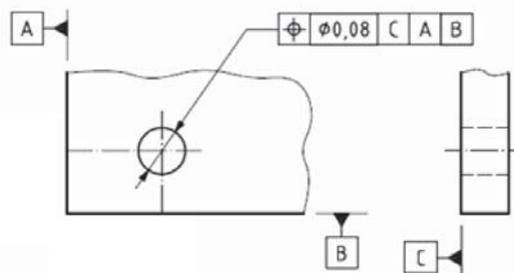
Realizando uma inspeção dimensional, utilizando instrumentos simples como um paquímetro, pode-se verificar a dimensão diametral de tamanho (Cartesiana), contida na cota $\varnothing 8.0 - 10.0$ mm. Considerando que, nesta inspeção, a dimensão esteja contida na zona de tolerância dimensional da peça, a mesma ainda não seria totalmente aprovada.

Também deverá ser realizada a verificação relacionada à linha de centro, medida do furo em relação à faixa de tolerância cilíndrica de diâmetro 1.4 mm, especificada pela linguagem GD&T. Somente desta forma estão controlados os elementos funcionais da peça, garantindo o atendimento dos requisitos previamente estipulados.

Considerando as diversas áreas envolvidas com o projeto de engenharia, também é de grande importância o entendimento dos referenciais geométricos do produto, questão normalmente não apresentada com o uso do método por coordenadas. Suprindo diretamente a lacuna deixada pelo sistema cartesiano, a metodologia de projeto GD&T define claramente os referenciais a serem utilizados para projeto, fabricação e montagem.

A Figura 13 demonstra a utilização do sistema de referenciamento utilizado pelo GD&T. São eliminados, através dos planos A, B e C, os graus de rotação e translação da peça, sendo assim definida a orientação da peça para inspeção, fabricação e projeto.

Figura 13 - Exemplo de definição dos referenciais geométricos.



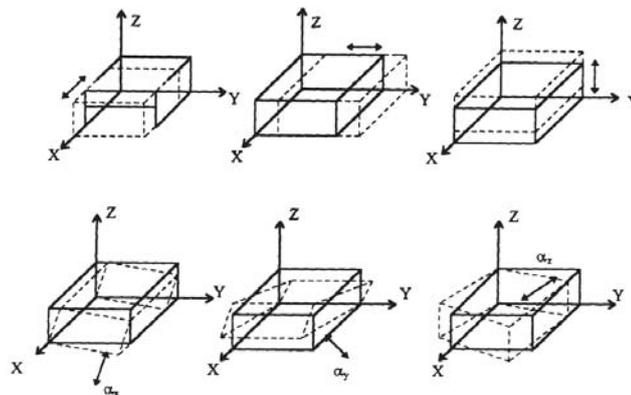
Fonte: Hausch (2009).

Também denominados como *Datum Reference Features* (DRF), os planos de referenciamento utilizados pelo sistema GD&T tem a maior parte de sua utilização na

confeção de dispositivos de manufatura e controle. Tal condição é explicada pelo fato de que, durante o processo de manufatura e controle dos componentes desenvolvidos, é natural a passagem dos mesmos por diversos dispositivos. Caso não haja uma uniformidade no referenciamento de tais componentes, haverá uma ampliação drástica no tamanho das cadeias dimensionais e, conseqüentemente, no acúmulo de tolerâncias.

O conceito utilizado para o referenciamento de peças baseia-se na eliminação dos graus de liberdades das mesmas. Yiming e Yaoxiang (1999) observam que, para tal necessidade, são necessários somente seis pontos, criando o conhecido conceito 3-2-1 para localização de peças. Os autores demonstram, como é possível ver na Figura 14, os graus de liberdade possíveis para uma peça rígida.

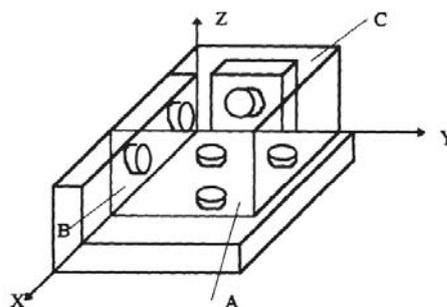
Figura 14 - Seis graus de liberdade de uma peça.



Fonte: Yimimn, Yaoxiang (1999).

Os graus de liberdade são divididos de forma elementar, de acordo com o tipo de movimento realizado: rotação ou translação. São tomados como referência os eixos cartesianos X, Y e Z. Desta forma, ou autor sugere, como se vê na Figura 15, um dispositivo para localização da peça demonstrada livre na Figura 14, utilizando o conceito 3-2-1. Três apoios formando um plano base A (referência primária), dois apoios formando uma linha B (referência secundária) lateral, e um ponto C (referência terciária) para localização final.

Figura 15 - Princípio de localização 3-2-1.



Fonte: Yiming, Yaoxiang (1999).

Desta forma, é obtida uma única posição para a peça no espaço. Entretanto, é válida a menção de que a maioria dos dispositivos utiliza diferentes tipos de localizadores, formando sistemas de localização dos mais simples aos mais complexos. O domínio destas questões é função das equipes de projeto para a manufatura, que deverão seguir a marcação de GD&T demonstrada pelo projeto.

Em resumo, a linguagem GD&T não pode ser considerada como simplesmente uma sequência ou conjunto de símbolos utilizados para descrever características de uma determinada peça. Sua abordagem é muito mais conceitual, sendo que a apresentação do conceito é dada por meio dos recursos da linguagem.

Pode-se afirmar que o processo de utilização da presente linguagem depende de grandes conhecimentos, nas diversas áreas do desenvolvimento de produtos, justificando, assim, a importância da abordagem sobre a esfera da Engenharia Simultânea. Também é importante salientar o grande amparo por parte das normas e *softwares* envolvidos neste processo.

Alguns autores buscam apresentar métodos sistêmicos para utilização de GD&T. Pode-se citar como referência a obra de Green (2005). Entretanto, vista a miscelânea de assuntos abordados para a elaboração dos conceitos, acredita-se que a aplicação dos métodos sistêmicos só deve ser realizada após o conhecimento e domínio dos mesmos.

2.3.2 Análise de Tolerâncias

Conforme já descrito nas seções anteriores, as organizações vêm desenvolvendo trabalhos na busca pelo aumento da qualidade de suas especificações e produtos. No entanto, o gerenciamento destas especificações deixa de ser uma tarefa simples, uma vez que os produtos desenvolvidos estão cada vez mais complexos.

Inserindo tal reflexão ao cenário da presente seção, são evidenciadas dificuldades semelhantes. O gerenciamento das especificações dimensionais de um produto é uma tarefa relativamente complexa, que depende de uma cadeia de conhecimentos coesa, juntamente com uma estrutura organizacional, provida de pessoas e equipamentos para tal. Fixada neste contexto organizacional, uma das principais etapas é a análise de tolerâncias.

Fisher (2011) define a análise de tolerâncias como um termo global, que inclui duas categorias. A primeira descreve os métodos para determinar o significado das especificações

individuais de tolerâncias, chamada de *Tolerance Analysis*. Já a segunda é responsável por determinar a variação acumulativa entre duas ou mais características. Esta é comumente chamada de *Tolerance Stack up*. Ambas são, de forma geral, métodos de análise das variações. Todavia, pode-se salientar que nem todas as fontes de variações podem ser compreendidas pelas tolerâncias dimensionais.

De forma simples, uma análise de tolerâncias, ou *Tolerance Stack Up*, é a análise do acúmulo das tolerâncias. Serve de ferramenta de decisão para os projetistas ou engenheiros, pois a mesma responde perguntas críticas, normalmente apresentadas durante o desenvolvimento de produtos. A informação obtida por meio destes estudos é numérica e, sendo assim, serve como parâmetro para possíveis alterações nos projetos e documentos de engenharia.

Realizando uma análise por meio da ferramenta apresentada na nesta seção, os projetistas ou engenheiros deverão ter condições de identificar os principais elementos contribuintes no somatório das variações em um determinado elemento. Também serão capazes de adequar os valores das tolerâncias, realizando, assim, um ajuste funcional, visando ao melhor custo, sem perda da qualidade.

Outro grande fator de contribuição para a obtenção ou não de um bom produto em termos de variações é a geometria das peças e conjuntos projetados. Com a utilização dos recursos descritos nesta seção, é possível a realização de avaliações quantitativas, relacionadas às geometrias escolhidas. Portanto, é possível a verificação de quais a melhores formas geométricas para um projeto, quais superfícies se tocam, ou qual é o melhor ângulo entre elas, provendo o melhor relacionamento entre os componentes.

Direcionando o ponto de vista do acúmulo de variações para o ambiente da manufatura, são então apresentados outros fatores, que possuem contribuições significativas no resultado do produto final. A sequência de montagem, se houve a montagem manual ou auxiliada com dispositivos, são fatores tomados como exemplo.

Para Fisher (2011), existem duas maneiras para realização de estudos de tolerâncias: manualmente ou com o auxílio de ferramentas computacionais, denominadas *Computer Aided Tolerance* (CAT).

- Manuais – Os estudos realizados manualmente são normalmente efetuados com o auxílio de planilhas simples, obtendo somente resultados em uma única direção vetorial. Para fins de auxílio, também podem ser usadas planilhas eletrônicas, como as geradas pelo *software* Microsoft Excel;

- CAT – Utilizado para estudos de tolerâncias em uma, duas ou três dimensões, normalmente utilizando simulações computacionais estatísticas.

Desta forma, serão apresentados, nas seções seguintes, os principais métodos utilizados para realização dos estudos.

2.3.2.1 Análise de Tolerâncias pelo Pior Caso

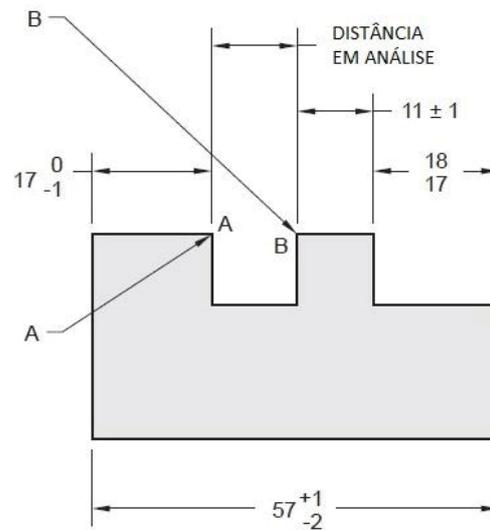
Conforme já sugere o nome em inglês, *Worst-Case Tolerance Analysis* é o estudo das tolerâncias no seu pior caso. O resultado desta ferramenta de análise é o valor absoluto máximo da variação de uma determinada distância.

Normalmente, este método de análise é utilizado para sistemas dimensionais simples, em que se deseja a obtenção de resultados rápidos, com um elevado fator de segurança.

Para fins de entendimento, será utilizado nesta seção o exemplo adaptado de Fisher (2011), que demonstra com clareza as etapas da aplicação do método de análise pelo pior caso.

1. Inicialmente, deve-se escolher a dimensão pela qual se dá a necessidade de obtenção da máxima variação. A Figura 16 apresenta o esquema dimensional da mesma, sendo que a dimensão escolhida é representada pelos pontos A e B.
2. Determinar se a análise deverá ser em uma, duas ou três dimensões.
 - a) Se a análise requerida for em duas dimensões, determinar se ambas as dimensões podem ser resolvidas em somente uma direção, com ajuda da trigonometria. Caso contrário, deverão ser usados os recursos de *softwares* computacionais.
 - b) Se a análise requerida for em três dimensões, deverão ser usados os recursos de *softwares* computacionais para análises tridimensionais.

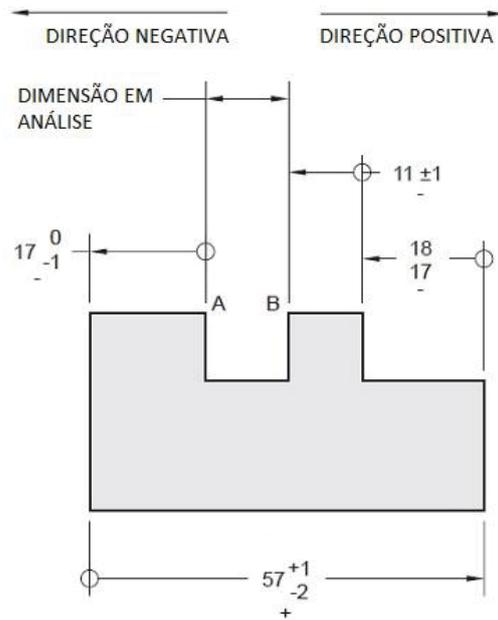
Figura 16 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 2.



Fonte: Fisher (2011).

3. Determinar as direções positivas e negativas.
 - a) Positivas: Direções no sentido de A para B. São normalmente identificadas através do sinal + ao lado da dimensão.
 - b) Negativas: Direções no sentido de B para A. São normalmente identificadas através do sinal - ao lado da dimensão.
 - c) As dimensões são também orientadas de acordo com sua origem. Apresentadas pelo símbolo de origem \circ no ponto de origem da dimensão.
4. Construir a cadeia de dimensões, seguindo a simbologia determinada. Utilizar como ponto de partida o ponto A, terminando em B, não podendo haver nenhuma descontinuidade entre os pontos e dimensões em contato. Figura 17.

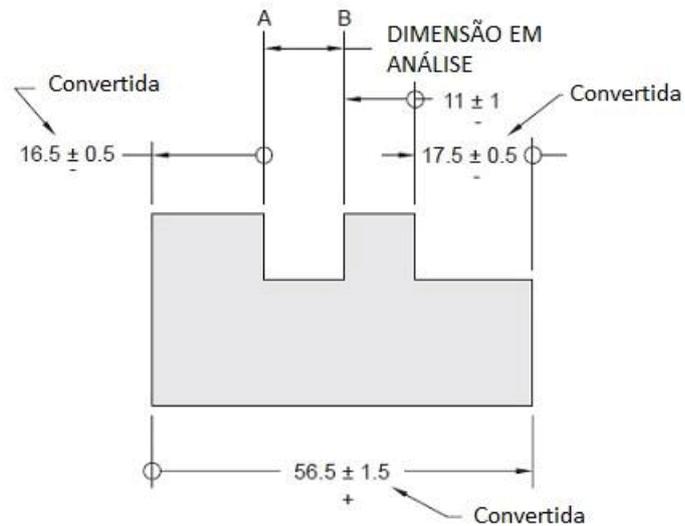
Figura 17 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 4.



Fonte: Fisher (2011).

5. Converter todas dimensões e tolerâncias para o formato bilateral simétrico. Observe-se a Figura 18.

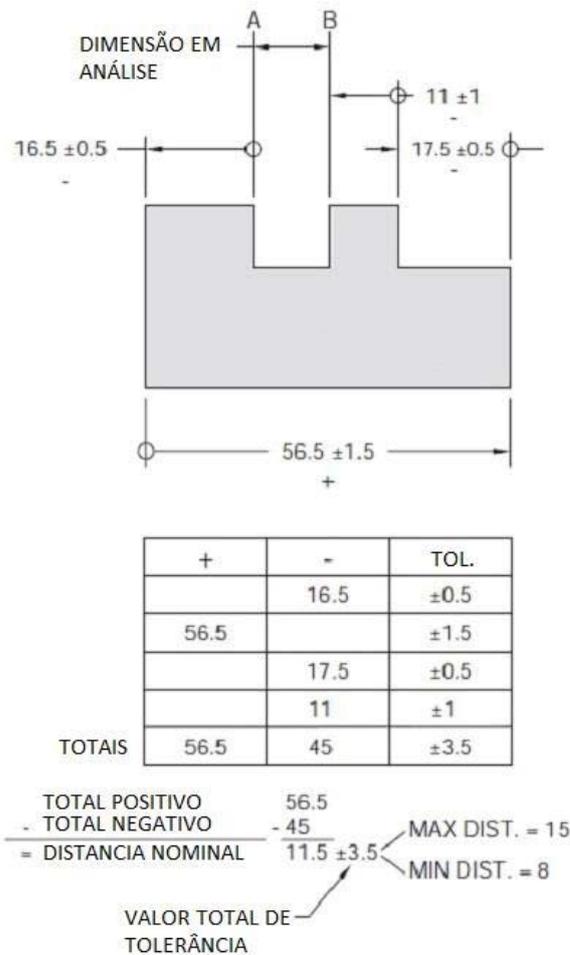
Figura 18 - Cadeia de dimensões e tolerâncias - Passo 5.



Fonte: Fisher (2011).

6. Elaborar a planilha conforme demonstrado na Figura 19. As dimensões positivas são colocadas na primeira coluna (+) e as negativas na coluna seguinte (-), seguindo a sequência iniciada do ponto A para B. A faixa de tolerâncias de cada uma das dimensões deve ser colocada na terceira coluna.
7. Subtraindo o somatório da primeira coluna com o somatório da segunda coluna, pode-se, então, obter a dimensão nominal estudada, sendo que esta não será necessariamente igual à dimensão inicialmente detalhada, devido à mudança realizada no formato das dimensões e tolerâncias (Passo 5). Realizando o somatório da terceira coluna, obtém-se, então, a faixa de tolerâncias resultante para a dimensão A-B. Os valores obtidos são apresentados na parte inferior da Figura 19.

Figura 19 - Resultado da análise de tolerâncias pelo pior caso.



Fonte: Fisher (2011).

2.3.2.2 Análise Estatística de Tolerâncias

A análise estatística denominada como *Statistical Tolerance Analysis* segue a mesma linha utilizada para o método de análise pelo pior caso, já apresentado anteriormente. Entretanto, o presente método destina-se à busca da provável máxima variação possível para dimensão alvo de estudo.

É, de fato, extremamente conservador o uso do método de análise pelo pior caso, pois é muito pouco provável que todas as dimensões estejam variando nos seus limites extremos superiores e inferiores, ao mesmo tempo, respectivamente.

Desta forma, a análise estatística se torna uma valiosa ferramenta, pois com ela é possível ampliar os valores das tolerâncias individuais, reduzindo os custos atrelados a produção.

Contudo, torna-se necessário o questionamento de quando deve-se utilizar o método estatístico ou o método de análise pelo pior caso. Fisher (2011) apresenta a resposta para tal questionamento, como sendo uma análise de riscos a ser efetuada. Tal análise deve considerar fatores como o número de dimensões envolvidas na análise, quantidade de peças a serem montadas, número de controles envolvidos no processo, etc.

Para Fisher (2011), o uso do método estatístico indubitavelmente aproxima os resultados das análises com o comportamento real, principalmente em grandes montagens. Entretanto, o mesmo salienta que alguns fatores principais devem ser contemplados, para garantir, assim, uma maior aproximação com os resultados físicos.

Em resumo, para que o método estatístico possa ser utilizado com uma boa aproximação, o processo real das peças em estudo deve possuir um comportamento controlado, dado através do uso das ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP). De outra forma, com processos instáveis e descontrolados, uma abordagem inicial sob o aspecto do pior caso apresenta-se mais confortável aos projetistas e engenheiros de produto.

Devido às diferenças estatísticas encontradas entre as simulações e os processos de manufatura, alguns fatores de correção podem ser aplicados, visando a possíveis ajustes durante as análises.

Existem diversos métodos estatísticos, sendo mais comumente utilizados o método da soma das raízes quadradas, ou *Root-sum-square* (RSS), e a simulação de Monte Carlo.

Mais amplamente utilizado, especialmente quando simulações computacionais não são possíveis, o método RSS de simulação estatística de tolerâncias pode ser entendido por meio da equação 6.

$$\text{Tolerância RSS} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + \dots T_n^2} \quad (6)$$

Como sugere o próprio nome, o valor estatístico obtido pelo método RSS é dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados de cada uma das tolerâncias envolvidas na cadeia dimensional.

Fisher (2011) salienta que o método RSS possui uma ligação direta com o processo pelo qual são realizadas as análises, quando discutido em termos de desvios padrões obtidos. Para o autor, um processo com desvios de tolerâncias da ordem de $\pm 3\sigma$ irá gerar uma simulação RSS de $\pm 3\sigma$, respectivamente.

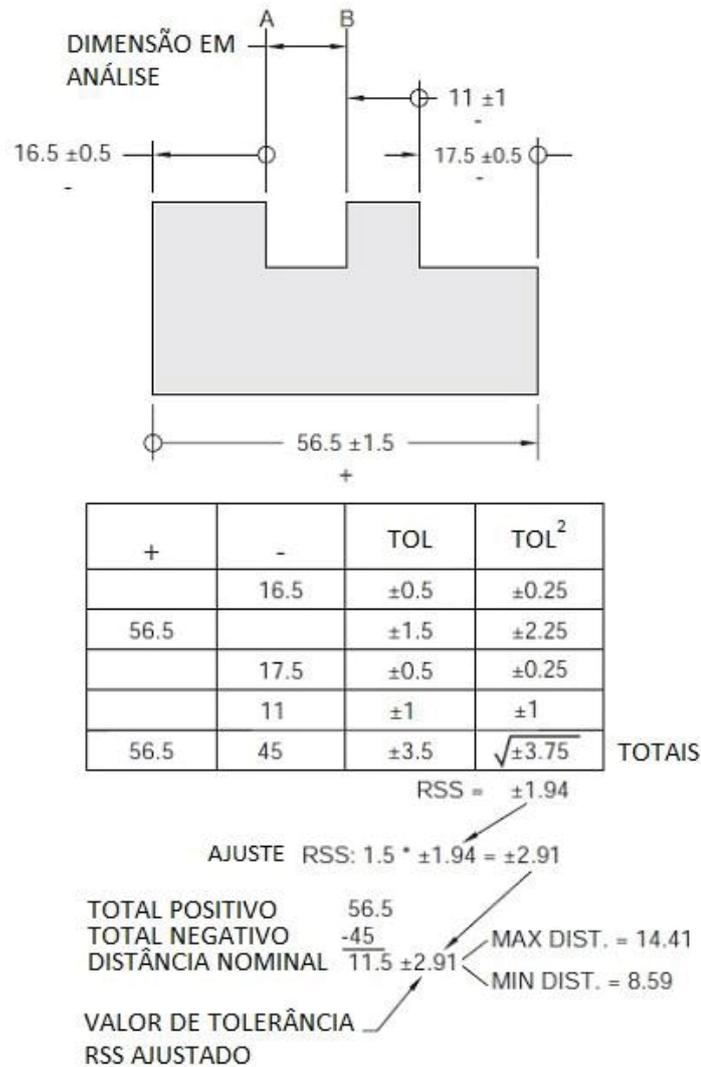
Sabe-se que em muitos processos utilizados nas indústrias o controle estatístico não é diretamente empregado. Desta forma, este é um dos motivos que levam ao uso de fatores de correção nos resultados obtidos em análises.

Seguindo a análise já exemplificada pelo método do pior caso, Fisher (2011) demonstra a utilização do método RSS e seus resultados, conforme Figura 20.

A forma inicial de abordagem para ambas as análises é a mesma. Sendo identificada a dimensão de interesse, são definidas as dimensões que possuem contribuição na cadeia dimensional. Cada uma delas é classificada como positiva ou negativa, de acordo com o sentido e sua origem.

O processo de conversão das dimensões e tolerâncias, indicado anteriormente pelo passo 6 da análise pelo pior caso, deverá ser efetuado novamente.

Figura 20 - Resultado da análise de tolerâncias pelo método RSS.



Fonte: Fisher (2011).

Entretanto, observa-se o acréscimo de uma coluna na matriz, chamada, na Figura 20, de TOL^2 . Esta coluna é elaborada a partir da Equação 1. Nesta são calculados os quadrados de cada tolerância e somados, extraindo-se sua raiz quadrada, correspondente ao valor $\pm 1,94$ mm.

Este é o valor obtido pelo método RSS. Quando comparado ao método pelo pior caso, o valor de tolerâncias obtido é significativamente mais baixo.

Comparado ao valor de $\pm 3,5$ mm, obtido pelo método do pior caso, pode-se, então, comprovar o conservadorismo excessivo antes adotado pelo método do pior caso.

Observa-se que o método é de relativa simplicidade. Porém, quando em sistemas de maior complexidade, ou mesmo em diferentes direções, o mesmo torna-se limitado e muitas vezes até obsoleto.

Entendendo que os métodos manuais possuem suas facilidades e limitações, surge então a abordagem para simulação de tolerâncias por Monte Carlo. Normalmente utilizado em simulações computacionais, mas também em planilhas como as geradas pelo *software* Microsoft Excel, o método de Monte Carlo consiste na atribuição de valores para as dimensões de uma análise, gerando uma iteração. Este processo é repetido milhares de vezes até que se atinja uma previsão estatística aceitável.

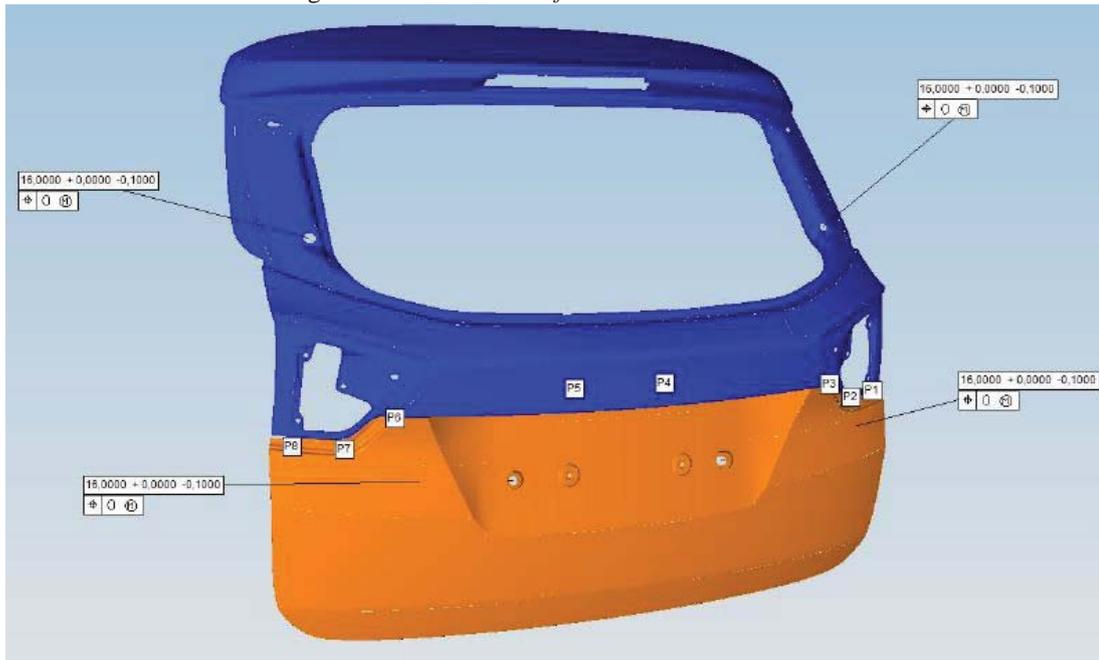
Dantan e Qureshi (2009) demonstram que este método de simulação usa perturbações randômicas (aleatórias) das dimensões das peças dentro das tolerâncias, para simular a população de uma montagem completa. Desta forma, as tolerâncias de montagens podem ser verificadas via programa de simulação de produção.

A simulação de Monte Carlo é um método popular para análise estatística das variações, mostrando, graficamente, como o processo funciona. A distribuição final é obtida em função das distribuições individuais de cada uma das variáveis envolvidas na montagem a ser analisada. A mesma é usada para calcular a porcentagem de rejeição da montagem dentro do lote, assim como o índice de capacidade do processo, a variância, a média e o desvio padrão (CAMARGO, 2010).

Alguns *softwares* podem ser utilizados para a realização de análises estatísticas em cadeias dimensionais. Como exemplo, tem-se o *software* CETOL 6 Sigma, citado por Fisher (2011) em sua obra, ou mesmo outros, tais como Siemens VisVSA e MITCalc, utilizados por Inanc (2012).

A Figura 21 apresenta um conjunto de peças do segmento automotivo, sendo analisadas por meio do *software* Siemens VisVSA. Pode ser observada a elevada complexidade envolvida na geometria dos componentes analisados. Tal condição leva a crer que resultados significativos, para essas análises, podem somente ser obtidos através de modelos computacionais e *softwares* estatísticos específicos, como no caso em questão.

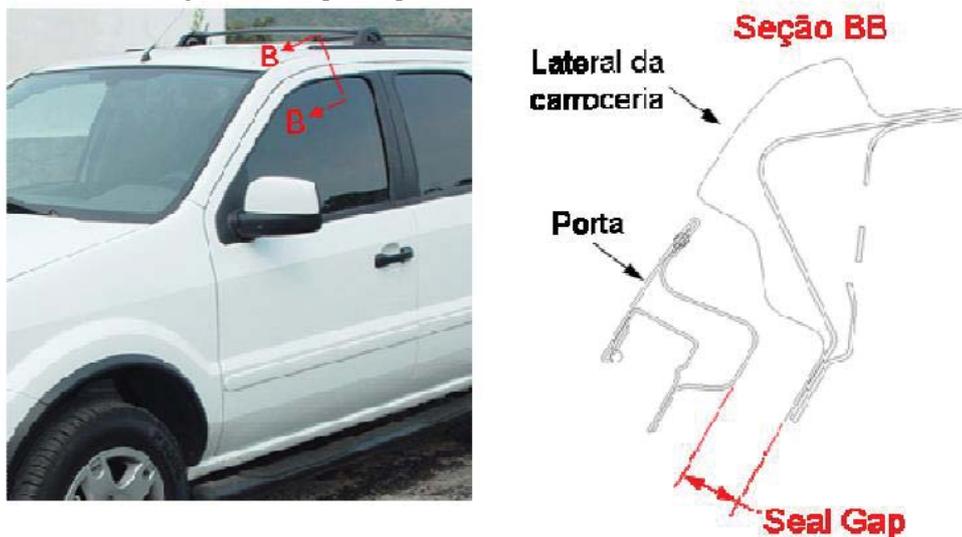
Figura 21 - Análise no *software* Siemens VisVSA.



Fonte: Inanc(2012).

A Figura 22 apresenta outra situação normalmente evidenciada por grandes empresas automobilísticas: a distância entre a porta e a carroceria do veículo. Esta condição é normalmente crítica, pois deve atender aos diversos requisitos, a saber, estéticos, funcionais, vedação e ruído.

Figura 22 - Requisito para análise de tolerâncias - Seal GAP.



Fonte: Cerqueira (2011).

2.4 Distorções no Processo de Soldagem

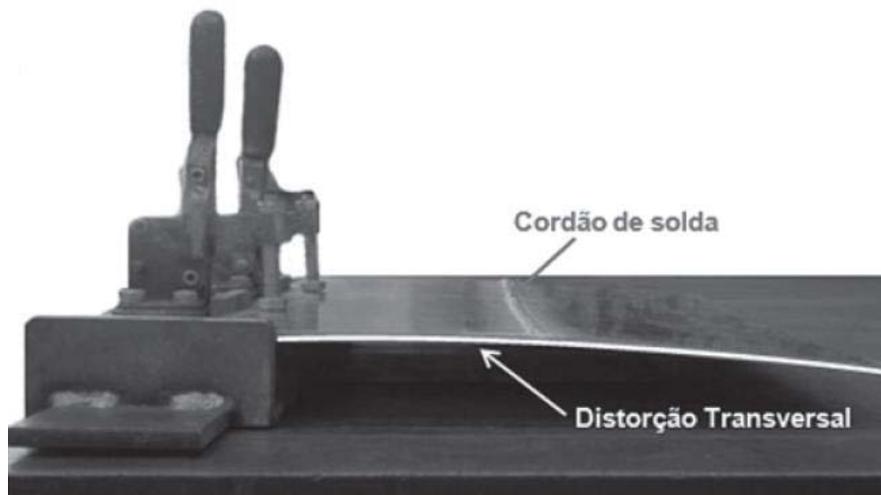
São notáveis as diferenças entre os produtos contidos nas linhas automobilística leve e pesada. Construídas sobre um chassi, as carrocerias de ônibus, foco do presente trabalho, são basicamente estabelecidas em uma estrutura de projeto com conjuntos e subconjuntos. Se comparada aos recentes automóveis, essa estrutura é demasiadamente complexa.

Esta condição, aliada ao uso em larga escala de processos de soldagem, traz grandes complicadores ao processo de manufatura, pois os processos de soldagem apresentam severas distorções aos componentes unidos.

Conforme Sulaiman *et al.* (2011), as distorções em peças soldadas ocorrem durante a contração e expansão não uniforme do metal de solda e metais adjacentes a este, causadas pelas complexas mudanças de temperaturas durante o processo de soldagem.

A Figura 23 demonstra a distorção apresentada no processo de união de chapas de alumínio pelo processo GMAW.

Figura 23 - Distorção após soldagem GMAW em chapas de Alumínio.



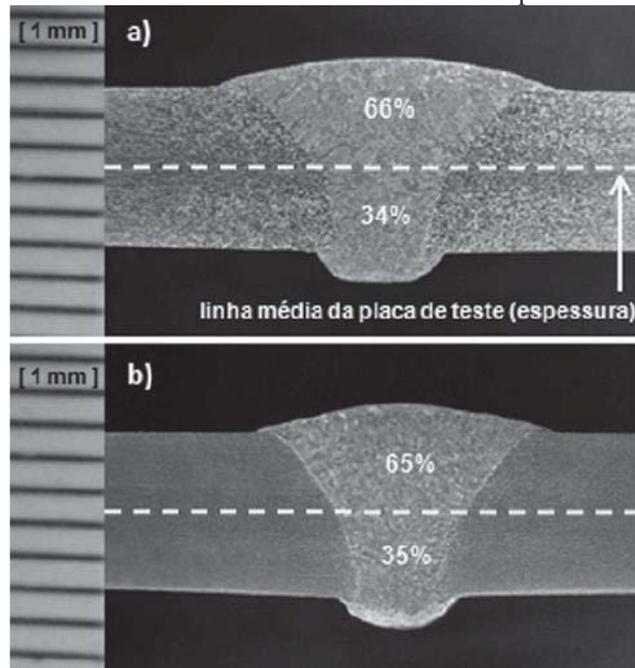
Fonte: Coraini, Kobayashi, Gonçalves (2011).

Existem diversos outros fatores relacionados a este fenômeno. Pode-se citar, como exemplos, o tipo de material utilizado no processo de soldagem, o material a ser unido pelo processo, a quantidade de energia utilizada, a espessura das chapas, entre outros. Contudo, não faz parte do contexto deste trabalho o estudo aprofundado dos princípios relacionados ao surgimento desse fenômeno.

2.4.1 Perfil do cordão de solda

Coraini, Kobayashi e Gonçalves (2011) apresentaram que o perfil do cordão de solda foi o fator determinante para as formas das distorções após o processo de soldagem das chapas apresentadas na Figura 23. Cordões de solda com perfis assimétricos resultaram em distorções significativas, conforme apresentado pelas macrografias realizadas. Figura 24.

Figura 24 - Perfil do cordão de solda na união de chapas de Alumínio.



Fonte: Coraini, Kobayashi, Gonçalves (2011).

Desta forma, entendendo-se que existe uma relação entre o perfil do cordão de solda e o aparecimento de distorções, pode-se concluir que o controle da distância entre chapas a serem soldadas é um fator crítico, já que o mesmo tem forte influência sobre a distribuição do perfil do cordão de solda.

O controle da distância entre peças, para fins de montagem, com ou sem o processo de soldagem, depende diretamente das questões dimensionais abordadas na seção 2.3 do presente trabalho, demonstrando, assim, a grande importância do atendimento das mesmas.

Sob outro ponto de vista, pode-se citar o uso destes conceitos na verificação das distorções dimensionais apresentadas. Tal tarefa pode ser efetuada com a realização de medições geométricas no produto final, auxiliada pelos projetos geometricamente dimensionados e tolerados. Entretanto, a realização de processos de inspeção somente após o

processo de soldagem poderá levar a análises não conclusivas sobre as possíveis causas das distorções.

2.4.2 ESI Weld Planner

Encontradas em grandes montagens, as distorções oriundas do processo de soldagem apresentam-se como uma dificuldade a ser contornada durante o processo de fabricação dos produtos. A existência de diversas variáveis relacionadas ao fenômeno torna essa tarefa onerosa.

Jackson e Darlington (2011) afirmam que as distorções finais são influenciadas pela rotina de fabricação, que pode ser resumida em seis etapas, conforme segue:

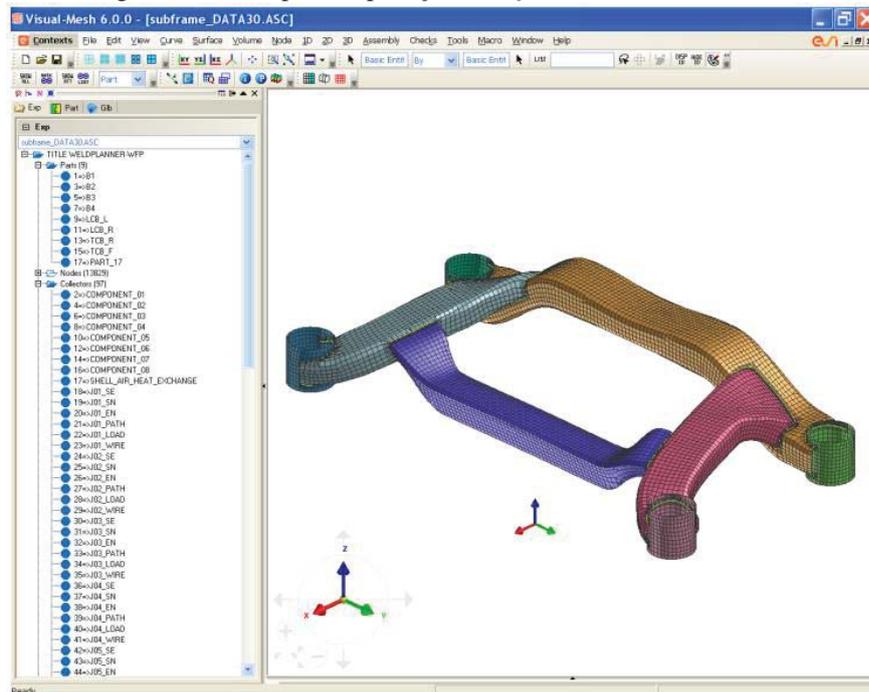
- Sequência de solda;
- Direção da soldagem;
- Projeto do dispositivo;
- Localização dos grampos de fixação;
- Sequência de acionamento dos grampos;
- Projeto do conjunto a ser montado.

De forma benéfica, os antigos modelos de simulação matemáticos evoluíram para *softwares* com alto potencial de solução para problemas de engenharia. Tal condição também se repetiu para os processos de soldagem.

Comercializado pela ESI Group, o *software* Weld Planner é apresentado como atual ferramenta para redução de distorções em conjuntos soldados. Com a aplicação dos conceitos de soldagem, juntamente com técnicas de simulação por meio de elementos finitos, é possível a otimização das variantes anteriormente descritas, reduzindo, assim, o somatório de distorções geradas pela soldagem.

A Figura 25 apresenta um exemplo de aplicação do *software* ESI Weld Planner.

Figura 25 - Exemplo de aplicação do *software* ESI Weld Planner.

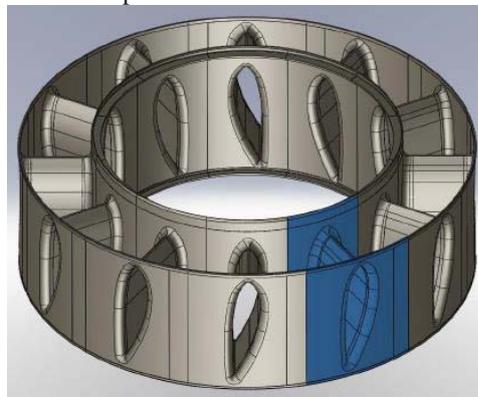


Fonte: <http://www.esigmbh.de/downloads/ESI/Dokumente/Welding/The%20Welding%20Simulation%20Solution%20-%20Benefit%20and%20Capabilities%20113010.pdf>

De forma geral, esse *software* utiliza-se de informações relacionadas ao material da junta soldada, juntamente com a geometria da mesma, objetivando quantificar o montante de distorções e as tensões residuais contidas no fenômeno simulado.

Objetivando a comparação entre os métodos de simulação e *softwares*, Jackson e Darlington (2011) obtiveram resultados significativos pelo uso do Weld Planner. A Figura 26 ilustra o rotor de palhetas, composto de 52 componentes, unidos por 64 soldas, objeto da obra dos autores citados.

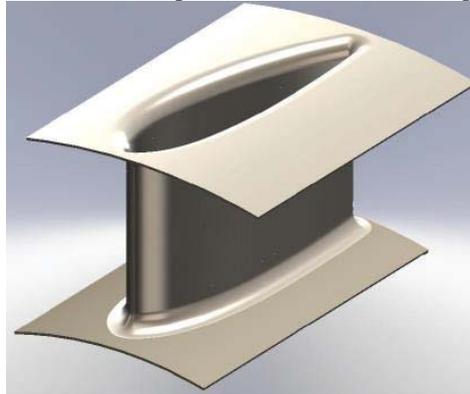
Figura 26 - Anel de palhetas utilizado na indústria aeroespacial.



Fonte: Jackson e Darlington (2011).

Já a Figura 27 apresenta um dos módulos que compõem a seção do anel de palhetas, conforme segue.

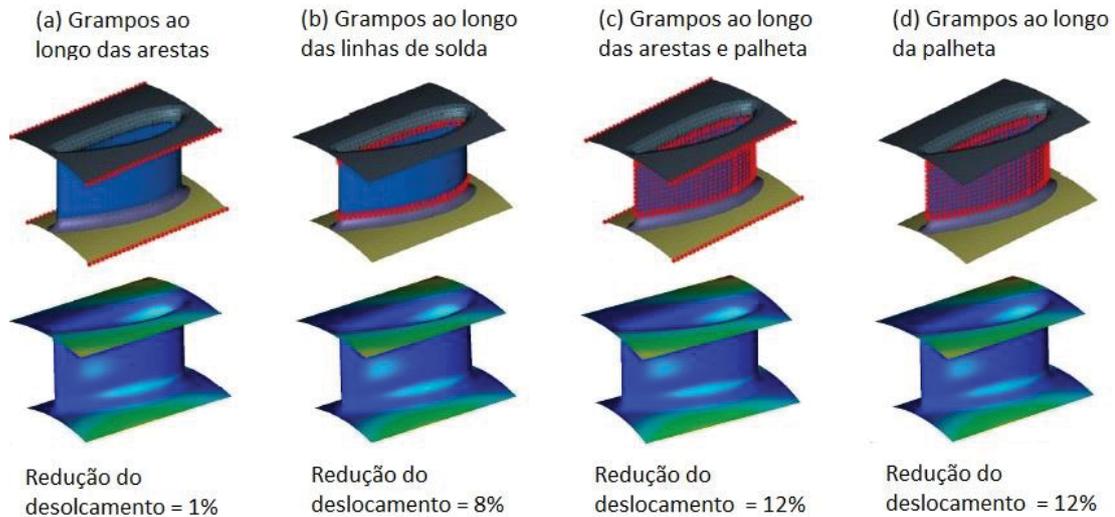
Figura 27 - Módulo palheta constituído de três peças,



Fonte: Jackson e Darlington (2011).

Utilizando variações no sistemas de fixação, Jackson e Darlington (2011) conseguiram reduções de até 12% no acúmulo de distorções do processo de soldagem dos módulos, demonstrado na Figura 28.

Figura 28 - Variação no sistema de fixação para soldagem dos módulos de palhetas.



Fonte: Adaptado de Jackson e Darlington (2011).

Apresentado o contexto referencial que envolve os conceitos e ferramentas necessárias para a concepção do método proposto, é então finalizado o alicerce teórico para desenvolvimento do trabalho. O capítulo 3 apresentará a utilização dos conceitos, objetivando a aplicação do método e ferramentas de gestão dimensional em uma empresa de carrocerias de ônibus.

3 MÉTODO DE TRABALHO

O presente capítulo apresentará o método de trabalho, proposto para a aplicação das ferramentas de gestão dimensional, em uma empresa de carrocerias de ônibus.

Serão abordados diferentes conceitos, conforme as necessidades apresentadas durante o desenvolvimento do trabalho. Também serão levados em consideração os pontos circunstanciais que cercam a implantação.

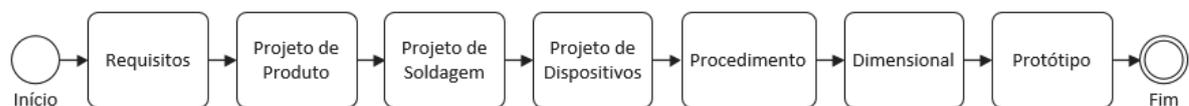
Inicialmente, também serão expostos e analisados os principais atores que constituem o sistema, os quais deverão participar, de forma colaborativa, na busca por produtos com bons níveis de qualidade.

O método respeitará a metodologia de desenvolvimento de produto já utilizada pela organização, sendo apresentadas, nas seções seguintes do presente trabalho, as limitações e possibilidades apresentadas por esta situação.

3.1 Etapas do Método

De forma geral, o método será contido em sete principais etapas do processo de desenvolvimento, conforme demonstra a Figura 29.

Figura 29 - Principais áreas de atuação do método.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Requisitos

Constituindo o primeiro passo para o desenvolvimento do método, a definição dos requisitos torna-se necessária para a correta especificação e funcionamento do produto. A

definição das tarefas a serem desenvolvidas e, posteriormente, a análise do grau de alcance das mesmas, dependem diretamente dessas informações.

Os requisitos deverão ser definidos e detalhados através de uma linha mestra. Sugere-se, para elaboração da mesma, a utilização dos conceitos apresentados pelos autores Pahl *et al.* (2005).

Conforme os autores, as áreas de desenvolvimento e projeto recebem suas tarefas de diferentes formas. Normalmente são incluídas nas entradas da informação, disposições sobre a funcionalidade do produto, *performance*, prazos e custos a serem mantidos.

O desafio imposto para as equipes, nesta etapa, se resume à identificação das informações relevantes, transformando-as em especificações quantitativas em uma lista de requisitos.

Como forma de abordar todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento de um produto, Pahl *et al.* (2005) apresentam dois métodos de complementação e ampliação dos requisitos. O trabalho seguindo uma linha mestra com uma lista das características principais, e a técnica do cenário.

A técnica do cenário baseia-se no desdobramento dos requisitos sobre o ciclo de vida de um produto. Já o método seguindo uma linha mestra é baseado na derivação de conhecimentos, relacionados aos pontos principais do projeto, sendo, desta forma, utilizado no presente desenvolvimento.

3.1.2 Projeto de Produto

Após definidos os requisitos a serem atendidos durante o desenvolvimento do produto, inicia-se a etapa de projeto do mesmo.

Entende-se que o desenvolvimento de um projeto de produto passa por definições conceituais, juntamente com diferentes tarefas, que buscam a concepção do produto e especificação do mesmo em um ciclo, sob o aspecto da Engenharia Simultânea.

Entretanto, as definições iniciais pertencentes a este ciclo obedecem a critérios pouco ligados à gestão dimensional de produtos, sendo, assim, desconsideradas da abordagem atual.

Desta forma, considerando o produto conceitualmente definido, são estabelecidas as diretrizes para o controle dimensional e geométrico do mesmo.

Ponderando os objetivos propostos, que buscam fornecer condições de análise e redução das distorções dimensionais do produto, torna-se imprescindível a utilização da linguagem geométrica de dimensionamento e uso de tolerâncias (GD&T).

Salienta-se que este processo deve ser realizado sob o aspecto da Engenharia Simultânea, envolvendo principalmente as áreas de Manufatura, Qualidade, Engenharia de Produto e Fornecedores.

3.1.3 Projeto de Soldagem

Apresentado em diversos conjuntos, que tem como finalidade compor a estrutura do produto, o processo de soldagem exige grande empenho das organizações e suas engenharias. Estas precisam especificar o processo de soldagem, visando ao controle das distorções oriundas do mesmo.

Para o controle das distorções no processo de união dos componentes, inicialmente deve-se obter o correto posicionamento e dimensionamento dos cordões do solda sob conjunto a ser soldado. Esta definição é efetuada e, posteriormente, registrada por meio do Plano de Solda do Produto (PSP), que deve ser construído utilizando-se dos conceitos demonstrados pelas normas da *American Welding Society A 2.4* (2012).

Torna-se importante salientar que, em circunstâncias iniciais, a distribuição e o dimensionamento dos cordões sobre a peça deverão seguir um padrão de simetria e equidistância. Estas definições visam à redução no fenômeno de distorção a ser posteriormente verificado nas etapas futuras do método.

Após definidas as dimensões e posições dos cordões de solda, faz-se necessária a definição do sequenciamento de soldagem dos mesmos. Este processo deve ser realizado através de simulações de soldagem no *software* ESI Weld Planner, tomando-se como base uma comparação analítica entre o valor das faixas de tolerâncias estipuladas no projeto e a possível distorção de solda a ser apresentada pelo conjunto. O registro destas informações deverá ser realizado através do documento denominado Sequenciamento de Soldagem (SQS).

O processo de simulação também deverá prover informações para o projeto do dispositivo e o procedimento operacional, pois o posicionamento dos grampos de fixação em uma peça e a sequência de acionamento dos mesmos influencia diretamente no montante de distorções dimensionais apresentadas.

Abaixo são listadas as principais etapas envolvidas no método de simulação utilizado:

- Importar o projeto do produto;
- Geração da malha em elementos finitos;
- Definição inicial de posição dos localizadores e fixadores do dispositivo;
- Definição da sequência de soldagem;
- Pré-Cálculo;
- Definição da pré-deformação;
- Cálculo iterativo;
- Resultados.

3.1.4 Projeto de Dispositivo

Quando considerada a utilização de dispositivos de produção no processo de desenvolvimento de produtos, estes tornam-se parte importante no processo de gestão dimensional.

Atuando como ferramenta na redução do montante de distorções dimensionais oriundas do processo de soldagem, o dispositivo deverá ser projetado obedecendo as características e informações definidas na simulação de soldagem. Posições e quantidades dos localizadores e fixadores de um dispositivo são algumas das informações vindas da simulação, contempladas nesta etapa.

Também deverá ser utilizada a linguagem GD&T para definição da estratégia de dimensionamento e zonas de tolerâncias permissíveis para os componentes do dispositivo, pois o mesmo também sofre variações em seu processo de fabricação. Quando em contato com a peça ou conjunto, estas variações poderão contribuir com o acúmulo das variações no conjunto final.

3.1.5 Procedimento

Visto o grande número de informações já definidas nas etapas anteriores a esta, torna-se imprescindível a utilização de procedimentos.

Estes têm como função a definição da forma como deverão ser operados todos os sistemas relacionados com o processo de desenvolvimento de produtos no ambiente de manufatura.

Sob o ponto de vista da gestão dimensional, dois aspectos devem ser considerados quanto à utilização dos procedimentos.

Inicialmente, torna-se importante que o Procedimento Operacional Padrão (POP), contemple as informações transmitidas pela simulação de soldagem. Toma-se como exemplo o acionamento dos grampos de fixação utilizados em um dispositivo. Mesmo que este seja projetado e construído, conforme as informações repassadas pela simulação de soldagem, a falta de acionamento de um dos grampos de fixação poderá acarretar em um fenômeno de distorção significativamente diferente do esperado pela simulação.

O segundo aspecto relaciona-se com o fenômeno do empilhamento de tolerâncias, que ocorre durante a montagem dos componentes. O procedimento deverá demonstrar, de forma clara, o sequenciamento das peças durante a construção do conjunto. Esta sequência irá garantir o controle sobre o acúmulo das variações e o conhecimento da cadeia dimensional envolvida no processo.

3.1.6 Dimensional

A presente etapa pode ser considerada como o alicerce da gestão dimensional do produto, uma vez que nela são realizados os estudos dimensionais, objetivando atingir bons projetos sob o aspecto dimensional.

A realização destes estudos deverá considerar todo o montante de informações geradas durante as etapas anteriores, na busca por um projeto robusto em um ambiente de qualidade *off-line*.

Este processo poderá ser executado manualmente ou por meio de *softwares* de simulação CAT. Utilizado pela empresa, toma-se como exemplo o *software* VisVSA.

O método de construção do modelo de simulação dimensional utilizando o *software* VisVSA é composto por etapas, conforme segue abaixo:

- Importar o projeto do produto;
- Determinar os referenciais de cada peça ou conjunto;
- Determinar as zonas e faixas de tolerâncias para cada elemento de cada peça ou conjunto;
- Definir as operações de montagem;
- Estabelecer as dimensões de interesse na análise;
- Cálculo iterativo;
- Resultados.

3.1.7 Protótipo

A etapa de Protótipo consiste, basicamente, na execução da metodologia, utilizando os documentos e ferramentas demonstradas pela mesma.

Devem ser verificados, nesta etapa, todos os conceitos previamente objetivados pelo método, visando à correta execução do mesmo no ambiente fabril.

É necessário, também, destacar-se nesta etapa as ações realizadas pelas áreas da qualidade, que tem por função a verificação e o uso de todos os documentos e ferramentas exigidas pelo método neste capítulo proposto.

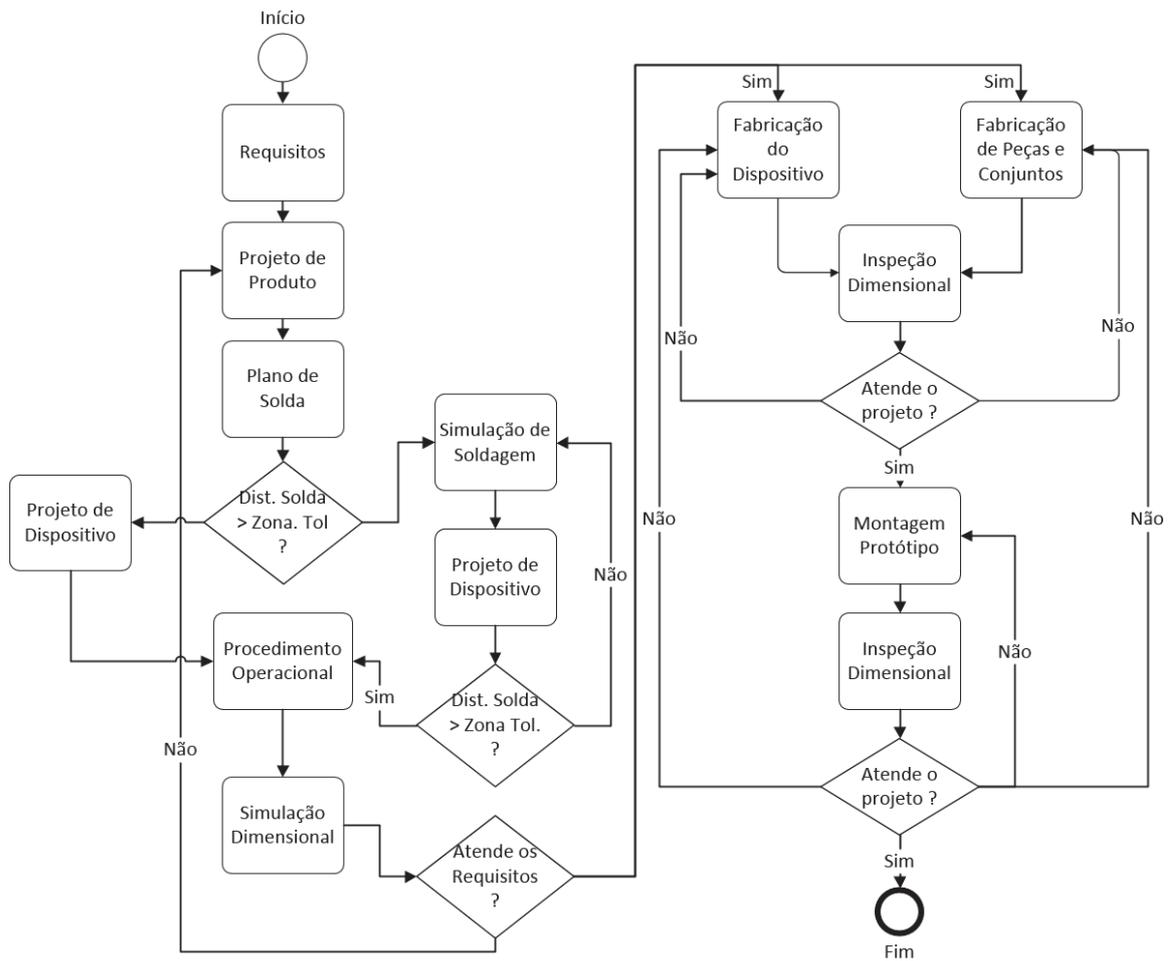
Cita-se como exemplo a inspeção dimensional das peças e conjuntos a serem utilizados. Estes devem estar em conformidade com as especificações de projeto, soldagem e procedimentos anteriormente definidos.

3.2 Método Proposto

Após demonstradas as principais fases atreladas ao método, faz-se necessária uma abordagem holística sobre o mesmo. Desta forma, a Figura 30 demonstra um fluxograma macro, contendo os principais pontos de tomada de decisões contidos no método.

É importante enfatizar que o fluxograma demonstrado não apresenta, em seu detalhamento, os ciclos ou fóruns impostos pela filosofia da Engenharia Simultânea. Entretanto, estes devem ser considerados durante a execução do processo.

Figura 30 - Fluxograma para desenvolvimento do método.



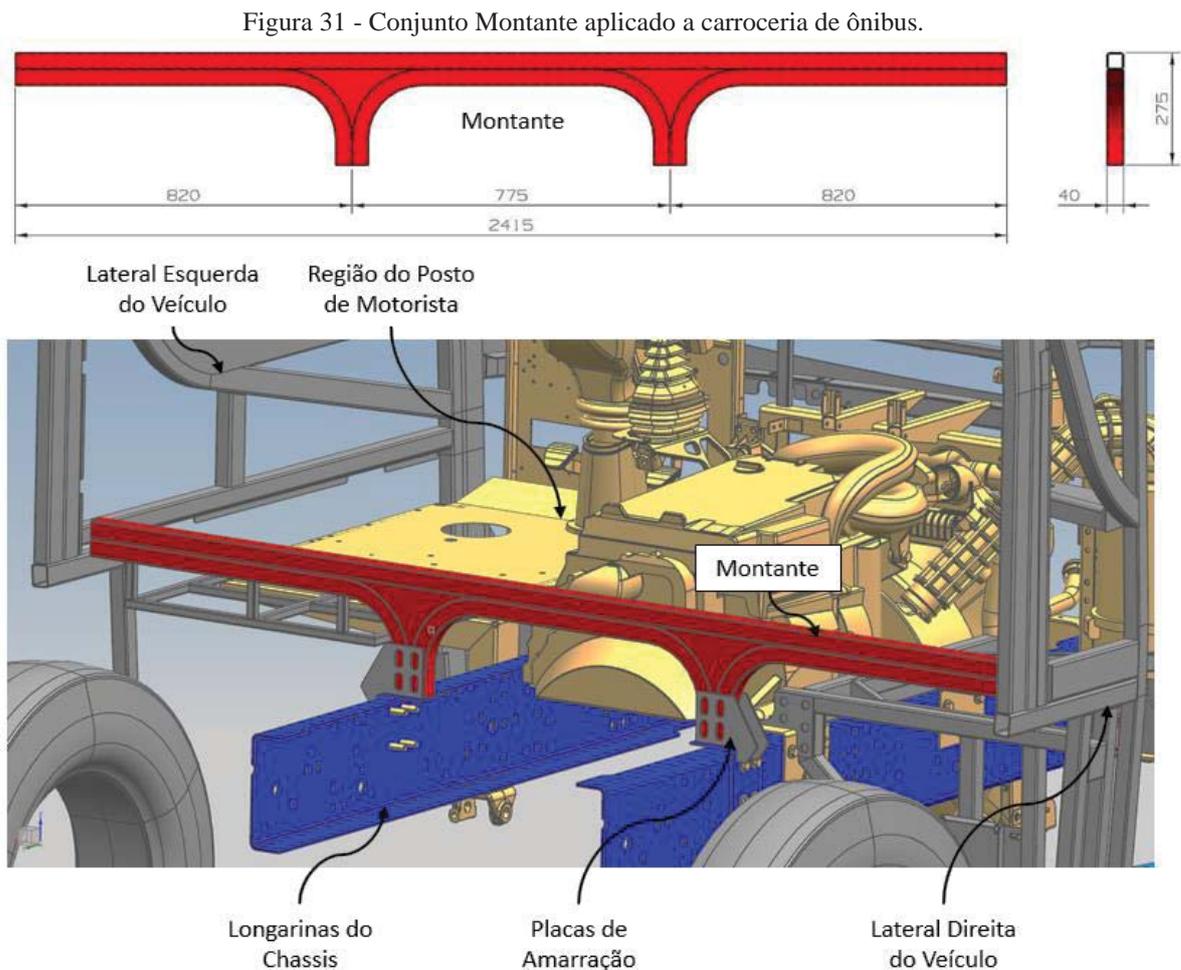
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 ESTUDO DE CASO

Considerando que o método aborda questões ligadas ao processo de soldagem de estruturas, dentro da esfera da gestão dimensional de produtos, o sistema estrutural adotado como objeto de estudo neste capítulo será o conjunto denominado de Montante.

Satisfazendo as condicionantes demonstradas pelo método, o conjunto Montante apresenta-se como um excelente objeto de estudo, visto que o mesmo deve possuir características dimensionais consistentes e necessita de diversos processos de manufatura para sua produção.

A Figura 31 apresenta, de forma esquemática, o Montante aplicado a carroceria, composto por tubos retangulares e chapas com diferentes espessuras, unidas entre si pelo processo de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O conjunto apresenta-se como um elemento de elevada criticidade. Como demonstra a Figura 31, o mesmo é responsável pela ligação estrutural entre a carroceria e o chassi do veículo, por meio de placas de amarração.

Este também possui suas características dimensionais afetadas por variações de diversas fontes, com ênfase nas variações dimensionais por processos de corte, dobra e soldagem, o que justifica a abordagem da gestão dimensional de produtos.

A Figura 32 apresenta o conjunto Montante sob o efeito das variações citadas anteriormente.

Figura 32 - Variações dimensionais do conjunto montante.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Pode-se perceber o efeito, gerado pelo acúmulo das variações no conjunto, pela saliente curvatura em sua parte superior. Este fenômeno acarreta severos retrabalhos durante o processo de manufatura, aumentando os custos e reduzindo a qualidade final do produto.

Montagens de componentes e peças de acabamento são diretamente afetadas pelas variações citadas. A Figura 33 demonstra, esquematicamente, a diversidade de montagens efetuadas sobre o conjunto Montante, salientando, assim, a necessidade da obtenção de um conjunto com relativa estabilidade dimensional.

Figura 33 - Degrau constituído Montante no interior do veículo.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Visualmente, pode-se inferir que o principal contribuinte para a grande variação apresentada no conjunto é o processo de soldagem. Fato decorrente da grande concentração e proximidade dos cordões de solda, nas torres de ligação verticais, conectadas ao chassi.

Esta região sofre um grande aporte de calor durante o processo de soldagem, gerando distorções dimensionais devido à contração proveniente do resfriamento. Entretanto, para o controle e conhecimento destas variações e suas fontes, todos os aspectos envolvidos no processo devem ser levados em consideração.

Desta forma, o conjunto montante apresenta-se suficientemente didático para aplicação do método, servindo como base para o presente estudo.

4.1 Requisitos do Projeto

Visto que o objetivo do presente trabalho circunda a esfera da gestão dimensional e que esta não se estende sobre todo o ciclo de vida de um produto, o método da linha mestra foi utilizado para a elaboração da lista de requisitos, de forma a focalizar os mesmos no contexto objetivado pelo trabalho.

A Tabela 2 apresenta a lista de requisitos para o conjunto Montante, conforme o método da linha mestra.

Tabela 2 - Lista de requisitos do conjunto Montante

		Lista de Requisitos				Folha/ Pag:	1/1
		Produto:	594320	Cliente:	Comil Ônibus S/A	Carroceria:	VR
Linha Mestre	Nº	E/D	Requisitos		Equipe Responsável		
Normas	1.0	E	Respeitar a dimensão de altura de degrau: Norma ABNT 15.570		Estrutural		
	Dimensional	2.0	E	Largura do conjunto deve possuir 2415,0 mm.			
2.1		E	Altura do conjunto deve possuir 275,0 mm.				
Montagem	3.0	E	Não deve possuir desvios na superfície adjacente a linha da base maiores que 2,5 mm.				
	3.1	E	Não deve possuir desvios nos espelhos frontal e posterior do conjunto maiores que 5 mm.				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, salienta-se que a definição da linha mestra foi baseada nos aspectos que se relacionam diretamente com a gestão dimensional de produtos. Entretanto, entende-se que para o desenvolvimento de produtos na sua abordagem geral, todos os aspectos devem ser considerados.

Os requisitos foram divididos em três diferentes campos. Normas, dimensional e Montagem.

Primeiramente é apresentado o requisito normativo relacionado à altura dos degraus no piso interno dos veículos, apresentado pela norma ABNT NBR 15.570 (2011). Este requisito relaciona-se com o conjunto Montante, visto que o mesmo faz parte do conjunto estrutural da carroceria. Desta forma o mesmo define a dimensão da altura do primeiro degrau de entrada, posicionado na parede divisória entre a cabine e o salão de passageiros.

Os requisitos dimensionais dividem-se em características a serem atendidas, resultantes de particularidades geométricas do produto (requisitos 2.0 e 2.1).

Já os requisitos relacionados a montagem (3.0 e 3.1) são caracterizados pela necessidade de uma montagem com boa aparência, visto que desvios nas superfícies do conjunto montante poderão resultar em um aspecto visual ruim ou mesmo dificultar a montagem das demais peças.

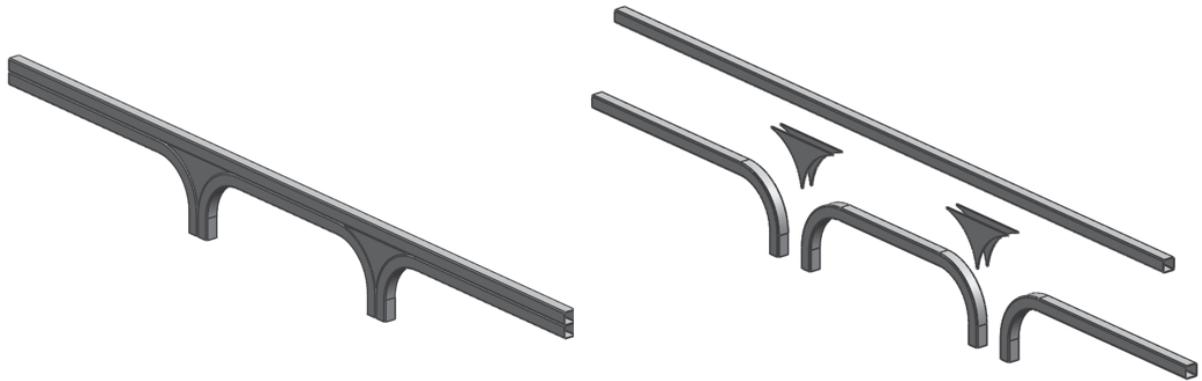
4.2 Projeto do Produto

O projeto do conjunto Montante foi desenvolvido seguindo os procedimentos e ferramentas utilizadas pela empresa.

A ferramenta de modelamento matemático utilizada para gerar a geometria das peças e posterior montagem virtual das mesmas foi o *software* UGS NX 7.5.

A Figura 34 demonstra o modelo tridimensional do conjunto Montante obtido por meio do *software* em sua condição de montagem (esq.) e em vista explodida (dir.).

Figura 34 - Modelo tridimensional do conjunto Montante.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Objetivando estabelecer e gerir com clareza as especificações dimensionais e geométricas do conjunto Montante, o modelo tridimensional apresentado pela Figura 38 foi detalhado bidimensionalmente, seguindo como referência a norma ASME 14.5Y (2009).

Ressalta-se que os requisitos apresentados anteriormente foram considerados durante a presente etapa, visando o alcance dos mesmos durante as etapas posteriores do método. Toma-se como exemplo o controle geométrico de Perfil de Superfície adotado para a face frontal do conjunto, que pode ser verificado no projeto de produto, pertencente ao Apêndice A deste trabalho.

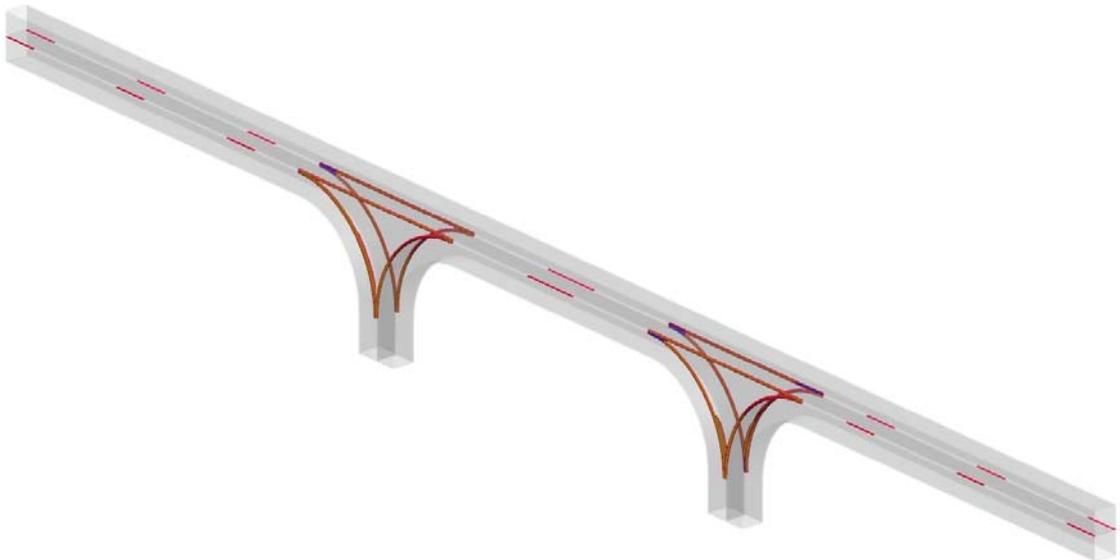
Delimitado por uma zona de tolerância com 4 mm, este tem por função demarcar os limites para os possíveis desvios geométricos da estrutura que, quando em conformidade, estará atendendo ao requisito de número 3.1 da lista de requisitos.

4.3 Plano de Solda do Produto

Conforme apresentado pelo método, o Plano de Solda do Produto deve especificar de forma clara e consistente a disposição dos cordões de solda sobre a peça ou conjunto a ser soldado. Desta maneira, o mesmo foi desenvolvido observando a necessidade construtiva apresentada pelo projeto de produto.

A distribuição dos cordões sobre a peça foi realizada de forma simétrica, visando à diminuição das distorções oriundas do processo de soldagem, conforme demonstra a Figura 35.

Figura 35 - Distribuição dos cordões no PSP do conjunto Montante.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

As dimensões e demais especificações relacionadas a soldagem podem ser consultadas no Plano de Solda do Produto, apresentado no Apêndice B deste documento.

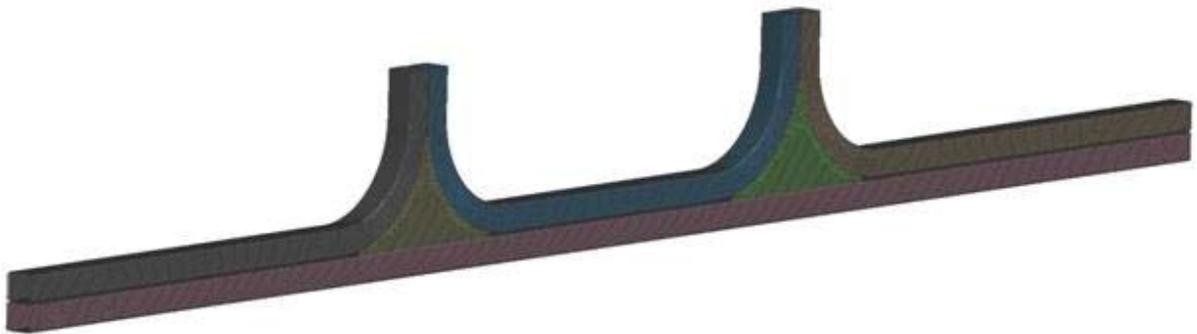
4.4 Simulação de Soldagem

A simulação de soldagem foi desenvolvida com a utilização do *software* ESI Weld Planner, sendo que a criação do modelo virtual foi realizada seguindo-se os passos e informações detalhadas no capítulo 2 deste trabalho.

Primeiramente, tomou-se como referência o modelo concebido por meio do *software* UGS NX 7.5, na etapa de projeto do produto. Este foi importado para geração da malha de elementos finitos, no *software* ESI Weld Planner.

A Figura 36 apresenta a malha de elementos finitos, obtida pela importação do modelo tridimensional. Salienta-se que o processo de geração da malha obedeceu a critérios de tamanho e refinamento dos elementos, conforme o objetivo do modelo virtual a ser simulado.

Figura 36 - Modelo de malha em elementos finitos do conjunto Montante.



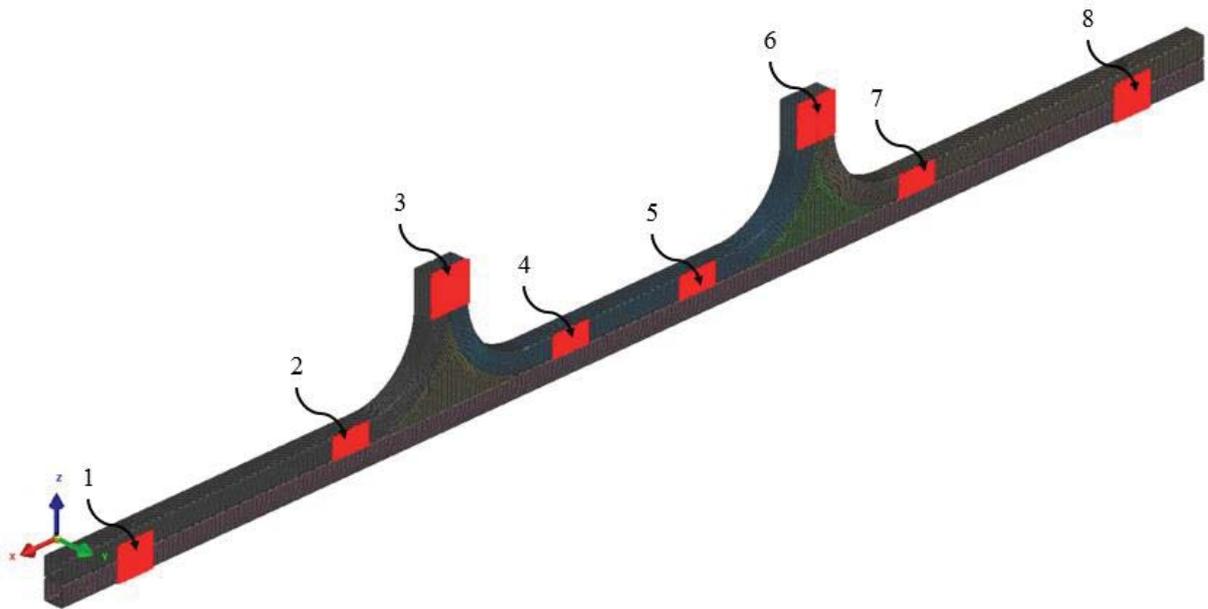
Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Após a composição da malha, foram definidos os pontos de localização das peças que compõem o conjunto, sobre o dispositivo de montagem do mesmo. Esta tarefa somente foi possível por meio da realização de fóruns envolvendo as áreas de projeto de dispositivos e produtos.

Foram amplamente considerados, nas discussões, assuntos como a melhor disposição dos pontos de localização das peças, visando à eliminação dos graus de liberdade das mesmas e minimização do acúmulo de variações. Aspectos ligados ao processo de soldagem, como a facilidade de acesso aos pontos de solda, também foram considerados.

A Figura 37 apresenta os pontos de localização das peças (1 a 8), definidos sobre o conjunto.

Figura 37 - Disposição dos pontos de localização das peças sobre o conjunto.

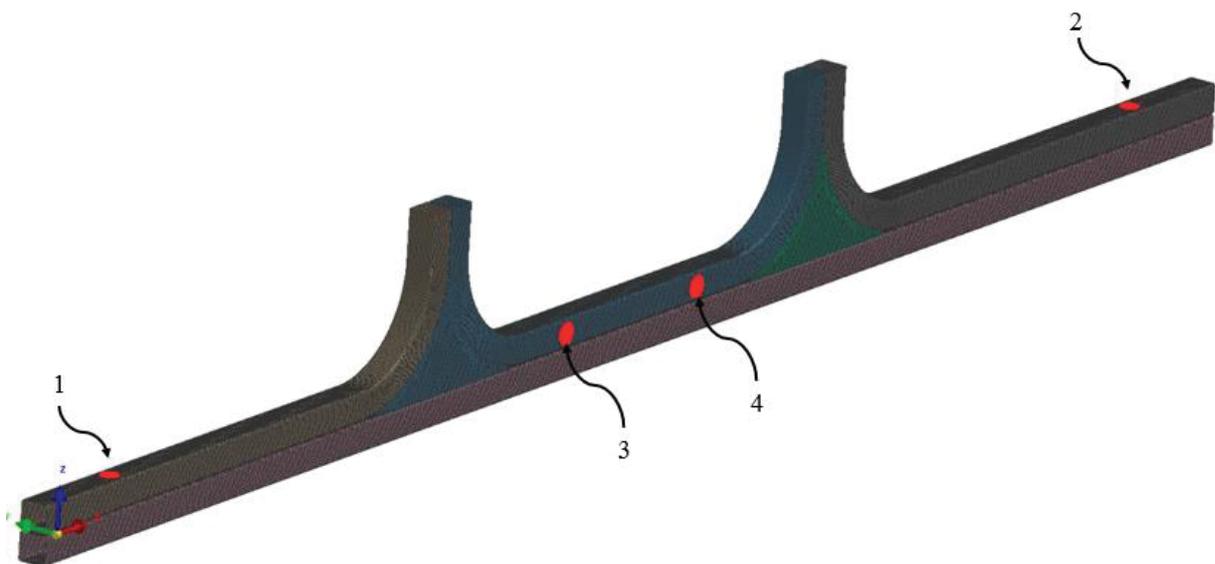


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Visando à total eliminação dos graus de liberdade, ainda não restringidos pelos localizadores já dispostos, foram acrescentados grampos de fixação manuais. Estes foram posicionados de forma estratégica o mais próximo possível dos localizadores, de maneira que fosse provida uma fixação robusta sem o uso de grampos em excesso.

A Figura 38 apresenta os pontos de fixação das peças (1, 2, 3 e 4), definidos sobre o conjunto.

Figura 38 - Disposição dos pontos de fixação das peças sobre o conjunto.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Considerando as peças devidamente localizadas e fixadas, pode-se definir a sequência de soldagem a ser aplicada sobre os componentes. Este processo foi realizado por meio de iterações que tinham como objetivo atingir a menor distorção de soldagem. A sequência definida pode ser demonstrada no Sequenciamento de Soldagem (SQS), disponível no Apêndice C do presente trabalho.

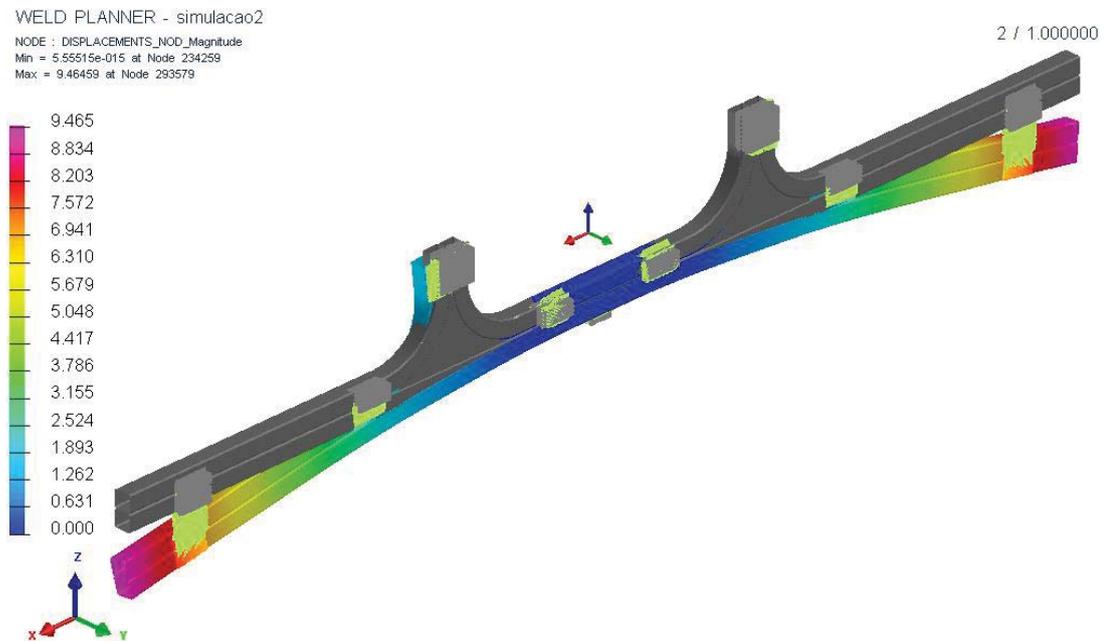
Com o modelo virtual contextualizado, iniciou-se a etapa de pré-cálculo, que visou ao entendimento inicial sobre o fenômeno de distorção a ser estudado.

Iterativamente, foram aplicados diversos conceitos de localização e fixação das peças, juntamente com sequências de soldagem alternativas, que resultaram em um fenômeno de distorção dimensional relativamente significativo.

Desta forma, optou-se pela aplicação do recurso de pré-deformação do modelo, visando à redução das distorções encontradas no final do processo. Este método de trabalho consistiu na aplicação de uma deformação inversa ao sentido da deformação encontrada no processo de soldagem.

A Figura 39 demonstra o modelo com aplicação de 15 vezes, pré-deformado em aproximadamente 8 mm na direção da distorção em sentido contrário.

Figura 39 - Pré-deformação aplicada de 8 mm.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

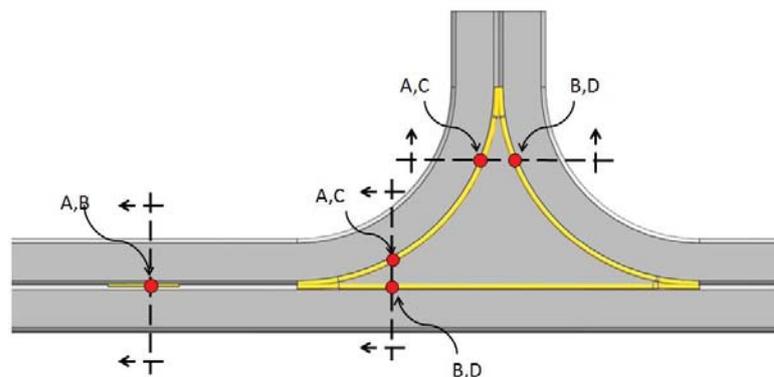
Assim, com a utilização da pré-deformação, a distorção dimensional foi sensivelmente minimizada.

Ressalta-se que, visando à confiabilidade dos resultados obtidos, foram necessários ensaios para levantamento de informações relacionadas ao material base das peças e o tamanho dos cordões de solda a serem efetuados nas mesmas.

Estes ensaios foram realizados e consistiram em um ensaio de tração do material base, para obtenção da curva de tensão x deformação (Figura 42), juntamente com análises macrográficas dos cordões de solda, visando à determinação do tamanho dos mesmos.

A Figura 40 demonstra como foram realizados os cortes para a retirada das amostras do ensaio macrográfico.

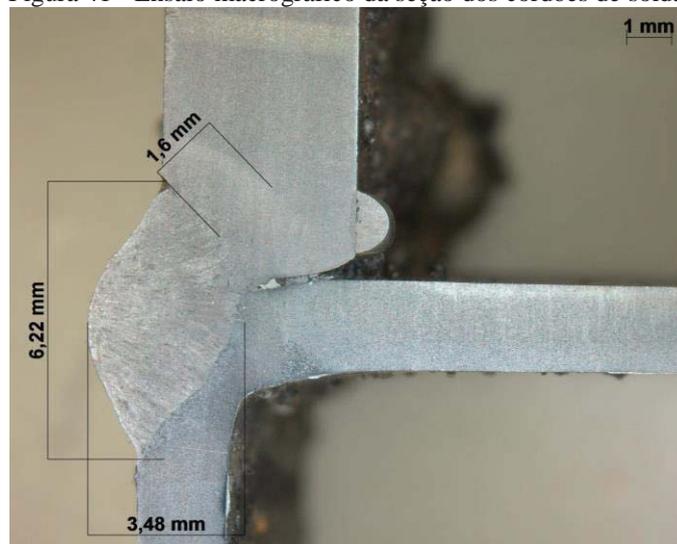
Figura 40 - Esquema de posicionamento dos cortes.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

A Figura 41, por sua vez, apresenta o resultado gerado pelo ensaio em uma das seções realizadas. Evidenciam-se, por meio da imagem, as principais dimensões do cordão de solda, largura e profundidade. Também é demonstrado o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA).

Figura 41 - Ensaio macrográfico da seção dos cordões de solda.

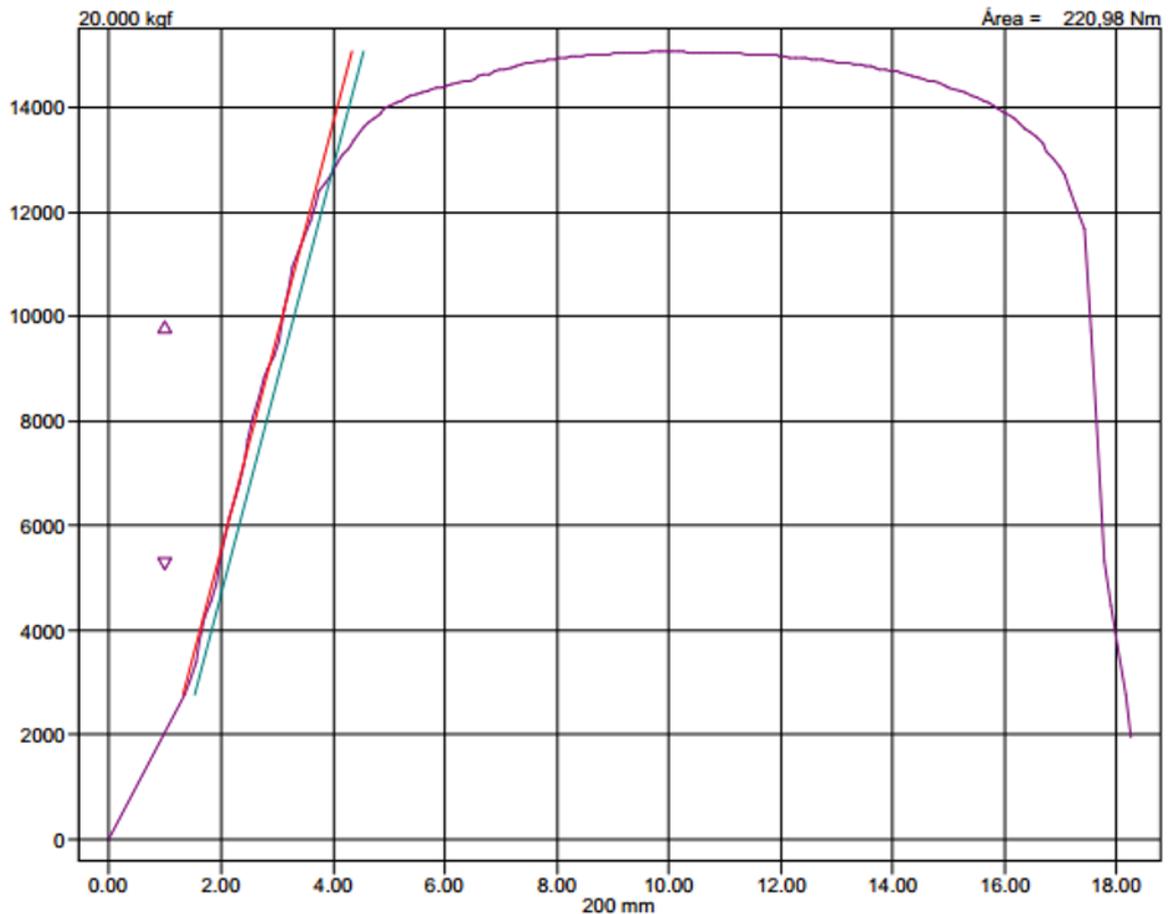


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Já a Figura 42 apresenta o gráfico de tensão x deformação obtido pelo ensaio.

Figura 42 - Curva tensão x deformação.

CARGA MÁXIMA: 15303,37 N	TENSÃO MÁXIMA: 386,45 N/mm²	CARGA DE ESCOAMENTO: 12978,45 N	TENSÃO DE ESCOAMENTO: 327,739 N/mm²
COMPRIMENTO INICIAL L ₀ : 84,60 mm	COMPRIMENTO FINAL: 97,30 mm	ALONGAMENTO FINAL : 15,01 %	MÓDULO DE YOUNG: 0,00 Kg
ALONGAMENTO ELÁSTICO: 12,53 %	RAZÃO ELÁSTICA: 1,179	TEMPERATURA: -.- °C	ESTRICAÇÃO: 60,278 %



Fonte: Elaborado pelo autor.

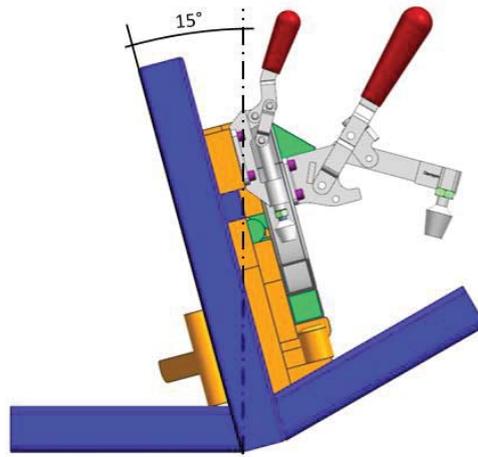
4.5 Projeto de Dispositivos

De maneira similar à etapa de Projeto do Produto, o desenvolvimento do Projeto do Dispositivo também se utilizou do *software* UGS NX 7.5. Entretanto, para a elaboração deste, foram considerados diversos outros fatores, ligados diretamente a funcionalidade e operação agora exigidos para o mesmo.

Primeiramente, foram consideradas características relacionadas a localização e fixação das peças a serem soldadas, seguindo, basicamente, as definições vindas da etapa de simulação de soldagem.

Ressalta-se que a eliminação dos graus de liberdade das peças, que visou à redução de variações no conjunto e a conformidade com as tolerâncias, foi possível com a combinação de forças gravitacionais, juntamente com o conjunto de localizadores e fixadores, orientados em um ângulo de 15° com a vertical, conforme apresenta a Figura 43.

Figura 43 - Orientação do dispositivo favorecendo a localização dos componentes.

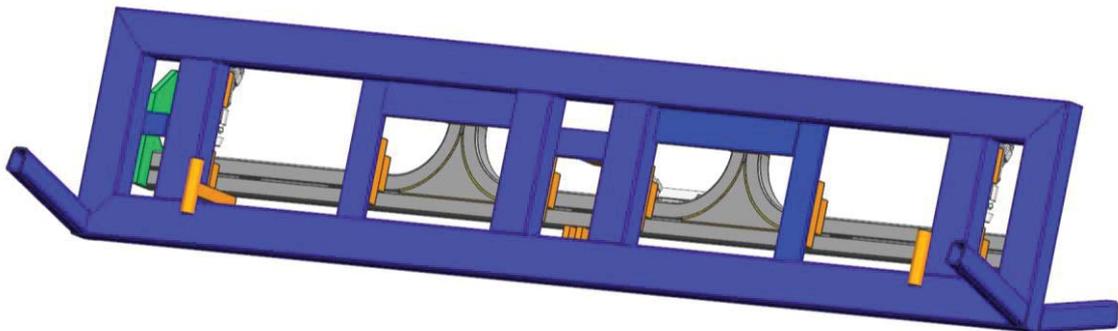


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Também é possível observar, na Figura 43, a condição operacional estabelecida para o dispositivo. Este pode ser rotacionado alternando o contato entre os apoios laterais sobre a bancada utilizada para soldagem, facilitando, assim, a execução dos cordões na face posterior da peça, conforme determinado no Sequenciamento de Soldagem.

A Figura 44 demonstra o dispositivo rotacionado e os acessos de solda, considerados e em projeto.

Figura 44 - Acessos para o processo de soldagem da face posterior.

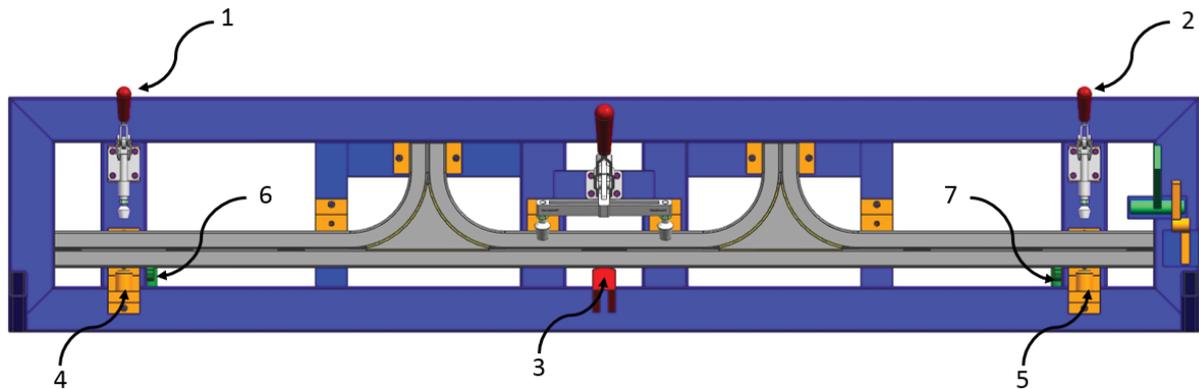


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Vista a necessidade de pré-deformação dos elementos, evidenciada por meio da etapa de simulação de soldagem, o dispositivo teve seu projeto gerado com a capacidade de pré-deformar o conjunto em 8 mm, conforme determinado pela simulação de soldagem.

Este processo foi possível com a utilização de localizadores fixos (3, 4 e 5) e móveis (6 e 7), juntamente com fixadores manuais (1 e 2), que possuem a função de aplicar as forças, resultando na pré-deformação estimada. A Figura 45 demonstra os localizadores e fixadores posicionados para esta condição.

Figura 45 - Posição dos localizadores e fixadores para pré-deformação.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Torna-se importante salientar que o dispositivo teve seu projeto detalhado seguindo os conceitos dimensionais e geométricos já estabelecidos pelo Projeto do Produto.

Referências geométricas e as tolerâncias dos localizadores foram definidas visando a minimizar o acúmulo de variações no conjunto, juntamente com as questões de manufatura implícitas no processo de produção do mesmo.

O projeto do dispositivo encontra-se no Apêndice D do presente trabalho.

4.6 Procedimento Operacional Padrão

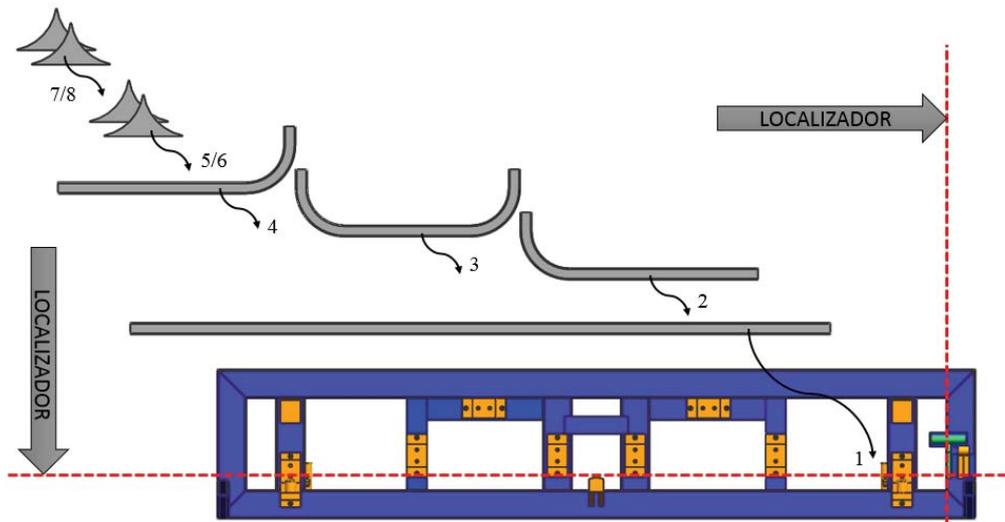
Seguindo o método detalhado no capítulo 3, o Procedimento Operacional Padrão (POP) teve-se a detalhar, de forma sistêmica, as ações necessárias para a correta operação do dispositivo.

Alguns aspectos foram priorizados na concepção do procedimento apresentado, vista a necessidade de um maior controle sobre os mesmos. Toma-se como exemplo o processo de

pré-deformação das peças antes da soldagem e o correto posicionamento das mesmas sobre o dispositivo.

A Figura 46 demonstra um esquema de montagem das peças sobre o dispositivo, indicando a necessidade de movimentação das mesmas na direção dos localizadores. A numeração indica a ordem de montagem dos componentes.

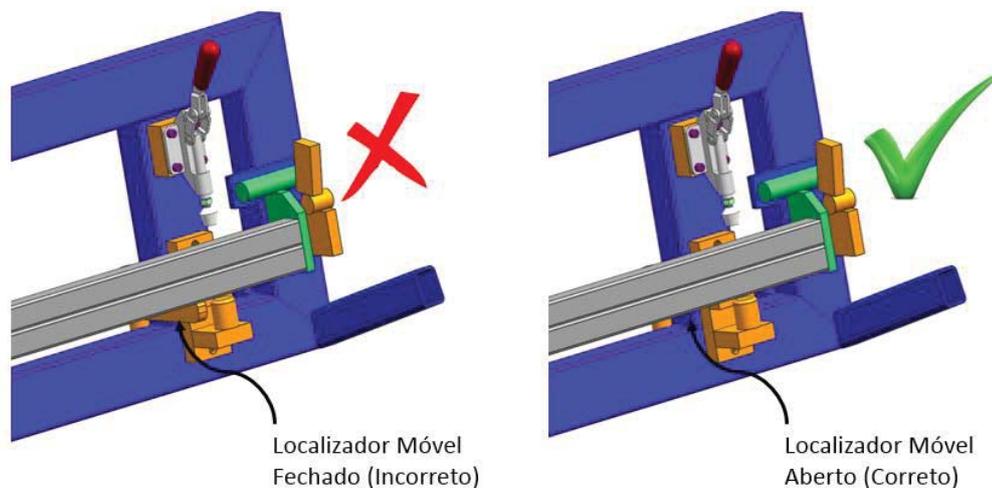
Figura 46 - Esquema de montagem do conjunto sobre o dispositivo.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

A Figura 47 apresenta o processo de remoção dos localizadores móveis, utilizados para o correto posicionamento das peças antes da pré-deformação. Os mesmos devem ser removidos antes do acionamento dos grampos de fixação, caso contrário o conjunto não sofrerá a pré-deformação.

Figura 47 - Posicionamento dos localizadores móveis antes da pré-deformação.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

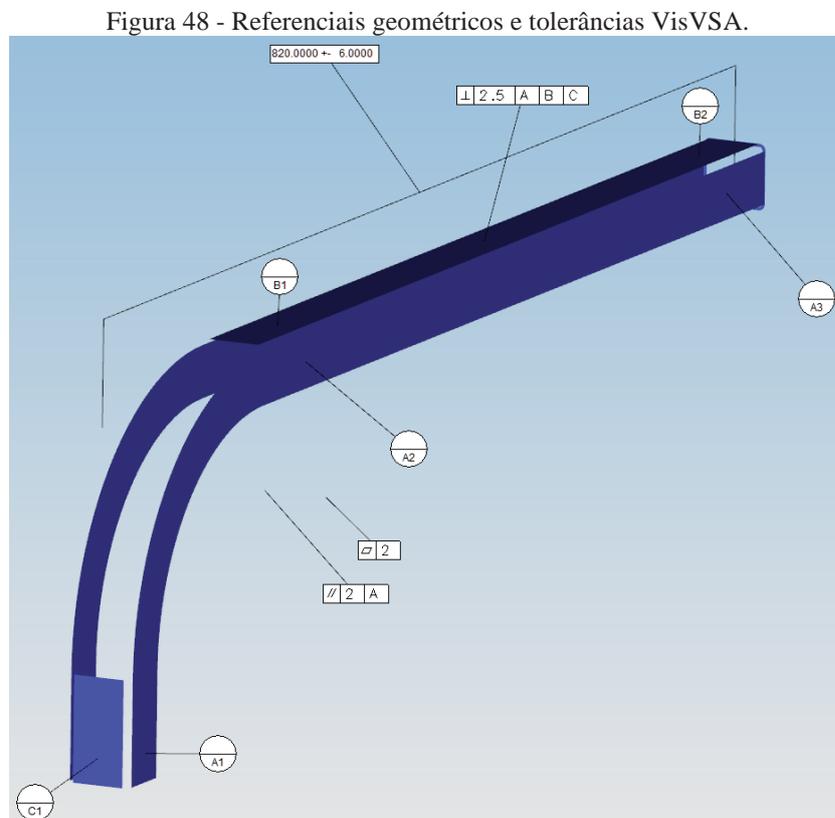
O Procedimento Operacional Padrão completo pode ser visualizado no Apêndice E do presente trabalho.

4.7 Simulação Dimensional

A simulação dimensional do produto foi realizada com auxílio do *software* VisVSA, seguindo os passos já demonstrados no capítulo 3 do presente trabalho.

Após a importação do modelo 3D obtido pelo *software* UGS NX 7.5, foram definidos todos os referenciais e tolerâncias, de cada peça ou conjunto envolvido na montagem do Montante. Para realização desta tarefa, foi determinante a utilização do projeto do produto, que representa claramente, por meio de sua linguagem, tais elementos.

A Figura 48 apresenta um exemplo dos referenciais geométricos e tolerâncias de uma das peças pertencentes ao conjunto, no *software* VisVsa. O projeto completo encontra-se detalhado no apêndice A do presente trabalho.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa

De acordo com o capítulo 2 do presente trabalho, é de grande importância, para o processo de análise de tolerâncias, a definição do sequenciamento de montagem que irá compor o conjunto.

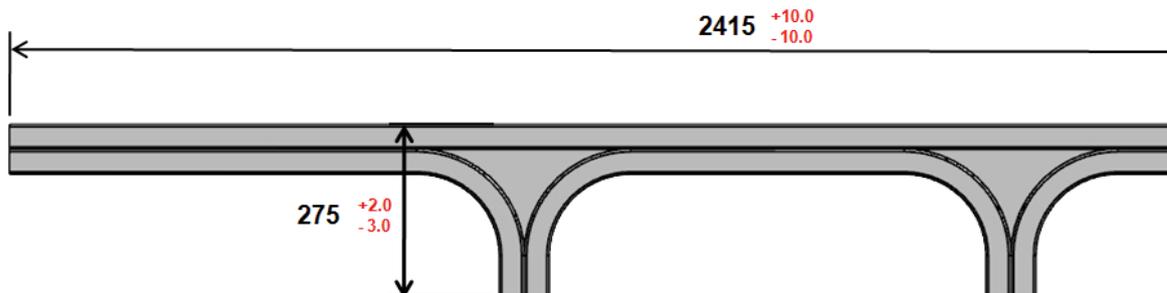
Assim, para a presente simulação, o Procedimento Operacional Padrão foi utilizado. Dessa forma, puderam ser definidas as operações de montagem, que delimitaram, no *software* VisVSA, as formas e condições de relacionamento entre as peças.

Este processo baseou-se na eliminação dos graus de liberdade de cada peça, informando ao *software* as superfícies que se tocam em uma sequência, definida pelo Procedimento Operacional Padrão.

Por fim, foram determinadas dimensões de interesse no modelo. Estas dimensões foram baseadas nos requisitos dimensionais 2.1 e 2.2, previamente estabelecidos para o presente estudo, na Tabela 2.

A Figura 49 apresenta as dimensões detalhadas no projeto do produto, sendo elas a largura de 2415 mm e a altura de 275 mm, ambas com suas respectivas tolerâncias.

Figura 49 - Dimensões de interesse apresentadas no projeto.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Dessa forma, foi possível simular a real condição de montagem das peças que, relacionadas entre si, apresentaram o resultado das possíveis variações do conjunto final.

4.8 Protótipo

Conforme já apresentado pelo capítulo 3, a presente etapa considera a fabricação e inspeção dimensional de todos os componentes necessários para o método, utilizando-se das informações geradas nas etapas anteriores do mesmo.

4.8.1 Fabricação dos Componentes

Com a escolha do produto conjunto Montante como foco do presente estudo, foram produzidas as peças referentes ao mesmo na unidade fabril da empresa.

Para obtenção de uma análise consistente, foram considerados, para o estudo, 20 conjuntos, sendo os mesmos manufacturados de acordo com capacidade e padrões da empresa.

A Figura 50 demonstra as peças produzidas para o estudo.

Figura 50 - Peças produzidas.

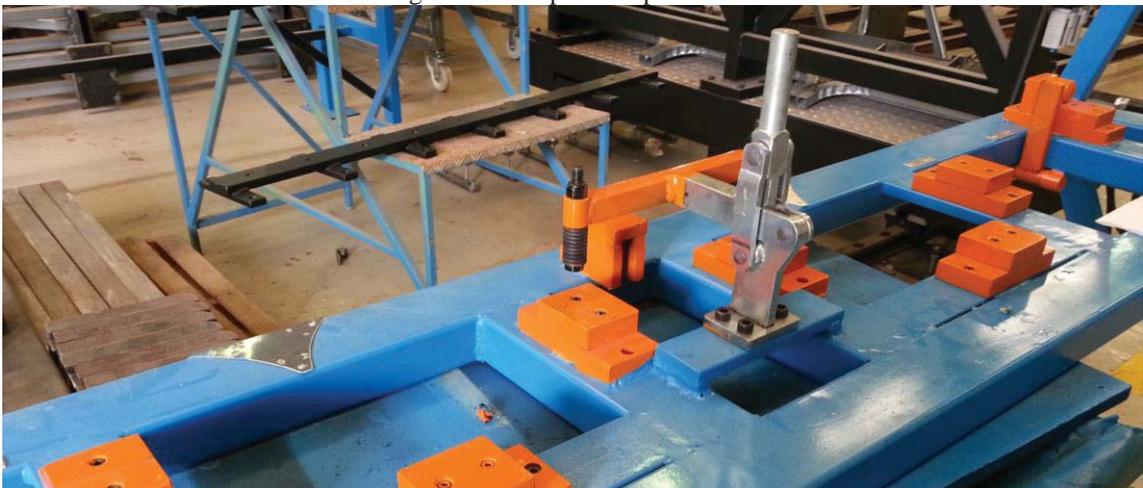


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Da mesma forma, o dispositivo anteriormente projetado foi também fabricado na unidade da empresa fabricante de carrocerias de ônibus.

A Figura 51 demonstra o dispositivo após seu processo de fabricação finalizado.

Figura 51 - Dispositivo produzido.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

4.8.2 Inspeção Dimensional dos Componentes

Visando à validação dos componentes necessários ao método, os mesmos foram inspecionados dimensionalmente através de recursos distintos.

Devido ao elevado número de componentes e à complexidade exigida pelos projetos que os compunham, as peças pertencentes ao conjunto Montante foram inspecionadas utilizando-se de uma tridimensional CNC Zeiss Prismo 10.

Contudo, a validação do dispositivo a ser utilizado no processo de produção dos conjuntos ocorreu por meio da utilização do braço de medição 3D portátil FARO EDGE, integrado ao *software* Polyworks.

A Figura 52 apresenta o equipamento utilizado para inspeção dimensional do dispositivo.

Figura 52 - Braço de Medição 3D Portátil FARO EDGE.

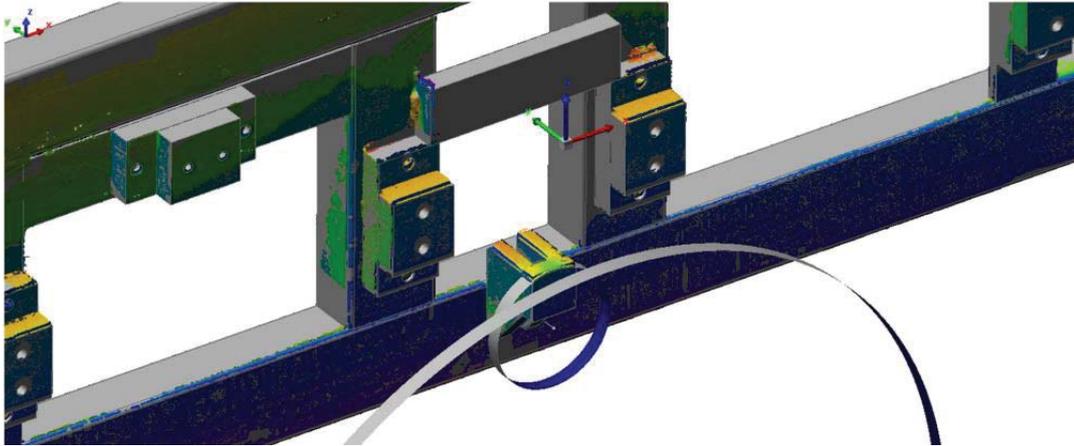


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

O processo de inspeção ocorreu baseado na comparação do modelo tridimensional obtido por meio do *software* UGS NX 7.5 com a nuvem de pontos, obtida por meio do uso do *scanner* acoplado ao braço de medição tridimensional.

A Figura 53 demonstra a nuvem de pontos (em cores) alinhada ao modelo CAD (cinza) utilizado como referência no *software* Polyworks.

Figura 53 - Comparação da nuvem de pontos com o modelo 3D CAD.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

4.8.3 Processo de fabricação do Conjunto Montante

A etapa de fabricação do conjunto Montante apresentou-se como o auge do método, neste capítulo aplicado, visto que foram utilizados os conceitos anteriormente definidos pelo método, podendo ser, depois de demonstrados de forma qualitativa, os possíveis avanços obtidos com o mesmo.

Levando em consideração as peças inspecionadas, juntamente com o dispositivo a ser utilizado, iniciou-se o processo de soldagem dos conjuntos sobre o dispositivo.

Foram escolhidos os parâmetros de soldagem e equipamentos de solda, de acordo com os já utilizados pela organização nos processos de produção atuais.

Para execução do processo, foram necessários os documentos que definiam o Sequenciamento de Soldagem (SQS) e o Procedimento Operacional Padrão (POP).

A Figura 54 demonstra o processo de soldagem dos conjuntos.

Figura 54 - Processo de soldagem dos conjuntos sobre o dispositivo.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

4.8.4 Inspeção Dimensional dos Conjuntos

Após realizado o processo de soldagem dos componentes, pôde-se realizar o processo de inspeção dimensional final dos mesmos, que visou à identificação dos desvios geométricos, resultantes dos processos de produção atribuídos. O equipamento utilizado foi o braço de medição portátil, já apresentado neste capítulo.

A Figura 55 demonstra a inspeção de um dos conjuntos.

Figura 55 - Processo de inspeção dimensional do conjunto Montante.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Salienta-se que o processo ocorreu de forma semelhante à inspeção realizada no dispositivo de produção. Foram comparados, por meio do *software* Polyworks, os dados obtidos pelo *scanner* com o modelo nominal projetado no *software* UGS NX 7.5.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentados, seguindo a cronologia dos mesmos, todos os resultados obtidos com o estudo de caso demonstrado no capítulo 4.

5.1 Resultados Dimensionais dos Componentes

Inicialmente serão apresentados os resultados da inspeção dimensional das peças, realizada na Universidade de Passo Fundo.

Objetivando demonstrar com clareza tais resultados, foram realizadas análises de capacidade das medidas coletadas, identificando assim os índices de C_p e C_{pk} atribuídos a cada uma.

A Tabela 3 apresenta o resumo da análise de capacidade realizada.

Tabela 3 - Índices de capacidade dos componentes

PEÇA	CARACT.	TOL. (+/-)	CP	CPK
Tubo Curvo Lateral	Cota 820	6,0	0,97	0,94
	Cota 235	2,0	1,05	0,74
	Planicidade 1,0 (A)	1,0	0,98	0,75
	Perpendicularidade 1,0 (B)	1,3	2,67	2,34
	Paralelismo 1,0	1,0	1,13	1,06
Tubo Curvo Central	Cota 235	4	1,34	1,16
	Planicidade 1,0 (A)	0,75	0,68	0,57
	Perpendicularidade 1,0 (B)	0,75	0,52	0,41
	Perpendicularidade 1,0	0,5	0,51	0,50
	Paralelismo 1,0	0,75	0,95	-0,05
Tubo Reto	Perpendicularidade 1,0	0,5	0,51	0,18
	Paralelismo 1,0	1,0	1,41	1,33
	Perpendicularidade 1,0 (B)	0,5	0,89	0,57
	Planicidade 1,0 (A)	1,0	8,98	0,60
	Perpendicularidade 1,0	0,5	1,10	0,73

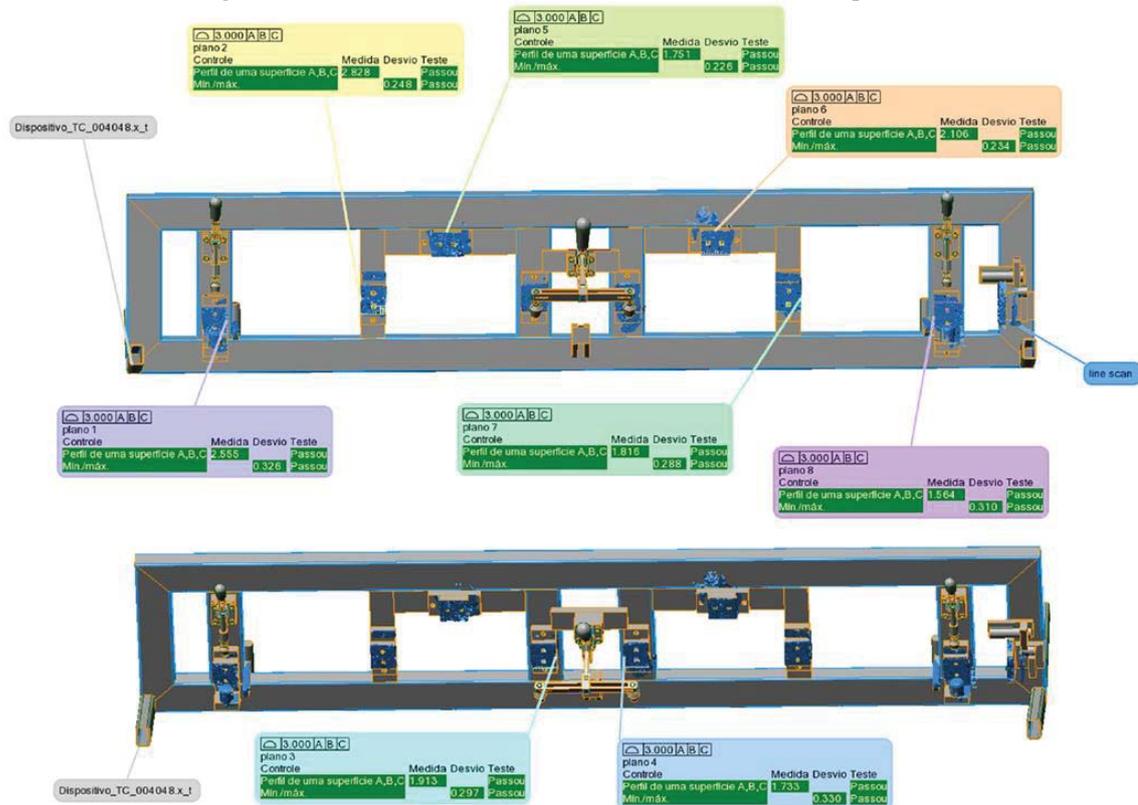
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que os componentes inspecionados apresentaram baixos índices de capacidade, quando analisados em relação a suas respectivas faixas de tolerâncias. Também

foram observadas medidas com distribuições não normais, sendo que, para estas, a análise de capacidade utilizou dados transformados.

Já o processo de inspeção do dispositivo apresentou dimensões em conformidade com as especificações realizadas na etapa de projeto do produto. A Figura 56 demonstra os principais localizadores das peças, controlados por meio dos perfis de superfície com zonas de tolerância de 3 mm.

Figura 56 - Resultados dimensionais dos localizadores do dispositivo.



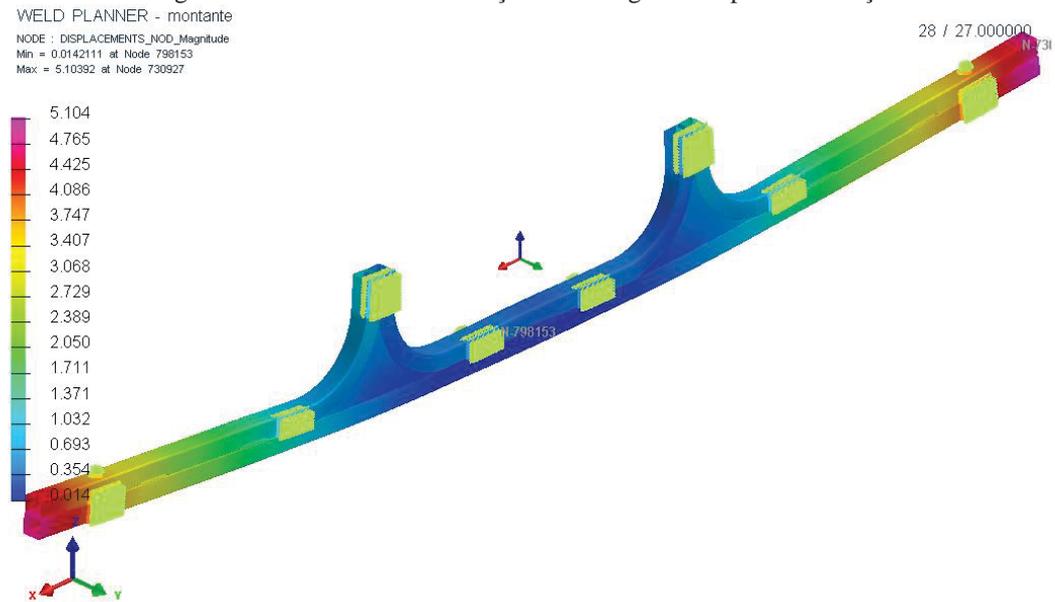
Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

5.2 Resultados da Simulação de Soldagem

A etapa de simulação de soldagem apresentou resultados satisfatórios, quando em comparação com as zonas de tolerância especificadas na etapa de projeto de produto. Entretanto, tais resultados somente foram alcançados com a utilização do recurso de pré-deformação do modelo.

Para fins comparativos, a Figura 57 demonstra o resultado simulado do conjunto sem a aplicação do recurso de pré-deformação.

Figura 57 - Resultado da simulação de soldagem sem pré-deformação.

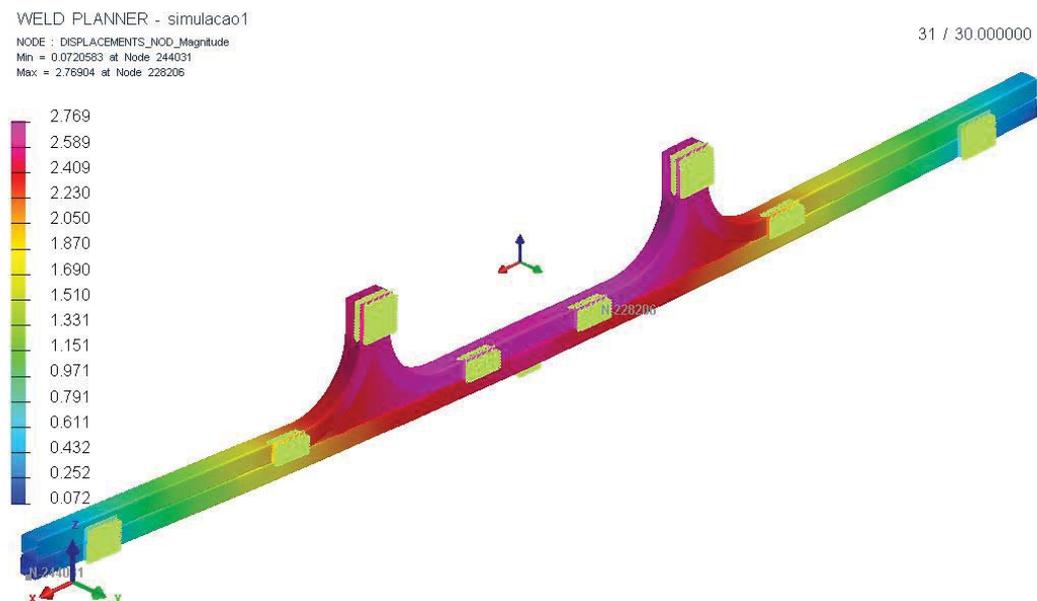


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

O resultado obtido ultrapassou o limite máximo de 4 mm, especificado pelo Perfil de Superfície detalhado pelo Projeto do Produto, não atendendo, desta forma, as especificações geométricas do mesmo.

Constatada a necessidade de pré-deformação, o resultado da distorção final foi significativamente minimizado, conforme demonstra a Figura 58.

Figura 58 - Resultado da simulação de soldagem com pré-deformação.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Encontrado o valor de 2,769 mm, este agora está compreendido dentro da zona de tolerância especificada pelo Projeto do Produto.

5.3 Resultados da Simulação Dimensional

A etapa de simulação dimensional apresentou variações expressivas, relacionadas medidas anteriormente determinadas como de interesse. A Figura 59 apresenta tais resultados.

Figura 59 - Resultados obtidos com a Simulação Dimensional.

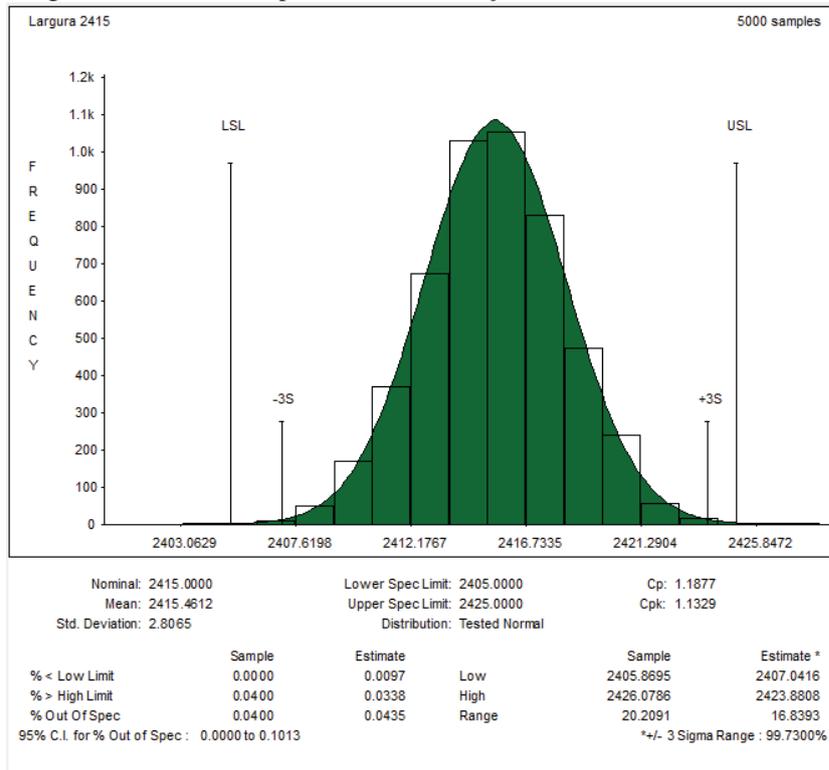


Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Foram encontrados valores de C_p e C_{pk} virtuais próximos a 1,0. Entretanto, para tal condição, foram necessárias tolerâncias com valores relativamente elevados. A largura nominal do conjunto de 2415 mm teve sua variação contida entre 2405 mm a 2425 mm. Já a altura nominal de 275 mm teve sua variação limitada entre 272 mm a 277 mm.

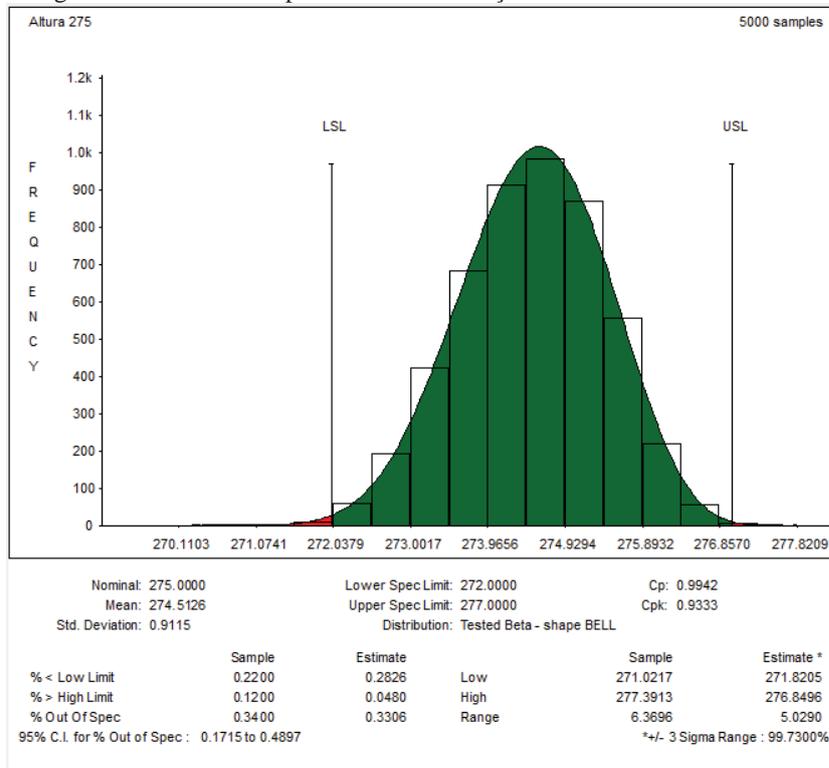
As Figuras 60 e 61 apresentam, detalhadamente, o resumo dos processos de simulação realizados para cada medida, respectivamente.

Figura 60 - Resumo do processo de Simulação Dimensional Medida 2415.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Figura 61 - Resumo do processo de Simulação Dimensional Medida 275.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Também são apresentados como resultados os principais elementos contribuidores no processo de acúmulo das variações, relacionadas a cada medida de interesse. O reconhecimento destes elementos possibilitou a determinação dos componentes que, quando modificados, possuem a maior capacidade de redução no montante final de variações encontradas.

Ambos os elementos, que contribuíram em maior parte para a variação das medidas de interesse pertencem à mesma peça, denominada como Tubo Curvo Lateral. Estes são detalhados através das Figuras 62 e 63, correspondentes às medidas de 2415 mm e 275 mm, respectivamente.

Figura 62 - Principais contribuidores para variação da largura 2415 mm.

Contributors		Effect
Nominal : 2415.0000 Process Variance : 7.8764 HLM Variance : 8.1363		
1. TB_CURV_MONT_VAO_235x820_VR13 - Distance_820		
-> Distance_820	49.16%	
-> 820.000000 +- 6.000		
-> Location: 820.000000 +- 6.000	49.16%	
2. TB_CURV_MONT_VAO_235x820_VR13_1 - Distance_820		
-> Distance_820	49.16%	
-> 820.000000 +- 6.000		
-> Location: 820.000000 +- 6.000	49.16%	

Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Figura 63 - Principais contribuidores para variação da altura 275 mm.

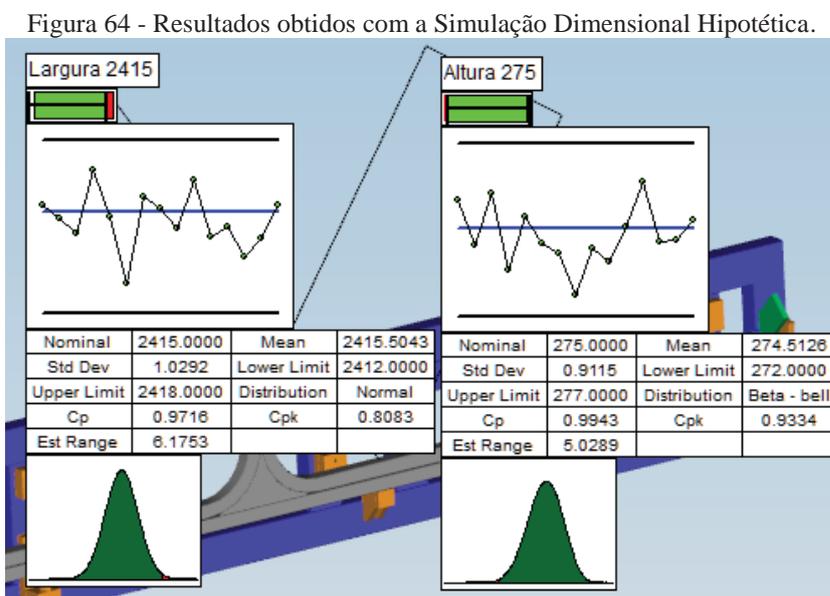
Contributors	Effective Tole...	Sensitivity	Effect
Nominal : 275.0000 Process Variance : 0.8307 HLM Variance : 0.5674			
1. TB_CURV_MONT_VAO_235x820_VR13_1 - Plano Paralelo B	3.6538	1.4615	
-> Plano Paralelo B			65.36%
-> PER 2.500 A B C			
-> Orientation: PER 2.500 A B C			52.28%
-> Form: PER 2.500 A B C			13.07%
2. TB_40x40x1_95x2415_Z - Plano_Paralelo_A	2.0703	1.0352	
-> Plano_Paralelo_A			20.98%
-> SPF 2.000 A B			
-> Location: SPF 2.000 A B			12.00%
-> Orientation: SPF 2.000 A B			2.50%
-> Form: SPF 2.000 A B			6.48%
3. TB_CURV_MONT_VAO_235x820_VR13_1 - Plane	1.5000	1.0000	
-> SPF 1.500 A B C			
-> Location: SPF 1.500 A B C			11.01%
-> Form: SPF 1.500 A B C			5.51%
4. TB_40x40x1_95x2415_Z - REF A	0.7353	0.3676	
-> REF A			2.65%
-> FLT 2.000			
-> Form: FLT 2.000			2.65%

Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Pode-se perceber que a largura de 2415 mm foi afetada em 49,16 % pela dimensão de 820 mm \pm 6 mm em ambos os Tubos Curvos Laterais utilizados no conjunto. Já a altura 275 mm teve o montante de variações afetado principalmente pelo perfil de superfície paralelo à referência B. Este teve o impacto de 65,36 % no acúmulo de variações desta medida.

Desta forma, visando à redução do impacto das possíveis variações durante o processo de produção do conjunto, considerou-se, de forma hipotética, a redução da tolerância contida na dimensão de 820 mm para \pm 2 mm.

O resultado desta consideração pode ser visualizado na Figura 64.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Os índices de C_p e C_{pk} mantiveram-se próximos a 1,0. Entretanto, a dimensão nominal de 2415 mm, antes contida no intervalo de 2405 mm a 2425 mm, poderia agora ser considerada entre 2412 mm a 2418 mm, confirmando a hipótese de redução da variação dimensional.

5.4 Resultados Dimensionais dos Conjuntos

Os resultados dimensionais obtidos pelo processo de inspeção, descrito na seção 4.8.4 deste trabalho, são apresentados através dos índices de capacidade alcançados pela análise dos mesmos.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pela análise.

Tabela 4 - Índices de capacidade do conjunto Montante

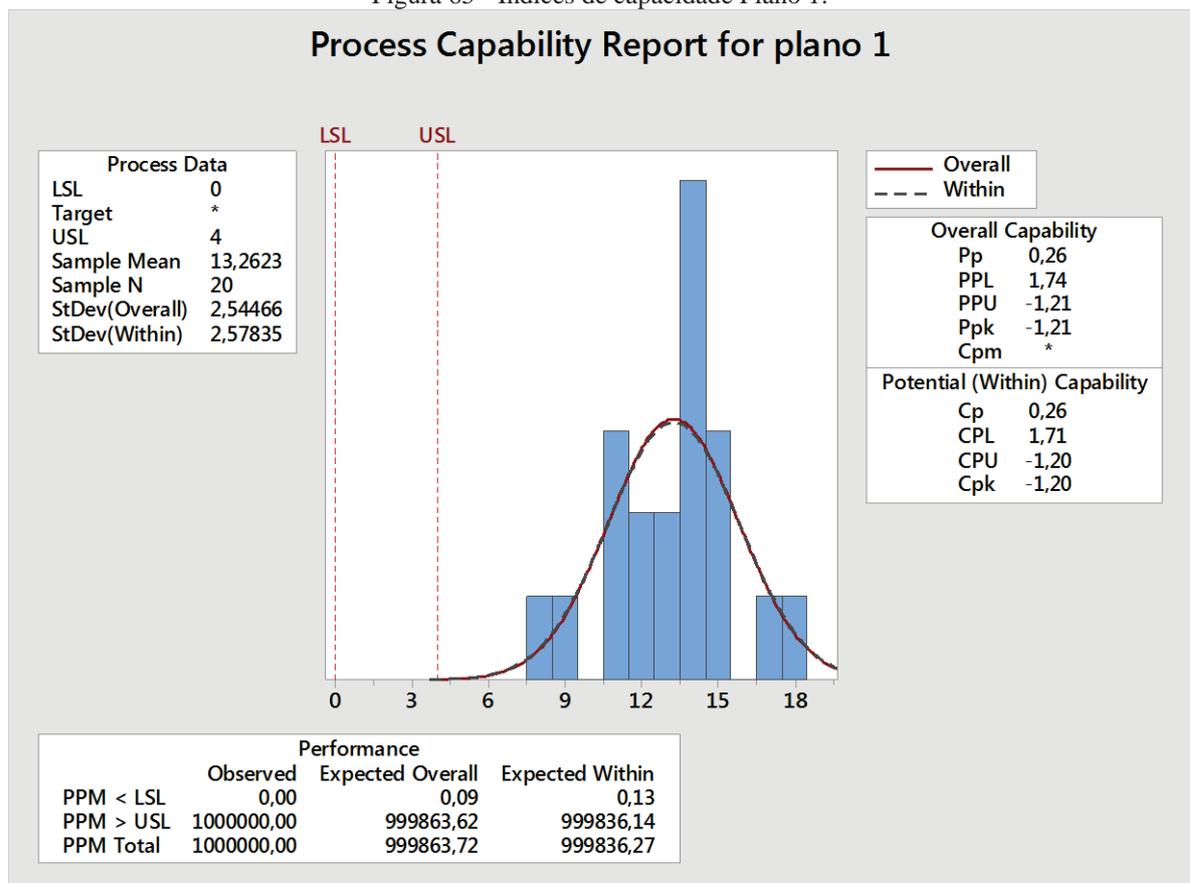
PEÇA	CARACT.	POS.	TOL. (+/-)	CP	CPK
Montante	Perfil de Superfície 5	I10	4,0	1,26	0,69
	Plano 1	K16	4,0	0,26	-1,20
	Largura_2415_02	I09	10,0	1,36	1,06
	Largura_L2_275	G13	5,0	0,65	-0,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se ressaltar os baixos índices de C_p e C_{pk} apresentados pelo controle denominado de Plano 1, juntamente com o controle atribuído à Largura_L2_275.

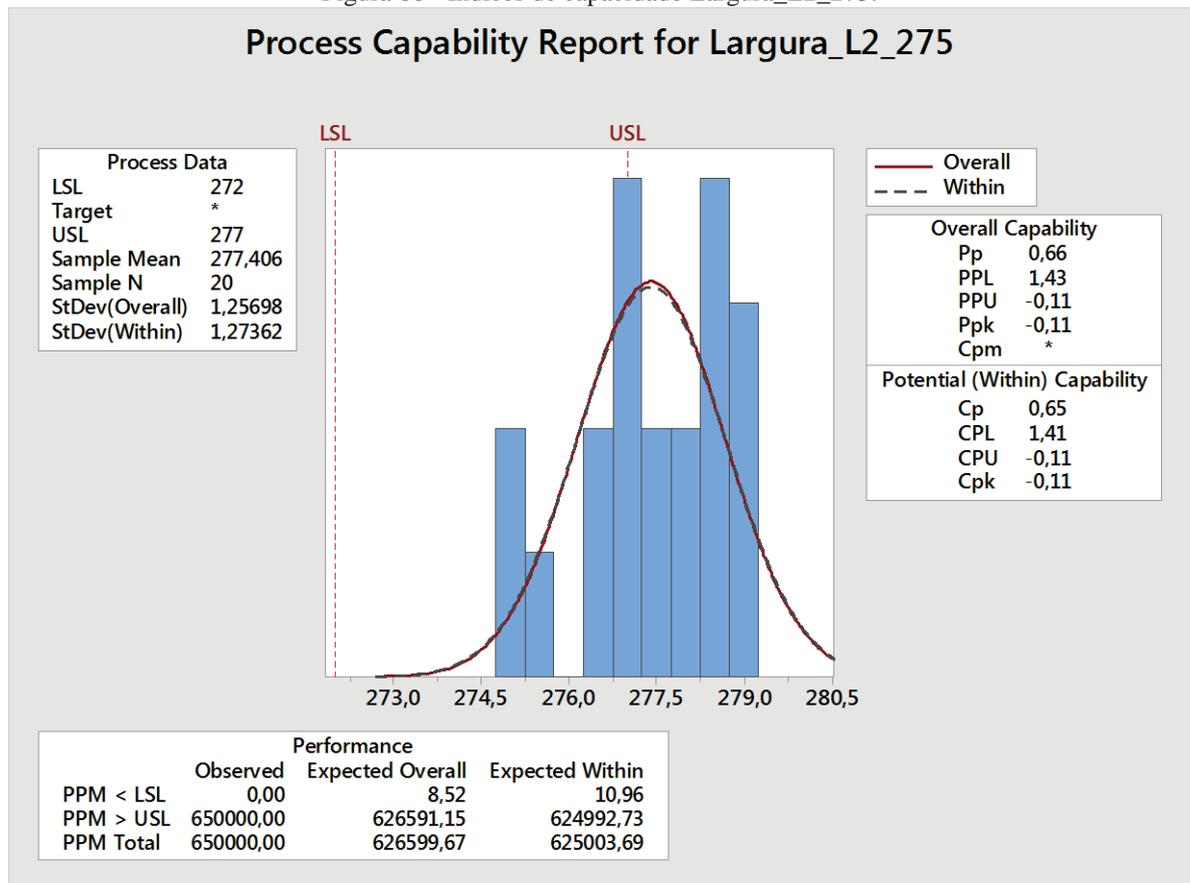
As análises individuais realizadas, sobre as características apresentadas acima, podem ser verificadas nas Figuras 65 e 66.

Figura 65 - Índices de capacidade Plano 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 - Índices de capacidade Largura_L2_275.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No capítulo seguinte, os resultados apresentados serão discutidos e analisados, buscando o entendimento sobre a eficácia do método proposto, abordando os pontos positivos e negativos apresentados durante a aplicação do mesmo.

6 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo propõe uma discussão e análise dos resultados obtidos com a aplicação do método. Visto que o mesmo abordou áreas distintas, serão dispostos separadamente os aspectos relacionados a Engenharia Dimensional, Engenharia de Soldagem e os Aspectos Gerais.

6.1 Engenharia Dimensional

A análise e discussão dos resultados, inseridos na esfera da Engenharia Dimensional, pode ser estendida sobre as seguintes etapas do método:

- Projeto de Produto;
- Projeto de Dispositivos;
- Simulação Dimensional;
- Inspeção Dimensional.

Inicialmente, pode-se salientar que as etapas de Projeto de Produto e Dispositivo não apresentam resultados passíveis de uma análise puramente analítica, visto que foram utilizadas somente como portadoras das especificações dimensionais e geométricas, esperadas para os componentes projetados.

Contudo, levando em consideração o objetivo do presente trabalho, torna-se indispensável uma abordagem conceitual, discutindo os pontos relacionados à utilização da linguagem GD&T, inserida no desenvolvimento do produto.

Assim, ressalta-se que a utilização da linguagem GD&T, nas etapas de Projeto de Produto e Dispositivos, demonstrou-se como o alicerce para o desenvolvimento das etapas posteriores do método, contido na esfera da Engenharia Dimensional.

Tal condição pode ser evidenciada durante as etapas de Simulação e Inspeção Dimensional, em que as especificações geradas nos projetos foram utilizadas sob sua forma direta, nos *softwares* de análise (VisVSA) e inspeção (Polyworks).

Já a etapa de Simulação Dimensional obteve como resultado faixas de tolerâncias para as medidas de largura (2415 mm) e altura (275 mm) do conjunto. Estas foram estabelecidas considerando índices de capacidade próximos a 1.0.

Desta forma, resultados semelhantes são esperados para a etapa de Inspeção dimensional dos conjuntos, validando, assim, as simulações executadas.

Como forma de comparação, a Tabela 5 apresenta os resultados das análises de capacidade simulada e inspecionada para as medidas de largura e altura.

Tabela 5 - Comparação dos índices C_p e C_{pk} simulados e inspecionados

PEÇA	CARACT.	CP INSP.	CPK INSP.	CP SIM.	CPK SIM.
Montante	Largura 2415	1,36	1,06	1,19	1,13
	Altura 275	0,65	-0,11	0,99	0,94

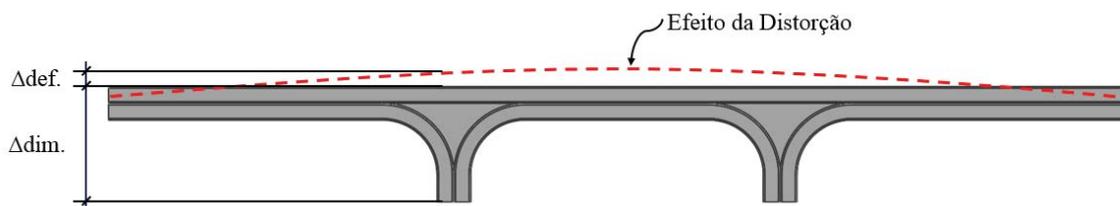
Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a medida relacionada à largura de 2415 mm obteve índices de capacidade semelhantes aos obtidos pela etapa de Simulação Dimensional, demonstrando significativa representatividade com o fenômeno físico inspecionado. Entretanto, a medida de altura 275 mm obteve índices de C_p e C_{pk} diferentes aos índices anteriormente simulados, apresentando-se em discordância com a simulação antes executada.

Tal condição pode ser percebida com maior clareza analisando-se a Figura 70, na qual é possível a identificação da distribuição dos dados, descentralizados em relação aos limites estabelecidos pelas tolerâncias de projeto, caracterizando, assim, o valor de $C_{pk} = -0,11$ demonstrado pela Tabela 5.

A discordância encontrada, entre os valores das distribuições simulada e real para a altura 275 mm, está fortemente relacionada com o fato de que o fenômeno de distorção dimensional, proveniente do processo de soldagem, possui o mesmo sentido da dimensão de interesse avaliada, conforme demonstra a Figura 67.

Figura 67 - Influência das distorções na etapa de Simulação Dimensional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, entende-se que a medida obtida na etapa de Inspeção Dimensional dos conjuntos é decorrente da soma de variações puramente dimensionais (Δ_{dim}), juntamente com a variação dimensional proveniente do fenômeno de deformação, encontrado durante a soldagem (Δ_{def}).

Ressalta-se que o fenômeno de deformação, ocorrido durante o processo de soldagem, não pode ser considerado durante a etapa de Simulação Dimensional do produto, visto que o mesmo não é consistido pelo princípio do acúmulo de tolerâncias.

Ainda considerando a etapa de Inspeção Dimensional dos conjuntos, pode-se analisar os resultados obtidos por meio dos controles denominados de Perfil de Superfície 5 e Plano 1, demonstrados na Tabela 4. Estes tiveram suas variações dimensionais afetadas diretamente pelas deformações oriundas do processo de soldagem.

A medida relacionada ao Perfil de Superfície 5 sofreu influência direta da deformação de soldagem no sentido vertical, conforme Figura 67. Já a medida relacionada ao Plano 1 sofreu influência do fenômeno de deformação ilustrado na Figura 68.

Figura 68 - Efeito da distorção de soldagem na direção longitudinal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se evidenciar que o fenômeno de distorção apresentado pela Figura 67 teve suas variações contidas entre os limites estipulados para a zona de tolerância do Perfil de Superfície 5, atendendo a especificação detalhada no Projeto do Produto. Contudo, as variações apresentadas pelo Plano 1 divergiram significativamente dos limites estabelecidos pela zona de tolerância do mesmo, conforme demonstra a Figura 65.

Sendo assim, serão analisados e discutidos, na seção seguinte, os resultados relacionados ao fenômeno de distorção de soldagem apresentado, visando ao entendimento deste, que se mostrou sensivelmente capaz de influenciar os resultados dimensionais obtidos com o método proposto.

6.2 Engenharia de Soldagem

Análise e discussão dos resultados contidos na esfera denominada de Engenharia de Soldagem apresentam-se como sendo imprescindível para o entendimento do método, juntamente com os níveis de qualidade alcançados com o mesmo.

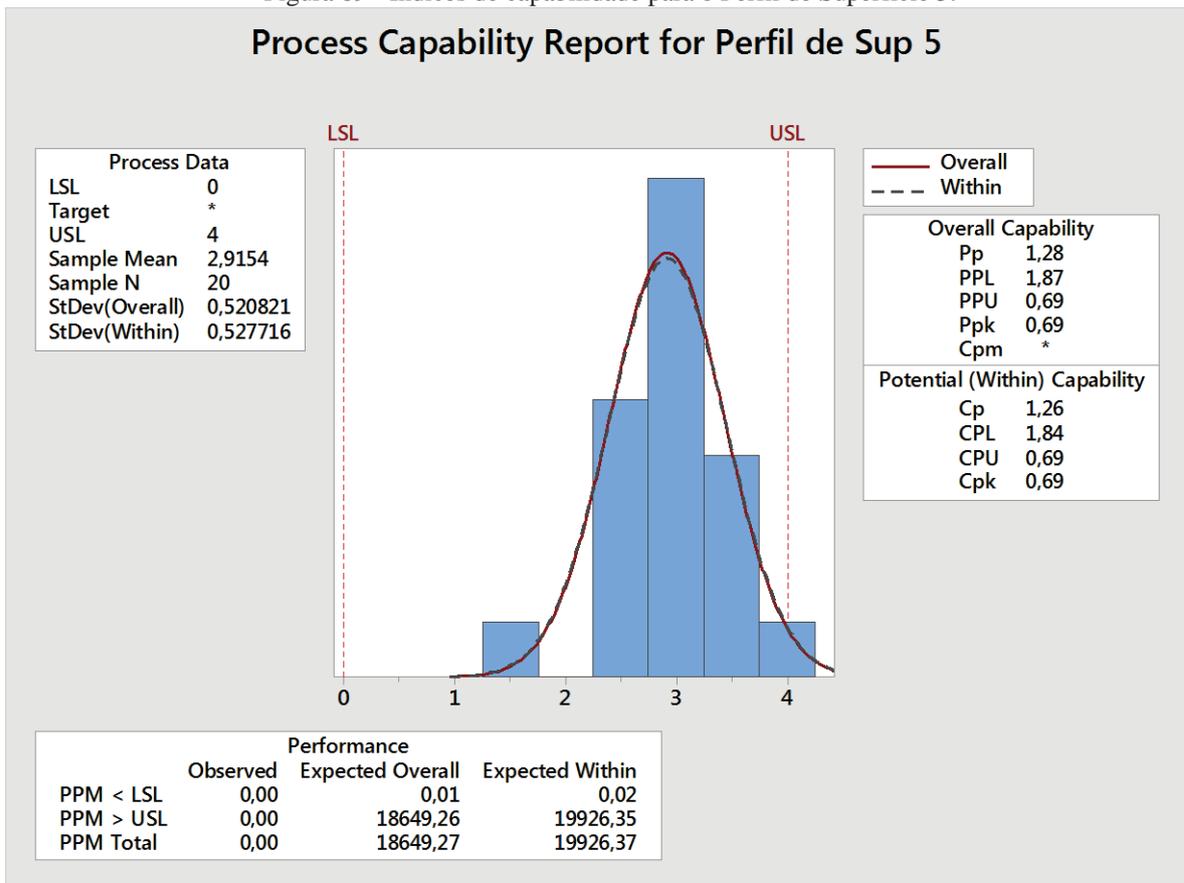
Conforme apresentado na seção 6.1, o fenômeno de distorção oriundo do processo de soldagem teve forte influência sobre a qualidade dimensional dos conjuntos desenvolvidos, sendo assim considerado como característica-chave para a análise e discussão apresentada nesta seção.

Demonstrados na seção 5.2 do presente trabalho, os resultados obtidos com o uso do recurso de pré-deformação do *software* ESI Weld Planner foram satisfatórios. A distorção encontrada sem pré-deformação foi de 5,104 mm; e após o uso do recurso, a distorção máxima encontrada foi de 2,769 mm, caracterizando uma redução de 45,7%.

Comparando os resultados obtidos com a simulação de soldagem aos resultados físicos inspecionados, pode-se encontrar uma correlação entre os mesmos, visto que a distorção média inspecionada nos conjuntos montantes foi de 2,915 mm.

A Figura 69 demonstra o resumo do processo de inspeção realizado para o Perfil de Superfície 5, correspondente à face superior do conjunto Montante.

Figura 69 - Índices de capacidade para o Perfil de Superfície 5.



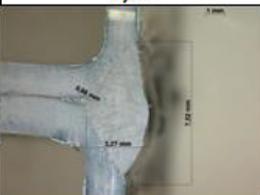
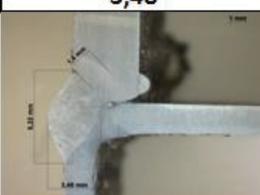
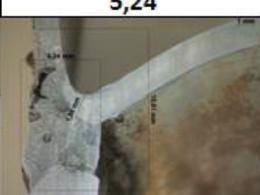
Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, foram encontrados, durante o processo de inspeção dos conjuntos, desvios dimensionais na face frontal do conjunto Montante, conforme demonstrado pela característica denominada de Plano 1, vista na seção 5.4.

Ressalta-se que os desvios encontrados durante a etapa de Simulação de Soldagem apresentaram-se com valores mínimos na mesma direção anteriormente inspecionada pelo Plano 1.

Desta forma, objetivando-se investigar quais os fatores responsáveis pelo aparecimento de distorções na direção citada, construiu-se a Tabela 6, que apresenta os resultados das macrografias em cada região de solda, juntamente com o tamanho dos cordões em milímetros.

Tabela 6 - Macrografias em cada região de solda

	A	B	C	D
1	2,18	2,66		
				
2	1,62	3,27		
				
3	3,48	6,5	2,41	4,34
				
4	3,13	5,24	4,56	2,54
				
5	2,59	2,91	2,86	2,43
				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se identificar que os cordões possuem tamanhos distintos, atribuídos aos diferentes tipos de uniões, dispostas em cada região do conjunto Montante. Tal condição demonstrou-se como possível fonte de distorção, visto que o *software* de simulação não tem condições de prever com precisão a variação encontrada nos cordões de solda executados.

Salienta-se que a variação encontrada no dimensional dos cordões de solda é intrínseca ao processo de soldagem, que foi executado manualmente nas diferentes condições de soldagem oferecidas pelo dispositivo.

Também se pode tomar como possível fonte de divergência, entre o modelo de simulação e o conjunto real, o fenômeno de deformação apresentado nas peças que sofreram o

processo de curvamento. A Figura 70 demonstra a distorção causada pelo processo de curvamento.

Figura 70 - Distorção gerada pelo curvamento das peças.



Fonte: Imagens repassadas pela empresa.

Como apresentado na etapa de Simulação de Soldagem, a mesma considera o modelo nominal obtido pelo *software* UGS NX para a criação da malha de elementos finitos. Desta forma, entende-se que a mesma não considera as deformações apresentadas pela Figura 74.

6.3 Aspectos Gerais

Discussão e análise dos aspectos gerais atrelados à implantação do método, no contexto organizacional imposto ao mesmo, serão realizadas considerando os objetivos descritos pelo presente trabalho, juntamente com as demais questões relevantes para sua aplicação.

Primeiramente, pode-se afirmar que a utilização da linguagem geométrica na etapa de Projeto de Produto apresentou-se como ponto determinante para o sucesso do método.

Por meio dela foi possível a determinação dos elementos funcionais e tolerâncias de peças e conjuntos, que juntamente com o sistema de referência definido, propuseram informações padronizadas para fabricação, simulação e inspeção dos mesmos.

Também pode-se salientar a importância das especificações relacionadas aos processos de soldagem e procedimentos envolvidos na construção do presente método. Estes tiveram um papel importante no transporte e registro das informações para as demais áreas da organização, contextualizando, desta forma, todo o montante de especificações necessárias para a aplicação do método.

Sob o aspecto da qualidade *off-line*, objetivada pelos processos de simulação de soldagem e dimensional, pode-se evidenciar a grande importância dos mesmos, quando inseridos no método de desenvolvimento de produtos proposto para a organização. Com a utilização destes foi possível provisionar os fenômenos intrínsecos aos processos de produção, diminuindo significativamente os custos envolvidos na criação de protótipos físicos.

Entretanto, ressalta-se que os processos de simulação utilizados demonstraram-se dependentes da capacidade de controle e produção dos processos disponíveis na organização. Tal condição pode ser exemplificada pelas análises dos índices de capacidade, relacionados às medidas Plano 1, Largura_L2_275.

Conforme já demonstrado, os índices atrelados às medidas Plano 1 e Largura_L2_275 foram sensivelmente afetados pelos fenômenos de distorção, oriundos do processo de soldagem manual, realizado durante a montagem dos conjuntos.

Considerando que o fenômeno de distorção encontrado pode ter como princípio a variação no processo de soldagem apresentada na seção 6.2, pode-se salientar que um maior controle sobre este processo seria absolutamente desejável.

Controles sobre as características dimensionais também são considerados desejáveis, visto que as mesmas podem possibilitar melhores condições para execução dos processos de soldagem, pela redução do *gap* entre as peças.

Assim, levando em consideração processos sob um maior controle, nos aspectos de soldagem e dimensional, espera-se o encontro de uma correlação entre os modelos de simulação e o protótipo físico elaborado.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aqui são apresentadas as conclusões obtidas por meio do presente estudo, bem como as limitações encontradas em aplicar este tipo de metodologia. Ainda neste item são apresentadas possibilidades de trabalhos futuros relacionados ao assunto.

7.1 Conclusões

Este trabalho foi proposto com os seguintes objetivos principais:

- Elaborar uma metodologia de desenvolvimento de produto aplicada a modelos de carrocerias de ônibus, sob o aspecto da gestão dimensional de produtos;
- Aplicar, na prática, o método em uma empresa de carrocerias de ônibus;
- Prover o entendimento necessário para utilização da linguagem de GD&T nos projetos da organização;
- Fornecer condições de análise e redução das distorções dimensionais, oriundas do processo de soldagem utilizado pela empresa.

Ressalta-se que os objetivos citados foram alcançados, pois o método elaborado foi aplicado na organização, que pôde perceber as vantagens competitivas atreladas ao uso da linguagem GD&T nos seus projetos.

Assim, com as etapas definidas pelo método, juntamente com a especificação geométrica do produto, foi possível a realização das ações necessárias para a redução nas distorções dimensionais tidas anteriormente.

Relacionado ao método elaborado, concluiu-se que o contexto da gestão dimensional de produtos para as organizações tornou-se uma necessidade diretamente ligada ao sucesso de seus produtos.

Segundo Campbell (2003), a primeira razão que justifica o uso de técnicas integradas de gestão dimensional é o fato de que estas provêm uma estrutura de desenvolvimento para o produto. Desta forma, pode-se traçar uma linha contínua de desenvolvimento, sem o aparecimento de lacunas.

Com a aplicação do método, foi evidenciado um sistema de desenvolvimento de produtos consistente, conforme descrito por Campbell (2003). Foram abordados os principais aspectos envolvidos na gestão dimensional dos produtos, por meio de uma metodologia fundamentada nos conceitos apresentados no referencial teórico do presente trabalho.

Desta forma, conclui-se que os objetivos iniciais, relacionados à elaboração e à aplicação de uma metodologia de gestão dimensional do produto foram atendidos em sua plenitude.

Entretanto, foram necessários grandes esforços para a aplicação da metodologia. Conforme descrito dos capítulos anteriores, a mesma depende de uma filosofia intrínseca a ela, sendo que, nesta, são colocados, em primeiro plano, conceitos de robustez dimensional e qualidade.

A existência de equipes focadas em atingir os resultados, juntamente com a aplicação dos princípios da engenharia simultânea, são considerados como requisitos básicos para o sucesso desta etapa.

Também devem ser considerados grandes esforços para solidificação do montante de conhecimento, que se refere aos conceitos técnicos e ferramentas utilizadas pelo método. Sem este importante passo, a implantação do mesmo ocorrerá de forma branda e inconsistente.

De acordo com Campbell (2003), outro significativo avanço encontrado é a comunicação entre as fases do método. Com o uso da linguagem GD&T e suas normas foi possível identificar e corrigir os problemas em suas fases iniciais. Esta condição pode prover o entendimento necessário para aplicação da linguagem nos projetos da organização, atendendo o terceiro objetivo listado anteriormente.

Impactando de forma positiva durante o processo de desenvolvimento deste trabalho, também foram evidenciados os benefícios inerentes ao uso das novas tecnologias, tais como *softwares* e seus recursos. Sendo utilizados, estes conseguiram maximizar significativamente os ganhos objetivados pelo método.

Também puderam ser evidenciadas conclusões acerca das circunstâncias da criação e implantação do presente método. O desenvolvimento do mesmo ocorreu sob circunstâncias iniciais, quando se objetivou, principalmente, a criação dos alicerces conceituais de um método para o desenvolvimento de produtos sobre o aspecto da gestão dimensional. Entende-se que, sob novas circunstâncias, o método poderá ser expandido, contemplando novas abordagens, mantendo uma característica adaptativa desejável para a organização.

Conclui-se, também, que sob o aspecto da redução no montante de distorções oriundas do processo de soldagem, o método neste trabalho proposto foi capaz de prover condições

para a redução no montante de distorções final encontrado nos conjuntos. Esta condição pode ser verificada por meio dos resultados obtidos pela inspeção dimensional realizada.

No entanto, utilizando-se dos mesmos resultados, pode-se verificar a existência de distorções residuais, apresentadas em uma direção diferente da direção de distorção anteriormente apresentada e reduzida.

Este fenômeno demonstrou a necessidade da utilização de processos de manufatura, sob um controle mais rigoroso, tanto nas características dimensionais como nas características relativas ao processo de soldagem dos conjuntos, objetivando, desta forma, uma diminuição nas variações intrínsecas ao método executado.

Questionado pela pergunta da presente pesquisa, pode-se concluir que o método desenvolvido pelo presente trabalho considerou-se adequado frente ao panorama organizacional em que o mesmo foi aplicado.

Ressaltam-se os quesitos técnicos que compuseram a profundidade atingida com o método, juntamente com as características organizacionais, implícitas ao processo de desenvolvimento de produtos da empresa. Com o contexto formado entre estes, o método proposto pode compor um ciclo de desenvolvimento, com objetivos claros e resultados de grande significância para a organização.

Sob o ponto de vista acadêmico, o presente método e sua abordagem teórica conceitual, sob os principais elementos relacionados ao desenvolvimento de produtos em uma empresa automobilística, pode prover condições para uma análise investigativa sobre os diversos fenômenos físicos encontrados.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

De acordo com os fenômenos apresentados durante o desenvolvimento do presente trabalho, pode-se salientar a necessidade de um estudo aprofundado acerca dos processos de soldagem realizados, visando à obtenção de um modelo de simulação de soldagem, com um nível maior de significância com o protótipo físico a ser executado.

Também pode ser considerado como fonte para estudos futuros, a investigação acerca do impacto da variação dimensional apresentada pela distância entre as peças do conjunto, em relação ao processo de soldagem, visando a melhoria e redução de variações apresentadas pelo mesmo.

Estudos puramente dimensionais também podem ser considerados com grandes fontes para futuros trabalhos, visto que o conceito apresentado pelo presente trabalho pode ser estendido para diversos outros elementos que compõem o produto, incluindo ou não o processo de soldagem. Desta forma, aproximando os níveis de qualidade da indústria de ônibus à indústria automobilística.

Considerando os índices de capacidade obtidos pelas peças que compuseram o conjunto Montante, pode-se afirmar que se demonstram apropriados estudos relacionados à aplicação da ferramenta de controle estatístico dos processos (CEP).

REFERÊNCIAS

Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S., Lirani, J., **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2001.

American Society Of Mechanical Engineers. **Dimensioning and Tolerancing**, ASME Y 14.5 M, 2009, Revision of ANSI Y 14.5 M 1994 (R2004).

American Welding Society. **Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination**, AWS A2.4, 2012.

Camargo, Roderlei. **Estudo da Otimização Dimensional para Controle de Projeto Robusto em Sistema de Análise de Tolerâncias**. Santa Barbara D'Oeste: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, 2010.

Cerqueira, Ricardo C. **Gestão Dimensional no Desenvolvimento de Produtos: Uma aplicação na Indústria Automotiva**. Salvador: Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC, 2011.

Cogorno, Gene. R. **Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design**. 2 ed. McGraw-Hill, USA, 2011.

Coraini, R., Kobayashi, Y., Gonçalves, G. **Influência do Tipo de Chanfro, Tecimento e Sentido de Laminação na Distorção Angular em Soldagem GMAW-P Robotizada de Alumínio**. Soldagem e inspeção. São Paulo, 2011.

Dantan, J.Y, Qureshi A. J, **Worst-case and statistical tolerance analysis based on quantified constraint satisfaction problems and Monte Carlo simulation**, in: Computer-Aided Design 41, Elsevier Ltd., Journal 1–12, 2009.

Drake, Paul J. Jr. **Dimensioning and Tolerancing Handbook**. McGraw-Hill, USA 1999.

Fischer, Bryan R. **Mechanical Tolerance Stack up and Analysis**, 2 ed. Taylor and Francis Group, USA, 2011.

Green, Paul. **The Geometrical Tolerancing Desk Reference: Creating and interpreting ISO Standard Technical Drawings**. Elsevier, Great Britain, 2005.

Hausch, Erich. **Sistemática de desenvolvimento para projeto de produtos com qualidade dimensional na indústria automobilística**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

Henzold, George. **Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards**. 2nd ed. Elsevier, UK, 2006.

Huang, G. Q. **Design for X: Concurrent Engineering Imperatives**. Editora Chapman & Hall, London, 1996.

Inanc, Eray. **Tolerance Analysis: Tolerance Analysis of Two-Piece Lift Gate Design for C344**. University of Duisburg-Essen, Duisburg, Germany, 2012.

Jackson, K., Darlington, R. **Advanced Engineering Methods for Assessing Welding Distortion in Aero-Engine Assemblies**. Trends in Aerospace Manufacturing 2009 International Conference. 2011.

Krulikowski, Alex. **Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing**. 2 ed. Delmar Publishers, USA, 1997.

Montgomery, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th ed., John Wiley & Sons, USA, 2009.

Nickolaisen, R. H. **Dimensional Management**. In: DRAKE, Paul J. (Org.). **Dimensioning and Tolerancing Handbook**. Ed. McGraw-Hill, USA, 1999.

Ombasic, N.; ZARE, D. **Dimensional Engineering: Methods and Tools for a Dimensional Engineering Process at Scania**. Mechanical Engineering Programme - Chalmers University of Technology, Mechanical Engineering, Department of Product and Production Development, Gothenburg, Sweden 2013.

Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005.

Ruthes, S. Ceretta, P.S. Sonza, I. B. **Seis Sigma: Melhoria da Qualidade através da Redução da Variabilidade**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Revista Gestão Industrial, Paraná, 2006.

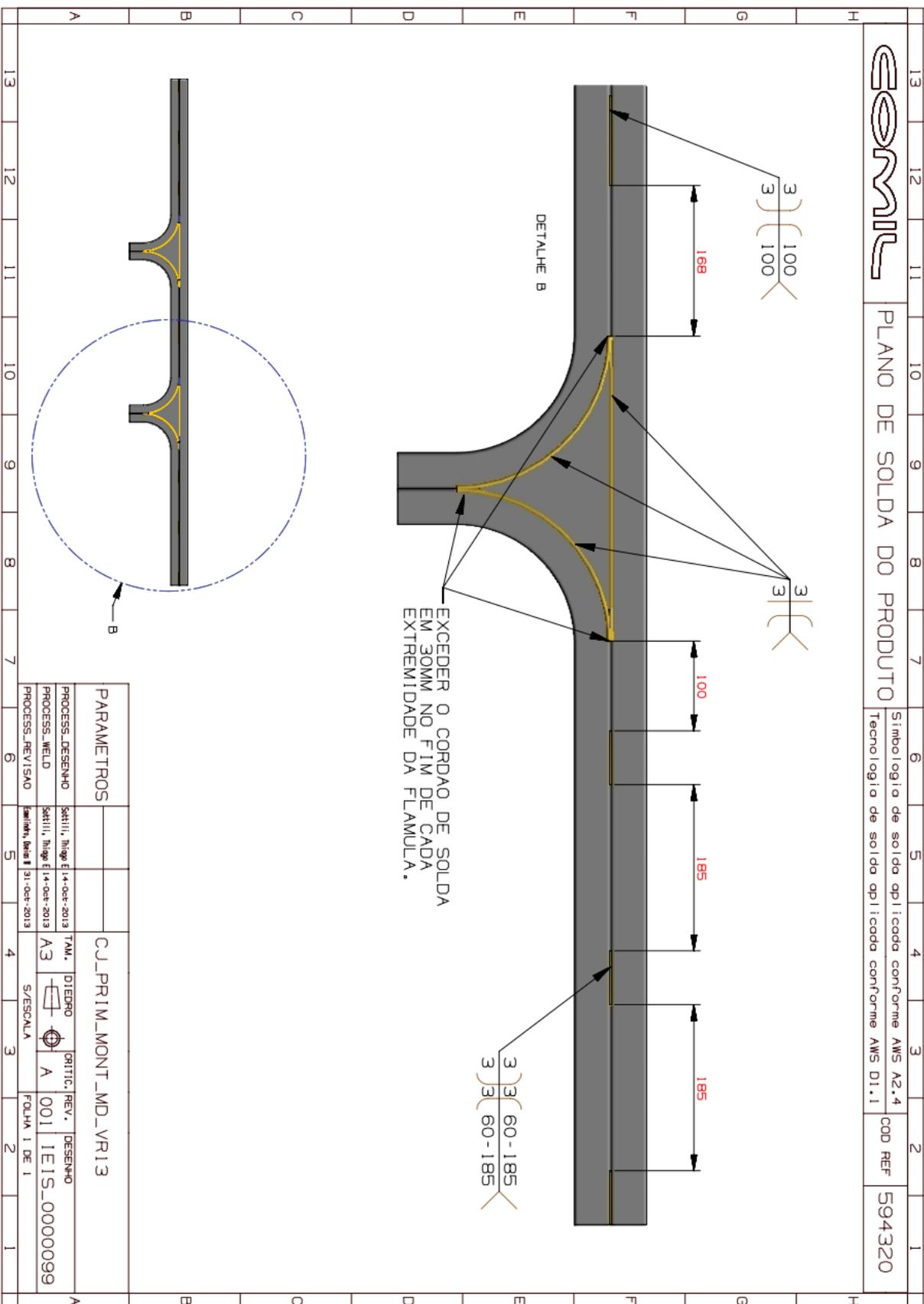
Sulaiman, Mohd S. *et al.* **Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER**. Journal of Mechanical Science and Technology. 2011.

Viero, Carlos F. **Metodologia de Projeto para Arranjo Estrutural de Carroceria de Ônibus através de Sistemas Modulares: um estudo de caso**. Universidade de Passo Fundo. Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação. Passo Fundo, 2013.

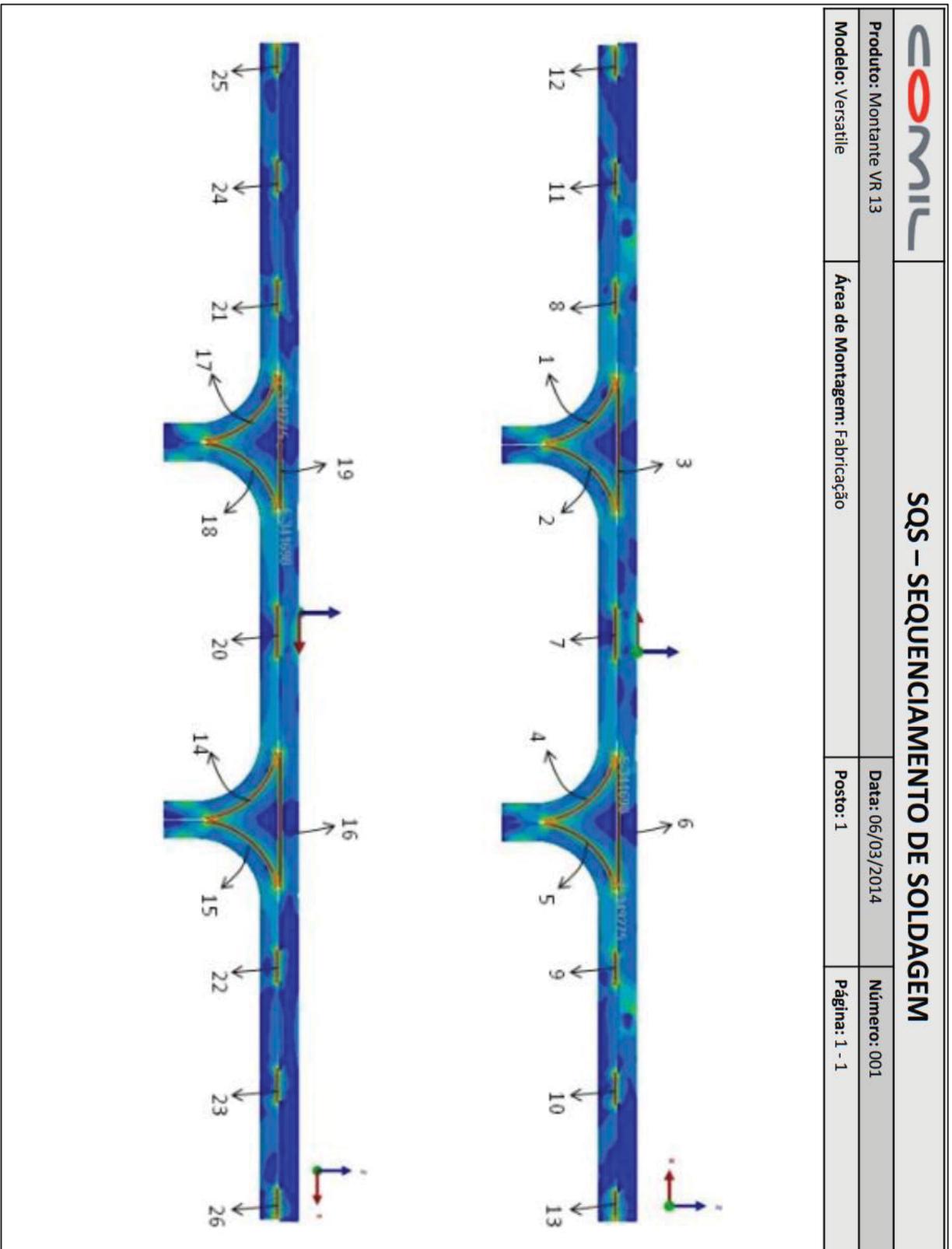
Walber, Márcio. **Avaliação dos Níveis de Vibração Existentes em Passageiros de Ônibus Rodoviários Intermunicipais, Análise e Modificação Projetual**. Rio Grande do Sul: Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Yiming, Rong; Yaoxiang, Zhu. **Computer-Aided Fixture Design**. Marcel Dekker Inc, USA, 1999.

APÊNDICE B - Plando de Solda do Produto



APÊNDICE C - Sequência de Soldagem



APÊNDICE E - Procedimento Operacional Padrão

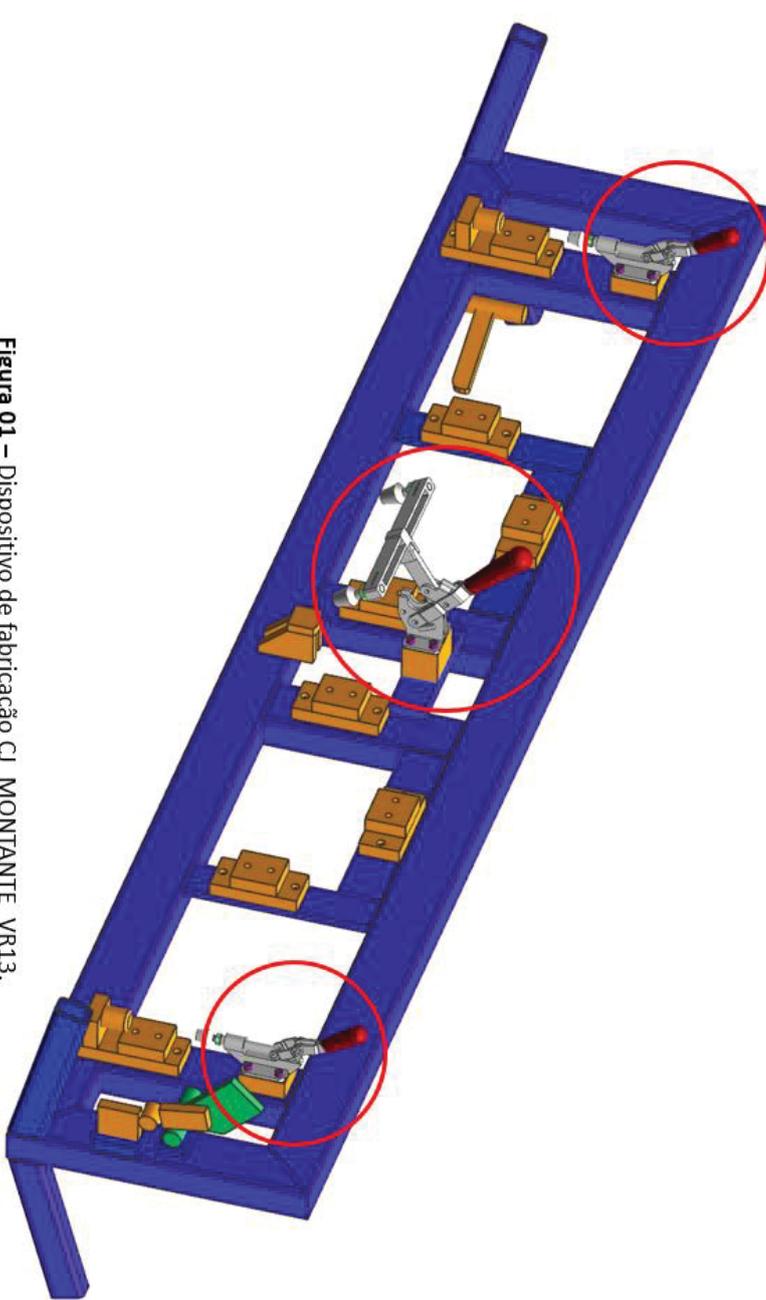
COMIL		POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	
Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROC
Modelo: Versatile	Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1	Página: 1 - 12
Atividades Operação 01: Verificar.			
AT 01	Certificar-se da abertura dos grampos	EPI's <ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	
 <p>The image shows a 3D CAD model of a blue metal frame assembly. Three red circles highlight specific components: the top-left corner, a central mechanical linkage, and the bottom-right corner. A small icon of a document with a pencil is located in the bottom right corner of the image area.</p>			

Figura 01 – Dispositivo de fabricação CJ_MONTANTE_VR13.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13

Data: 07/03/2014

Número: MPROC

Modelo: Versatile

Área de Montagem: Fabricação

Posto: 1

Página: 2 - 12

Atividades Operação 01: Verificar.

EPI's

AT 02

Certificar-se da posição do batente lateral.

- Óculos de proteção;
- Protetor auricular;
- Botina de segurança;
- Luva de raspa.

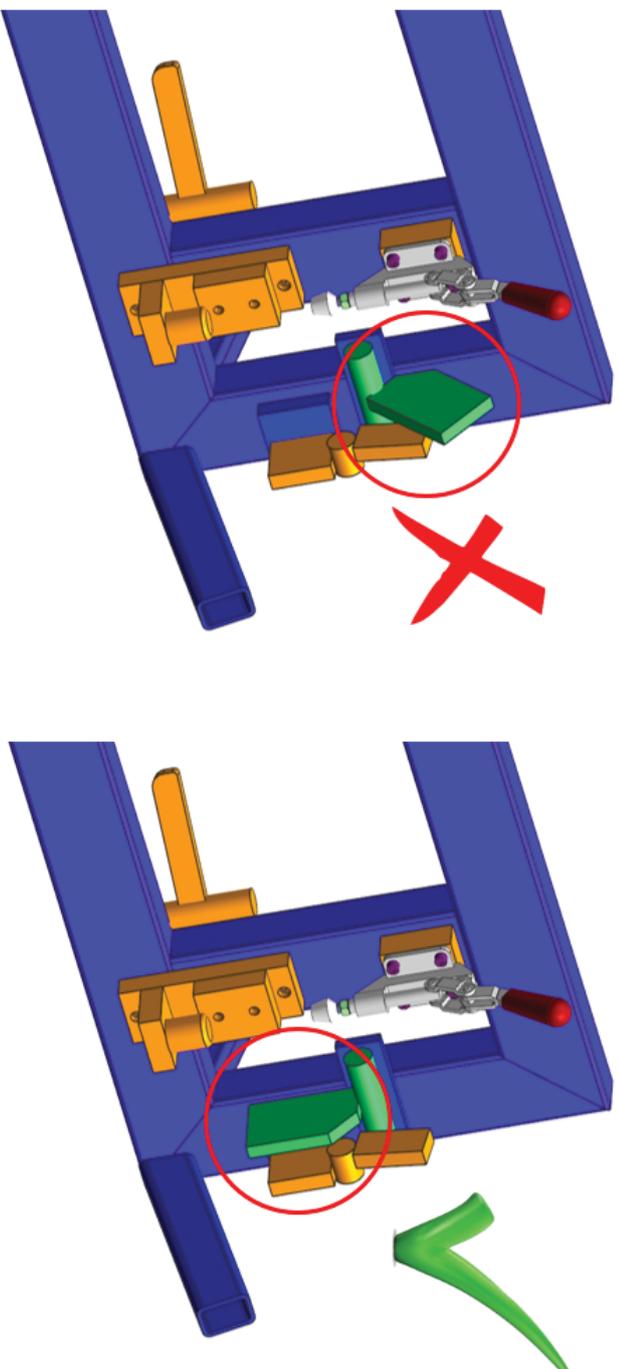


Figura 02 – Posição do Batente de apoio lateral



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13

Data: 07/03/2014

Número: MPROC

Modelo: Versatile

Área de Montagem: Fabricação

Posto: 1

Página: 3 - 12

Atividades Operação 01: Verificar.

EPI's

AT 03

Certificar a posição dos batentes móveis em ambos os lados do dispositivo.

- Óculos de proteção;
- Protetor auricular;
- Botina de segurança;
- Luva de raspa.

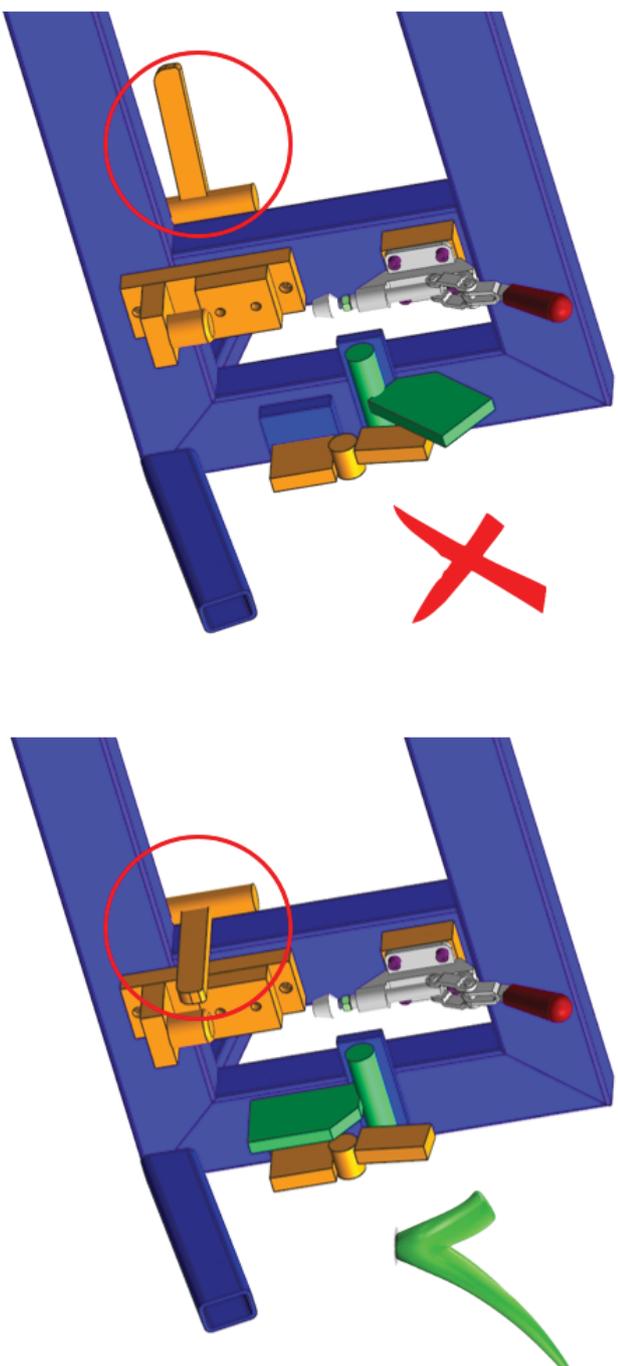


Figura 03 – Posição dos Batentes Móveis Inferiores.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13

Data: 07/03/2014

Número: MPROOC

Modelo: Versatile

Área de Montagem: Fabricação

Posto: 1

Página: 4 - 12

Atividades Operação 01: Verificar.

EPI's

AT 04	<p>Posicionar o tubo reto inferior, apoiando-os sobre os batentes (Fig. 02 e 03). Deverá ser garantido o perfeito apoio da peça sobre o dispositivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa.
-------	--	--

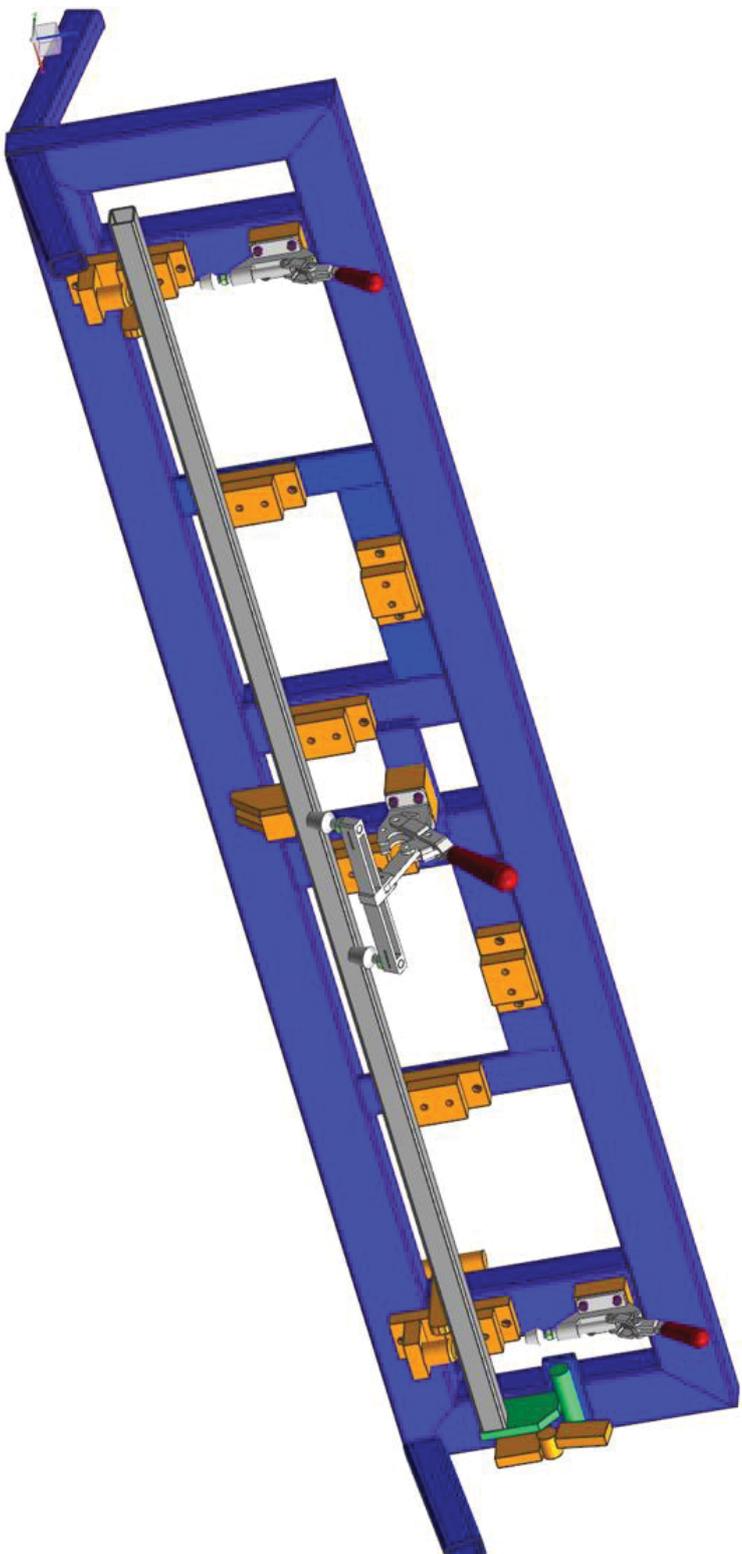


Figura 04 – Posicionamento do tubo reto inferior.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROC
Modelo: Versatile		Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1
		Atividades Operação 01: Verificar.	EPI's
AT 05	<p>Posicionar o tubo curvado simples, apoiando-o sobre o tubo inferior e os demais batentes. Deverá ser garantido o perfeito apoio da peça sobre o dispositivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	

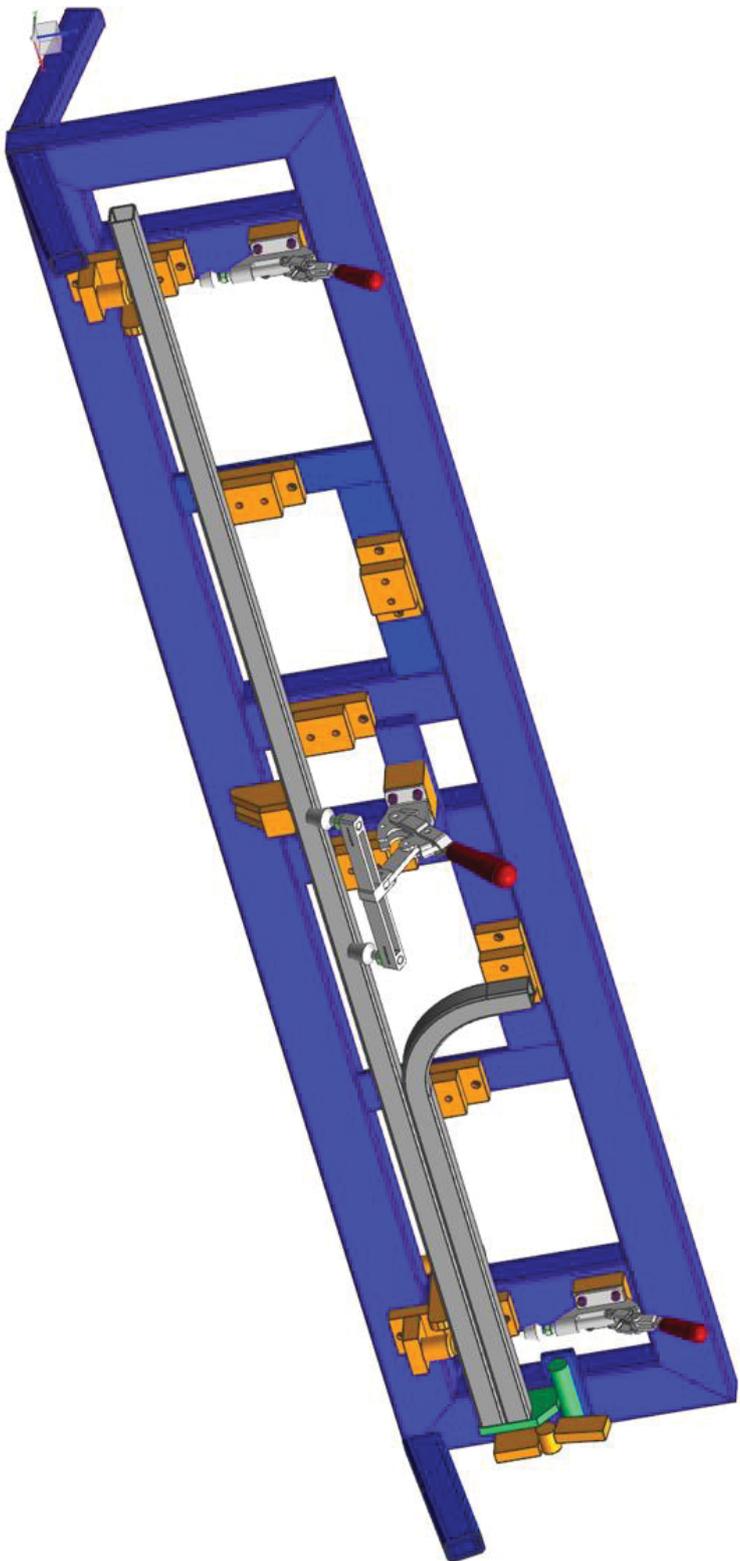


Figura 05 – Posicionamento do tubo curvado simples.

COMIL		POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	
Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROC
Modelo: Versatile	Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1	Página: 6 - 12
Atividades Operação 01: Verificar.		EPI's	
AT 06	<p>Posicionar o tubo curvado central, apoiando-o sobre o tubo inferior e os demais batentes. Deverá ser garantido o perfeito apoio da peça sobre o dispositivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	

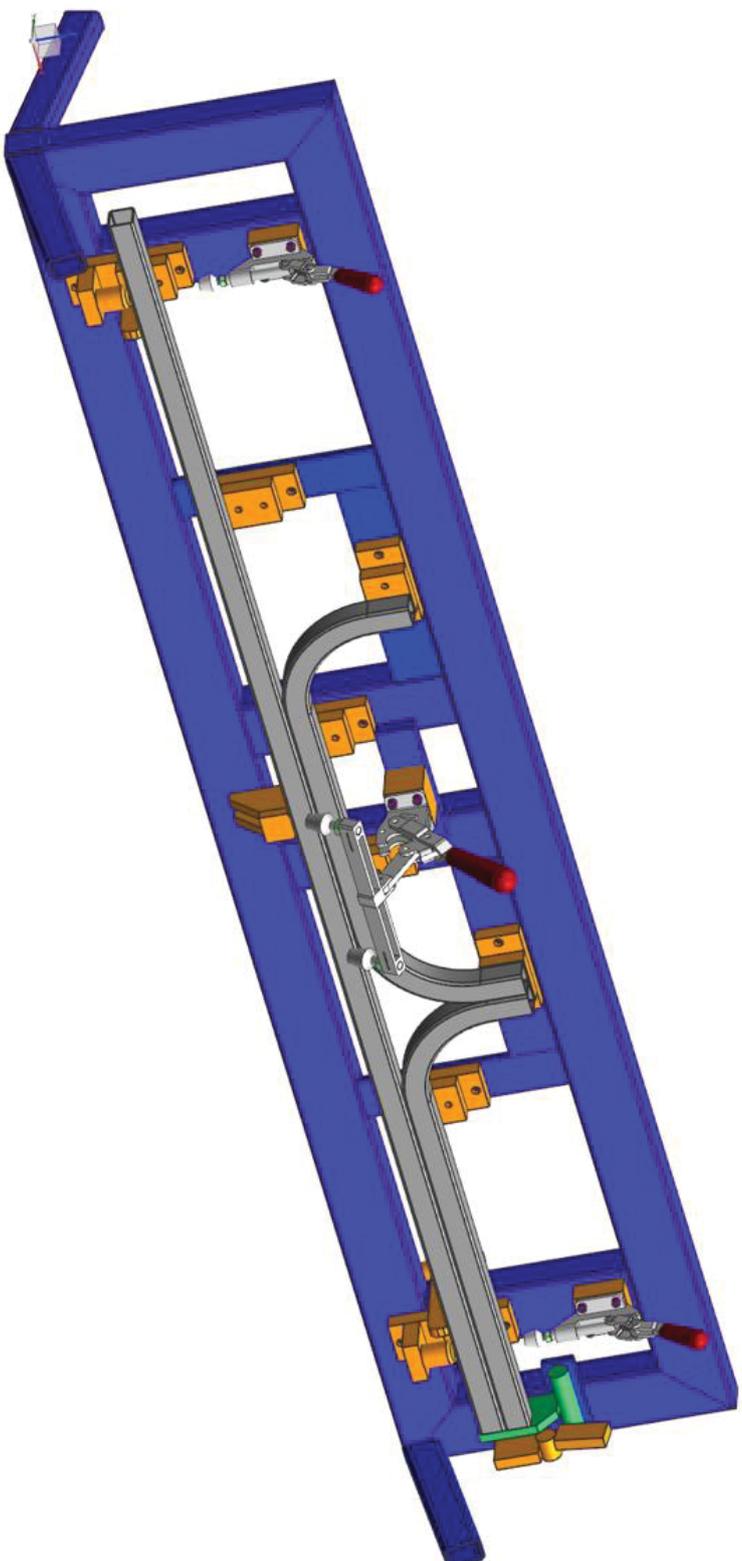


Figura 06 – Posicionamento do tubo curvado central.

COMIL		POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	
Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROCC
Modelo: Versatile	Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1	Página: 7 - 12
Atividades Operação 01: Verificar.		EPI's	
AT 07	<p>Posicionar o tubo curvado simples, apoiando-o sobre o tubo inferior e os demais batentes. Deverá ser garantido o perfeito apoio da peça sobre o dispositivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	

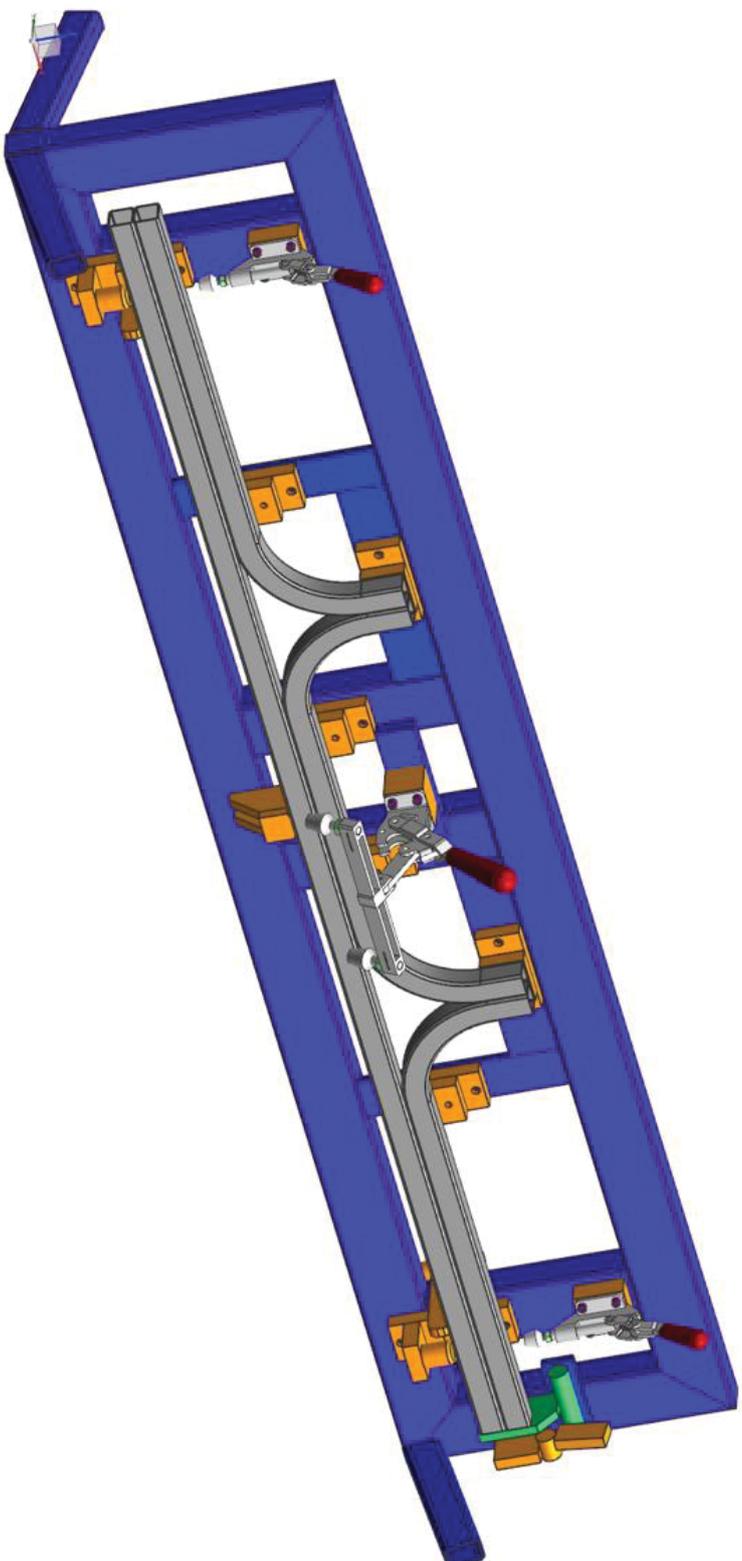


Figura 07 – Posicionamento do tubo curvado simples.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13

Data: 07/03/2014

Número: M/PROC

Modelo: Versatile

Área de Montagem: Fabricação

Posto: 1

Página: 8 - 12

Atividades Operação 01: Verificar.

EPI's

AT 08

Posicionar as chapas de fechamento. Utilizar os ímãs para alinhamento.

- Óculos de proteção;
- Protetor auricular;
- Botina de segurança;
- Luva de raspa.

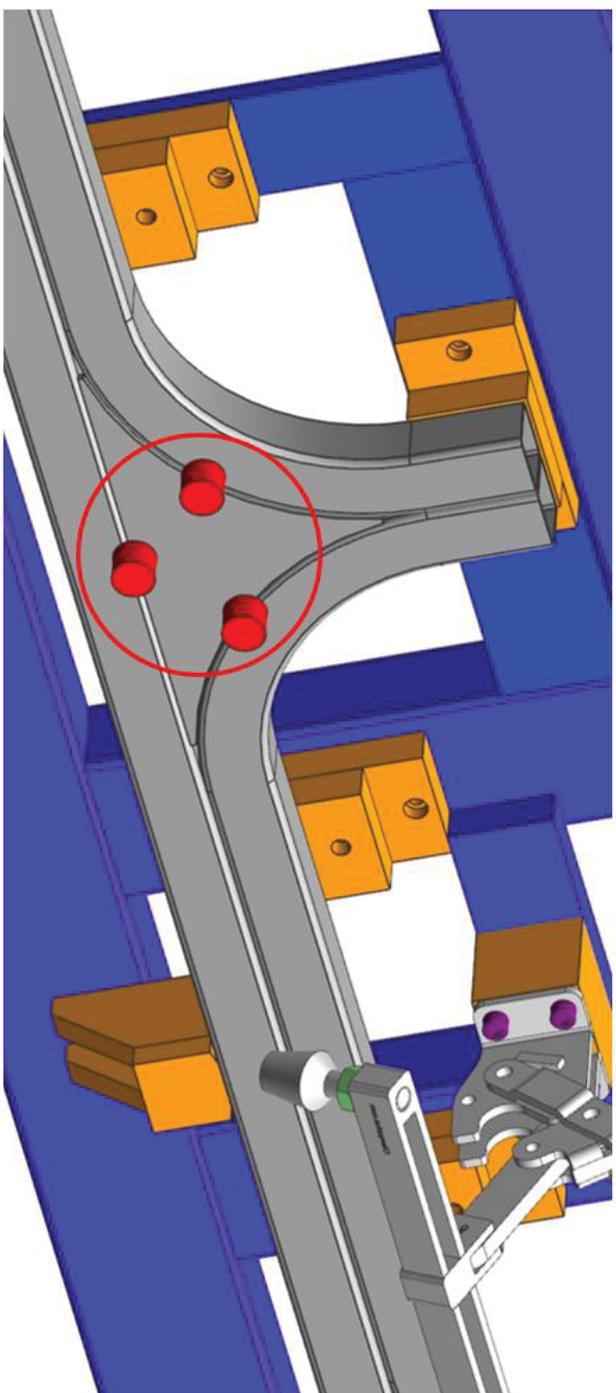


Figura 08 – Posicionamento das chapas de fechamento.

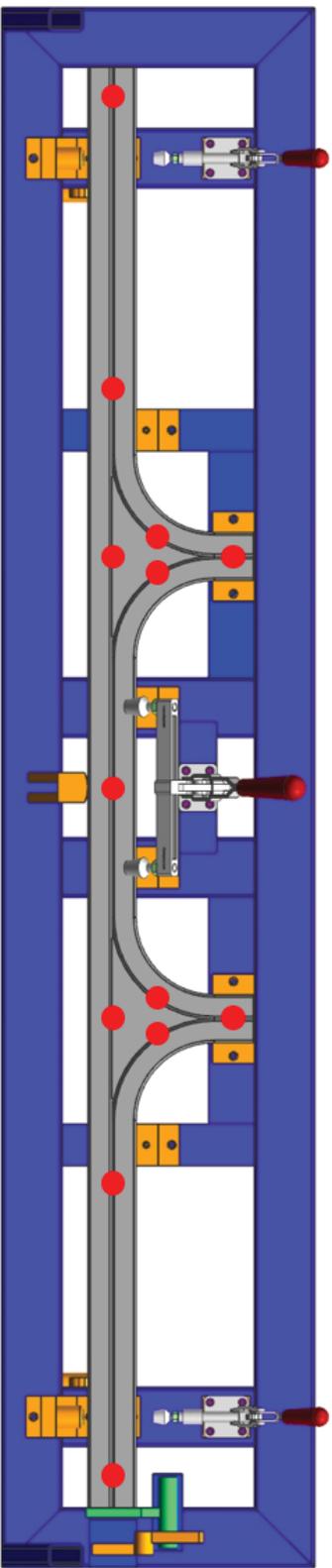
COMIL		POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	
Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROOC
Modelo: Versatile		Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1
Atividades Operação 01: Verificar.		EPI's	
AT 09	Soldar os pontos, unindo as peças, conforme abaixo.	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	
			
			

Figura 09 – Posição dos pontos de solda.

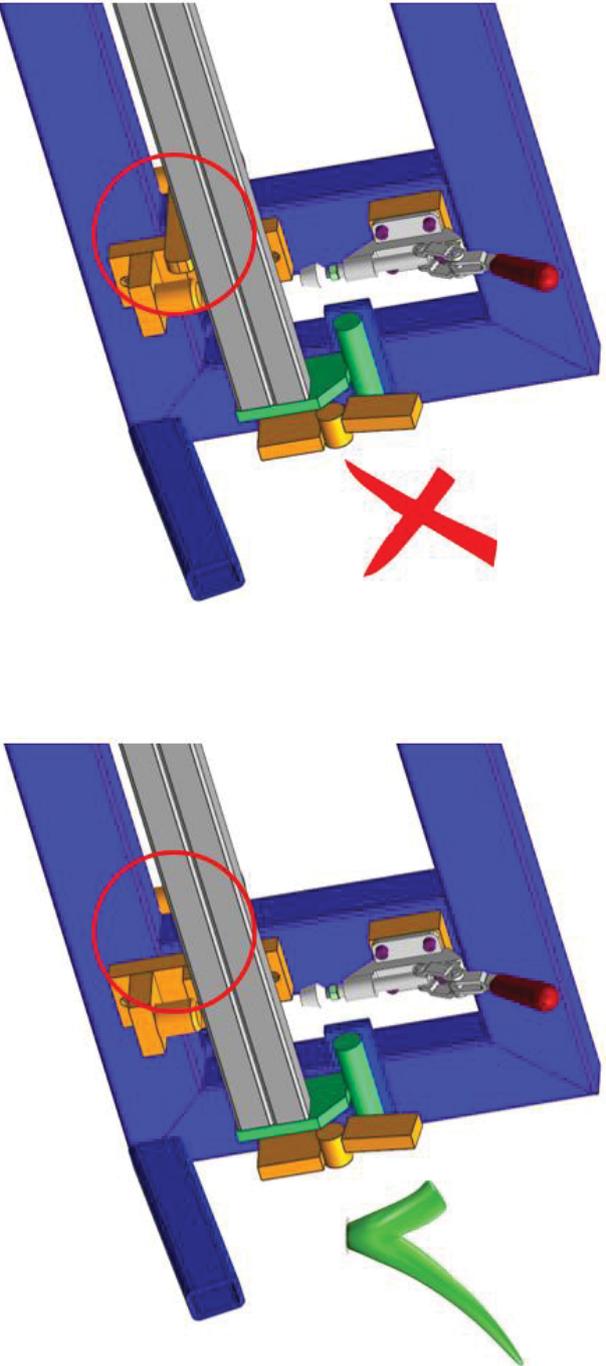
COMIL		POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	
Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROC
Modelo: Versatile		Área de Montagem: Fabricação	Posto: 1
		Posto: 1	Página: 10 - 12
Atividades Operação 01: Verificar.			
AT 10	Remover os batentes móveis de ambos os lados do dispositivo.	EPI's <ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	
			

Figura 10 – Posição dos batentes móveis inferiores.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13

Data: 07/03/2014

Número: MPROC

Modelo: Versatile

Área de Montagem: Fabricação

Posto: 1

Página: 11 - 12

Atividades Operação 01: Verificar.

EPI's

AT 11	<p>Fechar os grampos deformando a peça contra o dispositivo e soldar conforme o plano de solda e sequencia de soldagem.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa.
-------	---	--

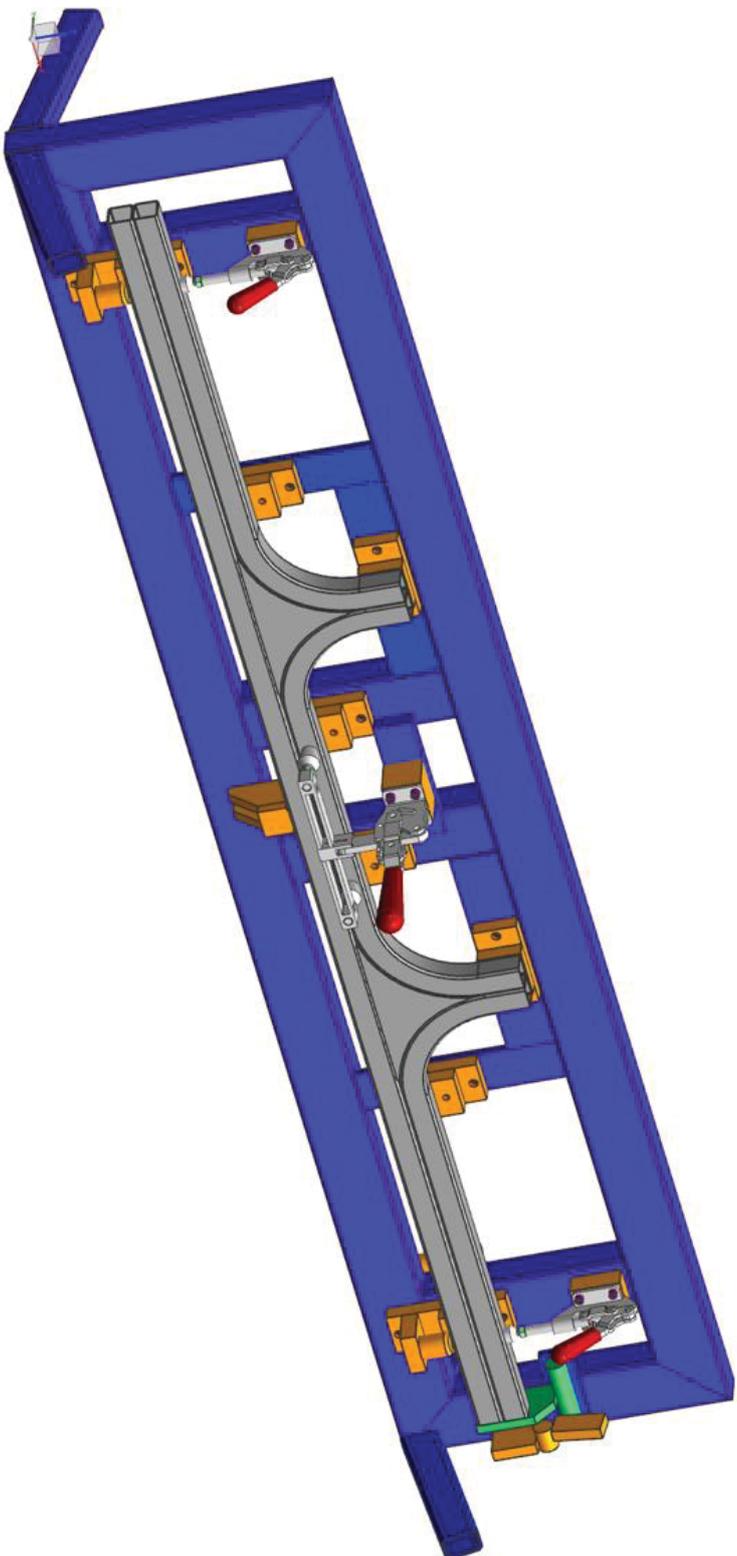


Figura 11 – Dispositivo pronto para execução do processo de soldagem.



POP – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

Processo: Montar arco Conjunto Montante VR13		Data: 07/03/2014	Número: MPROCC
Modelo: Versatile		Posto: 1	Página: 12 - 12
Atividades Operação 01: Verificar.			
AT 12	Abrir os grampos e remover o conjunto soldado.	<ul style="list-style-type: none"> • Óculos de proteção; • Protetor auricular; • Botina de segurança; • Luva de raspa. 	

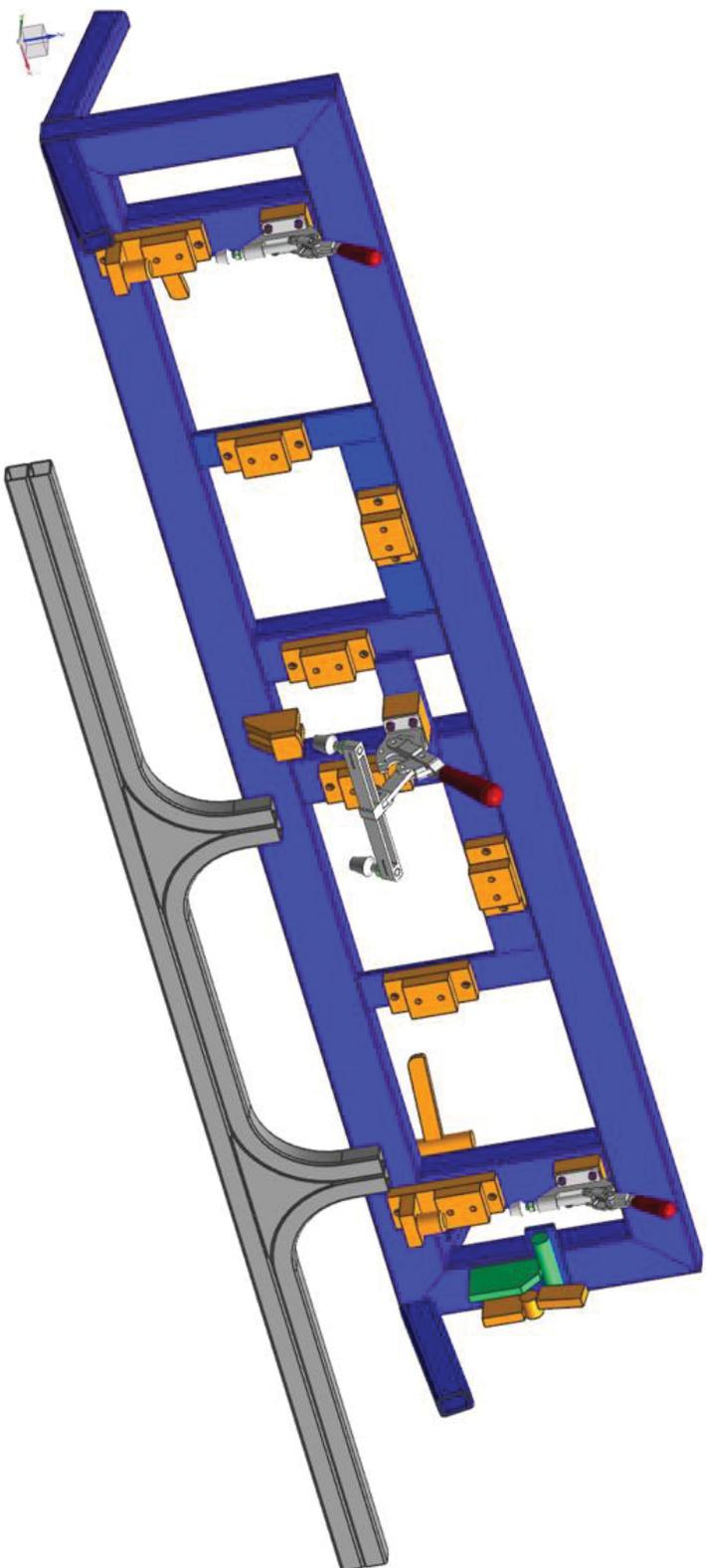


Figura 12 – Remoção do conjunto pós soldagem.