

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

**METODOLOGIA DE PROJETO PARA ARRANJO ESTRUTURAL DE**  
**CARROCERIA DE ÔNIBUS ATRAVÉS DE SISTEMAS MODULARES: UM**  
**ESTUDO DE CASO**

**por**

**Carlos Frederico Viero**

**Dissertação para obtenção do Título de**  
**Mestre em Projeto e Processos de Fabricação**

**Passo Fundo, julho de 2013**

**Metodologia de Projeto para arranjo estrutural de carroceria de ônibus através de sistemas modulares: Um estudo de caso**

**por**

**Carlos Frederico Viero**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Projeto e Processos de Fabricação

Área de Concentração: Projeto de Máquinas e Equipamentos

Orientador: Prof. Dr. Márcio Walber

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Antônio Valle Antunes Júnior - UNISINOS

Prof. Dr. Alexandre Baroni - UCS

Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Junior - UPF

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Coordenador do ppgPPF

Passo Fundo, 21 de julho e 2013

## **AGRADECIMENTOS**

Meu primeiro agradecimento é a minha mãe Anayr D. Chittó Viero, minha esposa Mirela Pedrini Viero, meus filhos Yan Pedrini Viero e Gabriel Xavier Viero que me deram total apoio para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Agradecer ao meu orientador Marcio Walber que se dispôs a orientar o meu trabalho e me direcionar da melhor forma possível.

Um especial e fraternal agradecimento aos professores José Antônio Valle Antunes Júnior, Alexandre Baroni e Douglas Rafael Veit pelo apoio e ajuda na conclusão do trabalho.

Agradecer, também, aos colegas de trabalho Marlos Link, Roberto Busetto, Oséias Esmelindro, André Petry, Marcio Paviani, Thiago Zilio.

## RESUMO

A necessidade de entregar rapidamente ao mercado produtos diferenciados e simplificar, ao máximo, projeto e processo de manufatura faz com que o estudo da modularidade cresça de forma acentuada no cenário atual das empresas de manufatura. Este trabalho realiza a aplicação de conceitos modulares, de forma adaptada, no desenvolvimento de um projeto de arranjo estrutural para carroceria de ônibus intermunicipal. A proposta do uso de alguns conceitos de projeto de produto modular, para o desenvolvimento de um arranjo estrutural de carroceria de ônibus, tem como objetivo simplificar a forma de projetar este arranjo estrutural, fabricá-lo e montá-lo. Estes conceitos modulares foram aplicados na empresa de carroceria de ônibus Comil Ônibus S/A situada na cidade de Erechim. Os principais conceitos de projeto modular de produto, os quais foram mostrados no referencial teórico, são estruturados na forma de uma metodologia que se divide em duas grandes fases. A fase de síntese ou elementarização dos componentes e a fase de análise de comportamento destes componentes. Na aplicação da metodologia foi utilizado um dos módulos que compõe o arranjo estrutural, a base. Inicialmente ele é sintetizado e posteriormente é analisado seu comportamento em função do agente externo chassi.

*Palavras-chave: Modularidade; Projeto-Modular; Arranjo Estrutural, Metodologia; Ônibus.*

## **ABSTRACT**

The need to rapidly deliver differentiated products to the market and simplify as much as possible the design and manufacturing process makes the study of modularity grow sharply in the current scenario of the manufacturing companies. This paper realizes the implementation of modular concepts in an adapted form, in developing a project structural arrangement for intercity bus body. The proposed use of some concepts of modular product design, to the development of a structural arrangement of bus body, aims to simplify the way you design this structural arrangement, build it and ride it. These modular concepts have been applied in an Erechim's bus company Comil Bus S/A. The main concepts of modular design of the product, which have been shown in the theoretical framework, are structured in the form of a methodology which is divided into two phases. The synthesis or elementarization components phase and behavior phase analysis of these components. To demonstrate the application of this methodology was used based subsystem. Base is subsystem of the structural arrangement system of the bus. Initially it is synthesized and later his behavior is analyzed as a function of external agent chassis.

*Key-words: Modularity; Modular-Design; Structural Arrangement; Methodology; Bus.*

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Justificativa .....	15
1.2	Objetivos .....	15
1.2.1	Objetivo Geral .....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	Estrutura do Trabalho.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
2.1	Teoria dos Sistemas.....	18
2.2	Definição de Arquitetura de Produto .....	18
2.2.1	Arquitetura Integral .....	19
2.2.2	Arquitetura Modular .....	20
2.3	Etapas para a Elaboração de um Projeto de Produto com Arquitetura Modular .....	23
2.3.1	Arranjo dos Elementos Funcionais .....	23
2.3.2	Mapeamento Entre os Elementos Funcionais e Físicos.....	24
2.3.3	Interação Entre os Componentes Físicos .....	25
2.3.4	Forma de Interação entre os Componentes Físicos .....	26
2.3.5	Domínios da modularização .....	29
2.3.6	Tecnologia de Grupos.....	30
2.4	Aplicações da Abordagem Modular em alguns Segmentos da Indústria.....	30
2.4.1	Modularização na indústria automotiva.....	30
2.4.2	A Modularização da Indústria do Computador .....	34
2.4.3	Modularização da indústria aeronáutica .....	36
2.4.4	Modularização da indústria naval .....	38
2.5	Arranjo Estrutural.....	41
2.5.1	Sistemas Estruturais .....	41
2.5.2	Forças que Atuam em um Arranjo Estrutural .....	42
2.5.3	Tipos de Solicitações que Ocorrem em um Arranjo Estrutural.....	42
2.5.4	Critérios de Projeto de um Arranjo Estrutural .....	43
2.5.5	Padrões Estruturais de um Arranjo Estrutural .....	43
2.5.6	Estruturas Horizontais .....	44
2.5.7	Estruturas Verticais.....	44
3	ABORDAGEM MODULAR PARA UM ARRANJO ESTRUTURAL.....	45
3.1	Introdução .....	45
3.2	Macro-fase de Síntese ou Elementarização.....	47

3.2.1	Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1 .....	47
3.2.2	Decomposição dos Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1.1 .....	48
3.2.3	Decomposição do Elemento Estrutural - Passo 2 .....	49
3.2.4	Decomposição do Subsistema Estrutural - Passo 3 .....	50
3.3	Macro-fase de Análise de Comportamento.....	51
3.3.1	Análise do(s) Subsistema(s) e Agente(s) Externo - Passo 4.....	51
3.3.2	Análise das Forças Atuantes - Passo 4.1 .....	52
3.3.3	Estudo do Comportamento do(s) Subsistema(s) ou Componente(s) - Passo 5 .....	53
3.3.4	Análise das Interações - Passo 6.....	55
4	ESTUDO DE CASO.....	57
4.1	Apresentação da Empresa .....	57
4.1.1	Aspectos Gerais .....	57
4.1.2	Processo Produtivo da Comil Ônibus S/A.....	58
4.1.3	Montagem do Casulo .....	58
4.2	Abordagem Modular ao projeto de uma Base.....	64
4.2.1	Descrição do Arranjo Estrutural de uma Carroceria de Ônibus .....	64
4.2.2	Estrutura da Frente e Traseira.....	65
4.2.3	Estrutura de Laterais .....	66
4.2.4	Estrutura da Base .....	67
4.2.5	Estrutura do Teto .....	67
4.2.6	Forças Dinâmicas que Atuam em uma Carroceria de Ônibus.....	68
4.2.7	Forças Verticais .....	68
4.2.8	Forças Longitudinais .....	69
4.2.9	Forças Transversais .....	70
4.2.10	Características gerais das carrocerias de ônibus.....	70
4.3	Aplicação da metodologia proposta na Empresa .....	72
4.3.1	Macro-fase de Elementarização.....	73
4.3.1.1	Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1.....	74
4.3.1.2	Decomposição dos agentes externos que afetam o sistema - Passo 1.1 .....	76
4.3.1.3	Decomposição do Elemento Estrutural - Passo 2.....	77
4.3.1.4	Análise do(s) subsistema(s) e elemento - Passo 3.....	78
4.3.2	Macro-fase de Análise de Comportamento .....	79
4.3.2.1	Análise dos Subsistemas e Agentes Externos - Passo 4.....	79
4.3.2.2	Análise do Comportamento do(s) Subsistema(s) ou Componente(s) - Passo 5 .....	81
4.3.2.3	Análise das forças - Passo 5.1 .....	92
4.3.2.4	Análise das Interações - Passo 6.....	92

5	RESULTADOS OBTIDOS .....	94
5.1	Padronização dos Componentes e Projetos.....	94
5.2	Montagens e Variantes do Produto .....	97
6	CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	101
6.1	Conclusões .....	101
6.2	Limitações .....	103
6.3	Trabalhos Futuros .....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
	APÊNDICE A – ASPECTOS HISTÓRICOS .....	104



## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1- Projeto desassociado/acoplado .....	26
Figura 2.2 - Projeto de um reboque e uma mesa .....	27
Figura 2.3 - Projetos usando interface de barramento .....	27
Figura 2.4 - Projetos com interfaces seccionais .....	28
Figura 2.5 - Módulo construtivo da cabine do caminhão Scania .....	32
Figura 2.6 - Esquema do consórcio modular MAN.....	33
Figura 2.7 - Esquema da plataforma VW MQB.....	34
Figura 2.8 - Esquema da máquina de Von Neumann.....	35
Figura 2.9 - Desenhos esquemática da máquina de Von Neumann .....	36
Figura 2.10 - Linha móvel de montagem do Boeing 747 .....	37
Figura 2.11 - Processo de montagem da fuselagem do Boeing 747.....	38
Figura 2.12 - Esquema simplificado de montagem de um avião .....	38
Figura 2.13 - Construção de barcos no conceito <i>stick building</i> .....	39
Figura 2.14 - Esquema de segmentação de um projeto de navio .....	40
Figura 2.15 - Montagem de um navio .....	40
Figura 2.16 - Indústria de navio Hanjin Heavy .....	41
Figura 2.17 - Formas gráficas aproximadas dos tipos de esforços.....	42

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Fase de elementarização (Síntese) .....	45
Figura 3.2 - Fase de análise de comportamento .....	46
Figura 3.3 - Matriz sistema x agente externo .....	48
Figura 3.4 - Decomposição do agente externo .....	49
Figura 3.5 - Matriz de decomposição do elemento estrutural .....	50
Figura 3.6 - Matriz de decomposição do subsistema do elemento estrutural.....	51
Figura 3.7 - Matriz de relação subsistema x sub elemento.....	52
Figura 3.8 - Matriz para análise dos componentes .....	53
Figura 3.9 - Matriz de interação entre módulo .....	55
Figura 3.10 - Formas de montagem.....	56
Figura 3.11 - Matriz de Processo de interação entre módulos.....	56

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Vista aérea da fabrica da Comil Ônibus S/A .....	57
---	----

Figura 4.2 - Esquema resumido da montagem de uma carroceria de ônibus .....	58
Figura 4.3 - Setor de fabricação.....	59
Figura 4.4 - Carrinho de peças da lateral.....	59
Figura 4.5 - Carrinho de peças da base.....	60
Figura 4.6 - Gabarito da base .....	60
Figura 4.7 - Gabarito do teto .....	60
Figura 4.8 - Gabarito da lateral.....	61
Figura 4.9 - Formação do casulo .....	61
Figura 4.10 - Setor de chapeamento .....	62
Figura 4.11 - Setor de pintura.....	62
Figura 4.12 - Setor de acabamento .....	63
Figura 4.13 - Setor de liberação.....	63
Figura 4.14 - Projeto de um casulo.....	65
Figura 4.15 - Projeto de frente e traseira de uma carroceria de ônibus .....	65
Figura 4.16 - Projeto de uma lateral .....	66
Figura 4.17 - Projeto de uma base de uma carroceria de ônibus .....	67
Figura 4.18 - Projeto de teto de uma carroceria de ônibus .....	68
Figura 4.19 - Força vertical na parte traseira.....	69
Figura 4.20 - Forças verticais na parte frontal.....	69
Figura 4.21 - Esquema das forças longitudinais.....	69
Figura 4.22 - Esquema das forças transversais.....	70
Figura 4.23 - Comprimento máximo para carroceria de ônibus.....	71
Figura 4.24 - Altura total e largura total de uma carroceria de ônibus.....	71
Figura 4.25 - Balanço traseiro, balanço dianteiro e entre eixos .....	72
Figura 4.26 - Sistema estrutural de uma carroceria de ônibus.....	73
Figura 4.27 - Esquema de uma sistema estrutural de ônibus.....	73
Figura 4.28 - Matriz de análise de interferência preenchida .....	74
Figura 4.29 - Projeto do módulo de uma base.....	75
Figura 4.30 - Chassi com motorização dianteira .....	75
Figura 4.31 - Desenho esquemático da base .....	76
Figura 4.32 - Matriz de decomposição do agente externo chassi.....	77
Figura 4.33 - Matriz de decomposição do módulo/sistema da base.....	78
Figura 4.34 - Matriz segmentos da base x segmentos do chassi .....	79
Figura 4.35 - Matriz de decomposição dos subsistemas da base.....	80
Figura 4.36 - Matriz rodado dianteiro x componente 1 .....	82
Figura 4.37 - Bloco construtivo componente (1) do subsistema rodado dianteiro.....	83

Figura 4.38 - Matriz conjunto entre-eixo x componente (1) .....	83
Figura 4.39 - Matriz de vãos do componente (1) do conjunto entre-eixo .....	84
Figura 4.40 - Matriz do componente (2) conjunto entre-eixo .....	85
Figura 4.41 - Geometria do bloco construtivo do componente (2) do conjunto entre-eixo .....	85
Figura 4.42 - Matriz do componente (3) do conjunto entre-eixo .....	86
Figura 4.43 - Geometria do bloco construtivo do componente (3) do conjunto entre-eixo .....	86
Figura 4.44 - Matriz do componente (4) do conjunto entre-eixo .....	87
Figura 4.45 - Matriz de vãos do componente (4) do conjunto entre-eixo .....	87
Figura 4.46 - Matriz do componente (1) do rodado traseiro .....	88
Figura 4.47 - Bloco construtivo do componente (1) do rodado traseiro.....	88
Figura 4.48 - Matriz dos componentes (1,2) do balanço traseiro .....	89
Figura 4.49 - Geometria do componente (1) do balanço traseiro .....	89
Figura 4.50 - Geometria do componente (2) do balanço traseiro .....	90
Figura 4.51 - Matrizes: do componente (1) do fechamento e dos vão do componente (1) .....	90
Figura 4.52 - Esquema das variantes do módulo da base .....	91
Figura 4.53 - Matriz de interface dos componentes da base .....	92

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1 - Projetos dos complementos dianteiros (VR/13) .....	95
Figura 5.2 - Gráfico representando a classificação dos projetos .....	96
Figura 5.3 - Carrinho de componentes da base .....	98

## **CAPÍTULO 6**

Figura 6.1 - Variação da produtividade do trabalhador brasileiro.....	101
Figura 6.2 - Salário x produtividade .....	102

## **APÊNDICE 1**

Figura A1.1 - Colunas gregas .....	104
Figura A1.2 - Residência típica japonesa. ....	106
Figura A1.3 - Construção do Palácio de Cristal .....	108
Figura A1.4 - Palácio de Cristal .....	109
Figura A1.5 - Meta-modelos de Borowski .....	111
Figura A1.6 - Sistema de Brankamp e Hermann.....	112
Figura A1.7 - Fases de design de um sistema fechado e aberto apresentado por Brankamp e Herrmann. ....	113

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns resultados obtidos pela modularização da Scania.....	32
Tabela 2 - Análise da redução de peças de alguns componentes .....	94
Tabela 3 - Análise de projetos de montagem .....	96
Tabela 4 - Comparação dos tempos de Montagens dos Casulos.....	98
Tabela 5 - Comparativo de tempos de montagens diária .....	99
Tabela 6 - Comparativos de tempos para montagens mensais .....	100
Tabela 7 - Margem anual estimada para 2014.....	100
Tabela 8 - Tabela de componentes romanos .....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARTESP	Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paul.
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
EPTC	Empresa Pública de Transporte e Circulação – Porto Alegre
PBT	Peso Bruto Total
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DETRO	Departamento de Transportes Rodoviários do Estado do Rio de Janeiro
SPTrans	São Paulo Transporte S.A.

# 1 INTRODUÇÃO

As diversidades normativas, as necessidades de personalização dos clientes e a baixas escalas de fabricação de seus componentes fazem da carroceria de ônibus um produto complexo de ser projetado e produzido.

Atualmente, nas indústrias de carrocerias de ônibus brasileiras, o conceito construtivo predominante na montagem da estrutura da carroceria é o stick building. Segundo Mello (2011), este conceito de construção tubo a tubo foi empregado, por muito tempo, pela indústria naval. Esta forma de montagem, a qual ocorre em especial no arranjo estrutural da carroceria, faz com que cada carroceria construída seja única. Segundo Mello (2011) a perda de competitividade da indústria naval gerou a necessidade de uma nova abordagem de projeto de engenharia para este produto. Esta mudança foi o uso da modularização nos projetos e montagens, ocorrida no final da década de sessenta e início da década de setenta, e transformou a geografia da indústria naval no mundo. Hoje a perda de produtividade é assunto recorrente em vários segmentos industriais brasileiros e, conseqüentemente, no segmento de carrocerias de ônibus. Além da questão da produtividade tem-se a questão da falta de mão de obra que vem afetando significativamente a capacidade produtiva e qualidade dos produtos das empresas que tem uso intensivo de mão de obra em seu processo produtivo.

Analisando sob o ponto de vista da indústria naval, pode-se inferir que, assim como ocorreu na indústria naval, uma mudança na abordagem dos projetos estruturais das carrocerias de ônibus poderá ser um caminho a ser percorrido na busca de melhorias nos processos produtivos das encarroçadoras de ônibus brasileiras.

## 1.1 Justificativa

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Ônibus (FABUS), a produção acumulada de carrocerias no ano de 2012 chegou a 32.500 unidades. Do total de 32.500 unidades produzidas, 4.200 unidades foram destinadas a exportação. Desta forma pode-se afirmar que o mercado nacional de carrocerias é superior a 27.000 unidades. Estas 27.000 unidades estão divididas nos segmentos urbano, rodoviário e micro. Além dos segmentos de produtos, há a divisão entre as encarroçadoras, sendo que há cinco empresas atuando no mercado nacional em todos os segmentos. Com isso é fácil compreender que a escala, no

universo de carrocerias de ônibus, dividida em seus segmentos, é bem diferente das escalas existentes nos segmentos de automóveis e caminhões.

A carroceria de ônibus é comercializada sob encomenda (make to order ou engineering to order), sendo esta a forma utilizada atualmente para atendimento das necessidades dos clientes. Este processo de comercialização somado as características dos chassis e a legislação em vigência (EPTC, SPTrans, DETRO, CONTRAN, DNER, etc...), que deverão ser atendidas para que o produto esteja apto a operar, geram infinitas possibilidades de projeto. O objetivo principal do produto ônibus é fazer o transporte de pessoas, para que isso ocorra é necessário que o produto execute várias funções, internamente, e cada uma destas funções está sob a influência de normas e das variações dos chassis. Somando-se a quantidade de funções podemos identificar que a forma de inter-relação e interdependência destas funções eleva ainda mais o grau de complexidade de se projetar e produzir uma carroceria de ônibus.

Como foi descrito acima, a baixa escala das carrocerias de ônibus comparada com a indústria automotiva, combinada com as personalizações dos produtos e seu nível de complexidade de projeto e produção, geram uma combinação que traz grande dificuldade para a evolução dos materiais empregados, processos produtivos e nas soluções de projetos para carroceria de ônibus. Desta forma a intenção deste trabalho é trazer uma possibilidade de solução para o aumento de escala dos componentes permitindo, desta forma, que as evoluções de materiais, processos de manufatura e soluções de projetos possam ocorrer. Sendo assim, a questão que norteia a presente pesquisa é: “Como o uso de projeto modular de produto pode auxiliar na construção de uma metodologia de desenvolvimento do arranjo estrutural de carroceira de ônibus”?

## **1.2 Objetivos**

Abaixo são apresentados os objetivos gerais, proposto pelo trabalho e os objetivos específicos que buscam ser alcançados.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor uma abordagem de projeto modular para contribuir na construção de uma metodologia para arranjo estrutural de carroceria de ônibus.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Propor a aplicação de conceitos relevantes de projeto modular para um arranjo estrutural para carrocerias de ônibus;
- Descrever, criticamente, a aplicação da metodologia para o desenvolvimento de um arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus em uma encarroçadora de ônibus do estado do Rio Grande do Sul;
- Aumentar a padronização dos componentes, diminuir o número de operações de montagem possíveis, na linha de montagem, no atendimento das variações do produto, diminuir o tempo de modelagem dos pedidos dos clientes.

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

No primeiro capítulo deste trabalho são apresentadas as justificativas, a questão de pesquisa e os objetivos gerais e específicos, bem como a estrutura do trabalho.

O capítulo dois apresenta o referencial teórico para este trabalho. Nele são expostas as principais abordagens de Pahl e Beitz (2005) e Ulrich (1993) para metodologia de projetos modulares de produto.

O capítulo três descreve, etapa a etapa, a metodologia desenvolvida para uma abordagem modular em arranjos estruturais.

O Capítulo quatro descreve o Estudo de Caso desta dissertação. Ele começa com a apresentação da empresa onde foi empregada esta abordagem de projeto, bem como, visa mostrar, de forma esquemática, como é produzida uma carroceria de ônibus. Além disso, descreve, de forma resumida, um sistema de arranjo estrutural para uma carroceria de ônibus juntamente com informações referentes a alguns requisitos normativos. Além da questão do



arranjo estrutural este capítulo apresenta, também, a aplicação desta metodologia na construção de um dos módulos do sistema de arranjo estrutural da carroceria de ônibus.

O capítulo cinco apresenta os resultados obtidos, após a implementação da metodologia apresentada no capítulo 3, para o desenvolvimento de um arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus intermunicipal.

O capítulo seis traz as conclusões, limitações e proposta para trabalhos futuros decorrentes do uso desta metodologia em arranjos estruturais de ônibus, nas indústrias de carroceria de ônibus.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Apresenta-se a seguir o marco teórico sobre os principais conceitos referentes à teoria dos sistemas, arquitetura de produto e projeto modular de produto para que, na sequência, propore uma metodologia para desenvolvimento de projeto modular para arranjo estrutural.

### **2.1 Teoria dos Sistemas**

Segundo Blanchard (1998) sistema é uma palavra de origem grega cujo significado é um todo organizado, ou seja, um grupo inter-relacionado de componentes trabalhando juntos por um objetivo comum. O autor ainda propõe que o sistema pode ser definido pelas seguintes características gerais:

- Combinação complexa de recurso na forma de seres humanos, equipamentos, softwares entre outros;
- Conter alguma forma de hierarquia;
- Um sistema pode ser quebrado em subsistemas e componentes;
- O sistema deve ter um propósito, deve ter uma função e ter a habilidade de responder a uma necessidade.

### **2.2 Definição de Arquitetura de Produto**

Quando se fala em arquitetura de produto devem-se levar em consideração as seguintes questões:

- Direcionamento para conceito da abordagem projetual do produto;
- Impactos sob os custos de manufatura;
- Impactos sob a evolução do produto;
- Impactos sob a organização da equipe de desenvolvimento.

Romeiro (2010) define que arquitetura de produto é um conceito que envolve o arranjo entre os elementos funcionais, um mapeamento destes elementos funcionais em relação aos componentes físicos e a especificação das interações entre os componentes físicos que interagem entre si, sugerindo que há dois tipos de arquitetura de produto, integral e modular.

Para Ulrich (1993) a arquitetura de produto viabiliza o debate do projeto de produto sob o ponto de vista dos processos de manufatura e, também, do seu gerenciamento. Segundo o autor a arquitetura do produto é uma livre escolha da empresa. Porém, alguns produtos definem sua arquitetura através de sua forma de evolução.

Para Ulrich e Eppinger (2012) o produto pode ser pensado sob a forma de funções ou sob o ponto de vista físico. Os elementos funcionais de um produto são as operações individuais que cada elemento executa e a contribuição que a função dá no funcionamento global do produto. Já os elementos físicos de um produto são as peças, componentes, submontagens e montagens que implementam as funções. Desta forma, concluem os autores, a arquitetura de um produto é a forma pela qual os elementos funcionais do produto são arranjados nos elementos físicos e como estes elementos físicos interagem.

Baxter (2011) define que os produtos podem ser descritos em termos funcionais ou físicos. Os elementos funcionais são os que executam operações ou transformações e contribuem para o desempenho global do produto. Já os elementos físicos são constituídos por peças, componentes e subconjuntos que exercem as funções do produto. Estes elementos podem ser organizados em diversos blocos e cada um destes blocos contém componentes que executam uma ou mais funções. O estudo das interações entre esses blocos e o arranjo físico dos mesmos chama-se arquitetura de produto.

Apesar de algumas divergências conceituais entre os autores, há convergência quanto aos tipos de arquitetura de produto, sendo que dois tipos são visualizados:

- Arquitetural integral;
- Arquitetural modular.

Pahl e Beitz (2005, 352) definem arquitetura de produto da seguinte forma “... é o esquema do relacionamento entre a estrutura da função e a estrutura física do produto, ou seja, é a estrutura da construção”. Os autores também destacam que “As características das relações entre descrição funcional e física tipificam o caráter da arquitetura do produto”.

### **2.2.1 Arquitetura Integral**

Ulrich (1993) destaca que a *arquitetura integral* de produto é composta por um complexo mapa de relacionamento entre função e componente físico, ou seja, a relação de uma função para os componentes não ocorre na forma um-para-um.

Já para Pahl e Beitz (2005) a *construção integral* possui este conceito, porém aplicado em componentes e subconjuntos. Para os autores o agrupamento de diversas funções em um único componente é uma forma de racionalização para processos de manufatura. No entanto esta técnica necessita de condições apropriadas de produção e aquisição de seus componentes. Para a manufatura, onde há ocorrência de um emprego intensivo de mão-de-obra com um custo elevado, os autores aconselham seu uso como forma de racionalização dos meios produtivos. É importante ressaltar que os autores não falam de produto com arquitetura integral, mas de componentes e subconjuntos.

Para Baxter (2011) os produtos com arquitetura integral devem apresentar uma das seguintes características:

- As inter-relações entre os blocos são mal definidas e nem sempre são fundamentais para a função principal;
- Um bloco exerce muitos elementos funcionais;
- Os elementos funcionais são compartilhados por mais de um bloco.

Romeiro (2010) define que a arquitetura integral é definida a partir de subsistemas que são projetados de forma dependente, cujas funções são compartilhadas por um ou mais componentes físicos.

### **2.2.2 Arquitetura Modular**

Para Baxter (2011) a arquitetura modular é aquela em que os blocos são arranjados em módulos, com as seguintes propriedades:

- Cada módulo exerce um ou alguns elementos funcionais de forma completa, ou seja, não existem funções compartilhadas entre os módulos;
- A interação entre os módulos é bem definida e geralmente são fundamentais para a realização da função global do produto.

Back (2008) define que o termo modularidade é adotado para descrever o uso de unidades comuns com o fim de criar uma variedade de produtos. O objetivo é identificar unidades independentes e normalizadas ou intercambiáveis para atender uma variedade de funções. Além disso, o autor destaca a conveniência de se distinguir dois conceitos:

- Módulos funcionais: conceito abstrato que pode ser formado por uma ou mais funções;
- Módulo construtivo: são soluções físicas que incorporam um ou mais módulos funcionais.

Ericsson e Erixon (1999) definem que produtos com arquitetura modular devem ter duas características:

- Similaridade entre as arquiteturas físicas e funcionais;
- Baixo nível de interação entre os componentes físicos.

Romeiro (2010) define que no projeto modular a arquitetura é concebido a partir de subsistemas que são projetados independentes, mas que funcionam juntos integralmente, sendo que cada módulo pode exercer uma ou mais funções.

Para Ulrich (1993) a arquitetura modular ocorre quando o elemento funcional esta contido, fisicamente, somente em um componente (componente/subconjunto/conjunto) do produto, ou seja, na relação um-para-um. Esta relação de pertinência provoca uma dissociação nas interconexões (interfaces) dos componentes.

Para Pahl e Beitz (2005) há dois princípios de racionalização de projeto e produção de produto onde há uma ampla faixa de variação.

O primeiro princípio é definido como **produtos em séries** onde existem objetos técnicos (máquinas, subconjuntos ou componentes) que atendem a mesma função. Esta função deve possuir a mesma solução, várias opções de tamanhos e, se possível, os mesmos processos de fabricação. Sob o ponto de vista de projeto este tipo de solução pode simplificar o trabalho de projeto, pois poderá ser feita uma única vez e, sob o ponto de vista de produção, este tipo de solução poderá facilitar a produção em lotes.

O segundo princípio é o do **sistema modular**, este sistema aparece como uma solução recente para racionalização de projeto e produção. Esta solução busca uma racionalização, também, para um programa de produto que atenda várias funções. O atendimento de várias funções, para os autores, gera uma multiplicidade de produtos que acarretam custos elevados de projeto e produção. A forma de racionalização sugerida pelos autores é a de que as variantes do produto sejam atendidas por combinações de componentes ou subconjuntos específicos (blocos de função). Sob o ponto de vista técnico e de produto, para os autores, este princípio sempre será vantajoso em comparação com soluções específicas, para tanto, as

variantes do programa de produto devem ser produzidas em quantidades pequenas para que a faixa de variação possa ser atendida com um ou poucos blocos auxiliares. O uso repetitivo dos blocos aumenta o tamanho dos lotes de peças, os autores defendem que este objetivo é alcançado pela elementarização em blocos de componentes específicos do produto. Os sistemas modulares são constituídos por blocos interligados de forma dissolúvel ou indissolúvel. Estes blocos devem ser distinguidos entre blocos de função e blocos de produção. Os blocos de função são aqueles que atendem as funções técnicas do produto isoladamente ou em combinação com outros blocos. Já os blocos de produção são aqueles que atendem exclusivamente os critérios tecnológicos de produção.

Os blocos funcionais são classificados, para Pahl e Beitz (2005), de acordo com as funções que se repetem nos sistemas e são combinadas em subfunções que satisfazem a função global. Os autores dão a seguinte sugestão de classificação das funções:

- **Função básica:** são funções fundamentais, repetitivas e imprescindíveis. Esta função não varia e pode comparecer, dentro do sistema, de forma única ou combinada com outras funções. Esta função se concretiza em um bloco básico que pode ser produzido em um ou vários tamanhos e, eventualmente, com vários estágios de acabamento.
- **Funções auxiliares:** são integrantes, em geral, atendidas por blocos auxiliares que se apresentam como elementos de ligação e interligação. Os blocos auxiliares necessitam ser desenvolvidos de acordo com o tamanho dos blocos básicos.
- **Funções especiais:** são subfunções isoladas, complementares, específicas de uma tarefa, que não se repete em todas as variantes da função global. São satisfeitas por blocos especiais que representam uma complementação ou um acessório do bloco básico.
- **Funções de adaptação:** são necessárias para um ajuste aos outros sistemas e condições complementares. São concretizadas por blocos adaptativos com dimensões fixadas parcialmente que, em casos especiais, necessitam de um ajuste das suas dimensões em razão da imprevisibilidade das condições de contorno.
- **Funções específicas:** são funções não previstas no sistema modular, sempre torna a ocorrer, mesmo que o sistema tenha sido desenvolvido cuidadosamente.

Outro aspecto ressaltado pelos autores é que geralmente um sistema modular ocorre no decorrer do tempo de vida de um plano de produto. A solução inicial é desenvolvida para atender uma função específica, porém no decorrer do tempo há a necessidade de se gerar

variantes desta função para atendimento da demanda. Para os autores esta condição é uma vantagem, pois as principais características do produto já foram testadas ao longo do tempo.

Como apresentado acima, todos os autores defendem as mesmas técnicas para se obter um projeto de arquitetura modular. Desta forma os três tópicos abaixo descrevem as três etapas gerais para a construção de uma arquitetura de produto modular.

### **2.3 Etapas para a Elaboração de um Projeto de Produto com Arquitetura Modular**

Os tópicos anteriores referentes à arquitetura de produto mostram que a relação entre os elementos funcionais e físicos determinam esta arquitetura e definem a implementação da função global do produto. Com isso há duas formas de arquitetura de produto, a integral e a modular. Na arquitetura integral todas as funções ou a maioria delas estão implementadas em um único ou poucos blocos físicos, por outro lado à arquitetura modular busca a implementação de uma função em um bloco físico. Olhando sob o ponto de vista de arquitetura de produto surgem três perguntas básicas a serem respondidas na implementação de um projeto com arquitetura modular, que são as seguintes:

- Quais são as funções do produto?
- De que forma estas funções são implementadas fisicamente?
- Como os elementos físicos se relacionam?

Os subcapítulos Arranjo dos Elementos Funcionais, Mapeamento entre Elementos Funcionais e Físicos e Inter-relação entre componentes físicos apresentam a base teórica para responder as perguntas anteriores.

#### **2.3.1 Arranjo dos Elementos Funcionais**

Para Ulrich (1993) os elementos funcionais são as operações individuais e transformações que contribuem para o desempenho geral do produto, ou seja, as funções para o produto são as ações necessárias, executadas pelo produto, para implementar sua função global.

Na mesma linha de raciocínio, Pahl e Beitz (2005), definem que o arranjo dos elementos funcionais ocorre através da interligação das subfunções as quais implementam a função global. Para os autores os objetivos desta estrutura da função são os seguintes:

- Simplificar o desdobramento da função global para subsequente busca da solução;
- Interligação destas subfunções em uma estrutura simples e não ambígua.

Os autores enfatizam que a estrutura de funções tem significativa relevância no desenvolvimento dos sistemas modulares, pois a estrutura de funções influencia decisivamente nos módulos e no arranjo dos subconjuntos. Além dos critérios funcionais, as exigências da tecnologia de produção também influenciam cada vez mais a estrutura de função e a estrutura da construção dela derivada. Desta forma conclui-se que a elaboração da estrutura de função deverá servir como ferramenta para a busca de soluções, segundo Pahl e Beitz (2005).

### **2.3.2 Mapeamento Entre os Elementos Funcionais e Físicos**

Para Ulrich (1993) o segundo passo, após a definição da estrutura funcional do produto, é o mapeamento dos elementos funcionais e físicos. Este mapeamento deve relacionar as funções do produto com seus componentes físicos. O autor esclarece que sua definição de componente não diz respeito somente a uma parte física do produto podendo incluir, também, suas montagens. Pode-se dizer que o componente, neste caso, passa a ser um segmento/região do produto. Os componentes físicos do produto devem conter funções elementares as quais irão formar, de forma integrada, a função global do produto. Este mapeamento se dá na forma de pertinência, ou seja, uma determinada função poderá estar contida em um bloco físico do produto, ou ainda, um bloco físico pode conter uma ou mais funções.

Segundo Ulrich (1993) na relação de pertinência entre elemento físico e elemento funcional, para o autor, há duas possibilidades de relacionamentos. A primeira forma de relacionamento é de um para um ( $1 \rightarrow 1$ ) e a segunda forma de relacionamento é de um para vários ( $1 \rightarrow n$ ).

Para os autores Pahl e Beitz (2005) a estrutura funcional do produto é derivada da lista de requisitos do produto, ou seja, esta estrutura de função surge da análise da lista de requisitos a qual determina a função. Fica evidente, com isso, que o uso da lista de requisitos é uma ferramenta de apoio à solução do problema, porém isso ocorre somente se o núcleo da tarefa global, que o sistema deve exercer, estiver formulado. Com base nisso pode-se formular



a função global do sistema/produto. A partir do entendimento da tarefa global, os autores definem a complexidade do sistema, ou seja, a partir da complexidade da tarefa a ser executada. Esta complexidade poderá ser diminuída através da divisão da função global (tarefa global a ser executada) em subfunções (tarefas menores).

A simplificação da função global em subfunções, através de um processo de elementarização, permite encontrar o princípio de funcionamento de cada uma das subfunções (tarefas), o qual deverá conter o efeito físico, suas características geométricas e seus materiais. Cada um destes princípios irá ser combinado, posteriormente, na estrutura de funcionamento do sistema.

Embora por caminhos diferentes, ambas as metodologias chegam aos elementos físicos de um sistema. O importante é compreender que se podem ter produtos modulares com arquitetura mista, ou seja, podem-se ter várias funções contidas em um único componente ou bloco físico e outras funções contidas, separadamente, em seu respectivo componente físico.

### 2.3.3 Interação Entre os Componentes Físicos

Ulrich (1993) define que a interação entre os componentes ocorre através das *interfaces*, as quais podem ser físicas (físico no sentido de tangível) envolvendo conexões geométricas entre dois componentes e as não físicas (não tangível), através de outros meios não tangíveis. Sendo esta interação responsável pela execução da função global do produto.

Pahl e Beitz (2005) definem que para o atendimento de uma função (solução/função/tarefa), os componentes e subconjuntos são conectados entre si. Logo, as *interfaces* entre os elementos físicos são o que gera a função (solução/tarefa) principal do sistema<sup>1</sup>. Estas uniões, entre os componentes e subconjuntos, irão atender a uma determinada função e o tipo de união entre os elementos é o que irá caracterizar suas propriedades e determinar seu comportamento. Além disso, para os autores o emprego correto destes princípios é decisivo para o sucesso da solução (função/tarefa).

Mais uma vez é possível encontrar convergência, sob o ponto de vista teórico, na visão de Pahl e Beitz (2005) e Ulrich (1993). Ambos defendem que é através das interfaces entre os elementos do sistema que a função global irá ser executada.

---

<sup>1</sup> Este tema pode ser visto no capítulo Campos de Solução no tópico Princípios das uniões mecânicas.

Ericsson e Erixon (1999) destacam que, em um projeto modular, as *interfaces* entre dois módulos tem influência vital no produto final e, também, em sua flexibilidade de proporcionar composições diferentes (variantes). A análise das interfaces entre os módulos, para os autores, se torna uma parte fundamental do trabalho. Desta forma os autores propõem que as formas de interface entre dois módulos podem ser fixa, móvel ou por transmissão através de um meio (tangível ou intangível). As interfaces fixas somente conectam os módulos e transmitem forças, já as interfaces móveis podem transmitir energia na forma de rotação ou através de outras forças alternativas. Porém como meios de transmissão os fluidos ou eletricidade. A matriz de interface traz uma visão das relações entre os módulos. Ela dispõe os módulos na sua ordem de montagem e suas inter-relações.

#### 2.3.4 Forma de Interação entre os Componentes Físicos

Para Ulrich (1993) as interfaces podem ser desassociadas (de-coupling) ou associadas (*coupling*). Logo, dois componentes estão acoplados, ou melhor, possuem interface de acoplamento se a alteração em um componente provoca alteração em outro componente. Dois componentes estão desassociados se a alteração em um dos componentes não provocar alterações no outro componente. A Figura 2.1 exemplifica os dois conceitos.

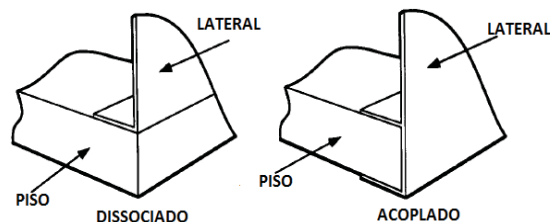


Figura 2.1- Projeto desassociado/acoplado  
(Fonte: Ulrich (1993))

Ulrich (1993) propõe, através de sua metodologia, um grau de padronização das interfaces entre os componentes. Segundo o autor, a este grau de padronização de interface ocorre da seguinte forma:

- Ranhura/Abertura/Entalhe (*slot*);
- Barramento (*bus*);
- Seção (seccional).

Na arquitetura modular de *ranhura/abertura/entalhe (slot)* cada uma das interfaces entre os componentes é de um tipo diferente. Nesta arquitetura cada *slot* recebe um tipo distinto de componente, não sendo possível a intercambialidade através dos *slots*. Pode-se citar como exemplo o rádio do automóvel, onde sua interface é diferente dos outros componentes do painel do veículo, no caso, em comparação ao velocímetro. Ambos têm interfaces diferentes e cumprem funções diferentes, porém estão contidos dentro de um módulo chamado de base (chassi) que, neste caso, é o painel. Na Figura 2.2 são apresentados dois exemplos de projetos usando este tipo de arquitetura de interface.

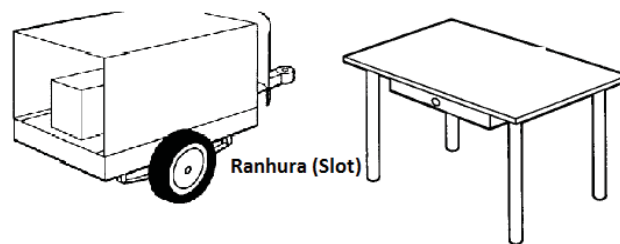


Figura 2.2 - Projeto de um reboque e uma mesa  
(Fonte: Ulrich (1993))

Na arquitetura modular com *barramento (bus)* há um barramento comum no qual os componentes são conectados usando interfaces padrões. Um exemplo deste tipo de arquitetura é a expansão de memória dos computadores pessoais. Porém este tipo de arquitetura não fica restrito somente a componentes eletrônicos. Este conceito pode ser observado, também, em projetos de iluminação. Não deve ser levado em consideração que este sistema deva ser implantado no formato linear, ele pode assumir vários formatos, como por exemplo, o formato estrela. Este conceito, dependendo como for implantado, poderá conter, de forma intrínseca, o conceito de intercambialidade. Na Figura 2.3 há exemplo de dois projetos usando este tipo de arquitetura de interface.

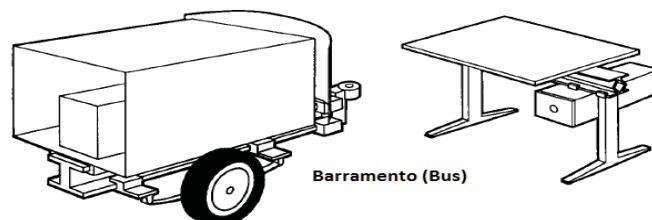


Figura 2.3 - Projetos usando interface de barramento  
(Fonte: Ulrich (1993))

Na arquitetura modular *seccional* todas as interfaces são iguais e vários elementos podem ser anexados a montagem. Esta arquitetura é construída através de ligações entre os componentes, diferente da arquitetura de barramento onde há um componente que faz a função de integração (base ou chassi). Exemplos desta arquitetura podem ser encontrados em sistema de tubulação, móveis modulares (sofás), divisórias de escritórios e sistemas de computador. Na Figura 2.4 há dois exemplos de projetos com interface seccional.

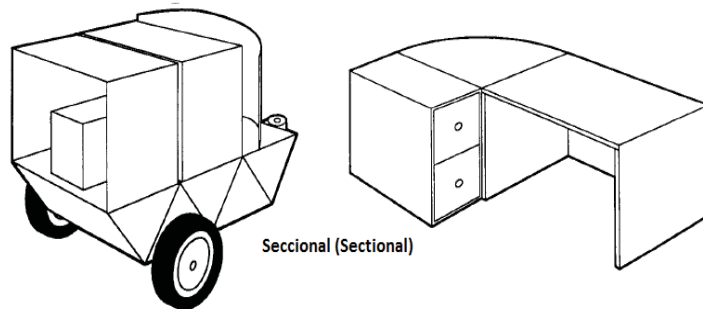


Figura 2.4 - Projetos com interfaces seccionais  
(Fonte: Ulrich (1993))

Para o autor a escolha das formas de arquitetura modular e das interfaces é livre e ocorre através da gestão do ciclo de vida produto.

Para Pahl e Beitz (2005) a forma de união, dos componentes, é que irá caracterizar as propriedades e seu comportamento básico. Para os autores as uniões podem ocorrer para arranjos fixos e móveis. Neste trabalho serão analisadas algumas conexões para arranjos fixos. Segundo os autores estes tipos de uniões servem para transferir forças, momentos e movimentos entre componentes (peças, subconjuntos) com posicionamento relativo claro e definido. Os seguintes tipos de conexões são definidos pelos autores:

- **Conexão material:** é uma união material. Esta união ocorre entre os materiais envolvidos ou materiais aditivados, através de forças moleculares e de adesão na superfície de atuação da interface. As formas construtivas podem ser junções por solda, abrasão ou adesivo;
- **Conexão por forma:** importante entender que este tipo de conexão ocorre por meio de forças normais nas superfícies atuantes dos elementos que se entrelaçam nas regiões das interfaces. As superfícies absorvem as pressões e, também, as tensões resultantes nas zonas de encaixes de acordo com a lei de Hooke. As formas construtivas podem ser uniões com chavetas, pino, cavilha, rebites, cubo-eixo, uniões de engate rápido, tencionadas e por aperto, uniões soldadas, coladas e abrasagem;

- **Conexões por força:** este tipo de conexão ocorre pela ação das forças entre as superfícies das peças e pode ser classificada em:
  - ✓ **Força de atrito:** conexão se dá por forças de atrito nos pares superficiais. Uniões flangeadas e parafusadas, uniões prensadas cubo-eixo com ou sem elemento elástico intermediário;
  - ✓ **Campo de forças:** utiliza campos de força. Como campos de forças magnéticos podem ser citados: as forças de compressão, por pressão hidrostática ou aerostática e forças de viscosidade em meios viscosos. Como formas construtivas podem ser citadas as embreagens hidrostáticas, mancais magnéticos e obturadores magnéticos;
  - ✓ **Força elástica:** as forças dos elementos elásticos intercalados determinam localização e comportamento dinâmico dos componentes interligados. Nas formas construtivas pode-se ter elementos elásticos deformáveis em acoplamentos e apoios, suportes elásticos e elementos intermediários para absorção de impacto.

### 2.3.5 Domínios da modularização

A busca por técnicas para redução na variedade dos produtos, sob o ponto de vista operacional, tem ocupado pesquisadores por muito tempo. Nesta caminhada surgiram muitas sugestões às quais, muitas delas, giram em torno de projetos modulares ou simplesmente modularidade de produto. A ideia básica de projetos modulares é projetar, produzir partes capazes de se combinarem para formar uma grande variedade de produtos finais.

As pesquisas referentes à modularidade estão divididas em duas disciplinas:

- Design;
- Engenharia de produção.

Sob o ponto de vista da ciência do design o que se busca é desenvolver a modularidade em família de produtos com múltiplas variantes. Os autores que se destacam neste ponto de vista são Pahl e Beitz.

Sob o ponto de vista de engenharia de produção a grande preocupação é no desenvolvimento de técnicas necessárias para se gerenciar a produção dos componentes definidos nos projetos modulares.

### **2.3.6 Tecnologia de Grupos**

Segundo Oliver (1981), a tecnologia de grupo consiste no agrupamento de peças e componentes, em famílias, com base em seus atributos. Geralmente, estes atributos são baseados nas características de geometria ou do processo de produção. A classificação geométrica das famílias é geralmente baseada em tamanho e forma, em quanto que a classificação por processo de produção baseia-se no tipo de processo, sequência de processo e número de operações.

A identificação de uma família de componentes, por semelhança, tem como objetivo a economia de escala, normalmente associado com produção em massa, para ser aplicado em pequenos lotes.

## **2.4 Aplicações da Abordagem Modular em alguns Segmentos da Indústria**

O objetivo deste tópico é mostrar a aplicação da arquitetura modular de produto em alguns segmentos expressivos da indústria mundial e, na medida do possível, tentar mostrar os motivos que levaram cada segmento a chegar nesta abordagem de arquitetura de produto.

Sob o ponto de vista da história, o Apêndice A, mostra um apanhado histórico da modularização aplicada em algumas civilizações antigas e nos principais países que dominavam a cena no início do século XX.

### **2.4.1 Modularização na indústria automotiva**

Segundo Womack, Jones e Roos (2004) as pesquisas incessantes de Ford a procura de seu projeto perfeito levou-o até seu vigésimo projeto, o Ford Modelo T de 1908. Nesse projeto, Ford tinha em mãos um carro projetado para manufatura. A linha de montagem em movimento, como todos acreditavam, não foi à base para a produção em massa, mas sim a completa intercambialidade das peças e a facilidade de ajustá-las entre si. Nos seus projetos, para alcançar esta intercambialidade, Ford buscou padronizar o sistema de medidas em todas as peças usadas ao longo do processo produtivo. Com isso, Ford foi capaz de desenvolver projetos inovadores reduzindo o número de peças necessárias tornando-as ajustáveis umas as outras.

Womack, Jones e Roos (2004) mostram, também, que nos anos cinquenta, do século passado, a indústria automotiva sofreu uma de suas principais mudanças. Essas mudanças foram provocadas devido à ascensão do Japão no cenário mundial, trazendo com ele seu modo de produção enxuta. O produto enxuto unia vantagens de produção artesanal e produção em massa combinando custo (produção artesanal) e rigidez (produção em massa) de forma harmonizada. Em síntese, produção enxuta racionaliza custos e linhas de montagem gera eficiência em termos de trabalho e racionaliza fornecedores de componentes. A capacidade de se usar diversos componentes em vários produtos foi um elemento chave no processo de flexibilização da produção. Para que essa comunicação ocorresse, foi necessária a divisão de um produto em módulos padronizados e intercambiáveis. Se for levada em consideração a quantidade de componentes que um automóvel possui, poderá ser observado que o agrupamento destes componentes em conjuntos maiores, ou seja, módulos, diminui consideravelmente sua complexidade. Em um sistema complexo como o da indústria automotiva, o processo de modularização só é alcançado graças a uma padronização e integração dos processos internos e externos. A modularização influencia diretamente na cadeia de fornecimento industrial. Primeiramente, reduzindo o número de componentes e, na sequência, permitindo que os fornecedores participem do processo de desenvolvimento dos produtos, com isso há uma maior responsabilidade no fornecimento dos subconjuntos/módulos/sistemas.

Nos anos 80, pode ser observado um esforço da Scania, montadora localizada na Suécia, de caminhões e ônibus, no gerenciamento das configurações de seus produtos. A linha de produto, chamada Série Dois, trouxe como novidade a padronização de seus elementos estruturais. Essa padronização serviu como pré-requisito para a próxima série de produtos chamada de Série Três lançada em 1987. Lehtone (2007) mostra que o principal objetivo desse trabalho foi permitir o gerenciamento das variações de produtos e a implantação de um modelo configurável de produto através do conceito de modularização. A Série Quatro do Produto, lançada em 1998, marcou a finalização do processo de estrutura modular. Os benefícios desses processos foram usados como argumentos comerciais do produto. A Figura 2.5 mostra um esboço da modularização da cabine dos caminhões Scania.

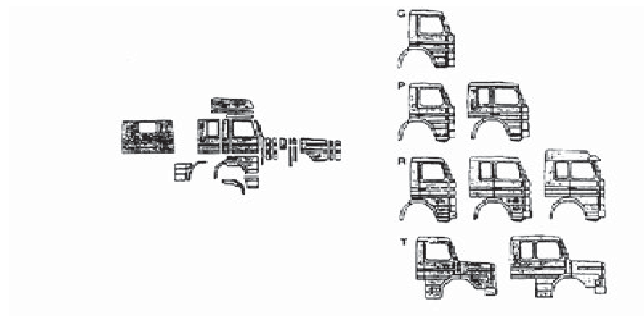


Figura 2.5 - Módulo construtivo da cabine do caminhão Scania  
(Fonte: Lehtone (2007))

Na Tabela 1 pode-se ver alguns dos benefícios apresentados em função do processo de modularização da cabine do caminhão Scania.

Tabela 1 - Alguns resultados obtidos pela modularização da Scania  
(Fonte: Lehtone (2007))

<b>Número de:</b>	<b>Antes</b>	<b>Depois</b>
Peças de chapas de metal	1400	380
Montagens internas de componentes	1800	600
Montagens de componentes superiores	7	3
Montagens de componentes frontais	8	3
Montagem de componentes das portas	12	8
Janelas	3	1
Ferramentas de estampagens	1600	280

Segundo Souza e Botelho (2011), a relação entre montadora e fornecedores pode evoluir, até o consórcio modular. A Figura 2.6 mostra um esquema explicativo do conceito modular, onde o fornecedor ou parceiro é responsável pela montagem de seus itens no produto que será entregue ao cliente. Pode-se observar este tipo de processo no consórcio modular da Volkswagen situado na cidade de Resende no Estado do Rio de Janeiro. Este processo reduz o número de colaboradores (mão de obra direta) na linha de montagem. A flexibilidade na produção através da modularização e da customização permite cada vez mais a utilização de outras estratégias como a produção sobre encomenda.





Figura 2.6 - Esquema do consórcio modular MAN

(Fonte: <http://www.dyjay.com.br/site/noticias/940-producao-por-consorcio-modular>)

A visão de futuro para Souza e Botelho (2011), é de que serão os consumidores quem irão determinar como serão os automóveis. Ou seja, pensar no mercado, nos usuários, na função do produto e, a partir destes parâmetros, determinar como será empregada a tecnologia nos produtos é o grande desafio da indústria automotiva. Esta evidência se vê no atual dilema da indústria automotiva onde padronização e customização são dois fortes atributos comerciais. Todos estes fatores devem estar fortemente ligados. A interação entre comercial e industrial para atendimento das expectativas dos usuários se faz cada vez mais necessária para incrementar a produtividade das empresas.

Atualmente a VW anunciou uma nova proposta de projeto para suas plataformas de produtos que atenderá modelos de carros pequenos e os modelos SUV's, conhecido como MQB. Na Figura 2.7 mostra, de forma resumida, o esquema MQB.

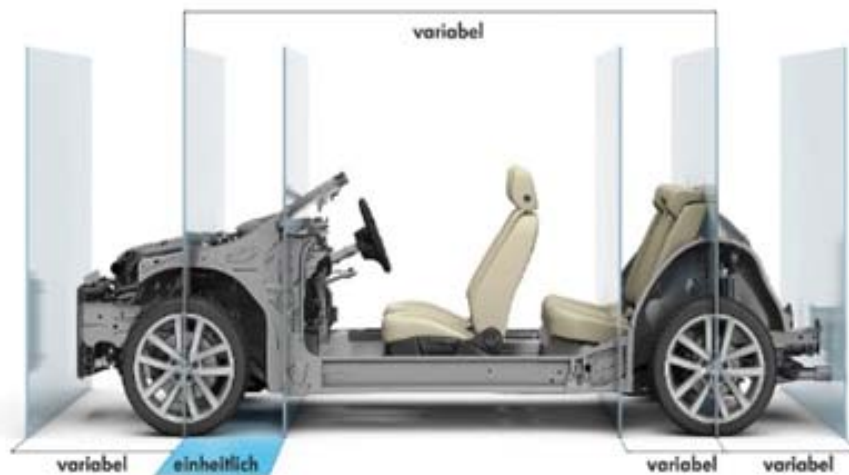


Figura 2.7 - Esquema da plataforma VW MQB

(Fonte: <http://wot.motortrend.com/we-hear-new-vw-golf-is-larger-and-more-spacious-vw-gti-concept-debuts-in-paris-250961.html/volkswagen-mqb-platform-4/#axzz2eDiX0e95>)

O VW MQB possui apenas alguns segmentos fixos, intervalo entre a posição do motor e a distância do eixo frontal e os pedais, os demais segmentos serão variáveis. Este comportamento da plataforma permite o uso da mesma plataforma para carros pequenos e SUV's.

#### 2.4.2 A Modularização da Indústria do Computador

Segundo Baldwin e Clark (2000), a potencialidade para emprego dos conceitos de modularidade sempre estiveram latentes desde o início da história do computador. John Von Neumann foi um dos primeiros a esboçar a ideia de sistema. Na máquina de Von Neumann, havia uma visão abstrata de projeto, dividindo o equipamento em componentes genéricos. Esse modelo permitia aos projetistas imaginar, de forma independente, os componentes de um computador e suas atualizações. Todos esses conceitos possibilitaram os projetistas atuais a combinarem soluções independentemente de componentes. Porém, segundo os autores, a decomposição do produto não é fator fundamental para o processo de modularização dos computadores. É fundamental a experiência dos projetistas, os vários projetos existentes e o entendimento preciso das interfaces entre os componentes. Somente com estes tipos de conhecimento é possível a implementação de um modelo conceitual de componentes em projeto de produto com abordagem modular. A Figura 2.8 mostra um esquema da máquina de Von Neumann.

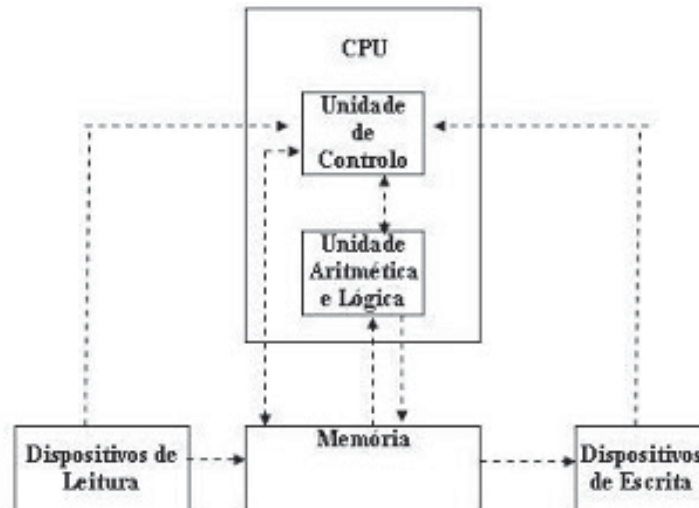


Figura 2.8 - Esquema da máquina de Von Neumann

(Fonte: <http://redes2srt.blogspot.com.br/2012/09/arquitetura-de-john-von-neumann.html>)

A máquina de Von Neumann é composta dos seguintes componentes:

- Unidade Central de Processamento (CPU);
- Unidade de Memória;
- Unidades periféricas para armazenamento e entrada e saída.

Os primeiros avanços conceituais no projeto de computador tiveram as seguintes origens:

- A decomposição de Von Neumann;
- O desenvolvimento dos controles micro programados (microprocessador);
- A padronização dos projetos de circuitos.

Cada uma das origens percorreu seu caminho específico expressando os princípios de modularidade. A Figura 2.9 mostra um esquema da evolução dos elementos da máquina de Von Neumann.

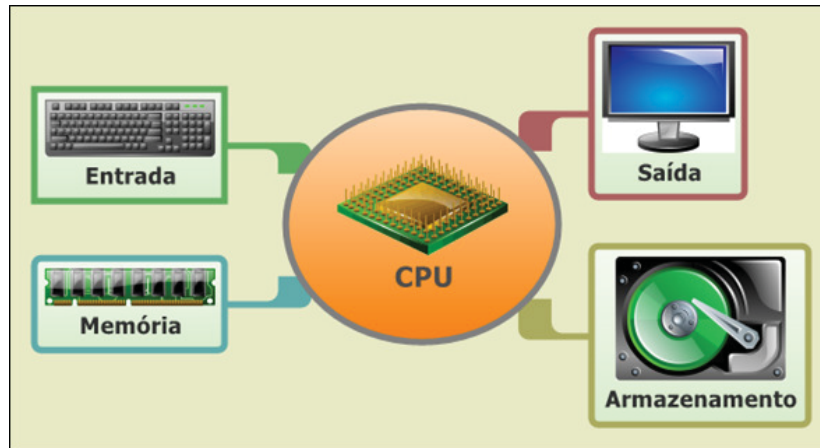


Figura 2.9 - Desenhos esquemática da máquina de Von Neumann  
(Fonte: <http://meiobit.com/33613/browsers-nao-sao-sistemas-operacionais-ok/>)

Em 1961 estes conceitos, os quais, até o momento, haviam sido aplicados de forma independente, foram reunidos, pela IBM, no *System/360* de forma simples e unificada. O lançamento deste sistema tornou-se um marco para os projetos de computadores.

### 2.4.3 Modularização da indústria aeronáutica

Segundo Barbosa (2007), a produção aeronáutica exige alto nível de tecnologia em sua produção. Isso se dá pela forte regulamentação do setor que exige padrões elevados de qualidade, confiabilidade e desempenho de seus produtos. Isso faz com que a mão-de-obra necessária para esta indústria seja altamente especializada e qualificada. Além das questões técnicas envolvidas no processo, há outro fator relevante nesse ramo que é a curva de aprendizagem. As modificações na concepção do produto ou nos processo de fabricação provocam novos ciclos de aprendizado para a produção. A área de montagem das aeronaves conserva características de produção artesanal, intensiva em mão-de-obra qualificada e baseada no saber especializado dos trabalhadores, diferentemente de outros segmentos industriais de produção seriada ou contínua, onde há a disseminação da informação nos diversos setores fabris, onde as novas formas de organização do trabalho estão revolucionando os métodos tradicionais. Para este tipo de manufatura os lotes de produção são pequenos, porém com alto valor agregado no produto. Soma-se a isso um ciclo de vida relativamente alto do produto e uma grande interação entre vendedores e compradores.

Barbosa (2007) fala, também, que os principais avanços tecnológicos estão no campo da automação de montagem e usinagem de peças em alta velocidade. Segundo Barbosa

(2007), durante sua vida útil, o avião é altamente exigido em relação à fadiga. Com isso a principal forma de fixação são os rebites, diferentemente da indústria automotiva onde predomina a união por soldagem.

Para Barbosa (2007) os gabaritos de união são uma das últimas evoluções tecnológicas na indústria aeronáutica. Segundo Barbosa (2007), a execução da montagem final do avião em linha móvel de montagem constitui-se em um grande avanço tecnológico no processo de montagem do avião. A empresa Boeing inicia o uso da linha móvel de montagem com o modelo Boeing 747 no ano de 2006. Nesse processo de montagem os problemas se tornaram visíveis e se cria um senso de urgência para a solução através da causa raiz. A Figura 2.10 mostra o interior de uma linha de montagem de aviões.



Figura 2.10 - Linha móvel de montagem do Boeing 747  
(Fonte: revista *Assembly dez/2006*)

De forma sucinta, Barbosa (2007) nos descreve que a montagem do avião se inicia na fabricação das peças primárias (chapas metálicas, usinados, composto, tubos, chicotes elétricos e etc.). Após essa fase, as peças vão sendo unidas umas com as outras, formando subconjuntos e conjuntos estruturais (painéis, revestimentos, ferragens, longarinas, nervuras e etc.). Posteriormente, os conjuntos e subconjuntos vão sendo agregados e tomando formas maiores através dos gabaritos e processos de junção. Os segmentos são equipados com os sistemas do avião (ar condicionado, pneumático, combustível, elétrico, comando de voo, motor e trens de pouso). A Figura 2.11 mostra o acoplamento da fuselagem de um avião. Na Figura 2.12 existe um esquema simplificado da montagem de um avião.





Figura 2.11 - Processo de montagem da fuselagem do Boeing 747  
(Fonte: [www.boeing.com](http://www.boeing.com))

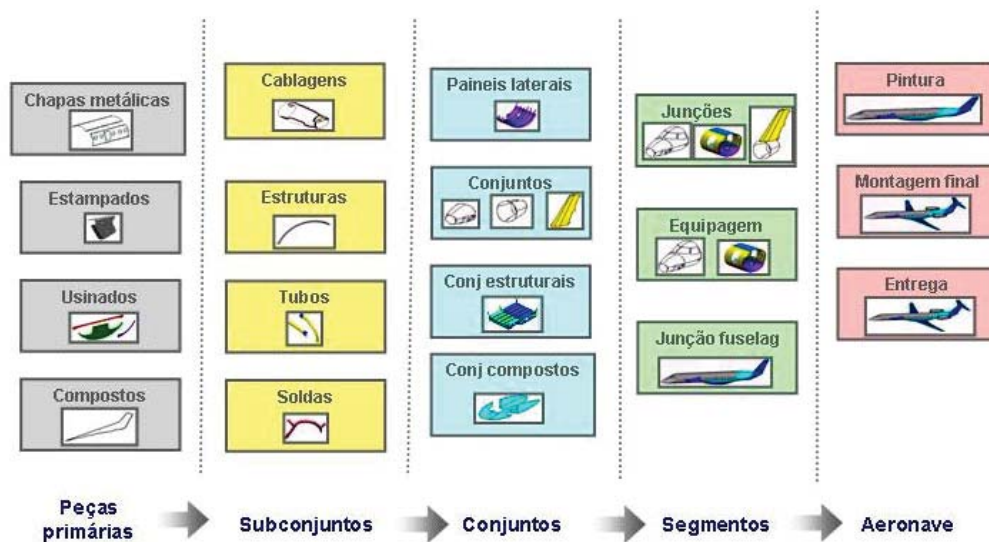


Figura 2.12 - Esquema simplificado de montagem de um avião  
(Fonte: Barbosa (2007))

Como pode ser visto o avião segue um processo de montagem modular do menor para o maior. Esta forma de projeto simplifica e, conseqüentemente, facilita as montagens na linha.

#### 2.4.4 Modularização da indústria naval

De acordo com Mello (2011), sair do conceito de produção *stick building* (técnica de construção onde não se utilizam conceitos de pré-montagens ou pré-fabricação ou modularização) ilustrada na Figura 2.13, na década de 70 para um conceito de produção

orientada para o produto foi um dos fatores fundamentais para a redução de custo das construções navais.



Figura 2.13 - Construção de barcos no conceito *stick building*  
(Fonte: <http://informationincontext.typepad.com/.a/6a01156f1433ae970c0115706ca365970b-pi>)

A construção naval caracteriza-se por executar um processo de manufatura complexo, composto por diversos conjuntos, organizados em diferentes sistemas funcionais. A Figura 2.14 mostra uma proposta de segmentação para um projeto de navio. Nesse tipo de manufatura, a gestão dos processos de manufatura é fundamental. Esses processos são divididos em serviços. A estrutura de divisão de serviços utilizada na construção naval pode ser orientada por sistemas ou por produto. Os blocos construtivos, atualmente usados na construção naval, estão se tornando cada vez maiores. Dessa forma, a divisão por produto tem se tornado cada vez mais importante como fator de produtividade. Na Figura 2.15, pode-se ver um exemplo de montagem de um navio.

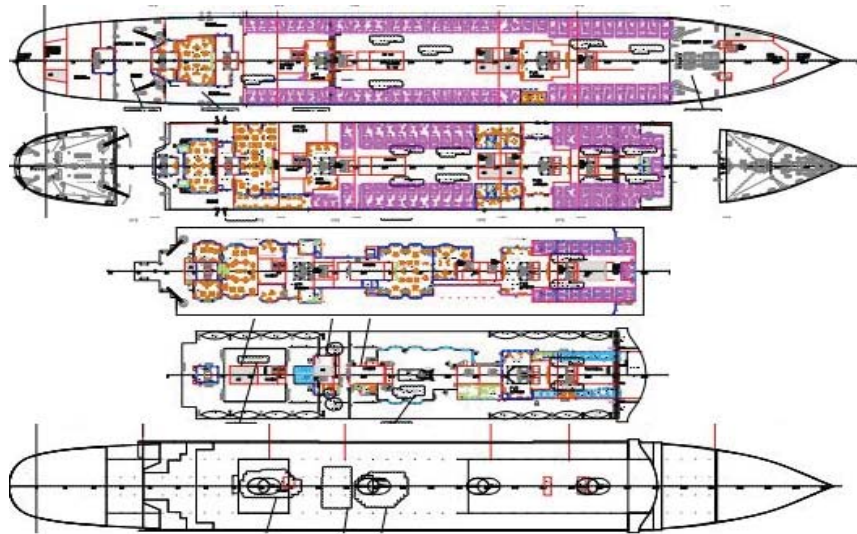


Figura 2.14 - Esquema de segmentação de um projeto de navio  
 (Fonte: <http://www.meionorte.com/noticias/internacional/novo-titanic-tera-compartimento-extra-de-seguranca-diz-dono-do-projeto-174117.html>)



Figura 2.15 - Montagem de um navio  
 (Fonte: [www.komec.kr](http://www.komec.kr))

Uma metodologia bastante utilizada na produção naval é a metodologia conhecida como “projeto voltado para manufatura”, que consiste na utilização de técnicas de projeto e produção que objetivam reduzir a quantidade de trabalho e atingir as especificações de projetos e qualidade (DFMA – *Design for Manufacturing and Assembly*).

Outro conceito de manufatura fortemente empregado na construção naval é o de manufatura enxuta (*lean manufacturing*). Segundo Mello (2011), a manufatura enxuta empregada na indústria de construção naval pode ser definida como “um fluxo uniforme e



contínuo através da cadeia de valor de cada um dos sistemas cobrindo cada uma das etapas de fabricação do navio”. A Figura 2.16 apresenta uma foto aérea de uma indústria naval.



Figura 2.16 - Indústria de navio Hanjin Heavy  
(Fonte: [www.komec.kr](http://www.komec.kr))

Apesar dos benefícios alcançados no processo de modularização da construção do produto, a indústria naval, ainda é uma indústria verticalizada com emprego intensivo de mão de obra.

## 2.5 Arranjo Estrutural

O objetivo deste tópico é descrever, de forma geral, alguns conceitos referentes a arranjo estrutural. Nesta visão geral serão abordados quais seus principais elementos e suas características. Adicionalmente será apresentada uma breve descrição das forças gerais atuantes no sistema.

### 2.5.1 Sistemas Estruturais

Os sistemas estruturais são definidos, por Ching (2010), como conjuntos estáveis de elementos projetados e construídos para agir como um todo no suporte e na transmissão de cargas, sem exercer os esforços permissíveis dos componentes.

Já as peças estruturais devem resistir aos esforços incidentes e transmiti-los a outras peças, através de vínculos que as unem. Segundo Almeida (2006) a forma de união dos elementos estruturais devem ser concebida de modo a resistir às solicitações de forças as quais o arranjo será submetido quando da operação.

## 2.5.2 Forças que Atuam em um Arranjo Estrutural

Ching (2010) define que os arranjos estruturais podem ser entendidos como caminho das forças. Sendo que as forças que atuam na estrutura precisam ser muito bem conhecidas na sua intensidade, direção e sentido. O conhecimento destas forças ajudará na concepção desta estrutura para que o arranjo estrutural seja coerente com o caminho que estas forças irão percorrer. Além disso, ajudarão no dimensionamento dos componentes estruturais.

Inicialmente as cargas podem ser definidas como permanentes (ocorrem durante toda a vida da estrutura) e forças acidentais (ocorrem eventualmente na vida da estrutura).

## 2.5.3 Tipos de Solicitações que Ocorrem em um Arranjo Estrutural

A Figura 2.17 mostra as formas gráficas aproximadas dos tipos de esforços mais comuns a que são submetidos os elementos construtivos.

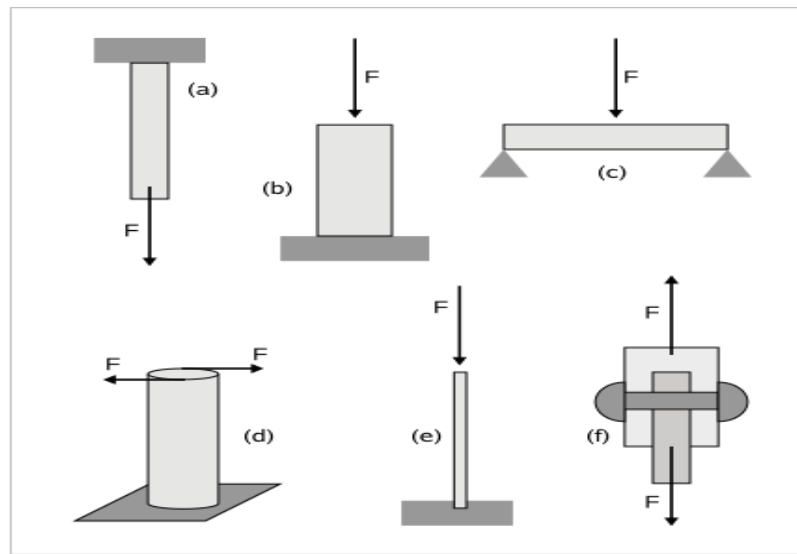


Figura 2.17 - Formas gráficas aproximadas dos tipos de esforços  
(Fonte: Ching (2010))

Estas forças são classificadas da seguinte forma:

- a. **Tração:** caracteriza-se pela tendência de alongamento do elemento da direção da força atuante;
- b. **Compressão:** a tendência é uma redução do elemento na direção da força de compressão;
- c. **Flexão:** ocorre uma deformação na direção perpendicular à da força atuante;

- d. **Torção:** forças atuam em um plano perpendicular ao eixo e cada seção transversal tende a girar em relação às demais;
- e. **Flambagem:** instabilidade na compressão axial;
- f. **Cisalhamento:** forças atuantes tendem a produzir um efeito de corte, isto é, um deslocamento entre seções transversais.

Em situações práticas ocorrem dois ou mais tipos de esforços. Mas também poderão ocorrer alguns casos em que há a predominância de uma força solicitante, diante de uma situação como esta, para fins de estudos, podem-se desprezar as demais.

#### 2.5.4 Critérios de Projeto de um Arranjo Estrutural

Entre os critérios de projeto de um arranjo estrutural podem ser elencados os seguintes:

- **Equilíbrio:** conceber um arranjo estrutural capaz de absorver às solicitações externas e transmiti-las aos elementos de apoio mantendo-se em repouso;
- **Estabilidade:** a configuração de equilíbrio do arranjo estrutural não pode ser alterada drasticamente na presença das imperfeições e das ações perturbadoras;
- **Resistência:** o material dos componentes estruturais deve ser capaz de absorver o nível de solicitação interna gerado pelas ações externas sem comprometer a sua integridade física;
- **Rigidez:** os componentes estruturais devem ser capazes de absorver as ações externas sem apresentar grandes deslocamentos que comprometam sua funcionalidade.

#### 2.5.5 Padrões Estruturais de um Arranjo Estrutural

Os padrões estruturais podem ser definidos como um *layout* bidimensional de elementos verticais e horizontais, bem como arranjos tridimensionais com implicações formais e espaciais no projeto.

### **2.5.6 Estruturas Horizontais**

O principal elemento horizontal para um arranjo estrutural são as vigas, as quais são formadas por elementos lineares e planos. As vigas são projetadas para sustentar e transferir as cargas transversais e longitudinais até os elementos verticais.

### **2.5.7 Estruturas Verticais**

As paredes laterais e os pilares são projetados para receber cargas e transmiti-las, verticalmente, ao longo da estrutura como cargas verticais conectadas. Estas cargas são provenientes das gravidades, das treliças, vigas ou longarinas.

### 3 ABORDAGEM MODULAR PARA UM ARRANJO ESTRUTURAL

Este capítulo abre-se em três itens. O primeiro item apresenta uma introdução sobre a metodologia. Os itens dois e três apresentam as macro-fases da aplicação da metodologia, divididas em macro-fases de síntese ou elementarização e macro-fases de análise de comportamento.

#### 3.1 Introdução

O objetivo principal desta metodologia é tornar-se uma ferramenta de apoio na busca de soluções modulares de projeto para arranjos estruturais usando técnicas de simplificação e análise de comportamento geométrico. A metodologia é composta de duas macro-fases distintas, porém interdependentes. A primeira fase, expressa na forma de esquema exposto na Figura 3.1, é referente à elementarização ou síntese do sistema. Esta fase está de acordo com Pahl e Beitz (2005) que defendem a simplificação da função global. A segunda fase, expressa na forma de esquema na Figura 3.2, analisa os comportamentos (variações geométricas) dos elementos mais simples do sistema através das variantes dos agentes externos e do sistema estrutural. Esta análise foi feita através dos agentes externos que afetam o sistema, os quais tem a capacidade de gerar modificações no mesmo.

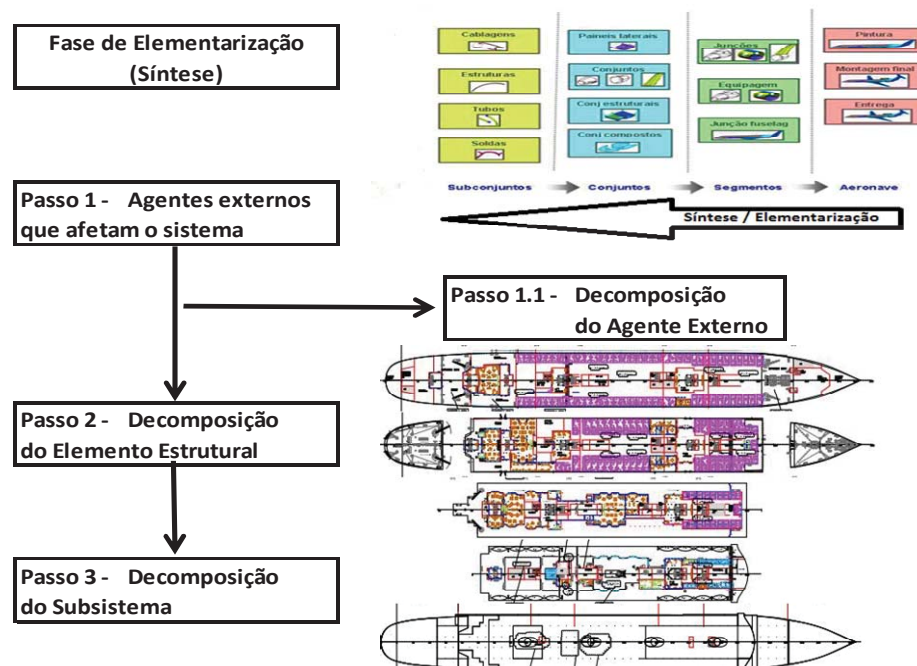


Figura 3.1 - Fase de elementarização (Síntese)  
(Fonte: Documento do autor)

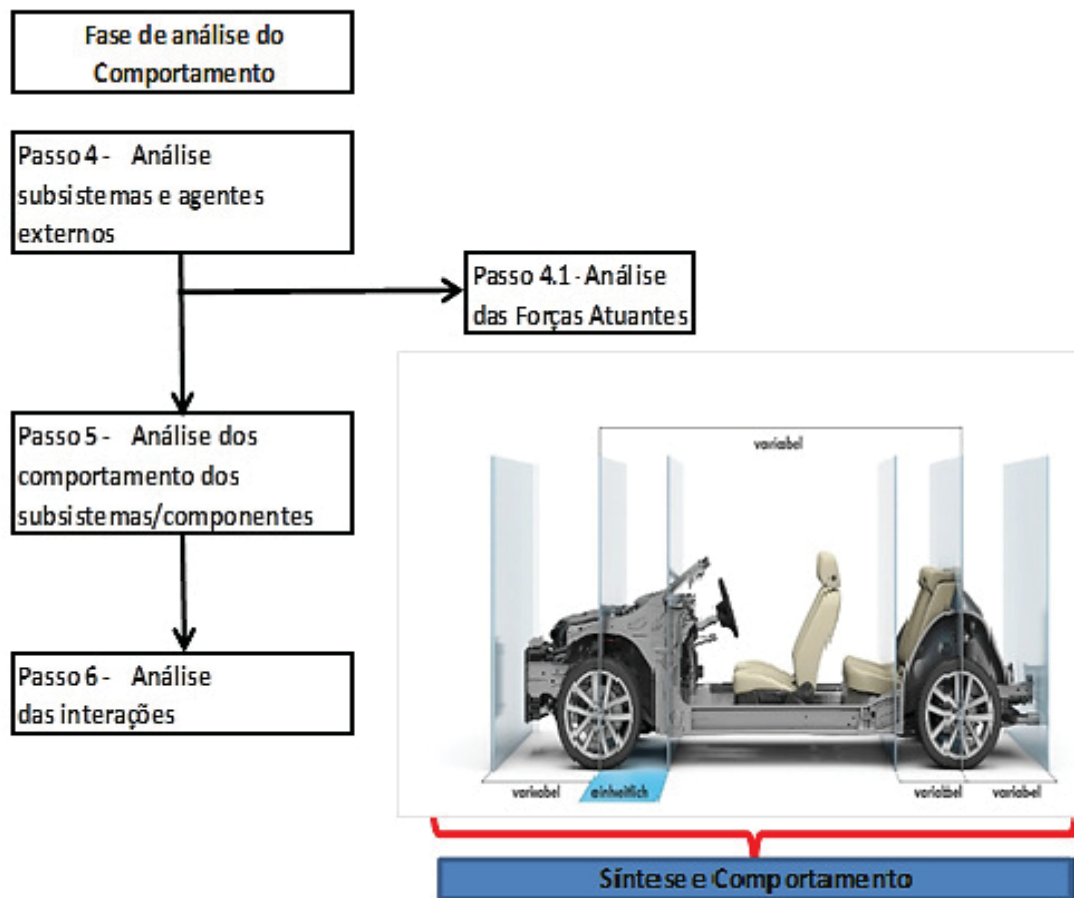


Figura 3.2 - Fase de análise de comportamento  
(Fonte: Documento do autor)

Nem todos os passos proposto pela metodologia são obrigatórios, no caso os passos 1.1 e 4.1, pois dependem no nível de complexidade do agente externo e da existência de forças atuantes no sistema para serem executados.

A execução do passo 5, desta metodologia, deve ser repetido até que sejam esgotados todos os componentes de cada subsistema e todos os subsistemas.

Para melhor entendimento desta metodologia é importante compreender que um projeto de arranjo estrutural pode possuir variantes, as quais devem ser conhecidas ou pré-definidas. Como variantes de projetos pode-se ter o comprimento (10m, 20m, 30m e etc.), número de cômodos (1 cômodo, 2 cômodos, 3 cômodos e etc.), número de andares (1 andar, 2 andares, 3 andares e etc.) e etc. Entendendo que estas variantes podem ser compreendidas como o mesmo produto mantendo a mesma função e os mesmos processos de fabricação, elas podem ser consideradas séries de produto. A série de produto, conceito descrito no referencial teórico deste trabalho, é um dos conceitos usados por Pahl e Beitz (2005) na

abordagem de Arquitetura Modular de produto. Esta informação, quando ocorrer, deve fazer parte das informações de entrada da matriz da seção 3.4.

## **3.2 Macro-fase de Síntese ou Elementarização**

Na sequência serão apresentados os diferentes passos que constituem a Macro-fase de Elementarização apresentada na Figura 3.1.

### **3.2.1 Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1**

Agentes externos são elementos, externos ao sistema do arranjo estrutural, os quais possuem capacidade de gerar modificações no sistema. Estes agentes podem ser normas, condições de terreno, limitação de material, limitação de espaço e etc. O importante é conseguir mapear cada um dos elementos externos que possam afetar de alguma forma, o arranjo estrutural.

Ching (2010) define que as forças que atuam em um sistema estrutural devem ser bem conhecidas para que se possam projetar soluções de arranjos estruturais. Entendendo os agentes externos como elementos capazes de gerar alterações no arranjo estrutural ou na busca de caminhos para solução de um arranjo estrutural é necessário o conhecimentos de todos os agentes que possam atuar de forma a provocar estas alterações no projeto do arranjo estrutural. Com isso o objetivo do primeiro passo da metodologia foi o mapeamento dos agentes externos capazes de provocar algum tipo de alteração no arranjo estrutural.

A ferramenta, proposta por esta metodologia, para fazer este mapeamento é uma matriz ( $m \times n$ ), ou seja, uma matriz de  $m$ -linhas e  $n$ -colunas. As  $m$ -linhas são preenchidas com todos os subsistemas existentes no sistema estrutural, já nas  $n$ -colunas devem ser listados todos os agentes externos que provocam alterações no sistema. Os agentes podem provocar alterações dimensionais (D) ou adicionar componentes (C) nos subsistemas. Desta forma a letra (D) indica dimensional e a letra (C) indica adição de componente pelo agente externo ao subsistema. Quando o agente externo provoca interferência no subsistema a célula deverá ser preenchida com 1, caso contrário deverá ser preenchido com 0 (zero). Na Figura 3.3 há um exemplo genérico desta matriz.

		AGENTE 1		AGENTE 2		AGENTE N-1		AGENTE N	
		D	C	D	C	D	C	D	C
Sistema	Subsistema 1								
	Subsistema 2								
	Subsistema 3								
	Subsistema n-1								
	Subsistema n								
Total									

Figura 3.3 - Matriz sistema x agente externo  
(Fonte: Dados do autor)

No final do preenchimento das células deve-se fazer uma totalização das colunas. Esta totalização, onde serão computados os valores das duas colunas (D) e (C), irá mostra qual ou quais os agentes que mais influenciam o sistema estrutural e seus subsistemas.

Para o desenvolvimento de um projeto estrutural este tipo de informação é importante, pois faz parte das condições de contorno do projeto. Além disso, em alguns casos, consegue-se ver se algum dos agentes se sobrepõe a outros e passa a ser o que determina as maiores mudanças no sistema.

Dando sequência à metodologia o passo seguinte foi realizar o desmembramento do agente externo. No entanto é importante salientar que as informações de saída deste passo da primeira fase da metodologia serviram de informações de entrada para alguns dos passos da segunda fase da metodologia, a fase de análise dos comportamentos.

### 3.2.2 Decomposição dos Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1.1

A decomposição dos *agentes externos* que afetam o arranjo estrutural serve para facilitar na análise da influência sobre o sistema estrutural e seus subsistemas. Um dos critérios que pode ser utilizado para a decomposição são as subfunções existentes no agente externo. Em algumas situações, vários componentes, do agente externo, afetarão o arranjo estrutural. Desta forma a decomposição pode servir de direcionador para a decomposição do subsistema estrutural. É importante ressaltar que esta decomposição só é feita quando necessário, pois em alguns casos o agente tem baixa complexidade e não pode ser decomposto. A matriz da Figura 3.4 pode ser usada para fazer a decomposição do agente externo.



		Componente 1	Componente 2	Componente n-1	Componente n	Total
Agente Extno	Agente 1	0	0	0	0	0
	Agente 2	0	0	0	0	0
	Agente 3	0	0	0	0	0
	Agente n-1	0	0	0	0	0
	Agente n	0	0	0	0	0

Figura 3.4 - Decomposição do agente externo  
(Fonte: Dados do autor)

As células devem ser preenchidas com 0 (zero) ou 1. As pertinências são indicadas com 1 e onde não há pertinência com 0. Ao final do preenchimento deve-se fazer uma totalização horizontal para indicar a quantidade de componentes pertencentes a cada agente.

### 3.2.3 Decomposição do Elemento Estrutural - Passo 2

Ching (2010) aborda o tema sobre estruturas horizontais e verticais do arranjo estrutural. Para o autor, dentro de um projeto estrutural pode-se ter uma ou várias estruturas verticais e uma ou várias estruturas horizontais. Cada uma destas estruturas pode ser composta por elementos verticais e elementos horizontais. Os conjuntos das estruturas verticais e horizontais contidos no sistema estrutural foram chamados de elementos estruturais.

O objetivo deste passo da metodologia foi decompor cada elemento estrutural até se chegar a sua forma mais elementar (síntese do elemento estrutural), conforme defendido por Pahl e Beitz (2005) em sua metodologia.

Um dos direcionadores que pode ser utilizado para se decompor o elemento estrutural é utilizar as informações referentes à deposição do agente externo que mais influencia no sistema. A Figura 3.5 mostra a matriz usada para a decomposição do módulo em subsistema ou segmentos.

Elemento Estrutural	Subsistema 1	
	Subsistema 2	
	Subsistema 3	
	Subsistema n-1	
	Subsistema n	

Figura 3.5 - Matriz de decomposição do elemento estrutural  
(Fonte: Dados do autor)

As células de preenchimento devem ser preenchidas com 0 (zero) ou 1 (um) onde 1 indica pertinência entre o elemento estrutural e o subsistema e 0 não indica pertinência.

Os subsistemas podem ser entendidos como segmentos de um elemento estrutural, subfunções ou qualquer abstração que tenha significado no contexto do arranjo estrutural.

### 3.2.4 Decomposição do Subsistema Estrutural - Passo 3

Na seção anterior foi feita a decomposição do elemento estrutural, esta decomposição define os subsistemas que compõem o elemento estrutural. Nesta fase foi necessário fazer mais uma decomposição para que se chegasse ao elemento mais simples destes sistemas. O que se buscou nesta decomposição foi entender como é formado o subsistema pertencente ao elemento estrutural. Esta decomposição deve facilitar na fase de análise de comportamento, pois quando for analisado este componente recebendo influência do agente externo será possível se ter o entendimento de que forma o agente (através de sua força) provoca alteração no componente, subsistema e no elemento estrutural, ou seja, a influência será analisada do menor para o maior.

Cada subsistema pode ser, ou não, dividido em componentes, regiões ou funções. Para isso usa-se uma matriz ( $m \times n$ ) onde nas linhas tem-se o subsistema e nas colunas componentes ou regiões de 1 até  $n$ . A ideia é que se preencha com 1 onde há subdivisão em componentes ou regiões do subsistema e 0 (zero) quando não há, pois desta forma pode-se se ter certeza de como cada subsistema será decomposto em sua estrutura mais simples. Na Figura 3.6 há um exemplo desta matriz.

		Componente/Região 1	Componente/Região 2	Componente/Região 3	Componente/Região n-1	Componente/Região n	Total
Elemento Estrutural	Subsistema 1						
	Subsistema 2						
	Subsistema 3						
	Subsistema n-1						
	Subsistema n						

Figura 3.6 - Matriz de decomposição do subsistema do elemento estrutural  
(Fonte: Dados do autor)

Conforme comentado acima, o resultado final desta matriz visa definir a pertinência de cada componente, região ou função ao seu respectivo subsistema. O número de componentes de cada subsistema será mostrado na célula de totalização.

Nesta etapa da metodologia encerrou-se a fase de decomposição do sistema, ou seja, a primeira fase do método. Com isso conseguiu-se chegar a elementos básicos do sistema estrutural. A fase subsequente, com suas etapas, foi à fase utilizada para analisar o comportamento do sistema estrutural através de seus elementos mais básicos, ou seja, dos elementos mais simples até os elementos mais complexos.

### 3.3 Macro-fase de Análise de Comportamento

Na sequência serão apresentados os diferentes passos que suportam a Macro-fase de Análise de Comportamento demonstrado na Figura 3.2 p. 39.

#### 3.3.1 Análise do(s) Subsistema(s) e Agente(s) Externo - Passo 4

O objetivo desta análise foi verificar como cada subsistema, pertencente ao elemento estrutural, é impactado pelos componentes do agente externo ou simplesmente pelo agente externo. Na seção 3.2.2 mostra a decomposição do agente externo em componentes, desta forma à saída da matriz da seção 3.2.2 foi uma das informações utilizadas nesta fase da metodologia. A outra matriz que gerou informação para esta fase foi a matriz de saída da seção 3.2.3. Da mesma forma que os agentes externos afetam o sistema estrutural, as alterações irão ocorrer nos níveis dos subsistemas dos elementos estruturais. Na Figura 3.7 é

possível observar um exemplo da matriz que faz o mapeamento entre módulo, subsistemas, agentes externos e componentes.

		Agente Externo								
		Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente n-1	Componente n				
Elemento Estrutural	Subsistema 1									
	Subsistema 2									
	Subsistema 3									
	Subsistema n-1									
	Subsistema n									

Figura 3.7 - Matriz de relação subsistema x sub elemento  
(Fonte: Dados do autor)

Assim como na primeira fase da metodologia, utilizou-se uma matriz para efetuar a análise das relações entre o(s) subsistema(s) e o agente(s) externo(s). Esta matriz é uma matriz (m x n) onde as m-linhas foram preenchidas com os sistemas e as n-colunas com os componentes dos agentes externos.

Até aqui a metodologia buscou a elementarização do(s) elemento(s) estrutural (is). Esta elementarização está em concordância com a metodologia de Pahl e Beitz (2005). A próxima fase da metodologia visou analisar o comportamento destes componentes do elemento estrutural.

### 3.3.2 Análise das Forças Atuantes - Passo 4.1

Ching (2010) enfatiza que antes de se construir uma solução (projeto) de arranjo estrutural deverá se conhecer as forças que atuam neste sistema. Desta forma para que um componente seja aceito como solução ele deverá atender os requisitos referentes às forças que atuam sobre o elemento estrutural o qual deverá ser construído com a capacidade de suportar e transmitir as forças que nele atuam.

### 3.3.3 Estudo do Comportamento do(s) Subsistema(s) ou Componente(s) - Passo 5

O objetivo desta etapa, conforme descrito no título, foi conhecer quais são os comportamentos de cada componente do subsistema frente ao agente externo. À proposição de soluções (princípios de solução), em conformidade a metodologia de Conhecendo as variações pode-se chegar Pahl e Beitz (2005), de projeto e de possíveis variantes do elemento estrutural. A Figura 3.8 mostra a matriz usada como ferramenta para a análise do comportamento do(s) elemento(s) estrutural(s).

Elemento Estrutural		Agente Externo					
		Variante do Agente 1	Variante do Agente 2	Variante do Agente ...	Variante do Ag. (n-1)	Variante do Agente n	
Subsistema (n)	Variantes do Arranjo Estrutural						Componente/Região (n)

Figura 3.8 - Matriz para análise dos componentes  
(Fonte: Dados do autor)

Cada uma das entradas da matriz vem de uma das etapas anteriores da metodologia. O preenchimento desta matriz foi feito da seguinte forma:

- **Elemento Estrutural:** esta entrada foi preenchida com as informações geradas no passo 1 da metodologia;
- **Subsistema(n):** subsistemas do elemento estrutural o qual tem origem no passo 2 da metodologia;
- **Componente/Região(n):** componente pertencente ao subsistema com origem no passo 3 da metodologia;
- **Variantes do Arranjo Estrutural:** estas informações, quando existirem, são pré-definidas no desenvolvimento do produto;
- **Agente Externo:** esta informação teve origem no passo 1 desta metodologia;
- **Variantes do Agente(n):** esta informação, quando existir, é pré-definida no desenvolvimento de produto.

O preenchimento das células desta matriz se dá com as letras F, que significa Fixo, e V, que significa variável. Fixo significa que, para a variante do sistema e para a variante do agente externo, o componente não irá variar sua geometria. O componente que varia, em função das variantes do sistema estrutural e agente externo, é aquele que sofrerá alteração em sua geometria. Quando todas as células da matriz forem preenchidas com F isso indica que as variantes do arranjo estrutural e as variantes do agente externo não provocam alteração no componente. Desta forma este componente pode ser classificado como um bloco construtivo.

Nas definições de Ulrich (1993), Pahl e Beitz (2005), Back (2008), Baxter (2011) está formalizado que os módulos devem ser responsáveis por conter uma ou mais funções e, a união destes componentes, deverá estar contida na função global do produto. Em outras palavras, pode-se dizer que um módulo físico de um produto é uma síntese funcional, o qual deverá executar uma ou mais funções pertencentes à função global do produto. É neste caminho conceitual que Miller e Elgard (1998) propõem a diferenciação entre módulo e bloco construtivos. Para os autores os módulos carregam consigo certas características funcionais as quais não tem pertinência nos blocos. Para os autores um exemplo disto é o “tijolo” do brinquedo lego. Este elemento, segundo Miller e Elgard (1998), é um bloco construtivo e não um módulo, pois não carrega elementos funcionais, ou seja, serve para preencher espaços sem levar em consideração questões funcionais.

Usando o raciocínio utilizado por Miller e Elgard (1998), esta metodologia propõe uma abstração da definição de bloco construtivo. Para esta metodologia os componentes, subsistemas e sistemas que não sofrerem variações, ou seja, se repetem em cada variante do agente externo e variante sistema estrutural será chamado de blocos construtivos. Estes blocos construtivos, diferentes do brinquedo Lego, poderão implementar funções específicas dentro de seus subsistemas, dependendo do sistema estrutural que estiver sendo analisado.

Por outro lado os componentes que sofrerem alteração em sua geometria deverão ser analisados novamente. Esta análise terá como objetivo descobrir a geometria necessária para atendimento da variação que ocorrem nas variantes do sistema estrutural comparadas com as variantes do agente externo. Estas variações serão classificadas como variantes do componente e este componente que possuir variantes será denominado de módulo.

Esta fase deverá se repetir até que cada uma das entradas se esgotarem. Quando isso ocorrer estará finalizado a fase de mapeamento das variações dos elementos estruturais. Com isto pode ser ter uma proposição para a construção de um sistema estrutural e suas variantes.

### 3.3.4 Análise das Interações - Passo 6

A análise das interações esta baseada na metodologia de interação entre os componentes físicos. Esta metodologia define que a interação entre os componentes irá avalizar o cumprimento da função global do sistema.

A primeira análise feita nesta etapa corresponde à análise das relações dos componentes de cada subsistema. Para isso, foi utilizada uma matriz (m x n) onde nas m-linhas foram preenchidas com os módulos/componentes que compõe o sistema de arranjo estrutural e nas n-colunas foram preenchidas com os módulos/componentes que compõe o sistema. O sentido da interação dos componentes se dá sempre da n-coluna com a m-linha, ou seja, do elemento contido na coluna com o elemento contido na linha.

A Figura 3.9 mostra a matriz usada para a análise das interações entre os módulos e os elementos externos da carroceria.

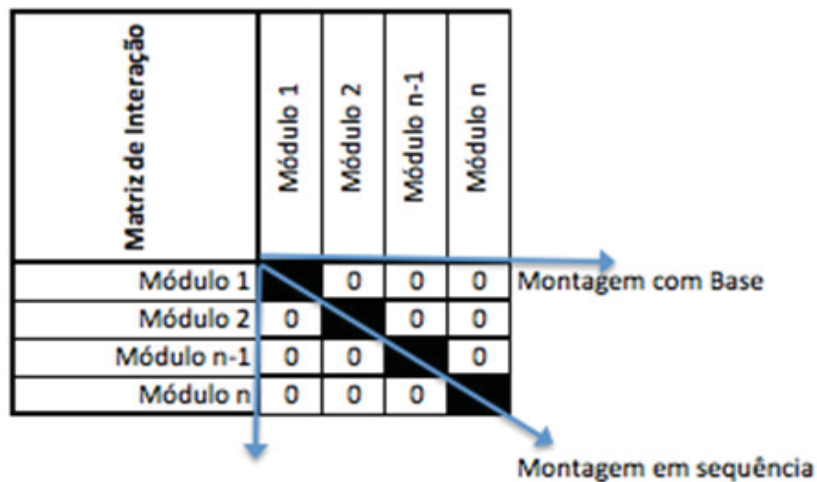


Figura 3.9 - Matriz de interação entre módulo  
(Fonte: Dados do autor)

As setas indicam o sentido que os objetos poderão ser montados e suas interações. No caso das interações se concentrarem na diagonal da matriz, indica que pode haver uma montagem sequenciada na forma de empilhamento. Já quando a concentração de interações apresentarem-se em um único objeto, este poderá servir de base para uma pré-montagem. É importante evidenciar que as questões de montagem não devem seguir somente os indicativos da matriz, pois o processo de montagem do módulo possui várias influências externas e

internas ao ambiente de manufatura. A Figura 3.10 mostra as formas de montagem que a matriz da Figura 3.9 pode sinalizar.

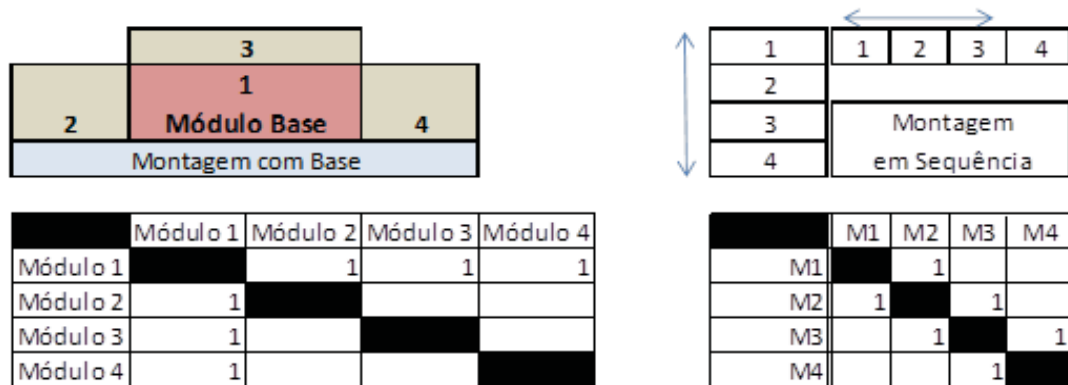


Figura 3.10 - Formas de montagem  
(Fonte: Dados do autor)

Com isso pode-se concluir que esta matriz serve como ferramenta de análise para algumas possibilidades proposta por Ulrich (1993) na forma de modularização pela forma interação entre os módulos.

A segunda análise foi feita entre o processo de união dos componentes. Para isso utilizou-se uma matriz (m x n) onde nas m-linhas têm-se o módulo/componente e nas n-colunas o processo que irá unir os módulos ou componentes. A Figura 3.11 mostra esta matriz.

	Processos de Uniões				
	Solda	Parafuso	Rebite	Cola	Outros
Módulo	0	0	0	0	0

Figura 3.11 - Matriz de Processo de interação entre módulos  
(Fonte: Dados do autor)

Ela foi preenchida com 0 ou 1. O 0 indica que não há processo e o 1 indica o processo que realizará a interação entre os módulos. Esta matriz pode ser usada antes ou depois da aplicação da matriz de interação entre módulos. Caso seja utilizada antes, no mapeamento do processo que irá efetuar as uniões entre os módulos, as letras iniciais dos processos podem ser utilizadas no preenchimento da matriz de interação entre módulos/componentes, como indicativo de conexão.



## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresentará o estudo de caso realizado a partir da metodologia proposta no Capítulo 3 deste trabalho. Inicialmente será apresentada a empresa onde foi aplicada a metodologia e, posteriormente, o estudo de caso. Yin (2001, p. 21) define que, “Como esforço de pesquisa, o estudo de caso contribui, de forma inigualável, para a compreensão que temos dos fenômenos individuais, organizacionais, sociais e políticos”.

### 4.1 Apresentação da Empresa

Este capítulo está dividido em três itens, para melhor entendimento sobre a empresa, são eles:

- Aspectos gerais;
- Processo Produtivo;
- Montagem do casulo.

#### 4.1.1 Aspectos Gerais

A COMIL Ônibus S.A é uma montadora de ônibus que atua no mercado desde 1986. Possui matriz em Erechim, norte do estado do Rio Grande do Sul, num parque fabril de 35 mil m<sup>2</sup>, construído em uma área de 140 mil m<sup>2</sup>, como demonstra a Figura 4.1.



Figura 4.1 - Vista aérea da fábrica da Comil Ônibus S/A  
(Fonte: Comil Ônibus S/A)

Atualmente, a empresa possui um quadro funcional que conta com mais de 2.400 colaboradores e sua produção é de 18 ônibus/dia. A empresa está em forte expansão no mercado interno e externo e possui quatro linhas de produtos: Rodoviária e Intermunicipal,

Urbano e Micro. A linha Rodoviária é composta pelos ônibus Campione 3.25, 3.45, 3.65 e 4.05 (HD) e DD (Double Deck); já a linha de ônibus Urbano é composta pelos ônibus Svelto, Doppio, Midi e Piso Baixo; o Versátil é o ônibus da linha Intermunicipal e o Piá completa a linha de produtos no seguimento de Micro.

#### 4.1.2 Processo Produtivo da Comil Ônibus S/A

Por tratar-se de uma encarroçadora de ônibus a empresa efetua o acoplamento dos seus modelos de carrocerias nos chassis adquiridos pelos clientes.

#### 4.1.3 Montagem do Casulo

A Figura 4.2 mostra, de forma esquemática, o processo de montagem de uma carroceria de ônibus.

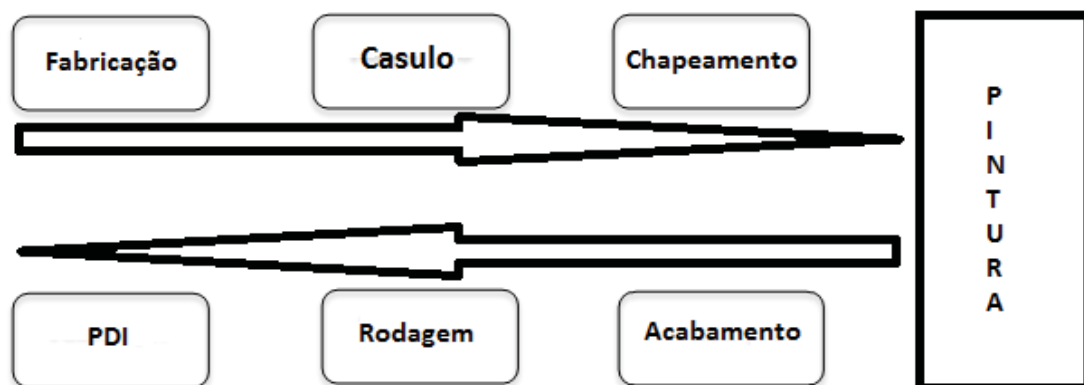


Figura 4.2 - Esquema resumido da montagem de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Informações repassadas pela empresa)

Na fabricação há os processos de corte e dobra dos componentes da estrutura do ônibus que são basicamente, tubos e chapas. Também existem alguns processos de montagens de módulos ou blocos construtivos do arranjo estrutural. A Figura 4.3 mostra uma visão geral do setor de fabricação.



Figura 4.3 - Setor de fabricação  
(Fonte: Informações repassadas pela empresa)

No setor de casulo inicia-se o processo de montagem propriamente dito da carroceria do ônibus. Os componentes e módulos recebidos do setor de fabricação serão montados e unidos, para a formação do arranjo estrutural. A Figura 4.4 possibilita ver de que forma as peças de uma lateral são transportadas para o setor de montagem. Já na Figura 4.5 pode ser visualizado um carrinho que transporta componentes da base para o setor de montagem. A Figura 4.6 apresenta uma base montada no seu gabarito. Na Figura 4.7 pode ser observada a finalização da montagem do teto e na Figura 4.8 a montagem da lateral no seu respectivo gabarito.



Figura 4.4 - Carrinho de peças da lateral  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)



Figura 4.5 - Carrinho de peças da base  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)



Figura 4.6 - Gabarito da base  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)



Figura 4.7 - Gabarito do teto  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)





Figura 4.8 - Gabarito da lateral  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

Ao término da montagem dos módulos, eles são transferidos para o gabarito de fechamento do casulo, onde cada módulo será unido através de processo de soldagem, o que pode ser visto na Figura 4.9, que mostra o setor de fechamento de casulo após os gabaritos das laterais.



Figura 4.9 - Formação do casulo  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

Quando o processo de construção do casulo é finalizado ele passa para o próximo setor que é o chapeamento onde o casulo recebe os acabamentos externos na frente, traseira e lateral. A Figura 4.10 mostra o último posto do chapeamento da linha de carrocerias intermunicipais.



Figura 4.10 - Setor de chapeamento  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

No processo de pintura a carroceria recebe uma camada de proteção na parte inferior, após é feita a limpeza, ficando disponível para o processo de pintura da cor base. Finalizado o processo de pintura da cor base inicia-se então, o processo de customização da pintura (processo de pintura de faixas). A Figura 4.11 mostra o setor de pintura das carrocerias.



Figura 4.11 - Setor de pintura  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

No setor de acabamento a carroceria recebe as janelas, as poltronas, a iluminação interna, os acabamentos internos e os componentes de iluminação externa. Na Figura 4.12 pode-se ver o setor de acabamento.



Figura 4.12 - Setor de acabamento  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

No setor de rodagem a carroceria é testada para verificação da sua construção, ao final do processo de manufatura ela passa pelo setor de liberação. O setor de liberação é o setor onde é feita uma inspeção de pré-entrega. Nesta inspeção são examinadas as condições do chassi, após o acoplamento da carroceria, antes da chegada do produto ônibus ao cliente. As montadoras de chassis dispõem de funcionários, neste setor, os quais são os responsáveis pela inspeção. A Figura 4.13 mostra os box de inspeções destinados as montadoras de chassis MBB, Scania e MAN para que possam fazer a inspeção dos seus chassis.



Figura 4.13 - Setor de liberação  
(Fonte: Imagens repassadas pela empresa)

Atualmente este setor é responsável pela inspeção de quinze carrocerias por dia. Estas quinze carrocerias são dos diversos modelos fabricados pela empresa.

## **4.2 Abordagem Modular ao projeto de uma Base**

Abaixo segue um resumo da utilização do método proposto na Empresa onde foi realizado o Estudo de Caso.

### **4.2.1 Descrição do Arranjo Estrutural de uma Carroceria de Ônibus**

Segundo Walber (2009) o arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus, o qual, usualmente é denominado por Casulo, é formado por sete componentes estruturais. Estes componentes são os seguintes:

- Frente;
- Traseira;
- Lateral Direita;
- Lateral Esquerda;
- Base Superior;
- Base Inferior;
- Teto.

Estes conjuntos são montados em gabaritos separados e, posteriormente, levados a um gabarito de montagem (fechamento) onde são unidos pelo processo de soldagem.

Entendendo que as principais funções do casulo são dar forma e rigidez a carroceria do ônibus, conclui-se desta forma, que ele suporta todas as solicitações de esforços. Além da rigidez e forma, a carroceria, também tem a responsabilidade de garantir a segurança dos usuários, pois mediante impacto ou tombamento a mesma irá absorver a energia durante a colisão. A Figura 4.14 mostra um projeto de casulo antes de seu acoplamento com o chassi.



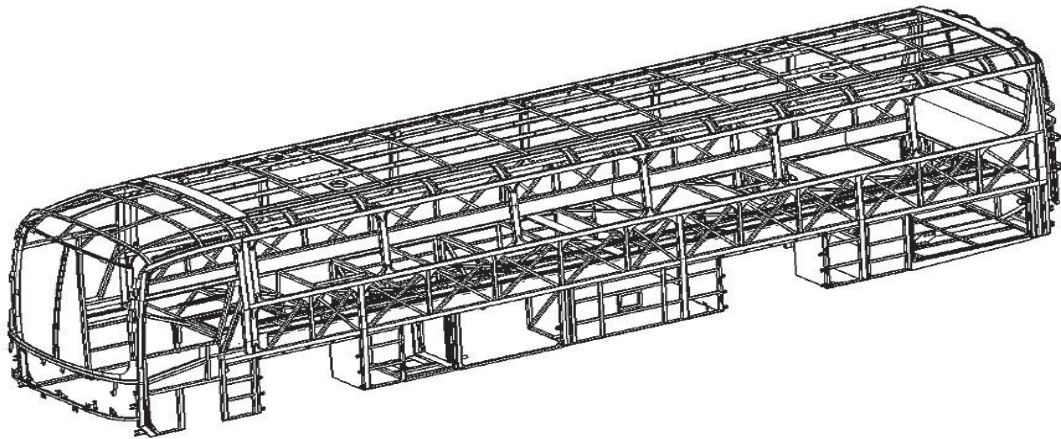


Figura 4.14 - Projeto de um casulo  
(Fonte: Dados do autor)

Como pode ser visto o casulo é formado por uniões soldadas de tubos e chapas. Estes componentes são unidos através de processo de soldagem.

#### 4.2.2 Estrutura da Frente e Traseira

As estruturas são formadas por tubos cortados e conformados geralmente unidos por processo de soldagem. Na Figura 4.15 pode ser observado o projeto de uma frente e uma traseira referente a uma carroceria de ônibus.

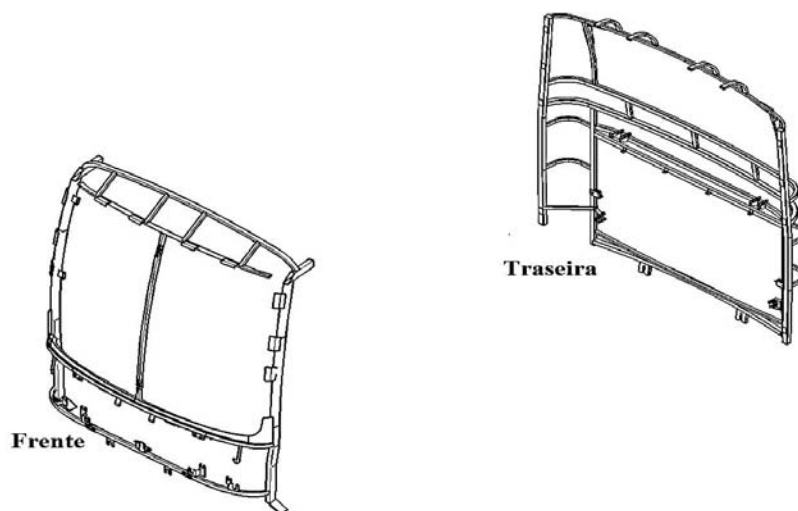


Figura 4.15 - Projeto de frente e traseira de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

As ferramentas utilizadas para fazer a união destes tubos e dos subconjuntos de frente e traseira são distintas.

Pode-se se ver, neste projeto de estruturas, os elementos verticais e horizontais formados por tubos que cumprem o papel de vigas e pilares.

### 4.2.3 Estrutura de Laterais

As laterais são formadas por tubos retangulares e quadrados de acordo com a seção transversal do veículo, sendo que a união dos componentes das laterais geralmente é executada por processo de soldagem.

Nas laterais são fixados os chapeamentos externos, janelas, portinholas dos bagageiros bem como toda a parte de acabamento interno do veículo. Além disso, elas servem de sustentação de toda a estrutura do teto e da carroceria.

As principais forças atuantes nas laterais são as seguintes:

- Arranque;
- Frenagem;
- Flexão;
- Torções.

Com relação à rigidez das laterais, pode-se dizer que ela é aumentada pela agregação de alguns componentes denominados contraventamentos (componente x). A Figura 4.16 contém um projeto de lateral de uma carroceria de ônibus.

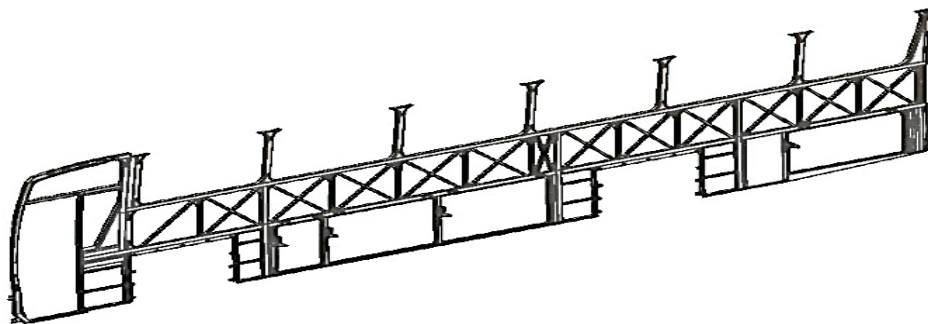


Figura 4.16 - Projeto de uma lateral  
(Fonte: Dados do autor)

Como pode ser visto no projeto da lateral na figura acima, esta é composta por elementos verticais e horizontais dentro do conceito de arranjo estrutural.

#### 4.2.4 Estrutura da Base

A estrutura da base é formada por tubos retangulares e quadrados, geralmente unidos através do processo de soldagem. Esta estrutura exerce as seguintes funções dentro do arranjo estrutural:

- Interface entre o chassi e a carroceria;
- Sustentação do assoalho;
- Ligação das laterais.

Na Figura 4.17 pode ser visto um projeto de base para uma carroceria de ônibus.

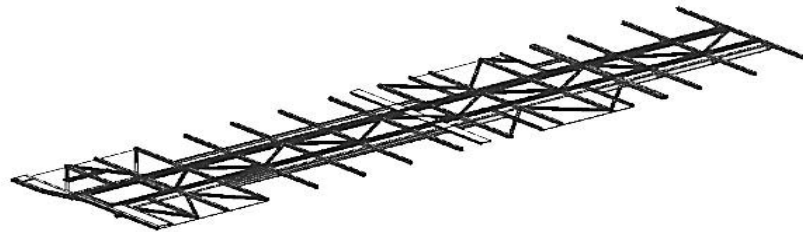


Figura 4.17 - Projeto de uma base de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

Como elemento de um arranjo estrutural a base é um elemento essencialmente horizontal. Ela faz a ligação entre duas estruturas que são as laterais esquerda e direita da carroceria.

#### 4.2.5 Estrutura do Teto

A estrutura do teto é composta por tubos, chapas e demais perfis. O teto serve para fixação de diversos componentes da carroceria.

Assim como a base o teto serve como elemento de ligação entre as laterais além de fazer a função de estruturação do arranjo. A função estrutural exercida pelo teto é de fechamento do casulo. A Figura 4.18 mostra o projeto de um teto para uma carroceria de ônibus.

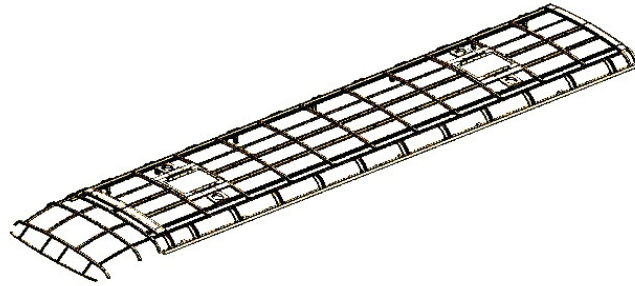


Figura 4.18 - Projeto de teto de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

É visível, neste projeto, que o teto também é um elemento horizontal do arranjo estrutural da carroceria, desta forma ele serve como elemento de ligação através de um vão.

Na Seção 4.1 deste trabalho, onde é apresentada a empresa onde este trabalho foi desenvolvido, foram consideradas maiores informações referentes ao processo de montagem dos componentes do arranjo estrutural da carroceria de ônibus e sua montagem final.

#### **4.2.6 Forças Dinâmicas que Atuam em uma Carroceria de Ônibus**

Um projeto de carroceria de ônibus deverá levar em conta os esforços que a carroceria irá receber. As cargas recebidas são devido ao seu peso e das forças dinâmicas que atuam em movimento. As principais forças que atuam em uma carroceria de ônibus são forças verticais, longitudinais e transversais.

#### **4.2.7 Forças Verticais**

As forças verticais são forças originadas pelos movimentos normais da suspensão. Forças adicionais que afetam as laterais de carroceria podem ocorrer quando o ônibus é solicitado em uma curva. As forças, na região frontal, são concentradas nas regiões de portas exercendo pressão elevada sobre ela. A massa dos passageiros e bagagens está concentrada no entre eixo. As Figuras 4.19 e 4.20 mostram um esquema das forças verticais atuando na parte traseira e frontal do arranjo estrutural.

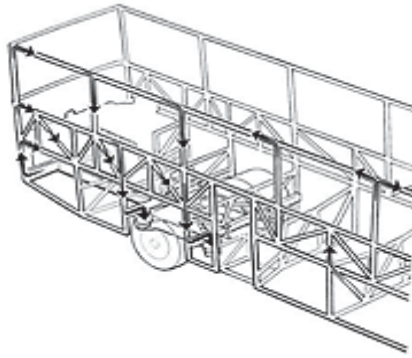


Figura 4.19 - Força vertical na parte traseira  
(Fonte: *Manual dos construtores de ônibus*)

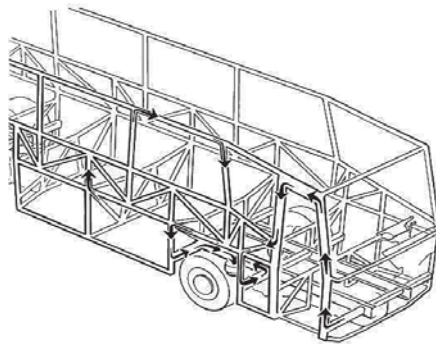


Figura 4.20 - Forças verticais na parte frontal  
(Fonte: *Manual dos construtores de ônibus*)

Os vetores das figuras mostram que as forças verticais tem propagação no arranjo estrutural através de seus elementos verticais e horizontais.

#### 4.2.8 Forças Longitudinais

As forças longitudinais ocorrem em frenagens e nos desníveis na estrada. Na Figura 4.21 pode ser observado, através dos vetores, um esquema representativo dessas forças.

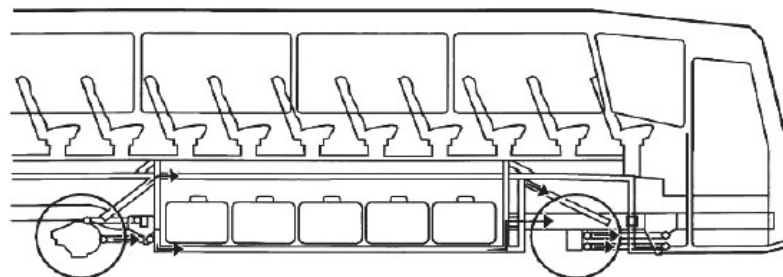


Figura 4.21 - Esquema das forças longitudinais  
(Fonte: *Manual dos construtores de ônibus*)

É interessante ressaltar que as forças longitudinais são forças que atuam mais na parte inferior do arranjo estrutural.

#### 4.2.9 Forças Transversais

As forças transversais ocorrem quando o veículo é submetido a estradas com grandes torções. Isso ocorre em situação de mudança de marcha severa ou quando a carroceria é submetida a curvas em média e altas velocidades. Estas forças atuam de dentro para fora, na direção das extremidades dos barrotes da base. O teto é pressionado para fora do veículo, mas é impedido pelas ligações inferiores da carroceria, tubos verticais e rodas dos chassis. Na Figura 4.22 há a visualização esquemática das forças transversais.



Figura 4.22 - Esquema das forças transversais  
(Fonte: *Manual dos construtores de ônibus*)

Além do teto, a base tem uma grande importância para suportar estas forças que são aplicadas à carroceria.

#### 4.2.10 Características gerais das carrocerias de ônibus

O DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) define que as carrocerias de ônibus devem ser projetadas e construídas de forma a garantir a segurança e o conforto dos passageiros e das tripulações.

As carrocerias devem ter as seguintes medidas:

- **Comprimento:** o comprimento é medido entre as faces externas dos para-choques dianteiro e traseiro. Esta medida deve estar entre 12m e 18m. A Figura 4.23 mostra a forma de se medir o comprimento total de um ônibus.

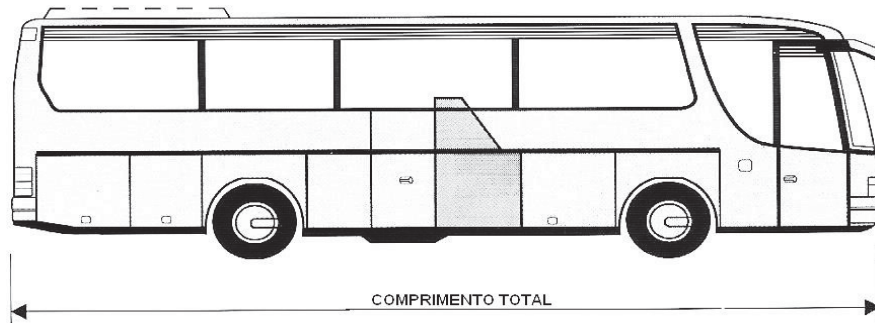


Figura 4.23 - Comprimento máximo para carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

- **Largura e altura:** a largura medida entre os pontos mais extremos das faces laterais das carrocerias de ônibus deve variar entre 2,50m e 2,60m. Já a altura máxima não deve ultrapassar a medida de 4,40m. Na Figura 4.24 podem-se ver as formas de medir a altura e a largura de uma carroceria de ônibus.

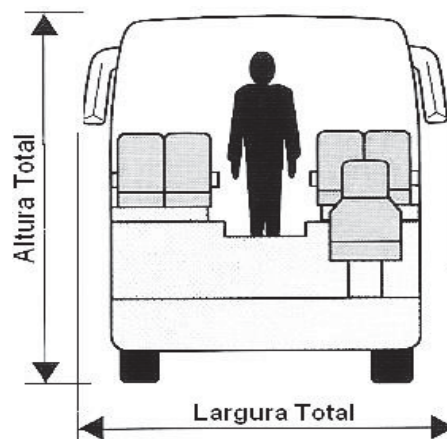


Figura 4.24 - Altura total e largura total de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

- **Entre eixos:** é a medida entre os centros dos eixos dianteiro e traseiro. O balanço traseiro, medida entre o para-choque traseiro e o centro do eixo traseiro, tem seu valor máximo em função da medida do entre eixo. Para chassi com motorização traseira a medida máxima do balanço traseiro não poderá ser superior a 62% da medida do entre eixo. Já para chassi com motorização dianteira sua medida poderá ser até 71% da medida do entre eixo. A Figura 4.25 ilustra as medidas do entre eixo, balanço traseiro e balanço dianteiro.



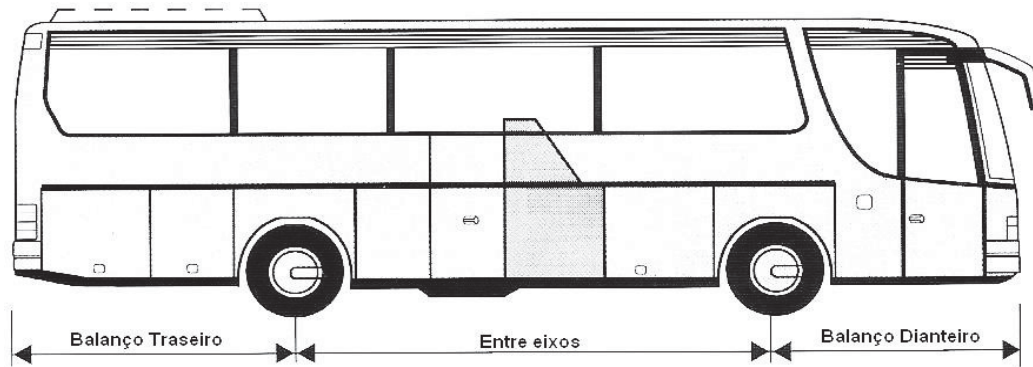


Figura 4.25 - Balanço traseiro, balanço dianteiro e entre eixos  
(Fonte: Dados do autor)

O conhecimento das principais forças que atuam sobre a estrutura do ônibus e dos seus dimensionais mínimos é de fundamental importância para se iniciar a modelagem de um projeto de carroceria.

Uma vez definido os conceitos referentes ao arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus, pode-se iniciar o estudo prático do emprego da metodologia proposta em um módulo que compõe o sistema arranjo estrutural da carroceria.

### 4.3 Aplicação da metodologia proposta na Empresa

A seguir estão descritos os passos da metodologia proposta nas Figuras 3.1 e 3.2 deste documento, sendo apresentadas as duas Macro-fases e seus respectivos passos. A Figura 4.26 mostra o projeto de um sistema de arranjo estrutural de um ônibus rodoviário.



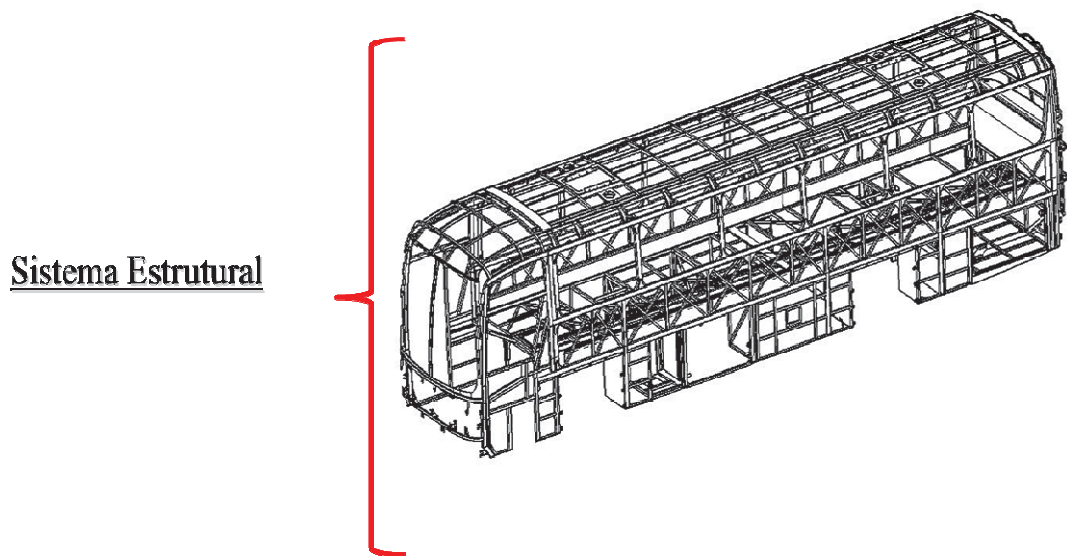


Figura 4.26 - Sistema estrutural de uma carroceria de ônibus  
(Fonte: Dados da empresa)

#### 4.3.1 Macro-fase de Elementarização

Neste item estão descritos os passos de 1 a 3, necessários para completar a fase de elementarização, primeira fase da aplicação da metodologia.

Para um melhor entendimento de um sistema estrutural de uma carroceria de ônibus é fundamental entender que inicialmente para se obter um ônibus é necessário fazer o acoplamento entre a carroceria e o chassi. As medidas que são inerentes à carroceria são altura e largura, já o comprimento é uma combinação entre chassi e número de lugares necessários para atendimento a aplicação do cliente. A Figura 4.27 exibe um esquema entre estrutura e carroceria.

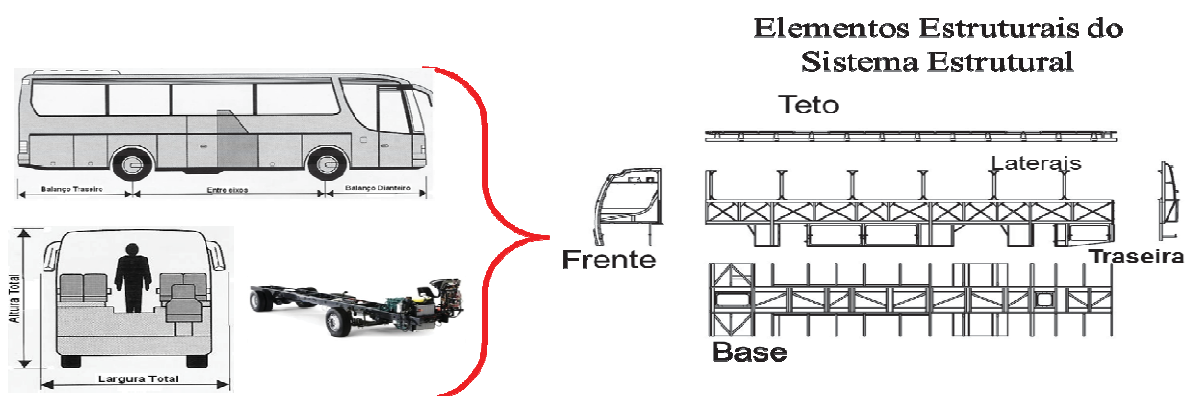


Figura 4.27 - Esquema de uma sistema estrutural de ônibus  
(Fonte: Dados do autor)

#### 4.3.1.1 Agentes Externos que Afetam o Sistema - Passo 1

Primeiramente, seguem os dados referentes a uma análise do sistema como um todo, ou seja, do casulo. Esta análise foi feita a partir da matriz, mostrada na Figura 3.3, indicada na metodologia.

Tomando-se como base as informações contidas na matriz, foi então iniciado seu preenchimento. Como sistema tem-se o casulo que é composto dos seguintes subsistemas, apresentados na seção anterior:

- Teto;
- Base;
- Laterais;
- Frente;
- Traseira.

Já como agentes externos que afetam o sistema foram usados o chassi, a legislação (normas) e os opcionais escolhidos pelo cliente (cliente). A Figura 4.28 mostra a matriz preenchida. A forma que cada agente externo pode afetar o sistema é “D” afetando o dimensional ou “C” gerando a necessidade de se desenvolver um componente.

		CHASSI		NORMA		CLIENTE	
		D	C	D	C	D	C
Chassi	TETO	1	0	0	1	1	1
	LATERAL	1	1	0	1	1	1
	BASE	1	1	0	0	1	0
	FRENTE	0	0	0	1	0	1
	TRASEIRA	0	0	0	1	0	1
	Total	5		4		7	

Figura 4.28 - Matriz de análise de interferência preenchida  
(Fonte: Dados do autor)

Após o preenchimento da matriz, pode-se observar claramente que o chassi e os opcionais do cliente são os elementos externos que mais afetam o arranjo estrutural de uma carroceria de ônibus. Também observar-se que os módulos que mais sofre interferências do chassi são os módulos das laterais e o módulo da base. Como foi apresentada anteriormente, a formação do ônibus se dá no momento do acoplamento da carroceria com o chassi tendo

como elemento de interação entre os dois componentes o módulo da base que compõe o sistema do arranjo estrutural da carroceria. Desta forma a base tem fundamental importância dentro do arranjo estrutural, pois é ela que faz a interação com o chassi e é, também, o primeiro elemento a receber as forças transmitidas pelo sistema de suspensão do chassi.

As interferências que o chassi, como agente externo, provoca na base são as seguintes:

- Agregação de componentes;
- Alteração de dimensional dos componentes da base.

Decompondo o sistema estrutural casulo, chega-se a base sendo um de seus subsistemas, pertencente ao sistema estrutural, o qual pode ser considerado como um elemento estrutural. Com isso, a base foi utilizada para aplicação da metodologia proposta.

O chassi, como agente externo, que influencia fortemente a base, foi utilizado como o agente externo. A Figura 4.29 mostra o projeto do módulo de uma base. Já a Figura 4.30 mostra um chassi de motorização dianteira e na Figura 4.31 há um desenho esquemático da base proposta pela metodologia.

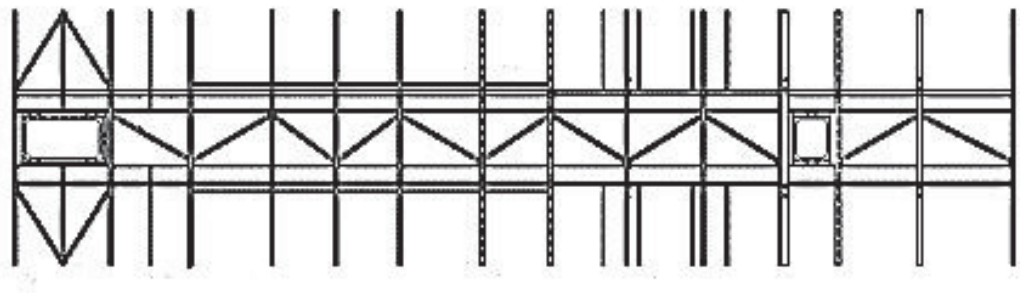


Figura 4.29 - Projeto do módulo de uma base  
(Fonte: Dados do autor)



Figura 4.30 - Chassi com motorização dianteira  
(Fonte: Manual dos construtores de ônibus)

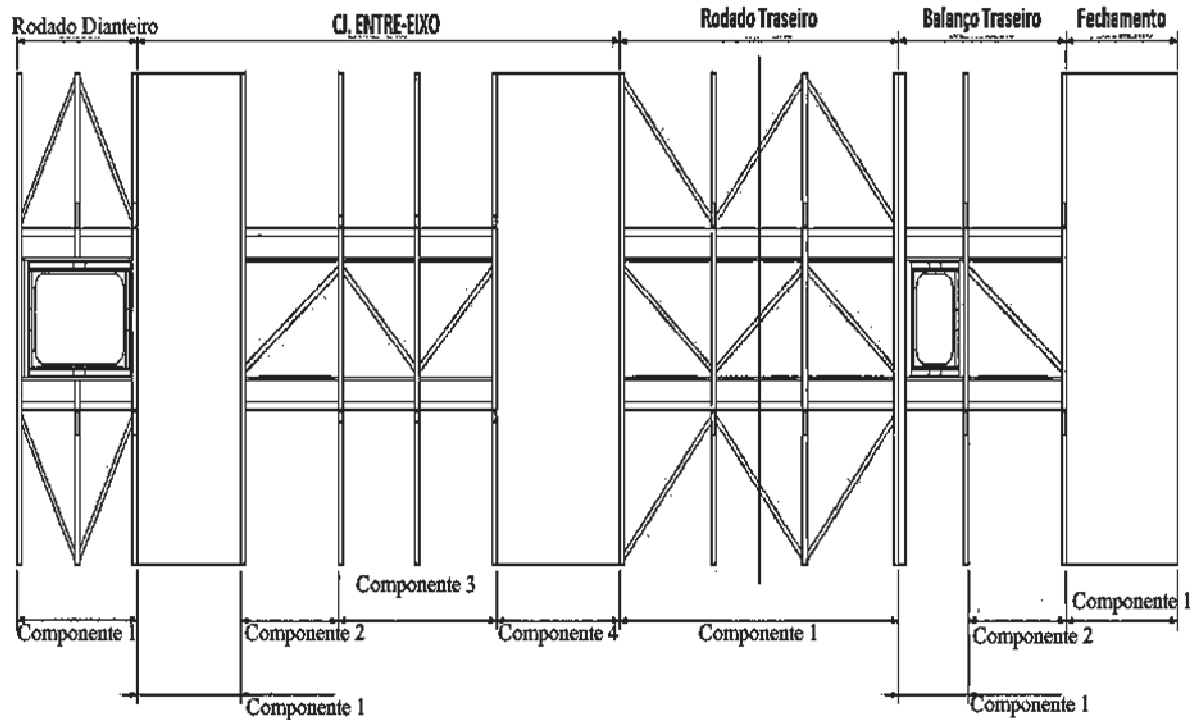


Figura 4.31 - Desenho esquemático da base  
(Fonte: Dados do autor)

A base, desenhada de forma esquemática, mostra sua segmentação composta por cinco subsistemas distintos e cada um destes subsistemas é formado por componentes (forma mais elementar do módulo da base). O total de componentes da base são nove e cada um deles foi ser analisado através da metodologia.

A aplicação da metodologia irá mostrar como se chega a esta forma esquemática do subsistema base, que faz parte do sistema estrutura da carroceria de ônibus. Além disso, mostrará as formas geométricas de cada um dos componentes pertencentes a cada um dos subsistemas.

#### 4.3.1.2 Decomposição dos agentes externos que afetam o sistema - Passo 1.1

Conforme já mencionado, o agente externo que foi analisado juntamente com a base é o chassi, o qual provoca várias alterações no sistema estrutural da carroceria.

Este agente externo também é de natureza complexa e pode ser decomposto, para isso foi usar a matriz da Figura 3.4 p. 43 de decomposição dos agentes externos.

Para preenchimento desta matriz foram utilizadas as informações fornecidas pelas empresas montadoras de chassis, como pode ser observado na Figura 4.32.

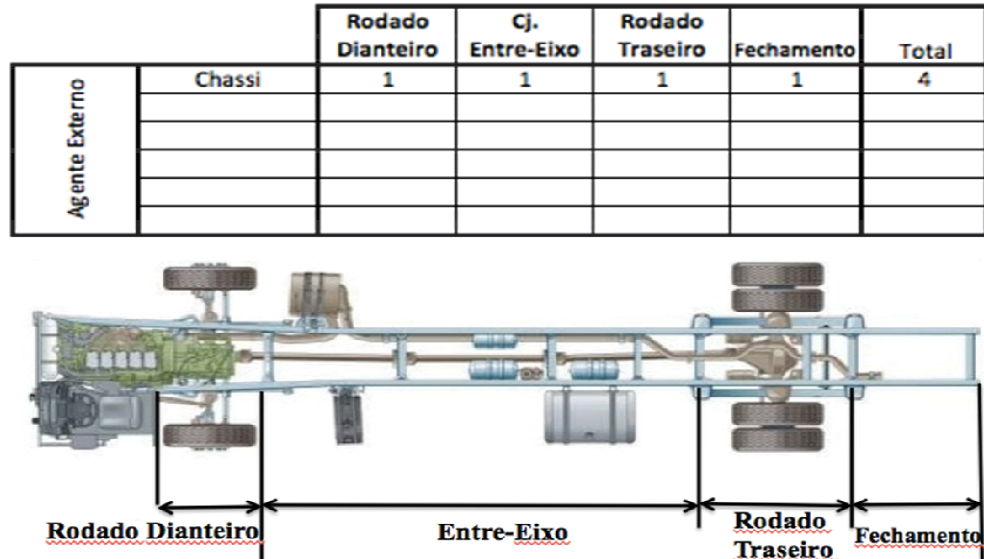


Figura 4.32 - Matriz de decomposição do agente externo chassis  
(Fonte: Dados do autor)

No preenchimento da matriz o agente externo é o chassis. A decomposição se dá através dos seguintes componentes:

- Rodado dianteiro;
- Conjunto entre eixos;
- Rodado traseiro;
- Balanço traseiro;
- Fechamento.

#### 4.3.1.3 Decomposição do Elemento Estrutural - Passo 2

A matriz da etapa, **agentes externos que afetam o sistema**, mostra que a base sofre grande influência do chassis. No processo de síntese da base foram usados, como direcionadores, os elementos pertencentes à decomposição do chassis. Como pode ser observado na Figura 4.32 cada um dos segmentos da base tem a mesma denominação da decomposição do agente externo.

Esta fase de decomposição não é obrigatória, porém para efeito de simplificação do sistema, ela foi usada como exemplo. A simplificação facilitou o entendimento das mudanças provocadas pelo chassi no arranjo estrutural e quais os impactos no módulo da base. Para melhor entendimento foram definidos os segmentos que compõe a base são os seguintes:

- Rodado dianteiro: recebe todos os esforços transmitidos pelo chassi;
- Conjunto Entre-Eixos: tem como função sustentar e adaptar a base ao chassi e serve como suporte aos bagageiros ou suporte para o estepe;
- Rodado Traseiro: assim como o rodado dianteiro recebe os esforços transmitidos pelo chassi;
- Balanço Traseiro: tem como função sustentar o bagageiro ou suporte do estepe;
- Fechamento: tem como função fazer a ligação entre a base e o módulo da traseira.

Na decomposição da base foi usada a matriz de decomposição do elemento estrutural. Na Figura 4.33 pode ser visto esta matriz preenchida.

Base	Rodado Dianteiro	1
	Cj. Entre Eixos	1
	Rodado traseiro	1
	Balanço Traseiro	1
	Fechamento	1

Figura 4.33 - Matriz de decomposição do módulo/sistema da base  
(Fonte: Dados do autor)

Para o preenchimento da matriz usou-se como elemento estrutural o módulo da base e como subsistemas as informações de saída da matriz de decomposição do agente externo. Após foi usado um critério de pertinência no preenchimento da matriz. Nos elementos que tem pertinência com o elemento estrutural (base) preencheu-se com 1 a célula. No caso de não haver pertinência teria sido preenchido com 0 (zero).

#### 4.3.1.4 Análise do(s) subsistema(s) e elemento - Passo 3

Esta etapa da metodologia analisa como os segmentos do agente externo, no caso o chassi, afetam o comportamento dos segmentos da base. Para esta análise foi usada, como ferramenta de apoio, a matriz da Figura 3.7. Como elemento estrutural usou-se a base, os subsistemas da base tem origem na etapa decomposição do elemento estrutural, como agentes

externos têm os chassis e sua decomposição. Como isso na Figura 4.34 pode-se ver o preenchimento desta matriz para o estudo da base.

		Chassi									
		Posição do Motor		Balanço Dianteiro		Entre-Eixos		Comprimento		Balanço Traseiro	
Base	Rodado Dianteiro										
	Cj. Entre-Eixo			G		G		G			
	Rodado Traseiro			D		D		D			
	Balanço Traseiro										
	Fechamento							G		G	
								D		D	

Figura 4.34 - Matriz segmentos da base x segmentos do chassi  
(Fonte: Dados do autor)

O preenchimento da matriz mostra que o Conjunto entre-eixos foi o subsistema mais afetado pelo chassi. As influências do chassi neste subsistema provocam alterações dimensionais as quais podem ser consideradas uma derivação das alterações geométricas. Como é mostrado na matriz este subsistema da base sofre várias alterações geométricas (G) e dimensionais (D) provocadas por cada um dos elementos do chassi.

### 4.3.2 Macro-fase de Análise de Comportamento

Neste item estão descritos os passos de 4 a 6, necessários para completar a segunda fase da aplicação da metodologia, a fase de análise de comportamento.

#### 4.3.2.1 Análise dos Subsistemas e Agentes Externos - Passo 4

Sob o ponto de vista de módulos as decomposições da base poderiam ter encerrado na etapa anterior da metodologia, porém sob o ponto de vista de manufatura não. A região do entre eixo, do elemento estrutural da base, deve ser decomposta mais ainda, pois este módulo é muito grande para ser manipulado pela manufatura desta forma será necessário dividir os subsistemas da base em mais componentes para, posteriormente, analisar seus comportamentos. Esta decomposição está em concordância com a metodologia de Pahl e Beitz (2005) que afirma que os sistemas modulares podem ser afetados por questões de manufatura.

A matriz de decomposição do subsistema usou, nas linhas, as informações geradas na matriz de decomposição do sistema e, nas colunas, a lista de componentes variando de 1 a  $\infty$  (infinito). Os componentes podem ser chamados de componente 1, componente 2 até componente  $\infty$ , ou simplesmente poderá ser usado seus respectivos nomes, caso se saiba.

A Figura 4.35 mostra o preenchimento da matriz. Com relação ao nome dos componentes foi usado simplesmente componente 1, 2, 3, até o 5. No preenchimento da matriz foi usando os número 0 (zero) e 1 (um) onde 1 identifica a pertinência do componente ao segmento e 0 (zero) a falta de pertinência.

		Com ponente 1	Com ponente 2	Com ponente 3	Com ponente 4	Com ponente 5	Total de Com ponentes
Base	Rodado Dianteiro	1	0	0	0	0	1
	Cj. Entre-Eixo	1	1	1	1	0	4
	Rodado Traseiro	1	0	0	0	0	1
	Balanço Traseiro	1	1	0	0	0	2
	Fechamento	1	0	0	0	0	1

Figura 4.35 - Matriz de decomposição dos subsistemas da base  
(Fonte: Dados do autor)

A matriz mostra que o subsistema rodado dianteiro foi formado somente por um componente, porém o segmento Conjunto Entre-Eixo foi formado por quatro componentes e assim sucessivamente.

Até este ponto da metodologia foi definido o agente externo e feita sua decomposição. Na sequência foram feitas as decomposições do elemento estrutural e dos subsistemas. A aplicação desta sequência de etapas levou a elementarização do elemento estrutural. As fases seguintes têm como objetivos entender como cada componente sofre influência do agente externo.



#### 4.3.2.2 Análise do Comportamento do(s) Subsistema(s) ou Componente(s) - Passo 5

O objetivo desta etapa foi analisar o comportamento geométrico do elemento mais simples do subsistema/módulo, no caso, o componente frente às variantes de chassi e carroceria.

Nesta etapa da metodologia foi usada a matriz para análise dos subsistemas x componente. Para o preenchimento desta matriz usou-se como elemento estrutural a base. Também foram usadas informações das variantes tanto do elemento estrutural (aqui, no caso, variantes do arranjo estrutural) bem como variantes do agente externo influencia no sistema. As informações referentes às variantes do sistema (arranjo estrutural) e do agente externo tem origem na primeira fase da metodologia de desenvolvimento da empresa. Nesta fase foram definidos os comprimentos das carrocerias que devem ser projetados e quais os chassis a serem encarroçados. Como variantes de carroceria foram definidos os seguintes comprimentos:

- Carroceria de 11,2 m de comprimento;
- Carroceria de 12,0 m de comprimento;
- Carroceria de 12,5 m de comprimento;
- Carroceria de 12,8 m de comprimento;
- Carroceria de 13,2 m de comprimento.

Como variantes do chassi foram definidos os seguintes modelos:

- Chassi modelo MBB OF-1721;
- Chassi modelo VW 1730 V;
- Chassi modelo Volvo B270;
- Chassi modelo MBB OF-1519;
- Chassi modelo VW 15190 V.

Na Figura 4.36 pode-se observar o preenchimento da matriz para análise dos subsistemas x componente.

Base		CHASSI				
		CF 1721	WW 1723LN	ES70	CF 1513J	WW 1513DV
Rodado Dianteiro	11, 2	F	F	F	F	F
	12, 0	F	F	F	F	F
	12, 5	F	F	F	F	F
	12, 8	F	F	F	F	F
	13, 2	F	F	F	F	F
Componente 1						

Figura 4.36 - Matriz rodado dianteiro x componente 1  
(Fonte: Dados do autor)

O segmento rodado dianteiro do elemento estrutural base possui, conforme pode ser visto no esquema da Figura 4.36, somente um componente. Esta informação é originária da decomposição dos subsistemas onde pode ser visto que o rodado dianteiro possui somente um componente, o qual é denominado componente 1.

O preenchimento da matriz para o componente (1), através das variantes da base e das variantes do chassi, mostra que não há variação neste componente (1), pois todas as células foram preenchidas com a letra F. Isto significa que o comportamento geométrico deste componente será sempre o mesmo para as variantes de comprimento de carroceria e para as variantes de chassi. A metodologia diz que os componentes com geometria constante serão chamados de blocos construtivos.

A Figura 4.37 mostra a geometria do bloco construtivo componente (1) do subsistema do rodado dianteiro, pertencente ao sistema da base. Esta geometria é fixa para cada comprimento do arranjo estrutural e para cada variante de chassi. Este bloco construtivo usará tubos e chapas como matérias primas em sua fabricação e montagem.

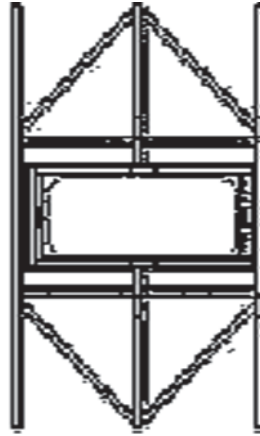


Figura 4.37 - Bloco construtivo componente (1) do subsistema rodado dianteiro  
(Fonte: Dados do autor)

Neste processo foram analisados todos os subsistemas (segmentos da base) e seus componentes em função das variantes do sistema, arranjo estrutural e das variantes de chassi.

O subsistema (segmento) que foi analisado na sequência foi o Conjunto entre eixos. A Figura 4.38 mostra o preenchimento da matriz deste subsistema em relação ao seu componente 1.

Base		CHASSI					Componente 1
		OF-1721	VW-17230 V	B270	OF-1519	VW-15190 V	
Cj. Entre-Eixo	11,2	v	v	v	v	v	
	12,0	v	v	v	v	v	
	12,5	v	v	v	v	v	
	12,8	v	v	v	v	v	
	13,2	v	v	v	v	v	

Figura 4.38 - Matriz conjunto entre-eixo x componente (1)  
(Fonte: Dados do autor)

Com o preenchimento da matriz, conforme a Figura 4.36, pode ser visto que este componente 1 do Conjunto entre eixos tem comportamento geométrico diferente do componente 1 do subsistema Rodado Dianteiro. O que pode ser visto, ainda, na matriz, é que este componente varia sua geometria, seja no comprimento de alguns de seus componentes ou na agregação de novos elementos para formar a sua montagem.

Uma vez identificado que o componente varia é de fundamental importância que sejam identificadas quais serão estas variações. Quando são definidas as variantes do agente

externo e do sistema estrutural estamos buscando construir uma biblioteca de módulos e blocos construtivos que nos permitam solucionar estas variações do arranjo estrutural do produto ônibus.

Para se conhecer as variações do componente (1), do Conjunto Entre-eixos foram analisadas as variações geométricas deste componente com relação às variantes do agente externo (chassi). As variações tabeladas dos comprimentos deste componente foram geradas em função dos comprimentos dos entre-eixos dos chassis. A matriz da Figura 4.39 mostra as variações possíveis para preencher este vão e as variantes de chassi.

Base		CHASSI				
		CF-1721	VW1720V	B270	CF-1519	VW15190V
Q. Entre-Eixo	440 mm	0	1	0	0	0
	350 mm	0	0	0	0	1
	555 mm	0	0	0	1	0
	500 mm	0	0	0	1	0
	775 mm	1	0	0	0	0

Figura 4.39 - Matriz de vãos do componente (1) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

O preenchimento da matriz mostra que cada variante do agente externo provoca, no componente (1) do Conjunto entre eixos, cinco variações em sua geometria. Estas variações estão expressas pelos valores que foram tabelados a direita do Conjunto entre eixos. Cada uma destas variações deve atender a uma ou mais variante de chassi e variação do comprimento do arranjo estrutural. Com isso cada uma destas variações deverá possuir um *part number* e todas as variações estarão contidas dentro de uma família de componente.

Partindo do conceito de família de componente é que se construiu uma abstração, na metodologia, para o conceito de módulo. Para o componente ser considerado um módulo, no âmbito de um arranjo estrutural, ele deverá sofrer variações na sua geometria e suas variações deverão ser conhecidas através da matriz da Figura 4.39. Desta forma o componente (1), do subsistema Conjunto entre eixo, pertencente ao elemento estrutural base e pode ser denominado de módulo.

O elemento analisado na sequencia foi o componente 2 do subsistema Conjunto Entre-Eixo. A Figura 4.40 mostra o preenchimento da matriz.

Base		CHASSI				
		OF-1721	VW-17230 V	B270	OF-1519	VW-15190 V
Cj. Entre-Eixo	11,2	F	F	F	F	F
	12,0	F	F	F	F	F
	12,5	F	F	F	F	F
	12,8	F	F	F	F	F
	13,2	F	F	F	F	F

Figura 4.40 - Matriz do componente (2) conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

O preenchimento da matriz do componente 2 mostra que este componente não sofre variações geométricas para as variantes de casulo e chassi. Desta forma este componente poderá ser classificado como um bloco construtivo. A Figura 4.41 mostra a geometria deste bloco construtivo.



Figura 4.41 - Geometria do bloco construtivo do componente (2) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

O elemento analisado na sequência foi o componente 3 do Conjunto Entre-Eixo. O preenchimento da matriz pode ser visto na Figura 4.42.

Base		CHASSI				
		OF-1721	VW-17230 V	B270	OF-1519	VW-15190 V
Cj. Entre-Eixo	11,2	F	F	F	F	F
	12,0	F	F	F	F	F
	12,5	F	F	F	F	F
	12,8	F	F	F	F	F
	13,2	F	F	F	F	F

Figura 4.42 - Matriz do componente (3) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

O preenchimento da matriz mostra que o componente 3 do Conjunto Entre-Eixo não sofre variações geométricas com relação às variantes de casulo e chassi. Desta forma este componente pode ser denominado de bloco construtivo. A Figura 4.43 mostra a forma geométrica deste componente.

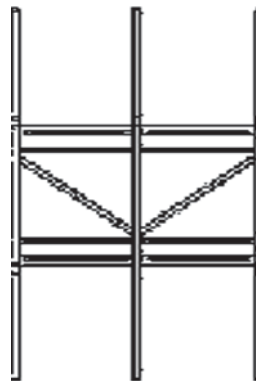


Figura 4.43 - Geometria do bloco construtivo do componente (3) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

A matriz de decomposição dos segmentos da base mostrou que o Conjunto Entre-Eixo é composto de quatro componentes. Desta forma o próximo componente do Conjunto Entre-Eixo, que foi analisado, foi o quarto componente. A Figura 4.44 mostra o preenchimento da matriz do componente 4 do Conjunto Entre-Eixo. Pelo preenchimento pode ser observado que este componente sofre variação e esta variação deverá ser conhecida para que se possa aplicar o conceito de *part family* neste componente.

Base		CHASSI				
		OF-1721	VW-17230V	B270	OF-1519	VW-15190V
Cj. Entre-Eixo	11,2	√	√	√	√	√
	12,0	√	√	√	√	√
	12,5	√	√	√	√	√
	12,8	√	√	√	√	√
	13,2	√	√	√	√	√

Figura 4.44 - Matriz do componente (4) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

Na Figura 4.45 pode-se ver que entre os vãos possíveis para preenchimento destes espaços e, diferente do componente (1), há um vão que serve para dois chassis. É importante observar que no preenchimento da matriz temos um vão que servirá para duas variantes de chassis. Entendendo que cada um destes vão, transforma-se em montagens no ambiente de manufatura isso é um ganho, pois poderá se atender cinco variações de carroceria com quatro montagens. No caso deste componente ele também será denominado de módulo.

Base		CHASSI				
		OF-1721	VW-17230V	B270	OF-1519	VW-15190V
Cj. Entre-Eixo	580	0	0	0	0	1
	650	0	0	0	1	0
	670	1	1	0	0	0
	360	0	0	1	0	0

Figura 4.45 - Matriz de vãos do componente (4) do conjunto entre-eixo  
(Fonte: Dados do autor)

Dando sequência ao processo de análise das geometrias o subsistema que foi analisado na sequência foi o subsistema do Rodado Traseiro. Este subsistema é formado somente por um componente. A Figura 4.46 mostra o preenchimento da matriz deste componente o qual não sofre variações geométricas para atender as variantes de casulo e chassis. Como o

resultado do preenchimento da matriz pode-se concluir que este componente pode ser considerado um bloco construtivo.

Como foi dito anteriormente todas estas geometrias se tornarão montagens no ambiente de manufatura, desta forma quanto mais blocos construtivos ou variações repetidas puderem ser encontrados, nestes estudos através do emprego da metodologia, mais simplificado ficará o ambiente de manufatura.

Base		CHASSI				
		OF-1721	VW-17230 V	B270	OF-1519	VW-15190 V
Rodado Traseiro	11,2	F	F	F	F	F
	12,0	F	F	F	F	F
	12,5	F	F	F	F	F
	12,8	F	F	F	F	F
	13,2	F	F	F	F	F

**Componente 1**

Figura 4.46 - Matriz do componente (1) do rodado traseiro  
(Fonte: Dados do autor)

Na Figura 4.47 pode ser observada a geometria do componente (1) do subsistema do Rodado Traseiro.

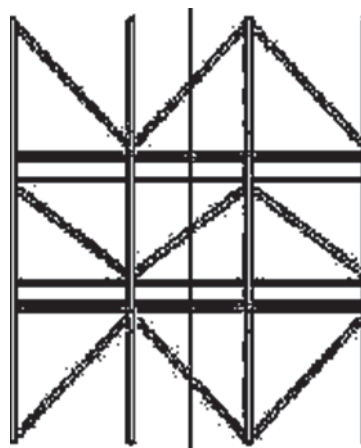


Figura 4.47 - Bloco construtivo do componente (1) do rodado traseiro  
(Fonte: Dados do autor)



Em alguns ambientes de manufatura este tamanho de bloco construtivo pode se tornar inadequado, desta forma este subsistema deverá ser decomposto em mais de um componente para que possa ser simplificado sob o ponto de vista da manufatura.

O próximo subsistema analisado foi o Balanço Traseiro que é composto de dois componentes. A Figura 4.48 mostra o preenchimento da matriz referente aos dois componentes. Ambos os componentes tem geometria constante para atendimento das variantes de chassi e casulo.

Base		CHASSI					Componente 1
		OF-1721	VW-17230V	B270	OF-1519	VW-15190V	
Balanço Traseiro	11,2	F	F	F	F	F	Componente 1
	12,0	F	F	F	F	F	
	12,5	F	F	F	F	F	
	12,8	F	F	F	F	F	
	13,2	F	F	F	F	F	

Base		CHASSI					Componente 2
		OF-1721	VW-17230V	B270	OF-1519	VW-15190V	
Balanço Traseiro	11,2	F	F	F	F	F	Componente 2
	12,0	F	F	F	F	F	
	12,5	F	F	F	F	F	
	12,8	F	F	F	F	F	
	13,2	F	F	F	F	F	

Figura 4.48 - Matriz dos componentes (1,2) do balanço traseiro  
(Fonte: Dados do autor)

As Figuras 4.49 e 4.50 mostram as geometrias destes dois blocos construtivos.

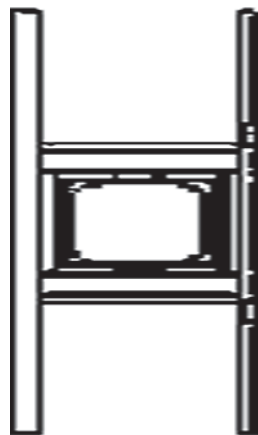


Figura 4.49 - Geometria do componente (1) do balanço traseiro  
(Fonte: Dados do autor)



Figura 4.50 - Geometria do componente (2) do balanço traseiro  
(Fonte: Dados do autor)

Como foi visto na matriz de decomposição do sistema o último subsistema (segmento) da base é o Fechamento. Decompondo o subsistema (segmento) em componentes encontrou-se somente um componente neste subsistema. A Figura 4.48 mostra a matriz referente ao componente (1), onde se pode observar que este componente tem um comportamento variado. Desta forma foi necessário avaliar os vãos que preenchem este componente. Os valores tabelados para este módulo foram gerados em função do comprimento do carro, que é uma consequência do número de lugares ofertado no produto.

Estes vãos estão expressos na segunda matriz da Figura 4.51. Igualmente como o componente (4) do subsistema do Conjunto Entre-Eixo o componente (1) do subsistema Fechamento também apresentou somente quatro variações.

Base		CHASSI					Componente 1
		OF-1721	WW-17230 V	B270	OF-1519	WW-15190 V	
Fechamento	11,2 m	v	v	v	v	v	Componente 1
	12 m	v	v	v	v	v	
	12,5 m	v	v	v	v	v	
	12,8 m	v	v	v	v	v	
	13,2 m	v	v	v	v	v	

Base		CHASSI					Componente 1
		OF-1721	WW-17230 V	B270	OF-1519	WW-15190 V	
Fechamento	500 mm	1	0	0	0	0	Componente 1
	520 mm	0	1	0	0	0	
	710 mm	0	0	1	0	0	
	460 mm	0	0	0	1	1	

Figura 4.51 - Matrizes: do componente (1) do fechamento e dos vãos do componente (1)  
(Fonte: Dados do autor)

Para que se chegasse aos módulos e blocos construtivos foi necessário muito estudo das geometrias necessárias para atendimento das variantes de chassi e casulo. Juntamente com

o emprego da metodologia proposta foi feito um estudo minucioso de cada geometria para cada componente dos subsistemas (segmentos) do sistema da base.

Na Figura 4.52 há um esquema de como as variantes do sistema da base ocorrem. O esquema de variantes da base mostra que existem 100 (cem) variantes possíveis deste subsistema pertencente ao sistema arranjo estrutural da carroceria de ônibus.

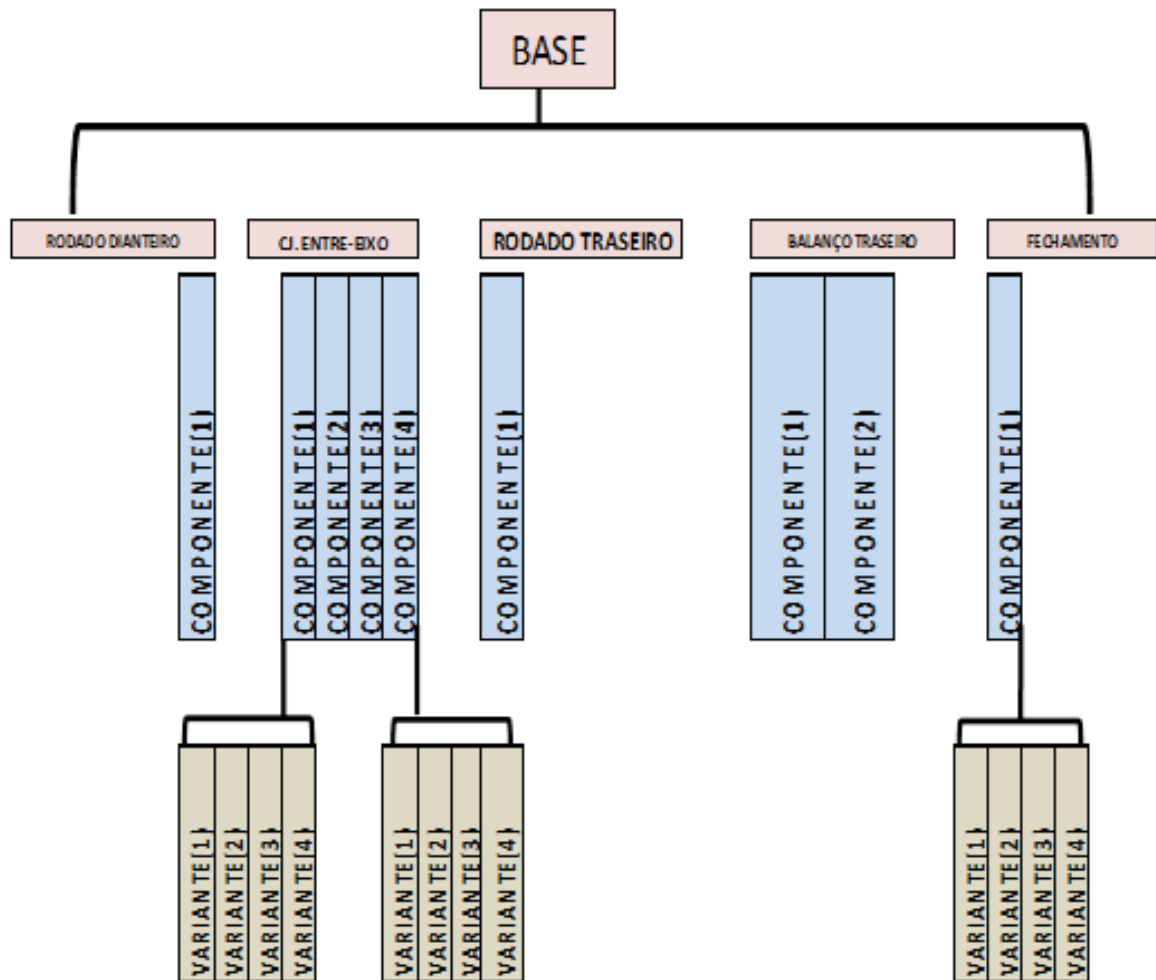


Figura 4.52 - Esquema das variantes do módulo da base  
(Fonte: Dados do autor)

O conhecimento das variantes da base no processo de atendimento aos pedidos de clientes, no dia a dia da engenharia, representa ganho de tempo, pois os projetos já estarão modelados com todas as informações necessárias.

#### 4.3.2.3 Análise das forças - Passo 5.1

As uniões que irão ocorrer entre os blocos construtivos e os módulos são uniões soldadas. Desta forma isso já está direcionando os materiais a serem usados. Definidos os materiais e as geometrias que irão ser usadas são feitos testes de ciclagem com os módulos e blocos para ver se eles atendem as solicitações que ocorrem na carroceria. Este processo pode demorar de um a dois meses até se obter uma geometria correta para suportar as solicitações que ocorrem na carroceria.

As principais forças atuantes na base são as forças originárias da suspensão do chassi e o suporte do peso da carroceria. Também ocorrem forças transversais atuando na base da carroceria. Desta forma a composição final do sistema da base através de sua decomposição deverá atender os requisitos das forças aplicadas a carroceria.

#### 4.3.2.4 Análise das Interações - Passo 6

Como é mostrado na metodologia, nesta etapa foi aplicada a matriz para análise das interações entre os componentes. Esta análise serve como direcionador do processo de montagem. A união da base com o chassi não é escopo deste trabalho, então a matriz de interface foi usada entre os componentes da base. A Figura 4.53 ilustra o preenchimento da matriz de interface dos componentes da base.

Matriz de Interfaces		Rodado Dianteiro	Cj. Entre-Eixo				Rodado Traseiro	Balanço Traseiro		Fechamento
		Componente(1)	Componente(1)	Componente(2)	Componente(3)	Componente(4)	Componente(1)	Componente(1)	Componente(2)	Componente(1)
Rodado Dianteiro	Componente(1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cj. Entre-Eixo	Componente(1)	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	Componente(2)	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	Componente(3)	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	Componente(4)	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Rodado Traseiro	Componente(1)	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Balanço Traseiro	Componente(1)	0	0	0	0	0	1	1	1	0
	Componente(2)	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Fechamento	Componente(1)	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Figura 4.53 - Matriz de interface dos componentes da base

(Fonte: Dados do autor)

O preenchimento da matriz mostra que as interações entre os componentes são sequenciais, pois o preenchimento da matriz se concentra na diagonal da matriz. Com relação à forma de união destes componentes não haverá mudança do processo atual que são uniões fixas usando-se o processo de soldagem.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Os objetivos alcançados pela metodologia proposta no projeto e manufatura do sistema estrutural de carroceria de ônibus da Empresa em questão podem ser percebidos a partir dos tópicos apresentados a seguir:

- Padronizar ao máximo os componentes que formam o arranjo estrutural;
- Ter o menor número possível de submontagens para atendimentos das variações do produto;
- Diminuir o tempo de modelagem dos pedidos dos clientes.

### 5.1 Padronização dos Componentes e Projetos

A busca de padronização dos componentes deve ocorrer para absorver os impactos provocados pelas variantes do sistema estrutural e dos agentes externos. Além da necessidade de ampliar a escala dos componentes. Pahl e Beitz (2005, 323) “A produção de lotes de determinados tamanhos se repete e por isso fica mais econômico”.

Diante das considerações supracitadas torna-se possível analisar os resultados obtidos na aplicação da abordagem modular. A Tabela 2 compara o número de peças necessárias na construção de alguns componentes pertencentes ao sistema estrutural. Esta análise foi feita comparando-se a forma de projeto atual (VR/07) em relação com os novos projetos (VR/13) após a aplicação da metodologia proposta no capítulo 4.

Tabela 2 - Análise da redução de peças de alguns componentes  
(Fonte: Dados do autor)

ANÁLISE DAS REDUÇÕES DE PEÇAS POR CONJUNTO APÓS MODULARIZAÇÃO						
	COMPLEMENTO DIANT. DIREITO	COMPLMENTO DIANT. ESQUERDO	CUPULA DO TETO	CJ. DA TRASEIRA	CJ. DA BASE	TOTAL
VR/07	14	22	21	18	55	130
VR/13	7	9	18	15	22	71
PEÇAS REDUZIDAS	7	13	3	3	33	59
% DE REDUÇÃO	50,0	59,1	14,3	16,7	60,0	45,4

A tabela mostra que nos cinco componentes analisados houve redução do número de peças para atendimento das variantes do arranjo estrutural e as variantes de chassi. Na Figura

5.1 podem ser vistos os projetos dos complementos dianteiros direito e esquerdo das laterais. Estes projetos, juntos, na versão anterior do produto (VR/07) necessitavam de 36 *part numbers* para atender as variantes de arranjo estrutural e variantes de chassi. Na nova versão do produto (VR/13) necessita-se somente 16 *part numbers*. Há uma redução de 50% no número de *part numbers* necessários para atendimento das variações de produto.

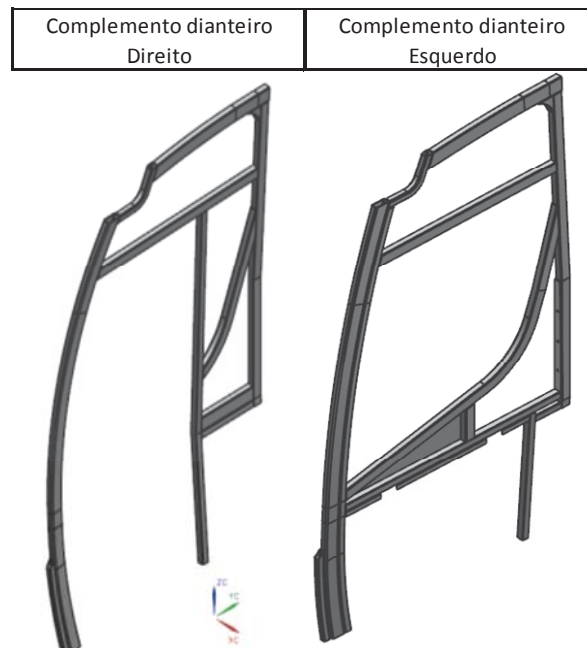


Figura 5.1 - Projetos dos complementos dianteiros (VR/13)  
(Fonte: Dados da empresa)

A cúpula do teto, também sofre redução no número de *part numbers* necessários para atender as variações do arranjo estrutural. No caso do elemento estrutural base à comparação foi feita entre o projeto atual (VR/07) e o novo projeto (VR/13) atendendo uma variação de arranjo estrutural para um mesmo chassi. Para construir a base deste chassi eram necessários 55 *part number* no projeto anterior e na nova abordagem foi necessário, somente, 22 *part numbers*.

A próxima análise irá mostrar os resultados alcançados com relação ao número de projetos de montagem para cada um dos componentes dos diversos subsistemas do sistema estrutural. Para fazer a análise das necessidades de projetos necessários para atender as variantes de arranjo estrutural e variantes de chassi foram utilizados os mesmos conjuntos apresentados na Tabela 2. A análise de projeto é mostrada na Tabela 3 serve como complemento da análise da Tabela 2, pois ela mostra a análise da quantidade de projetos necessários para atender as variantes de arranjo estrutural e variantes de chassi.



Tabela 3 - Análise de projetos de montagem  
(Fonte: Dados do autor)

ANÁLISE DO NÚMERO DE PROJETOS NECESSÁRIOS PARA ATENDIMENTO DAS VARIANTES DE ARRANJO ESTRUTURAL E CHASSI					
	COMPLEMENTO DIANT. DIREITO	COMPLMENTO DIANT. ESQUERDO	CUPULA DO TETO	CJ. DA TRASEIRA	TOTAL
VR/07	9	12	1	5	27
VR/13	1	1	1	1	4
REDUÇÃO DO No. DE PROJETOS	8	11	0	4	23
% DE REDUÇÃO	88,9	91,7	0,0	80,0	85,2

Conforme já apresentado anteriormente a Tabela 3 complementa o entendimento da Tabela 2. Analisando a quantidade de projetos necessários para atender os complementos dianteiros direito e esquerdo no modelo anterior e no novo modelo fica mais claro a causa da redução do número de peças ocorridas. No caso da cúpula do teto não há redução de projeto, porém a redução no número de peças ocorre através de uma melhoria nos projetos.

A redução no número de projetos necessários para o atendimento das variações do arranjo estrutural provoca uma nova classificação nos projetos de engenharia. Abaixo pode-se visualizar a Figura 5.2 que representa a participação, em porcentagem, da nova classificação de projetos.

### Classificação dos Projetos

■ Projetos Determinados ■ Projetos Configuráveis ■ Projetos Indeterminados

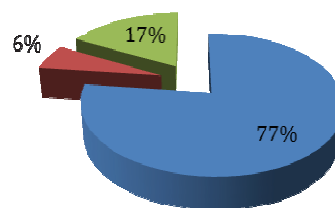


Figura 5.2 - Gráfico representando a classificação dos projetos  
(Fonte: Dados da empresa)

Como pode ser visto no gráfico há uma predominância de projetos determinados, ou seja, projetos que não terão necessidade de envolvimento da engenharia de projeto. Estes projetos determinados somam-se aos projetos configuráveis, ou seja, projetos que necessitam de regra para serem definidos. Um exemplo deste tipo de projeto são os componentes 1 e 4 do segmento conjunto entre eixo onde cada um deles possui quatro variantes. Cada variante será determinada através do comprimento do arranjo estrutural e da variante de chassi.

Olhando conjuntamente teremos desta forma, 83% dos projetos modelados sobrando, somente, 17% de projetos que necessitarão de modelagem da engenharia de produto.

As reduções de peças provocam redução nas necessidades de recursos alocados na área de fabricação da empresa, ver Figura 4.2. A principal operação afetada com esta redução é a operação de corte. Mantendo-se a mesma produção diária de carrocerias deste modelo fica claro que teremos um aumento na capacidade da operação de corte devido às reduções de peças. O tamanho deste impacto não foi medido ainda.

## 5.2 Montagens e Variantes do Produto

A aplicação da metodologia na modularização no sistema estrutural permitiu que, independente de suas variações, houvesse redução nos tempos de montagens do arranjo estrutural. Segundo Pahl e Beitz (2005 p. 342) “Outro critério para a caracterização de um sistema modular é a forma de *combinar* os blocos. Objetiva-se combinar apenas blocos iguais, que é vantajoso do ponto de vista de produção. Porém na prática combina-se blocos iguais como blocos diferentes, bem como não-blocos específicos de um pedido.”. Na Tabela 4 podem-se ver as comparações referentes aos tempos de montagem de cada posto do setor de casulo onde é montado o arranjo estrutural do ônibus. A sigla VR07 significa o modelo atual da carroceria já VR13 é o novo modelo proposto. Os tempos, mostrados na tabela, são minutos necessários para executar o total das tarefas de montagem em cada um dos postos de montagem do casulo (arranjo estrutural). Como pode ser visto a nova abordagem de projeto modular permite que a montagem do arranjo estrutural ocorra de forma mais rápida, no caso, 293 minutos a menos que a montagem atual. Atualmente a empresa está produzindo duas carrocerias por dia deste modelo, ou seja, dez carrocerias por semana. Com a redução de tempo nas montagens, obtida através da nova abordagem projetual, permitirá que se possa produzir uma carroceria a mais por semana. É importante evidenciar que os tempos mostrados na tabela são tempos de processo efetivo (montagem dos módulos e solda).

Tabela 4 - Comparação dos tempos de montagens dos casulos  
(Fonte: Dados da empresa)

SETOR DE CASULO							
COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE MONTAGENS DOS DOIS MODELOS NOS POSTOS (em minutos)							
	POSTO 1	POSTO 2	POSTO 3	POSTO 4	POSTO 5	POSTO 6	TOTAL
<b>VR07</b>	781	670	430	296	158	452	2787
<b>VR13</b>	723	571	416	250	130	404	2494
<b>REDUÇÃO</b>	58	99	14	46	28	48	293
<b>REDUÇÃO %</b>	7%	15%	3%	16%	18%	11%	11%

Além das questões de montagem, as questões de logística interna são afetadas com esta nova abordagem de projeto, ou seja, hoje o processo de fabricação ocorre em um local distante do local onde é feita a montagem da base (ver Capítulo 4). Com isto, a falta de qualquer tubo na montagem dos elementos estruturais gera a necessidade de deslocamento de operadores até o prédio da fabricação para providenciar o referido tubo. Esta perda no processo de montagem dos elementos estruturais ocorre com o objetivo de se manter o fluxo produtivo. Caso ocorra parada, gerada pela falta de peça, na linha de montagem impactará diretamente nos custos produtivos da linha. A Figura 5.3 mostra um carrinho de movimentação dos componentes da base que abastecem a linha de montagem.



Figura 5.3 - Carrinho de componentes da base  
(Fonte: Dados do autor)

Analisando o elemento estrutural do estudo de caso, a base, no modelo proposto através de sua modularização, terá uma nova forma construtiva, a qual gera somente nove montagens em seu gabarito de montagem. É importante ressaltar que este número é bem inferior ao número de montagens no processo *stick building*. Além do que o risco de ocorrer perdas no processo de montagem será minimizado.

A Tabela 4 mostra a redução total no tempo de montagem, de uma unidade, do arranjo estrutural no setor de casulo, onde se monta este arranjo estrutural. Já a Tabela 5 mostra o ganho, em minutos, de capacidade para fazer a produção diária de 2 carrocerias. Este nível de produção é o nível de produção atual da empresa para este modelo de carroceria. Como pode ser visto há uma redução de 586 minutos, ou seja, o arranjo estrutural consumirá menos tempo de recurso, no setor de casulo, para a sua montagem.

Tabela 5 - Comparativo de tempos de montagens diária  
(Fonte: Dados do autor)

<b>Tempo (min.) diário necessário para produção (VR/07 x VR/13)</b>		
	<b>Produção diária</b>	<b>Tempo necessário em min.</b>
<b>VR/07</b>	<b>2</b>	<b>5.574,00</b>
<b>VR/13</b>	<b>2</b>	<b>4.988,00</b>
<b>Redução em min.</b>		<b>586,00</b>
<b>% Redução</b>		<b>10,51</b>

A Tabela 6 mostra a redução de tempo obtida para uma produção mensal deste modelo de carroceria. Considerando-se o mês com 21 dias úteis a nova forma de montagem, proposta pela aplicação de conceitos modulares no arranjo estrutural, mostra que o setor de casulo produzirá as 42 unidades mensais do novo modelo de arranjo estrutural em 18,5 dias, ou seja, há um aumento de capacidade de 4,93 carrocerias por mês neste setor.

Tabela 6 - Comparativos de tempos para montagens mensais  
(Fonte: Dados do autor)

<b>Tempo (min.) mensal necessário para produção (VR/07 x VR/13)</b>		
	<b>Produção mensal (21 dias)</b>	<b>Tempo necessário em min.</b>
<b>VR/07</b>	<b>42</b>	<b>117.054,00</b>
<b>VR/13</b>	<b>42</b>	<b>104.748,00</b>
<b>% Redução</b>		<b>12.306,00</b>
<b>Aumento de Capacidade em dias de produção</b>		<b>2,47</b>
<b>Aumento de Capacidade em unidades produzidas</b>		<b>4,93</b>

A Tabela 7 mostra uma projeção de capacidade de produção para no exercício de 2014 e sua respectiva margem de contribuição estimada. A margem de contribuição usada na Tabela 7 é uma margem média referente as uma configuração padrão de produto, utilizada para efeito de orçamento. Com o aumento da disponibilidade de capacidade anual em 52 unidades de carroceria isso provoca um incremento de margem de contribuição anula aproximado de R\$ 2.003.938,89.

Tabela 7 - Margem anual estimada para 2014  
(Fonte: Dados da empresa)

<b>Estimativa de margem de contribuição para 2014 (VR/07 x VR/13)</b>			
	<b>Capacidade p/ 2014</b>	<b>Margem média unit. por carro</b>	<b>Margem média Anual</b>
<b>VR/07</b>	<b>483</b>	<b>38.500,00</b>	<b>18.595.500,00</b>
<b>VR/13</b>	<b>535,05</b>	<b>38.500,00</b>	<b>20.599.438,89</b>
<b>Incremento de margem anual</b>			<b>2.003.938,89</b>
<b>Incremento de recursos</b>			<b>-</b>

## 6 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

### 6.1 Conclusões

A necessidade de se apresentar novos produtos, no menor tempo possível buscando atender os desejos e necessidades dos clientes, é a realidade do mercado atual de carroceria de ônibus. Este novo cenário de mercado traz com ele uma pressão, cada vez maior, por custos cada vez menores das carrocerias produzidas.

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram os dois grandes temas desafiadores para as indústrias brasileiras nos próximos anos. Inicialmente a questão da produtividade do trabalhador brasileiro comparado com outros países. Segundo a CNI (Confederação Nacional das Indústrias) a produtividade da indústria brasileira cresceu 4% entre 2001 e 2011. “O baixo desempenho do Brasil resulta de questões de natureza regulatória e problemas associados à formação fraca dos trabalhadores”, diz José Augusto Fernandes, diretor de políticas e estratégia da entidade.

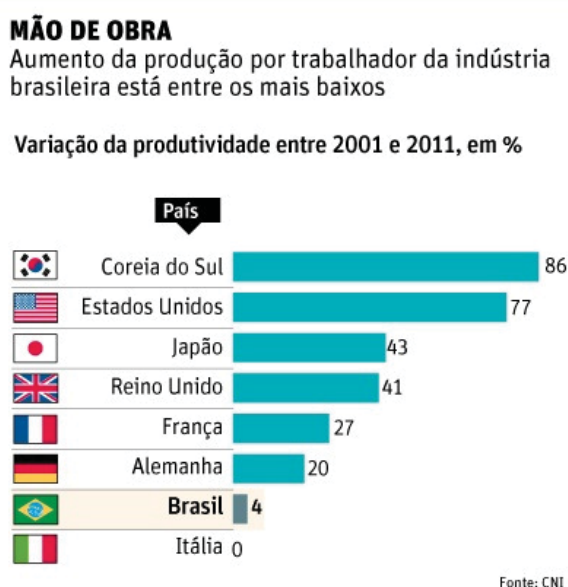


Figura 6.1 - Variação da produtividade do trabalhador brasileiro  
(Fonte: <http://agenciati.com.br/produtividade-do-brasil-cresce-menos-do-que-a-de-outros-paises/>)

A Figura 6.2 mostra o gráfico referente à variação da produção e do salário do trabalhador brasileiro. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI) a produtividade da indústria brasileira de transformação está longe de seguir o mesmo ritmo do aumento salarial dos trabalhadores. O que pode ser observado no gráfico é que entre 2001 e 2012 a produtividade da indústria cresceu apenas 1,1%, diferente da remuneração média dos trabalhadores (em US\$) que subiu 169%. Olhando sob o ponto de vista de manufatura a quantidade de produtos fabricados por um trabalhador aumentou 1,1%, enquanto os salários mais que dobraram. Isso mostra que a indústria está absorvendo os custos decorrentes dos reajustes salariais e, conseqüentemente, diminuindo suas margens.

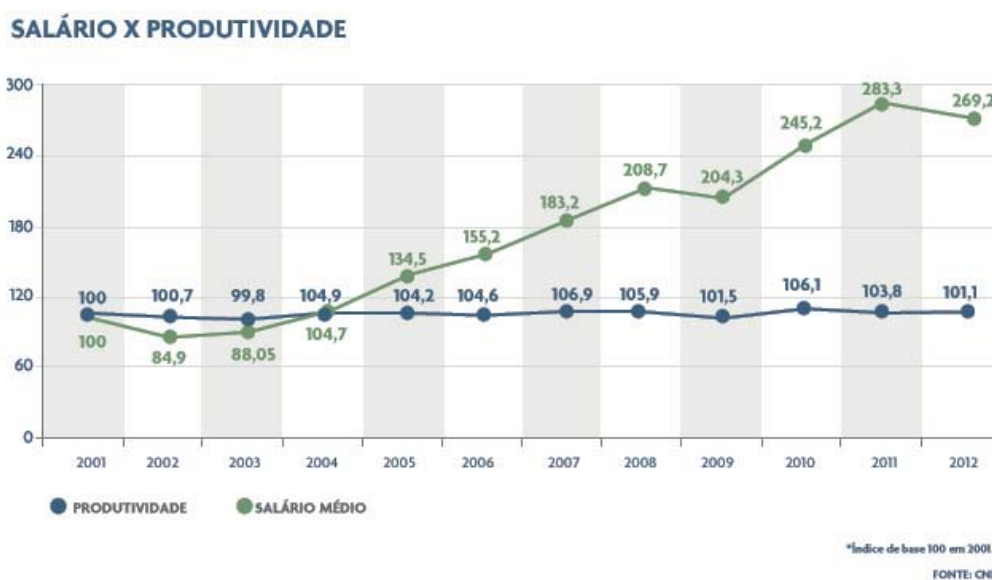


Figura 6.2 - Salário x produtividade

(Fonte: <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/imprensa/2013/06/1,17034/salarios-dos-trabalhadores-industriais-subiram-169-desde-2001.html>)

Tomando-se como direcionador a questão de produtividade pode-se concluir que os resultados desejados foram atingidos e atendem as necessidades competitivas desejadas pela empresa.

A capacidade de gerar padrões de projetos para o atendimento das variantes de projeto de produto mostrou-se como um dos pontos fortes da metodologia. Estes padrões projetuais irão se transformar em aumento de escala dos componentes do produto, maior controle nos processos de fabricação, logística e montagem. Além das questões de fabricação e logística haverá um menor investimento em ferramentais (gabaritos de soldagem) para a construção dos mesmos. A melhoria no controle dos processos produtivos aliada ao aumento de



capacidade permite que os incrementos de capacidade produtiva e produtividade dos trabalhadores gere redução nos custos produtivos da empresa.

A diminuição no tempo de modelamento dos projetos, para atendimento dos pedidos dos clientes, permite que a engenharia se concentre mais na melhoria das soluções de produto tanto para os clientes bem como para a manufatura.

## **6.2 Limitações**

As principais limitações observadas neste trabalho foram à impossibilidade de poder aplicar esta metodologia em outro produto de um segmento diferente, porém com um nível de customização do produto semelhante ao encontrado nas carrocerias de ônibus. O objetivo de aplicar esta metodologia em outro segmento industrial seria o de analisar o nível de generalização do método e adaptá-lo a novas necessidades diferentes da carroceria de ônibus. Outra limitação encontrada foi a de não conseguir analisar os dados de engenharia com o produto em fase plena de produção. Atualmente o produto esta em fase inicial de produção e engenharia, com isso o volume de informações de pedidos fica um pouco prejudicado para análise.

## **6.3 Trabalhos Futuros**

A possibilidade de trabalhos futuros esta relacionado às questões de aumento da escala dos componentes, diminuição da complexidade de manufatura e modelagem de projetos.

O aumento da escala dos componentes está relacionado ao nível de repetitividade dos componentes no atendimento as variantes de sistema estrutural. Esta repetitividade possibilitará à pesquisa de materiais mais leves, porém com custos mais elevados, que possam ser empregados no sistema estrutural da carroceria. Olhando sob o ponto de vista da estabilidade das geometrias pode-se, a partir do *rump up* do produto, desenvolver pesquisas para novos processos de montagem dos blocos construtivos e módulos bem como em novas formas de interação destes elementos. Em outras palavras novas formas de uniões, capazes de reduzir os tempos de montagens, para formação dos blocos construtivos e módulos e nas suas interações.

A diminuição da complexidade do ambiente de manufatura para atendimento das variantes de produto permite um estudo detalhado nos processos de automatização na construção dos blocos construtivos e módulos, bem como, nas interações entre estes elementos. Além disso, outro estudo que poderá ser desenvolvido é sobre a relação entre a abordagem modular de projeto e trabalho padronizado nas linhas de montagem em ambientes de produto com alto grau de customização.

Sob o ponto de vista de modelagem, esta metodologia pode servir como ferramenta na busca de processos de automação para modelagem de produtos. Além das questões de modelagem esta metodologia poderá auxiliar em trabalhos de implantação de manufatura digital, especialmente nos processos de simulação de manufatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Aciars; SILVA, Jonny C. da. **Projeto Integrado de Produto: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Editora Monale Ltda., 2008.

BALDWIN, Carliss Y.; CLARK, Kim B. Design Rules. **The Power of Modularity**. Massachusetts Institute of Technology All rights reserved 2000.

BARBOS, Gustavo F. **Aplicação da Metodologia DFMA - Design for Manufacturing and Assembly no Projeto de Aeronaves**. Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de, 2007.

BAXTER, Mike. **Projeto de Produto Guia Prático para o Design de novos Produtos**. São Pauto: Blucher, 2011.

CHING, Francis D. K.; ONOUYE, S. Barry; ZUBERBUHLER, Douglas. **Sistemas Estruturais Ilustrados Padrões, Sistemas e Projetos**. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2010.

ERICSON, Anna. ERIXON, Gunnar. **Controlling Design Variants Modular Product Plataforms Society of Manufacturing Engineers**. Michigan: Deargorn, 1999.

KANITAR, Fatima P. **Análise do Desenvolvimento dos Sistemas CAD/CAM/CAE no Brasil nos Diversos Setores do Conhecimento sob a Ótica da Propriedade Industrial**. Rio de Janeiro: Centro Federal de Educação Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, 2005.

GRAVEN, Helio A. BALDAUF, Alexandra S. F. **Introdução à construção modular no Brasil: uma abordagem atualizada**. Porto Alegre: ANTAC, 2007. — (Coleção Habitare, 9).

HAYS, Robert T. **The science of learning a systems Theory approach** Brown Walker Press. Florida: Boca Raton, 2006.

KAMRANI, Ali K.; SALHIEH, Sa'ed M.; **Product Design For Modularity**. 2 ed. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers Norwell, 2010.

KRATOCHVÍL, Milan; CARSON, Charles. **Growing Modular** – mass customization of complex products, services and software. Springer Berlin – Heidelberg 2010 – Printed in Germani.

LEHTONE, Timo. **Design modular product architecture in new product development**. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 713 Tampere University of Technology. Publication 713 – 2007.

MELLO, Luís C. B. de B.; BANDEIRA, Renata A. de M.; FARIAS FILHO, José R. de. **Análise da competitividade dos estaleiros nacionais fabricantes de embarcações offshore através de estudo de casos múltiplos**. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. Revista Produção Online. Florianópolis, SC – 2011 - v.11, n. 2, p. 369-398, abr./jun.

OLIVER, Charles Ekepre. **Analysis of the parts/machines grouping problem in group technology manufacturing system**. Texas Tech University, 1981.

MILLER, Thomas D. ELGÁRD, Per. **Modules, Modularity and Modularization** – evolution of the concept in a historical perspective design for integration in manufacturing. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsoe 1998.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering Design: systematic approach**. 5th printing 2005. Springer-Verlang London Limited Printed in Great Britain.

ROMEIRO FILHO, Eduardo, FERREIRA, Cristiano V.; MIGUEL, Paulo A. C. GOUVINHAS, Reidson P.; NAVEIRO, Ricardo M. **Projeto do Produto**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2010.

ROSENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando A.; AMARAL, Daniel C.; TOLEDO, José C.; SILVA, Sergio L.; ALLIPRANDINI, Dario H.; SCALICE, Regis K. **Gestão de desenvolvimento de produto uma referência para melhoria de processo**. São Paulo: Editora Saraiva, 2006.

SOUZA, Josimar J.; BOTELHO, Róber D. **Os Conceitos de Modularização na Indústria Automotiva**. VI Encuentro Latinoamericano de Diseño 2011.

TORIYA, Hiroshi. **3D Manufacturing Innovation Revolutionary Change in Japanese Manufacturing with Digital Data** Springer. Verlag London 2008.

TU, Yiliu; DEAN, Paul. **One-of-a-Kind Production** Springer - Verlag London Limited 2011.

ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D. **Product Design and Development**. 5 ed. McGraw-Hill Irwin New York: 2012.

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.

WOMACK, James P.; JONES Daniel T.; ROOS, Daniel. **A Máquina que Mudou o Mundo**. 17<sup>a</sup> Tiragem. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2004.

Yin, Robert K. **ESTUDO DE CASO – Planejamento e Método**, 2<sup>a</sup>. Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.

## APÊNDICE A – Aspectos históricos

A palavra módulo originou-se no latim (*modulu*), seu conceito foi empregado por algumas das principais culturas humanas. Segundo Graven e Baldauf (2007) “... o uso de módulo aparece na arquitetura em uma interpretação clássica dos gregos, sob o caráter estético; dos romanos, sob um caráter estético-funcional; e dos japoneses, sob um caráter funcional”. Uma breve passagem pelo uso desses conceitos apresentados por estas culturas é se faz importante.

Apesar de este conceito ter sido empregado nas culturas antigas, foi somente no final do século XIX e início do século XX que ocorreu sua retomada. Durante a Segunda Guerra Mundial este conceito foi empregado na indústria bélica. Um exemplo disso é visto na empresa Blohm & Voss estaleiro de montagem de submarino. Já no pós-guerra, a utilização dos conceitos de modularização foi aplicada dos na reconstrução de uma Alemanha destruída pela guerra quando seu emprego foi utilizado de forma intensa na construção civil da época.

### 1 Gregos

Segundo Greven e Baldauf (2007), a expressão da beleza e harmonia dos gregos se dava pela proporção dos elementos das ordens gregas. O diâmetro das colunas era tomado como unidade básica, o qual era utilizado nas construções gregas. A partir deste módulo eram criadas as demais dimensões, não só da coluna, mas de todas as demais dimensões da obra arquitetônica. O espaço entre as colunas era baseado na medida do módulo (diâmetro da coluna). O primeiro conflito encontrado nesse processo, segundo Greven e Baldauf (2007) são os vãos de esquina das colunas. Estes vãos se adaptavam às condições necessárias para manter a dimensão dos módulos “pré-fabricados”. A Figura A1.1 mostra os vãos das colunas.

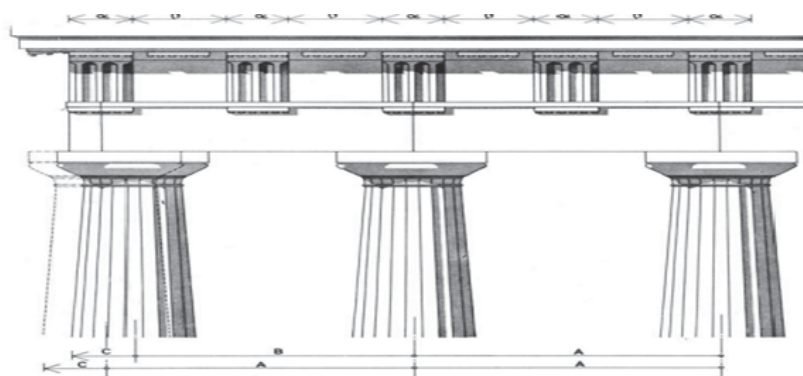


Figura A1.1 - Colunas gregas.  
(Fonte: Graven e Baudalf (2007))

## 2 Romanos

Os romanos eram um povo de caráter essencialmente prático, trabalhavam com várias medidas padrões as quais definiram seus módulos. As cidades, por exemplo, Emona, hoje Liubiani na Eslovênia, possuíam um reticulado de 360 x 300, ou seja, 6 por 5. Esses reticulados eram baseados no *passus* romano, um múltiplo do *pes*, medida antropomórfica da época. O uso desses conceitos construtivos, pelos romanos não se davam somente na construção das cidades se davam, também, na construção de objetos, tais como: tijolos, tubos cerâmicos e ladrilhos. O emprego desse conceito é usado também nos utensílios domésticos criados por essa cultura. Pesquisas arqueológicas do professor iugoslavo Tine Kurent mostram que os romanos possuíam componentes padronizados e modulados. O que mais chama a atenção é que os componentes modulados já levavam em consideração as junções ou sobreposições. Ou seja, já havia, na época, uma preocupação com a interface entre os diversos objetos. Uma importante característica desse conceito romano era o que Vitruvius, arquiteto romano do século I a. C., chamava de *ratio symetriarium*, ou seja, os tamanhos modulares dos componentes construtivos romanos eram pequenos múltiplos de várias unidades padrão. Portanto as composições de componentes romanos eram somas e múltiplos de várias unidades padrão de medida, mas nenhuma unidade padrão constituía um módulo-base. A Tabela 8 mostra alguns componentes utilizados pelos romanos e suas dimensões.

Tabela 8 - Tabela de componentes romanos  
(Fonte: adaptado de Garven e Baldauf)

<b>Componente</b>	<b>Dimensões</b>
<b>Tubo cerâmico para água</b>	<b>Comprimento modular: 1 gradu (passo)</b>
<b>Tegula (telha)</b>	<b>Comprimento e largura modulares: 1 cubitu (osso longo situado na face interna do antebraço) = 6 palmi (palma: proporção da mão entre o punho e os dedos)</b>
<b>Imbrex</b>	<b>Comprimento modular: 1 cubitu = 6 palmi</b>
<b>Laje de tijolos para hypocaustu (sistema de calefação)</b>	<b>Comprimento e largura modulares: 1 bipedalis (2 pés) = 8 palmi</b>
<b>Tijolo Lydica</b>	<b>Largura modular: 1 pes = 4 palmi Altura modular: 1 palmus Comprimento modular: 1 cubitu = 6 palmi</b>
<b>Vários ladrilhos quadrados para piso</b>	<b>Áreas modulares = 1 cubitu quadrado ou 1 pes quadrado ou 1 bes quadrado</b>
<b>Vários ladrilhos hexagonais</b>	<b>Espaço modular: 1 uncia cúbica ou 1 semiuncia cúbica ou 1 silicus (pedra) cúbico.</b>

### 3 Os Japoneses

Na obra de Greven e Baldauf (2007), pode ser visto que, com uma unidade padrão praticamente equivalente ao pé inglês e originário da China, o *shaku*, os japoneses desenvolvem seu sistema modular. No método *kýo-ma*, o tatame tem medida fixa ou constante (3,15 x 6,30 *shaku*) e o módulo *ken* tem como padrão o entre colunas com medidas que oscilam entre 6,4 a 6,7. O tatame, por ser usado em todos os locais internos da construção, levou à necessidade de dimensionar os espaços de forma a receberem, em seu piso, um número inteiro de tatames. As medidas de uma construção eram expressas pelo número de tatames empregados e, esses tatames permitiam que duas pessoas pudessem estar sentadas ou uma deitada. Essa forma de modulação caracteriza o aspecto prático-funcional da mesma. Com o tempo, o tatame perdeu suas dimensões humanas, principalmente após a intensificação da utilização do *Ken* (medida entre colunas). A Figura A1.2 mostra uma antiga residência típica japonesa.

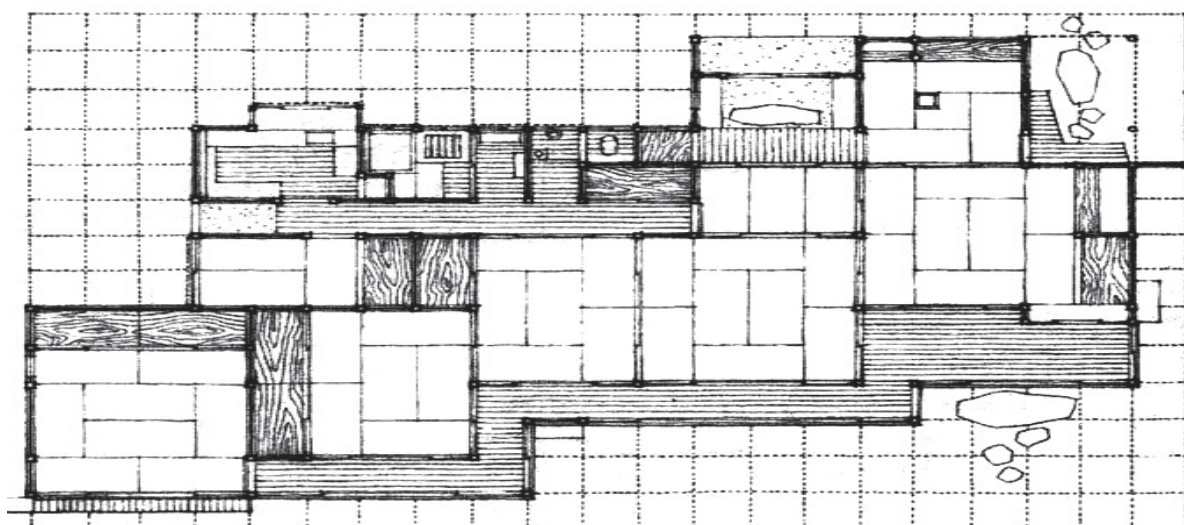


Figura A1.2 - Residência típica japonesa.  
(Fonte: Graven e Baudalf (2007))

### 4 Revolução Industrial e seus novos caminhos

Conforme dito por Greven e Baldauf (2007), o desenvolvimento das estradas de ferro teve forte influência na construção civil. Essa influência se deu de duas formas: desvinculando a construção da dependência de materiais locais e, por outro lado, agindo na formação da rede urbana. A mudança de foco do transporte férreo de carga para passageiros deixou o transporte fluvial livre para o transporte de materiais pesados. Nesse panorama de



evolução dos transportes a construção civil também evoluiu gerando novas necessidades aos prédios. Dessa forma, os prédios devem se tornar mais resistentes, com isso temos a necessidade do emprego de novos materiais na construção. O emprego intensivo de vidro e do ferro, gerado pela necessidade de novos materiais, na construção civil marca o início da arquitetura moderna. O uso do vidro e ferro na construção não é uma novidade, porém seu problema estava na escala. Com os avanços industriais adquiridos, foi possível o emprego destes materiais, os quais foram considerados como novos para o período.

## 5 Século XX

No final do século XIX, a busca, pela Alemanha, de aceleração no seu processo de industrialização se dava em função da competição com a França e a Inglaterra.

Greven e Baudalf (2007) relatam que, na Alemanha do final do século XIX, havia um ambiente cultural muito intenso, combinado com clima político fortemente nacionalista, que levava a Alemanha em busca de uma linguagem estética. Um dos eixos centrais desse movimento baseava-se no conceito de um design focado nas questões de manufatura; o conceito por trás deste pensamento era a produção em massa. Acreditava-se, na época, que a sociedade trabalhadora teria maior acesso a produtos por meio de uma produção massificada dos mesmos. Essa era a diferença básica entre o movimento da Alemanha e o da França (Art Nouveau) e Inglaterra (Art & Craft). Além dessas questões, pode ser dito que o movimento teve forte influência do pensamento racionalista com que os artistas e intelectuais da época reagiram a Primeira Guerra Mundial. Esse movimento se expressou pela escola Bauhaus, que sintetizou o movimento *Art & Craft* e *Art Nouveauna* Alemanha.

O prédio da primeira exposição industrial, ocorrida em 1851, foi concebido por Joseph Paxton, que apresentou um estudo baseado nas suas experiências adquiridas com outros projetos, em especial de estufas, e na estrutura de um tipo de nenúfares (vitória-régia). A concorrência foi ganha, e a edificação executada dentro do orçamento previsto e no incrível prazo de nove meses. Isso foi possível graças ao rigoroso estudo e detalhamento feito pelos engenheiros Charles Fox e Henderson, seus sócios, de todos os elementos da construção, do método de produção, do sistema de montagem, do tempo de construção e do rigoroso controle dos custos. Os elementos utilizados foram projetados para serem produzidos em massa, com as técnicas de fundição existentes na época, permitindo sua montagem e desmontagem. O elemento condicionador da escolha do módulo foi o vidro, aplicado em grandes placas, cuja

medida máxima de fabricação era de 8 pés (cerca de 240 cm), dimensão esta que determinou o reticulado da malha. Os múltiplos do módulo (24, 48, 72 pés – cerca de 720 cm, 1.440 cm, 2.160 cm, respectivamente), determinaram as posições e as dimensões de todas as peças. Na Figura A1.3 temos um dos módulos sendo manipulado em seu processo de montagem.

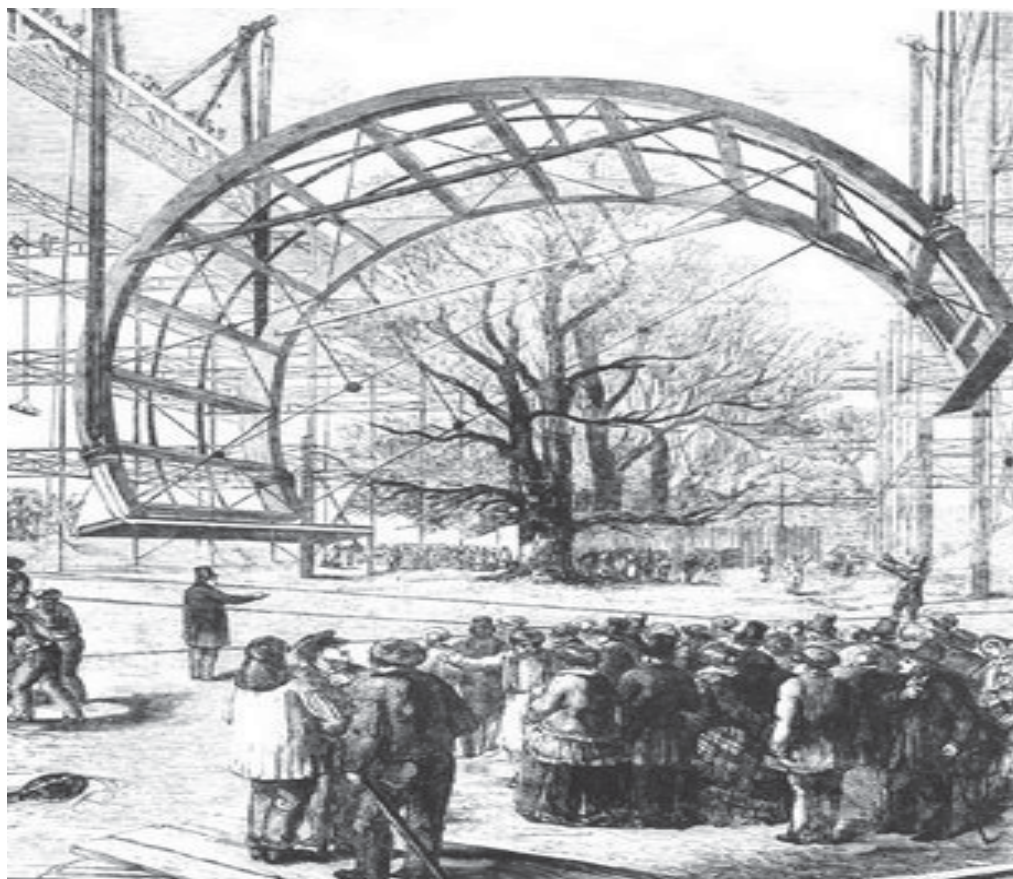


Figura A1.3 - Construção do Palácio de Cristal  
(Fonte: [http://12-efe.blogspot.com.br/2009\\_04\\_01\\_archive.html](http://12-efe.blogspot.com.br/2009_04_01_archive.html))

Construtivamente, o Palácio de Cristal, mostrado na Figura A1.4, representa uma síntese dos componentes estudados separadamente e coordenados entre si por uma rede modular. O espaço resultante, do somatório de elementos padronizados e industrializados, era o fruto perfeito da tecnologia empregada, do estudo racional dos vínculos, dos limites econômicos, de tempo necessário para a produção e conclusão da obra e dos condicionantes técnicos de produção e de montagem.



Figura A1.4 - Palácio de Cristal  
(Fonte: Gössel; Leuthäuser)

## 6 Walter Gropius e a escola Bauhaus

A Bauhaus foi fundada por Walter Gropius em 1919. Foi concebida como uma escola democrática com o objetivo de formar arquitetos e design para uma Alemanha em transformação. A base de toda a estética bauhauseana se encontra no princípio da funcionalidade racional dos objetos e do espaço habitável. “*A forma segue a função*”, isto é, a forma é resultado da funcionalidade do objeto em questão ou do ambiente em questão. Isso desconsidera o capricho pessoal e a tradição histórica. Havia a necessidade de despir o objeto de seus ornamentos. Essa proposição vinha de Adolf Loos em seu livro “*Ornamento e Crime*” lançado em 1908, onde há a defesa da honestidade da forma. Isso se expressa na expressão “*menos é mais*”. Com isso dá-se uma maior ênfase à forma (Gestalt) e à formação da forma (Gestaltung), derivando assim na abstração das formas geométricas simples essenciais e nas cores primárias. Este pensamento levado à arquitetura permite o desenvolvimento do método de construção do menor ao maior objeto. Conforme Lehtone (2007), apesar de haver várias citações relacionando esta escola com o tema modularização, o que se vê é uma incessante busca pela padronização e simplificação. A ideia de modularização na arquitetura aparece mais claramente no trabalho de Aalto padronização flexível (*flexible standardization*).

## 7 Karl Heinz Borowski

Lehtone (2007) mostra que, sob o ponto de vista das questões de modularização, o trabalho desenvolvido por Karl Heinz Borowski pode ser considerado como fundamental para o estudo do tema modularização. Em seu livro “*Das Baukastensystem in der Technik*”, publicado em 1961, ele aborda o sistema de família de produtos baseado em blocos construtivos (*Baustein*), apresenta também, exemplos desta tecnologia aplicada à indústria. A grande contribuição de Borowski foi o estabelecimento de regras para o sistema modular de construção (*Baukastensystem*). Ele apresenta observações sobre o uso e a natureza deste sistema. Segundo seu sistema um *kit* de construção, que pode ser também traduzido como uma submontagem (*Baukasten*), a qual é composta de pequenos blocos construtivos (*Baustein*). Desta forma ele utiliza o conceito de blocos construtivos, Borowski apresenta um exemplo de três níveis no campo da engenharia ferroviária. Segundo ele, um trem é composto de locomotiva e vagões. Os vagões são compostos de um chassi e uma estrutura. O chassi é composto por um jogo de rodas, uma estrutura de sustentação e uma suspensão. A idéia de fixar um tamanho e níveis de solução é uma importante parte para a classificação dos elementos de construção do sistema.

Seguindo a definição de Borowski, os elementos do sistema modular de construção consistem de blocos construtivos de vários tamanhos dentro do seu nível de solução. Um bloco construtivo é uma unidade indivisível dentro do sistema de construção. Esses elementos possuem interfaces físicas ou de outra forma com os outros elementos.

A definição de Borowski para seu sistema modular de construção é a seguinte:

*Das Baukastensystem ist ein Ordnungsprinzip, das den Aufbau einer begrenzten oder unbegrenzten Zahl verschiedener Dinge, aus einer Sammlung genormter Bausteine auf Grund eines Programmes oder Baumusterplanes in einem bestimmten Anwendungsbereich darstellt.*

O sistema modular é um princípio de ordem, mostrando a construção de um número limitado ou ilimitado de coisas diferentes, a partir de um conjunto de componentes padronizados com base em um tipo de programa ou plano em um determinado escopo.

Este autor também fala sobre intercambialidade:

*Das Baukastensystem tritt erst in dem Augenblick auf, wo das*

*Vorhandensein der Baugruppen zur Fertigung verschiedener Dinge durch verschiedene Kombination der Baugruppen ausgenutzt wird.*

O sistema modular ocorre através da combinação de diferentes módulos para a produção de diferentes coisas.

Dessa forma, pode-se dizer que a abordagem modular de projeto permite a simplificação de produtos complexos. Isso se dá através do uso de uma coleção de blocos construtivos padronizados que podem ser usados de forma limitada ou ilimitada para a construção de vários produtos, de acordo com um plano de construção. Borowski define nove variações de sistemas que podem ser usados como meta-níveis para planos de construção, como pode-se ver na Figura A1.5.

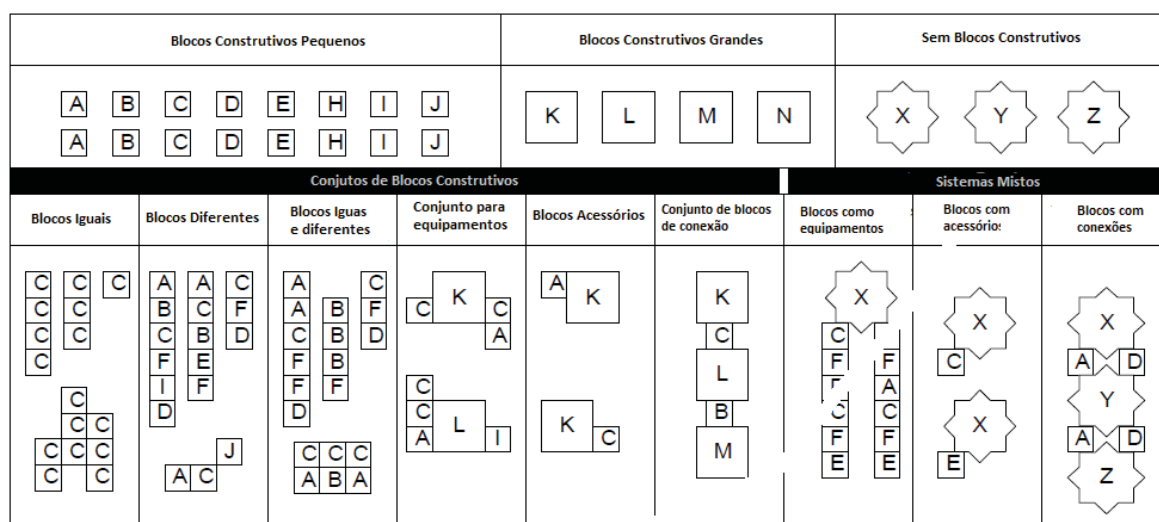


Figura A1.5 - Meta-modelos de Borowski  
(Fonte: Adaptado Lehtone (2007))

Na Figura A1.5 pode-se ver que os blocos construtivos (*small building blocks*) são os elementos de menor tamanho. Já os elementos maiores podem ser compostos ou construídos de blocos construtivos. Em cada nível, os blocos construtivos são indivisíveis. No sistema misto não há blocos construtivos, nesse modelo vemos que a classificação se categoriza de forma arbitrária. Primeiramente, são considerados dois tamanhos de sistemas um pequeno e outro grande. Isso não significa que não se possa ter sistemas com diferentes números de tamanhos. Os blocos construtivos, nesse sistema, devem ser criados sempre em nível de peças significando, desta forma, que deve-se conhecer a gama de produtos a ser concebido. Borowski reconhece, também, dois sistemas modulares, um aberto e outro fechado. Ambos diferem da seguinte forma:



- Fechado: conhece-se bem as variantes do produto antes do desenvolvimento;
- Aberto: não se conhecem as variantes do produto e, dessa forma, precisa-se definir as funções do mesmo.

Para Borowski, a funcionalidade serve como ponto de partida para os sistemas abertos. Brankamp e Herrmann são pesquisadores que deram continuidade ao pensamento do sistema modular, estruturando um sistema de *design* de sistema aberto e fechado, conforme mostram as Figuras A1.6 e A1.7. Brankamp e Herrmann, em seus trabalhos, não aceitam sistemas baseados somente em encaixe de peças. Eles discordam do sistema não padronizado definido por Borowski. As figuras a seguir mostram a redefinição de sistemas construídos por Brankamp e Herrmann.

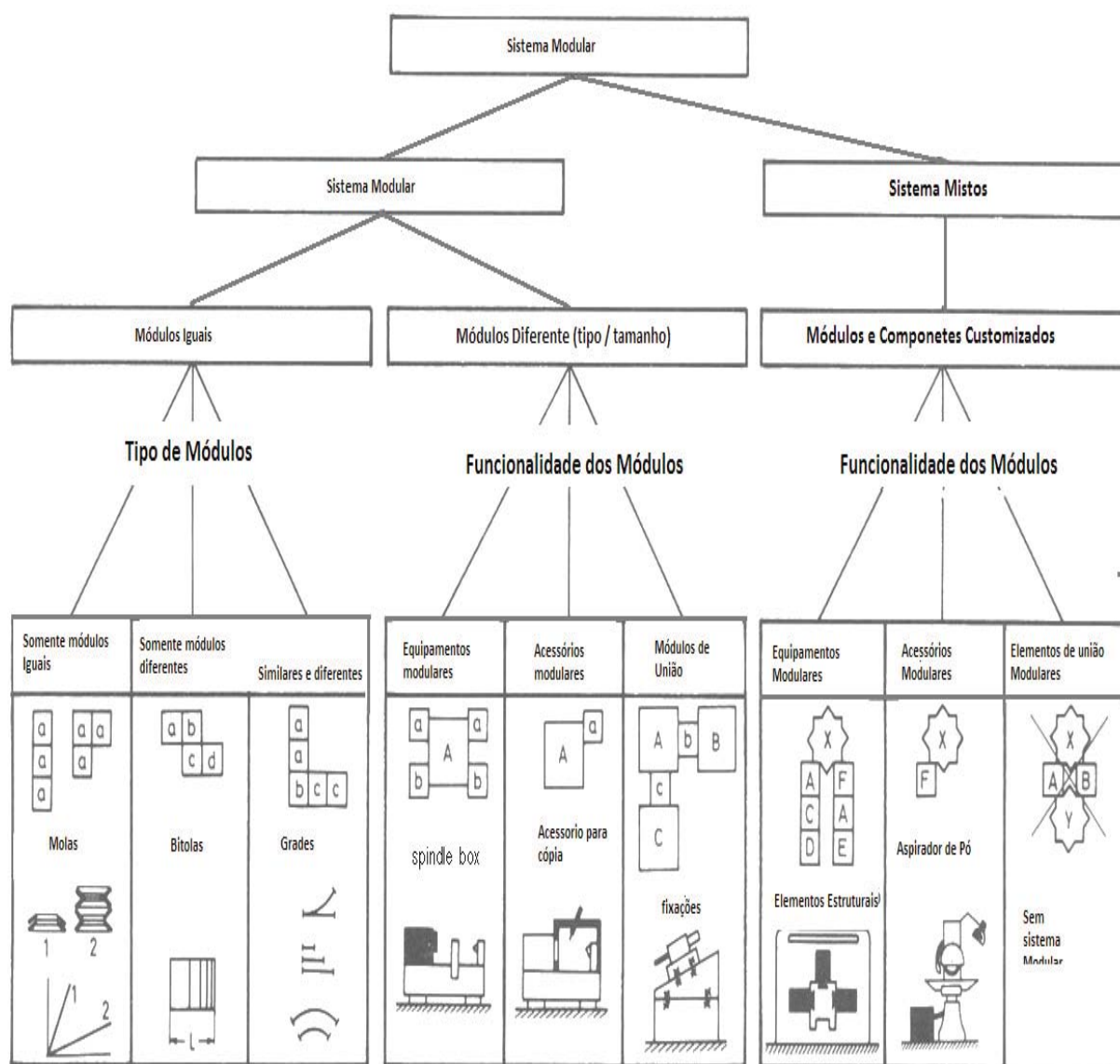


Figura A1.6 - Sistema de Brankamp e Herrmann.  
(Fonte: Adaptado de Lehtone (2007))

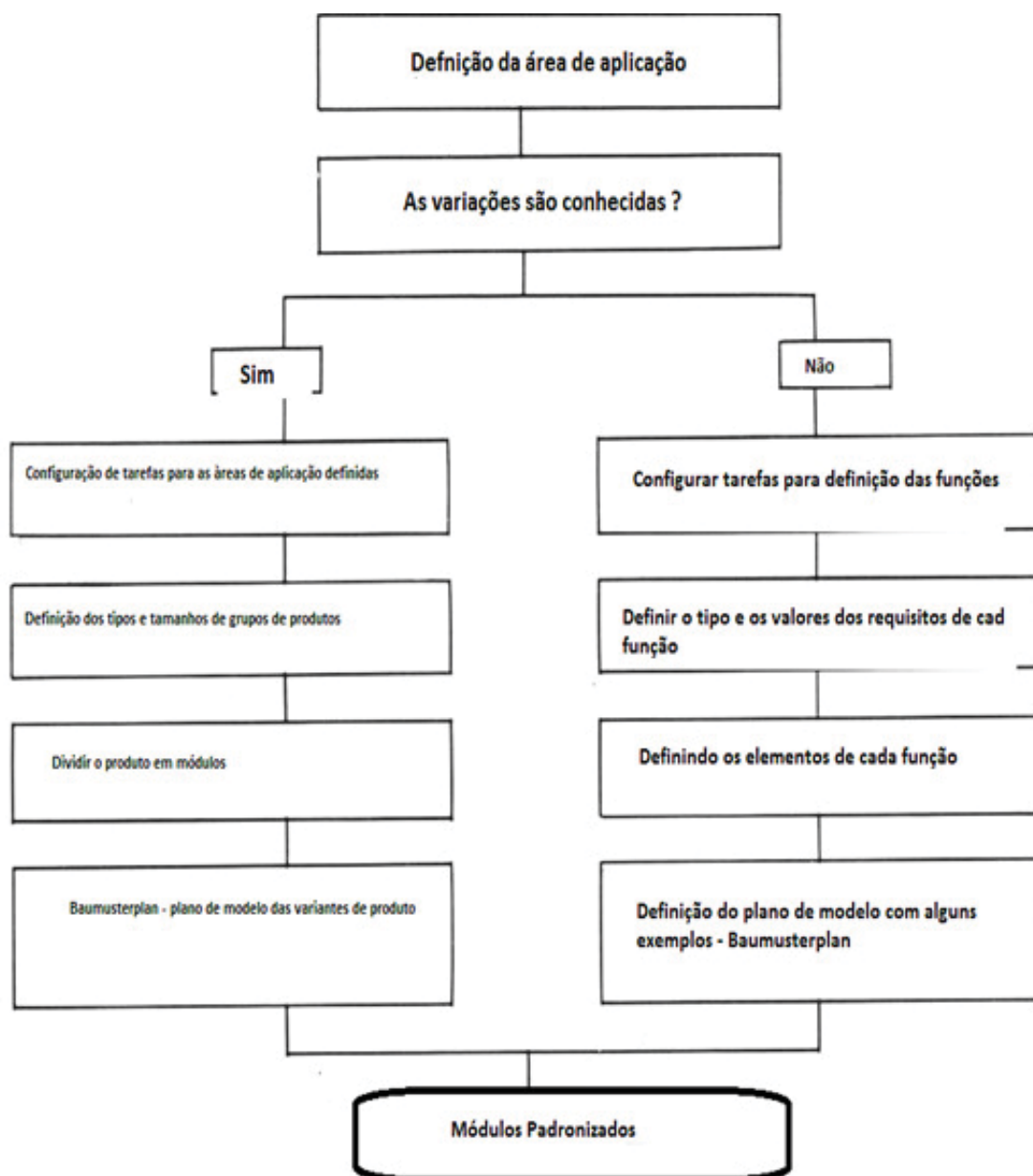


Figura A1.7 - Fases de design de um sistema fechado e aberto apresentado por Brankamp e Herrmann.

(Fonte: Adaptado de Lehtone (2007))

Segundo Miller (1998), basicamente neste período da história os módulos são tratados como conceito de bloco construtivo (*building block/Baukasten*). Este conceito foi importante para que pudessem ser desenvolvidos os conceitos atuais de módulo, modularidade e modularização. O bloco construtivo é físico, tal qual o elemento de máquina, tendo em suas geometrias a descrição de suas interfaces. O atributo básico de um bloco construtivo é a capacidade que ele tem de se compor e formar diferentes outros blocos com suas somas e múltiplos.