

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS**

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AÇO CONVENCIONAL**  
**POR AÇO DE BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA (BLAR)**  
**EM MÓDULO ESTRUTURAL**

**MAGNUS GEDER HENZ CRUZ**

**Caxias do Sul**

**2006**

**MAGNUS GEDER HENZ CRUZ**

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AÇO CONVENCIONAL  
POR AÇO DE BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA (BLAR)  
EM MÓDULO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado  
em Materiais da Universidade de Caxias do Sul,  
visando a obtenção do grau de Mestre em  
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Viecelli

**Caxias do Sul**

**2006**

# **MAGNUS GEDER HENZ CRUZ**

## **ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AÇO CONVENCIONAL POR AÇO DE BAIXA LIGA E ALTA RESISTÊNCIA (BLAR) EM MÓDULO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de Mestre em Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Viecelli

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

**Prof. Dr. Alexandre Viecelli**  
**Orientador**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Marcelo Krajnc Alves**

---

**Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol**

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto Costa**

## **DEDICATÓRIA**

À minha esposa Marlí e minha filhinha Kathy, pelo apoio e pela compreensão, pelas horas e os dias em que estive ausente de seu convívio.

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me acompanha em todos os momentos quando penso que não existe caminho ou solução, Ele sempre me mostra que devo continuar.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Viecelli que muitas vezes teve a paciência e a árdua tarefa de me acompanhar nesta jornada.

Ao meu colega Felipe Perini que colaborou com muitos dos ensaios e testes que realizamos.

Aos colegas e amigos que juntos passamos horas e dias discutindo o que era certo e após várias conclusões chegávamos a um veredicto, continuávamos a não saber o que realmente era e é correto.

A secretária da pós-graduação Marga, que inúmeras vezes teve que ouvir nossas queixas e reclamações, sempre tentando apaziguar e usar seu conhecimento em prol de todo o grupo.

Ao engenheiro Edson Mainieri que me oportunizou esta oportunidade de expandir meus conhecimentos.

A Marcopolo, empresa na qual dedico muitas horas de meu dia para que juntos possamos crescer.

A empresa representante do Software de Elementos Finitos Ansys® no Brasil, ESSS e todo seu corpo técnico.

Em especial o meu Mestre que muitas vezes foi além de professor também um amigo que me auxiliou nos momentos de fraqueza e desânimo.

A todos os que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Foram estudados dois tipos de aços, aço convencional ZAR 230 (ZAR – Zincagem de alta resistência) e aço microligado ZSTE 380 (segundo norma SEW 093), sendo que foram avaliadas as suas propriedades mecânicas visando a substituição do aço convencional por aço microligado na estrutura tubular de uma carroceria para veículos de transporte coletivo de passageiros. O aço convencional vem sendo utilizado pela indústria de carrocerias há vários anos, já o aço microligado é utilizado basicamente em estruturas específicas que requeiram boas propriedades mecânicas e conseqüentemente redução de peso. A análise de viabilidade para a substituição de aço convencional por aço microligado em um módulo estrutural completo requereu uma série de ensaios: ensaios padronizados em laboratório foram executados para avaliação de suas principais propriedades mecânicas e químicas; ensaios de nós estruturais submetidos a uma carga forneceram informações para o uso em software de elementos finitos tanto para execução de cálculos estruturais, quanto para calibração de resultados. Os módulos estruturais foram preparados de acordo com as regulamentações ECE R66-00 (mercado europeu) e CONTRAN 811/96 (mercado brasileiro) e foram ensaiados exaustivamente até se obter o melhor resultado de deslocamento comparativamente aos dois materiais analisados. A validação da estrutura tubular foi obtida com a utilização do software Ansys Workbench 9.0 e a confecção de estrutura representativa de uma carroceria ensaiada conforme regulamentação CONTRAN 811/96.

**Palavras-chave:** aços BLAR; aços microligados; aços galvanizados; melhoria de estrutura; seleção de materiais; estrutura de carroceria de ônibus.

## **ABSTRACT**

*Two kinds of steel were studied, conventional steel ZAR 230 (a standard for high strength galvanizing) and microalloyed steel ZSTE 380 (according to the regulation SEW 093). The study of its mechanical properties aimed to replace the steel for microalloyed steel in bodywork's tubular structure for collective transport vehicles of passengers. The conventional steel has been used for the bodywork industry for years, and the microalloyed steel is basically used in specific structures, those who require good mechanical properties and mass reduction. The analysis of the feasibility for the replacement of conventional steel for microalloyed steel in a complete structural model requires a series of tests. Lab tests were done to evaluate their main mechanical and chemical properties. The tests of the structural nodes and the structural behaviour when subjected to a load provided information to be used in the finite elements method software to do structural calculation and to calibrate the results. The structural modules were prepared according to the regulations ECE R66-00 (European market) and CONTRAN 811/96 (Brazilian market) and these modules were tested exhaustively to achieve the best displacement between the two materials that were analysed comparatively. The validation of the tubular structure was obtained using the software Ansys Workbench 9.0 and the production of the representative structure of a bodywork tested according the regulation CONTRAN 811/96.*

**Keywords:** *HSLA (High Strength Low Alloy) steel; microalloyed steel; galvanized steel; optimisation of structure; material selection; bus bodywork.*

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>16</b>
<b>1INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1Comentários iniciais.....	17
1.2Tema e importância do trabalho.....	19
1.3Objetivo do trabalho.....	20
1.4Método de desenvolvimento do trabalho.....	21
1.5Estrutura do trabalho.....	22
1.6Limitações do trabalho.....	23
<b>2REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MATERIAIS.....</b>	<b>25</b>
2.1Aços utilizados na indústria de carrocerias.....	25
2.2Utilização de aços galvanizados na indústria de carrocerias.....	26
2.3Soldabilidade dos aços galvanizados.....	29
2.4Metalurgia da soldagem e o processo MIG/MAG.....	30
2.5Aços microligados.....	32
2.5.1Mecanismos de endurecimento de metais.....	33
2.5.2Efeito dos elementos de liga nos aços BLAR.....	35
2.5.3Utilização e histórico dos aços BLAR.....	38
<b>3REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTRUTURA VEICULAR.....</b>	<b>40</b>
3.1Conceito de treliças.....	40
3.2Estruturas tubulares.....	41
3.3Norma ECE R 66-00 - norma de tombamento de estruturas.....	43
3.4Resolução CONTRAN 811/96.....	45
3.5Ferramenta de análise pelo Método de Elementos Finitos.....	46
3.6Corrosão branca e corrosão vermelha.....	50
<b>4MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
4.1Materiais utilizados.....	52
4.2Modelos e corpos de prova.....	53

4.3	Cálculo das estruturas por elementos finitos.....	54
4.4	Solda dos corpos de prova e nós.....	55
4.5	Procedimento aplicado.....	56
4.6	Ensaio dos materiais e das estruturas.....	58
4.6.1	Ensaio de Névoa Salina (Salt Spray Test).....	58
4.6.2	Ensaio de imersão em pH Básico e Ácido.....	58
4.6.3	Ensaio de dureza.....	58
4.6.4	Ensaio de tração.....	59
4.6.5	Macrografia de solda.....	59
4.6.6	Micrografia.....	61
4.6.7	Ensaio dos nós I e II.....	62
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
5.1	Ensaio em laboratório.....	65
5.2	Cálculos dos nós estruturais.....	74
5.3	Melhoria estrutural.....	76
5.4	Validação dos resultados.....	80
5.4.1	Dados do ensaio experimental do módulo otimizado em aço ZSTE 380.....	80
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de soldagem MIG/MAG (Fonte: Marques [22]).....	31
Figura 3.1: Treliça Isostática Warren ou Neville utilizadas em coberturas e em pontes. (Fonte: Marcopolo, 2004).....	41
Figura 3.2: Treliças mais utilizadas em estrutura de carrocerias para ônibus. a) Treliça Pratt; b) Treliça Comum; c) Quadrada ou retangular; d) Treliça K. (Fonte: Marcopolo, 2004).....	41
Figura 3.3: Superestrutura, carroceria fabricada em aço tubular retangular e quadrado. (Fonte: Marcopolo 2005).....	43
Figura 3.4: Figura esquemática para o cálculo da Energia Total (Fonte: Norma ECE R 66-00).....	44
Figura 3.5: Nó estrutural submetido a uma carga. Valores obtidos em MPa da tensão de Von-Mises através do software Workbench Ansys 9.0. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	47
Figura 3.6: Fluxo de processo para análise de estrutura veicular com auxílio de CAE, adaptado de Ricardo, 2000. (Fonte: Ricardo, 2000) [50].....	48
Figura 3.7: Malha de um nó estrutural por elementos finitos CAE – Computer Aided Engineering. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	49
Figura 3.8: Análise de estrutura por elementos finitos CAE – Computer Aided Engineering usando o software Workbench Ansys® 8.0 – 2004. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	50
Figura 4.1: Nó estrutural união da lateral com o assoalho (piso) da estrutura - Nó I (Fonte: Arquivo Marcopolo, 2005).....	53
Figura 4.2: Nó estrutural união da lateral com o teto - Nó II (Fonte: Arquivo Marcopolo, 2005).....	53
Figura 4.3: Figura fornecida pelo software Ansys® na análise do deslocamento do nó estrutural (Nó I) submetido a uma força, sendo a deslocamento dado em mm. (Fonte: arquivo Marcopolo, 2005).....	55
Figura 4.4: Corpos de prova para ensaio de tração, aço BLAR ZSTE 380. (Fonte: Arquivo Marcopolo, 2005).....	56
Figura 4.5: Macrografia de região soldada. (Fonte: UCS, 2004).....	60
Figura 4.6: Figura esquemática para ensaio de nó estrutural para atendimento de norma ECE R 66-00 para Tombamento de Veículos (Fonte: Arquivo Marcopolo S.A. - 2005).....	63
Figura 4.7: Gráfica força (kgf) versus ângulo (graus) de inclinação para um corpo de prova estrutural (Fonte: Marcopolo, 2005).....	64

Figura 5.1: Fotografia dos corpos de prova (ZSTE 380, CP1 e CP2) após o final do ensaio em névoa salina (Fonte: Marcopolo, 2005). .....	66
Figura 5.2: Gráfico de barras comparativo entre os corpos de prova avaliados, ensaio de corrosão, linha determina limite de aprovação 250 horas (névoa salina) (Fonte: Marcopolo, 2005). .....	67
Figura 5.3: Fotografia do corpo de prova CP1, após as 503 horas de ensaio em pH2 (Fonte: Marcopolo, 2005).....	68
Figura 5.4: Gráfico de barras do aço microligado em ensaio de pH2 e pH 10 para verificação do comportamento do revestimento de zinco, material ZSTE 380, linha determina o limite para aprovação, 500 horas. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	69
Figura 5.5: Região da costura do tubo (ERW) e região soldada dos corpos de prova para ensaios de tração pelo processo MIG/MAG, ampliação 12,5x (Fonte: UCS, 2005).....	70
Figura 5.6: Nó estrutural I – material: aço BLAR ZSTE 380, submetido a uma carga de 6370 N, deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).....	75
NÓ ESTRUTURAL I.....	76
Figura 5.7: Módulo estrutural de aço ZAR 230 submetido a uma energia de deslocamento conforme a equação 3.1 (Energia Total); deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).....	78
Figura 5.8: Módulo estrutural de aço microligado ZSTE 380 submetido a uma energia de deslocamento conforme a equação 3.1 (Energia Total), deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).....	79
Figura 5.9: Módulo estrutural em aço BLAR ZSTE 380 submetido a uma tração lateral, conforme determina a resolução 811 CONTRAN (Fonte: Marcopolo, 2005). .....	81
Figura 5.10: Módulo estrutural em aço BLAR ZSTE 380 submetido a uma carga (C) no teto da estrutura, conforme determina a resolução do CONTRAN (Fonte: Marcopolo, 2005).....	83
Figura 5.11: Módulo estrutural otimizado de aço BLAR ZSTE 380 analisado por elementos finitos, submetido a uma energia de deslocamento (Nm) conforme a equação 3.1 (Energia Total), deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).....	84
Figura 6.1: Etapas do desenvolvimento do trabalho e as respectivas fases até a aprovação. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	86
Figura 6.2: Modelo melhorado em ZSTE 380, tração lateral conforme determina CONTRAN 811/96, utilizando-se software de elementos finitos Ansys®. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	91
Figura 6.3: Modelo melhorado em ZSTE 380, carga sobre o teto conforme determina CONTRAN 811/96, utilizando-se software de elementos finitos Ansys®. (Fonte: Marcopolo, 2005).....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades dos aços convencionais ZAR.....	26
Tabela 2.2: Propriedades do aço BLAR tipo ZSTE 380.....	36
Tabela 5.1: Ensaio de névoa salina conforme norma DIN 50021, para o aço BLAR ZSTE 380.....	65
Tabela 5.2: Ensaio de névoa salina conforme norma DIN 50021, para o aço convencional ZAR 230.....	66
Tabela 5.3: Ensaio imersão pH 10 para aço BLAR ZSTE 380.....	67
Tabela 5.4: Ensaio imersão pH 2 para aço BLAR ZSTE 380.....	68
Tabela 5.5: Ensaio de dureza, aço convencional ZAR 230 e microligado ZSTE 380.....	71
Tabela 5.6: Ensaio de tração para o aço convencional ZAR 230 soldado.....	71
Tabela 5.7: Ensaio de tração para o aço microligado ZSTE 380 soldado.....	71
Tabela 5.8: Ensaio de tração do aço microligado ZSTE 380 (chapa), sem solda.....	72
Tabela 5.9: Ensaio do Nó Estrutural I, aço BLAR ZSTE 380, conforme Norma Interna Marcopolo.....	73
Tabela 5.10: Ensaio do Nó Estrutural I, aço convencional ZAR 230, conforme Norma Interna Marcopolo.....	73
Tabela 5.11: Ensaio do Nó Estrutural II, aço BLAR ZSTE 380, conforme Norma Interna Marcopolo.....	73
Tabela 5.12: Ensaio do Nó Estrutural II, aço convencional ZAR 230, conforme Norma Interna Marcopolo.....	73
Tabela 5.13: Dados de entrada para o software de elementos finitos.....	74
Tabela 5.14: Valores obtidos por cálculo de elementos finitos no Nó Estrutural I: força e deslocamento máximos e modo de freqüência (primeiro).....	76
Tabela 5.15: Valores obtidos por cálculo de elementos finitos no Nó Estrutural II: força e deslocamento máximos e modo de freqüência (primeiro).....	76
Tabela 5.16: Tabela de dados referente a estrutura do veículo para análise dos módulos estruturais em aço convencional ZAR 230, aço BLAR ZSTE 380 e estrutura otimizada em ZSTE 380.....	77
Tabela 5.17: Tabela de deslocamentos referente a ensaio de tração lateral de um módulo estrutural otimizado em aço microligado ZSTE 380.....	81
Tabela 5.18: Tabela de deslocamentos referente a ensaio de compressão do teto de um módulo estrutural otimizado em aço BLAR ZSTE 380.....	83

Tabela 6.1: Validação experimental e calculada obtida pelos ensaios na estrutura de aço microligado em estudo (ZSTE 380) em substituição ao aço convencional ZAR 230.....	87
Tabela 6.2: Valores calculados de deslocamento dos módulos estruturais submetidos a uma carga conforme determina a norma ECE R 66-00.....	89
Tabela 6.3: Valores de deslocamento dos módulos estruturais submetidos a uma carga conforme determina CONTRAN 811/96.....	90
Tabela 6.4: Tabela comparativa entre os valores encontrados experimentalmente no módulo melhorado ZSTE 380 e valores calculados por elementos finitos...	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEI - *Automotive Engineering International*

AISI – *American Iron and Steel Institute*

AWS – *American Welding Society*

ASTM - *American Society for Testing of Materials*

ATS - *International Steelmaking Conference*

BSI – *British Standard Institute*

BLAR - Baixa Liga e Alta Resistência

AWS – *American Welding Society*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CAD – *Computer Aided Design*

CB – Corrosão Branca

CV – Corrosão Vermelha

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

DIN – *Deutsches Institut für Normung e.v.*

ECE – Conselho da União Européia

ERW – *Electric Resistance Welding*

FEA – *Finite Element Analysis* (Análise por Elementos Finitos)

Fe(OH)<sub>2</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – Óxidos de ferro

GG – *General Galvanizing*

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

HDG – *Hot Dip Galvanized*

IISI – *International Iron Steel Institut*

IBS – *Instituto Brasileiro de Siderurgia*

KTL – *Cataforese*

MEF – *Método dos Elementos Finitos*

MIG/MAG – *Metal Inert/Active Gas*

NBR – *Norma Brasileira*

IZA – *International Zinc Association*

ISO – *International Standard Organization*

SABS – *South African Standard*

SAE – *Society of American Engineers*

ULSAB – *Ultra Light Steel Auto Body*

ZAR – *Zincagem Alta Resistência*

ZTA – *Zona Termicamente Afetada*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$  = Carga (N)

$E^*$  = energia total da estrutura (Nm)

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$H$  = altura do veículo (m)

$H_s$  = Altura do centro de gravidade do veículo sem carga (m)

$LE_{MS}$  = limite de escoamento do material inicial (MPa)

$LE_{HS}$  = limite de escoamento do novo material (MPa)

$L_t$  = comprimento do veículo (mm)

$M$  = massa sem carga do veículo (N)

$NP$  = número de pórticos da superestrutura.

$P_{mach}$  = peso máximo admitido pelo chassi (N)

$P_{max}$  = distância (mm) entre as colunas da superestrutura

$t_{HS}$  = espessura otimizada (mm)

$t_{MS}$  = espessura do material inicial (mm)

$T$  = força lateral (N)

$W$  = largura máxima do veículo (m)

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Ao longo das últimas três décadas, o aço utilizado na fabricação de estruturas veiculares vem enfrentando a competição de materiais mais leves e mais resistentes. <sup>[1]</sup> Muitos dos veículos automotores já podem ser encontrados no mercado internacional fabricados com estrutura e ligas de alumínio como Audi A8 e Jaguar XJ-8. Além disso, aplicações automotivas em aço estão dando lugar a materiais avançados, como polímeros reforçados com fibra de carbono.<sup>[2]</sup>

Com o avanço das ligas de alumínio e polímeros reforçados o aço perdeu espaço e participação no peso dos automóveis. Este fato tem levado a indústria siderúrgica ao desenvolvimento de novos aços. Neste contexto, surgiram os Aços de Baixa Liga e Alta Resistência (BLAR) no intuito de frear o avanço de seus concorrentes. <sup>[3]</sup> De uma maneira simples, os aços BLAR podem ser caracterizados como aços com baixo percentual de carbono e um limite de escoamento acima de 270 MPa.

Projetos relacionados ao desenvolvimento de aços BLAR e seus respectivos processos de fabricação que foram iniciados nas décadas de 80 e 90 podem ser considerados ícones no desenvolvimento de novas alternativas e propriedades dos aços para a indústria de carrocerias e automóveis. O projeto denominado ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body*) desenvolvido por várias companhias siderúrgicas como Arcelor, Kobelco, SSAB, Nippon Steel Corporation, Usiminas, Thyssenkrupp Stahl, entre outras, previa ganhos consideráveis para a indústria de

automóvel já no ano de 1998. [4]

Atualmente, o uso de aços de Baixa Liga e Alta Resistência possibilita a redução de peso dos veículos complementando com aumento da eficiência dos motores de combustão interna, gerando economia de combustível, além de atender à necessidade de aumentar a segurança dos veículos. [5]

O estudo de viabilidade técnica para aplicação e introdução de aços de Baixa Liga e Alta Resistência envolve uma quantidade muito grande de ensaios realizados tanto em laboratórios quanto em campo de provas.

Devido à pressão de órgãos governamentais, sociedades organizadas e população em geral para a redução da emissão de poluentes na atmosfera, a indústria automotiva busca alternativas para diminuição do peso dos veículos e maior eficiência dos motores de combustão interna. Também, a crescente tendência do preço dos combustíveis derivados de petróleo tem mobilizado a indústria em buscar alternativas para a melhoria do rendimento dos veículos.

Devido a estes fatores, surgiu a necessidade de estudo, desenvolvimento e aplicação de novos materiais na indústria de carrocerias. Na Europa, Brasil e África do Sul, as normas e exigências quanto à segurança dos passageiros de transporte de massa, está baseada em Regulamentações como: Conselho da União Européia ECE R66-00, CONTRAN 811/96 e a SABS 1563 (MAN - Nutzfahrzeuge AG, 1996) que determinam valores mínimos de segurança, métodos de ensaios e procedimentos que devem ser adotados pelos fabricantes tanto de automóveis quanto de veículos de grande porte. [6] [7] [8]

Considerando os fatos apresentados, verificou-se que existe um espaço para o estudo da substituição dos aços estruturais convencionais utilizados atualmente pela indústria de carrocerias de ônibus por aços com melhores propriedades. Em conjunto com a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) iniciou-se um estudo para viabilizar a utilização de Aços de

Baixa Liga e Alta Resistência (BLAR) galvanizados em estruturas para veículos com mais de 20 passageiros.

A maior dificuldade de se ensaiar, aprovar e viabilizar a substituição de materiais para a aplicação em estruturas veiculares está no fato de que os veículos estão sujeitos a uma gama muito grande de esforços e tipos de terrenos. Para racionalizar este tipo de análise serão utilizados neste trabalho ensaios dos materiais em laboratório, ensaios de estruturas em banco de provas e melhoria geométrica interativa. Para os cálculos será utilizada ferramenta CAE (*Computer Aided Engineering*) Ansys Workbench® 9.0.<sup>[9]</sup> Como parâmetro de validação será utilizado a Norma ECE R66-00 CONTRAN 811/96 que se refere ao tombamento de estrutura para o transporte de passageiros e segurança para veículos de transporte coletivo de passageiros e estabelece, atualmente, um dos mais rigorosos ensaios aplicados para veículos desta natureza.<sup>[6][7]</sup> Para este trabalho de desenvolvimento serão adotados valores e métodos comparativos, utilizando como referência os aços estruturais convencionais aplicados na indústria de carrocerias.

## **1.2 TEMA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO**

O tema central desta dissertação é o estudo e análise comparativa e experimental de dois nós estruturais e a substituição de aço estrutural convencional por um aço de Baixa Liga e Alta Resistência Mecânica (BLAR), dando ênfase às exigências de segurança conforme Norma Regulamentadora ECE R 66-00, que se refere aos ensaios de tombamento de estrutura, e CONTRAN 811/96, procedimento para avaliação estrutural do mesmo segmento.<sup>[6][7]</sup> Também, será avaliado o comportamento dos aços em estudo, quanto ao deslocamento em regime elástico, e feita a melhoria dimensional para permitir economia de massa estrutural e ganho de resistência mecânica. Isto é, além da viabilidade técnica, busca-se a redução de peso nos módulos dos nós estudados.

De uma maneira geral, deseja-se propor a substituição do material da estrutura de uma carroceria, validada por resultados de ensaios que verifiquem o comportamento de um módulo estrutural pré-definido composto por dois nós principais, que são representativos de uma estrutura total.

Utilizando-se um aço com melhores características mecânicas permitirá obter uma estrutura de menor peso que interfere diretamente no menor consumo de combustível, menor desgaste de pneus e na possibilidade de integrar maior quantidade de passageiros, gerando maiores ganhos para os proprietários dos veículos.

Na busca de ser o primeiro trabalho de desenvolvimento conhecido no Brasil para utilização de aços de Baixa Liga Alta Resistência (BLAR) em estruturas para veículos de grande porte para transporte de passageiros, será utilizado um software do método de elementos finitos (Ansys® – Workbench® 9.0) para validação dos resultados experimentais no regime elástico. Pretende-se ainda verificar pelo mesmo método de elementos finitos, qual o comportamento do material quando submetido a esforços devido ao tombamento da estrutura, atendendo a norma ECE R 66-00. <sup>[6]</sup> Concluindo, será ensaiado um módulo estrutural atendendo a norma regulamentadora CONTRAN 811/96. <sup>[7]</sup>

### **1.3 OBJETIVO DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo que possa viabilizar a utilização e substituição de aço estrutural convencional por aço de Baixa Liga e Alta Resistência (BLAR) em nó estrutural da lateral tubular veicular automotiva para o transporte de passageiros (ônibus). Nó estrutural pode ser definido como a região onde exista a união de dois ou mais perfis e/ou tubos unidos por solda, rebite ou outro tipo de união mecânica.

Buscou-se inicialmente a caracterização dos materiais envolvidos no estudo, a análise do comportamento dos aços convencionais e dos aços BLAR. Também, avaliou-se

experimentalmente a resistência mecânica estrutural de nós escolhidos e que representam uma parcela significativa da estrutura conforme determina a Resolução ECE R66-00 e CONTRAN 811/96. [6][7]

Para agilizar o processo interativo de desenvolvimento e validação da nova estrutura composta pelo novo material, utilizou-se o método de elementos finitos para melhoria dimensional (Ansys®). Assim, após cada ensaio da estrutura com o novo material, seguiu-se de um novo processo de recálculo e melhoria, até atingir os parâmetros especificados pela norma.

Como objetivo secundário, mas não menos importante, buscou-se o *know-how*, ou seja, o domínio e aprendizado da soldagem de aços BLAR bem como procedimento para substituição de materiais estruturais em carrocerias para ônibus. Inerente a este procedimento, havia o interesse, também, de redução dos custos de fabricação devido ao menor consumo de aço para fabricar o mesmo tipo de estrutura.

#### **1.4 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

O desenvolvimento deste trabalho está fundamentado em várias atividades que são apresentadas a seguir:

1- Revisão bibliográfica, considerada como ponto de partida para a compreensão da dissertação de mestrado. Foi necessário coletar material e informações a respeito dos assuntos abordados e o que outros pesquisadores já escreveram ou estão estudando a respeito de aços de Baixa Liga e Alta Resistência (BLAR). Também faz parte da revisão bibliográfica a pesquisa de artigos e trabalhos apresentados que estão relacionados com o assunto.

2- Análise quantitativa e qualitativa dos requisitos mínimos e exigências das normas que regem o transporte de passageiros no Brasil. Preparação de todo o material necessário para a realização dos ensaios, cálculos, projetos e desenhos. Caracterização dos aços envolvidos.

Análise de elementos finitos aliada a ensaios experimentais para definições de espessuras, cargas e os principais dados de entrada. Utilização de métodos iterativos para avaliação dos resultados em laboratório e calculados. Nesta etapa do trabalho é considerada a experiência acumulada do autor deste trabalho e de seus pares.

3- Definição e apresentação dos dados relativos aos ensaios realizados, testes, correções que se fazem necessários e comparativos com as normas vigentes no Brasil. Tabulação dos dados e análises preliminares dos dados.

4- Conclusões sobre o trabalho, onde é apresentado um comparativo entre os materiais utilizados até então e o material foco de estudo deste trabalho. Por fim, de acordo com os resultados e conclusões apresentados, sugerem-se algumas propostas para trabalhos futuros.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

A dissertação está estruturada em sete etapas, as quais são apresentadas de forma clara, objetiva e lógica que permita o seu entendimento:

No capítulo 1 (introdução), são apresentados comentários iniciais sobre os desafios e a utilização de aços galvanizados em estruturas e sua importância frente ao desenvolvimento de produtos. Ainda neste capítulo, são apresentados os aspectos diretamente relacionados ao trabalho, tais como, tema e importância, os objetivos, método de desenvolvimento, estrutura e suas limitações devido a complexidade do estudo.

Na revisão bibliográfica (capítulos 2 e 3) são apresentados os fundamentos técnicos e científicos exploratórios do trabalho, onde se fez presente a fundamentação para os materiais e estruturas utilizados na indústria de carrocerias de ônibus. Ainda nestes capítulos é apresentado o processo de união dos perfis utilizados, os tipos básicos de estruturas tubulares, as normas referenciais para este trabalho, culminando com a apresentação da ferramenta de análise de elementos finitos para a validação dos resultados.

A definição dos materiais e métodos é apresentada no capítulo 4 de forma clara e baseada em normas nacionais e internacionais referentes ao assunto. Os modelos computacionais são gerados em CAD 3D (SolidWorks®, 2005), são caracterizados e ensaiados os corpos de prova e materiais utilizados. Ensaio utilizados e uma breve apresentação dos equipamentos utilizados para a realização do trabalho.

Os resultados são apresentados no capítulo 5 e a verificação dos ensaios estão tabulados e todos os dados colhidos para que permita uma avaliação e facilite as conclusões quanto ao desenvolvimento do trabalho. É apresentado um resumo de todas as atividades desenvolvidas em forma de gráficos, tabelas e figuras que mostram de forma concisa os resultados obtidos, permitindo desta forma uma conclusão sobre o trabalho.

Nos capítulos 6 e 7, fez-se a análise dos resultados obtidos e foram apresentadas as conclusões quanto ao desenvolvimento do trabalho e a confirmação de que os objetivos foram atingidos.

Por fim no capítulo 8 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros referentes a substituição de aços convencionais por aços BLAR.

## **1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Esta pesquisa limita-se apenas à avaliação da substituição de material em um módulo estrutural de veículo para transporte de passageiros (ônibus). A avaliação se refere ao quesito análise do comportamento dos aços BLAR, quando submetidos à norma de tombamento ECE R 66-00 e as especificações estruturais da regulamentação CONTRAN 811/96. <sup>[6][7]</sup> O conjunto analisado é parte integrante de um conjunto maior, que configura a estrutura de um ônibus.

Outras cargas dinâmicas ou estáticas oriundas da ação e reação do chassi, devido a vibrações e ruídos provenientes do motor e da estrada não foram consideradas, pois tais

esforços não estão presentes na análise e escopo do estudo. Também, a análise da estrutura inteira não foi considerada, optando-se pela análise de um módulo estrutural que possa ser desenvolvido com menor custo e avaliado segundo os critérios adotados.

As normas de ensaios e regulamentos utilizados dizem respeito somente a construção e segurança de veículos para o transporte de passageiros (ônibus). Algumas normas e ou procedimentos utilizadas são de uso exclusivo da empresa Marcopolo S.A., não refletindo desta forma o pensamento de outras montadoras do mesmo segmento.

Os dispositivos utilizados para os ensaios foram desenvolvidos segundo conhecimento e *know-how* adquiridos ao longo de cinquenta anos, fabricando este tipo de veículo e no trabalho conjunto com institutos internacionais credenciados para a validação dos ensaios e caracterização do material. Portanto, não podem ser utilizados ou comparados a outros modelos e meios de avaliação de estruturas veiculares.

Não se avaliou a estrutura como usualmente a indústria automobilística faz, realizando simulações de *Crash Test*, choque frontal, vibração, ruído, túnel de vento, choque lateral, entre outros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MATERIAIS

#### 2.1 AÇOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CARROCERIAS

Entre 80 e 85% da produção anual de aço no mundo é destinada a fabricação de ligas convencionais (ligas de baixo carbono com limite de escoamento abaixo de 270 MPa).<sup>[10]</sup> Já a *American Welding Society* (AWS -2001), relata que os aços de baixo carbono representam 95% das ligas utilizadas no mundo para a fabricação e construção, isso devido as suas propriedades mecânicas, facilidade de transformação e baixo custo.<sup>[11]</sup>

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, segundo Chiaverini (1990), porém designada como “uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”.<sup>[12]</sup>

A indústria de carrocerias utiliza os aços convencionais comerciais atualmente fornecidos pela indústria siderúrgica, devido ao baixo custo e a facilidade de processamento (soldagem, conformação a frio, estampagem e dobramento). Os aços convencionais utilizados em carrocerias no Brasil estão basicamente limitados ao que determina a norma NBR 7008:2003, a qual especifica as propriedades e a composição química em percentual máximo.<sup>[13]</sup>

O aço convencional utilizado pela indústria de carrocerias possui Grau ZAR-230 o que na verdade determina o seu limite de escoamento de 230 MPa e o tipo de revestimento aplicado na superfície do aço, ZAR (Zincagem de Alta Resistência), proteção superficial que retarda o processo de corrosão do substrato. Na tabela 2.1 pode-se verificar a especificação dos aços

mais utilizados pela indústria de carrocerias no Brasil, tipo ZAR conforme norma NBR 7008.

[13]

**Tabela 2.1: Propriedades dos aços convencionais ZAR**

Norma Técnica	Grau	Composição Química (Máx)			Propriedades Mecânicas				
		C (%)	P (%)	S (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento		
							Espessura (mm)	Base (mm)	Mínimo (%)
NBR 7008	ZAR - 230	0,20	0,04	0,04	230	310	Qualquer	50	22
	ZAR - 250	0,20	0,10	0,04	250	360			18
	ZAR - 280	0,20	0,10	0,04	280	380			16

\* LE = Limite de escoamento mínimo.; LR = Limite de resistência mínimo.

## 2.2 UTILIZAÇÃO DE AÇOS GALVANIZADOS NA INDÚSTRIA DE CARROCERIAS

O consumo de aços galvanizados pelas indústrias de bens de consumo duráveis, principalmente na automobilística mundial, vem crescendo nos últimos anos, pois os fabricantes buscam materiais que possam oferecer maior resistência mecânica, com menor peso e maior garantia contra corrosão. [3]

Em seu estudo, Wallentowitz *et al* (2003), relatam as possibilidades e desafios encontrados pela indústria automobilística na busca de estruturas mais leves otimizando o uso de aços desenvolvidos especialmente para cada componente, bem como sua aplicação na busca de materiais alternativos, porém ainda com elevado custo. [14]

Ainda segundo Santos (2000), dentre os principais aspectos que justificam este esforço destacam-se: [3]

- a busca de diferenciação dos veículos;
- o aumento da poluição atmosférica que traz um ambiente mais corrosivo / agressivo;
- o uso de materiais com maior resistência mecânica que permitem reduzir massa dos veículos;

- a maior segurança no trânsito;
- a exigência dos consumidores por maior durabilidade dos veículos, e com isso, a garantia contra a corrosão passou a ser um diferencial.

Segundo o levantamento de Santos (2000), com relação a participação dos materiais no peso do automóvel de 1977 a 1999, o consumo de aço caiu de 60% do peso total do veículo para 55%. Esta queda reflete a entrada de outros materiais tais como ligas de alumínio, compósitos e plásticos em geral. <sup>[3]</sup>

Jeanneau e Pichant (2000) realizaram estudo sobre as novas tendências no uso dos aços em produtos automotivos na Europa observando as exigências e regulamentações, e consideraram a existência de três grandes forças: regulamentação, marketing e exigências dos consumidores. Isto mostra a preocupação das sociedades quanto a geração de poluição, durabilidade, mínima manutenção, economia energética, segurança, proteção ao meio ambiente, conforto, qualidade e baixos custos. <sup>[15]</sup>

Considerando o aspecto de durabilidade, o zinco possui a propriedade de proteger as superfícies metálicas e o aço galvanizado é a escolha ideal para a proteção contra a corrosão porque o zinco é estável depois de certo tempo de exposição atmosférica e desenvolve uma camada que mantém o desempenho por décadas. <sup>[16]</sup>

Segundo a *American Galvanizers Association* (2000), o custo anual estimado com corrosão é de aproximadamente 4% do produto interno mundial. O uso de proteção a base de zinco em estruturas metálicas (aços) pode reduzir em 20 bilhões de dólares estes gastos. <sup>[17]</sup>

Segundo a *Auto/Steel Partnership* (1999), é importante saber onde a peça será utilizada e em qual ambiente estará exposta durante a sua vida útil. <sup>[18]</sup> Para definir a espessura de camada a ser aplicada e o tipo de processo para proteção, existem ainda outros fatores que devem ser verificados e observados como: processos de fabricação, vida útil que se deseja

para o componente, entre outros. Quanto maior a camada de proteção, maior a durabilidade da superfície a ser revestida.

Os processos mais utilizados atualmente na indústria para revestimentos de superfícies metálicas com zinco são: <sup>[19]</sup>

- Galvanização a Fogo ou Zincagem a Fogo por Imersão a Quente
- *Hot Dip Galvanized* – HDG (linha contínua)
- General Galvanizing – GG
- Galvanização Eletrolítica ou Zincagem a Frio ou Eletrodeposição.

A zincagem por imersão a quente é um processo de revestimento de peças de aço ou ferro fundido de qualquer tamanho, peso, forma e complexidade, visando sua proteção contra a corrosão. As peças devem estar isentas de elementos estranhos, tais como óleos em geral, graxas minerais e vegetais, ceras animais e vegetais, sabão e gorduras, tintas, vernizes, resinas, fluxos de solda entre outros produtos.

A zincagem a quente ou imersão a quente deve obedecer aos mesmos princípios da zincagem por imersão, porém neste processo o banho de zinco se encontra a uma temperatura em torno de 450°C. Para os aços de baixo carbono revestido em banho de zinco fundido obtém-se um revestimento constituído por quatro fases: Gama, Delta, Zeta e Eta. <sup>[16]</sup>

O processo de zincagem mais utilizado por parte da indústria do aço é o HDG. Atualmente, existem aproximadamente 500 linhas deste tipo de processo, produzindo em torno de 44 milhões de toneladas métricas de aços revestidos, espalhadas pelo mundo. O uso deste processo está baseado principalmente nas boas condições de controle de espessura, processo e qualidade da deposição de zinco, porém existe uma limitação devido a equipamentos. Atualmente, a maior espessura recoberta de zinco está na ordem de 3 mm, dependendo do tipo de material, largura de bobina e tipo de processo. <sup>[19]</sup>

O uso de aços galvanizados em estruturas é uma realidade irreversível a médio e longo prazo nos países fabricantes de carrocerias, devido principalmente ao baixo custo deste tipo de proteção contra corrosão. O advento das plataformas mundiais utilizadas na indústria automobilística implica que as especificações definidas sejam atendidas pelas fábricas instaladas em todo o mundo. A grande diferença entre a indústria automobilística e de carrocerias de ônibus está principalmente no processo de transformação e união dos componentes, onde a indústria de carrocerias gera uma quantidade muito grande de agentes poluidores e agressivos ao ser humano devido ao processo de soldagem (queima do zinco). Devido a queima do zinco, fabricantes de chassis de alguns países adotaram outras formas de tratamento, porém devido ao custo, fica inviabilizada sua utilização em mercados onde o custo do produto é fator decisivo de compra. <sup>[3]</sup>

### 2.3 SOLDABILIDADE DOS AÇOS GALVANIZADOS

Segundo a *American Galvanizers Association* (2002), muitas técnicas e práticas de soldagem podem ser utilizadas em aços galvanizados, porém alguns cuidados devem ser tomados. <sup>[20]</sup> Estes cuidados estão diretamente relacionados com a preparação da área a ser soldada, determinada pela norma da *American Welding Society* AWS D-19.0: a composição química do material de adição e os métodos de soldagem (manual, semi-automático ou automático).

O processo mais comum de solda utilizado para a união de materiais galvanizados é denominado de “Processo MIG/MAG” (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*). No caso da indústria de carrocerias, o processo utilizado para a junção de materiais pelo processo de soldagem é o processo MAG, utilizando-se como gás ativo o CO<sub>2</sub>. Segundo a *American Welding Society* (AWS – 2001), o uso do gás CO<sub>2</sub> é o mais conveniente e versátil processo semi-automático de soldagem. <sup>[11]</sup> A presença da camada de zinco não tem efeito sobre a junta

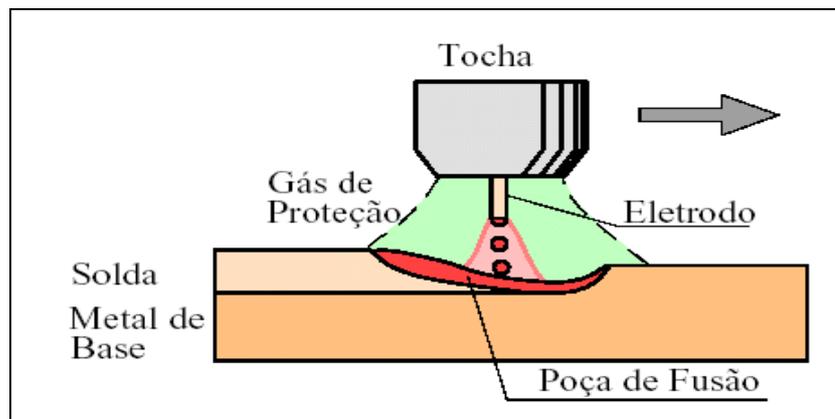
soldada quanto às propriedades mecânicas da região soldada. Devido ao zinco depositado na superfície de soldagem podem ocorrer alguns respingos provenientes do processo de queima do zinco depositado.

## **2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM E O PROCESSO MIG/MAG**

Apesar de haver inúmeras maneiras de classificar os aços para a soldagem, pode-se dividir os aços carbonos e as suas ligas de acordo com a sua composição química, de acordo com a sua estrutura e de acordo com a aplicação. <sup>[21]</sup> No presente caso, interessa-se pela soldagem dos aços de baixo carbono e aços de baixa liga e alta resistência.

Os aços de baixo carbono podem ser soldados por diversos processos tais como arco elétrico, resistência, fricção, laser, entre outros. A soldagem é um dos processos mais difíceis de serem controlados devido as muitas variáveis interagindo durante o processo, porém antes de escolher o processo de soldagem propriamente dito, deve-se ter conhecimento das matérias-primas envolvidas, tanto do material base que será unido pelo processo, como do material de adição que será acrescentado à poça de fusão. A soldagem é um processo que causa mudanças microestruturais e nas propriedades mecânicas dos materiais devido a quantidade de calor transferido para a região de solda. Esta região é conhecida como zona termicamente afetada (ZTA). Dependendo da composição química do material, esta zona afetada pelo calor pode, de maneira significativa, alterar as propriedades mecânicas do material. Um dos elementos que interferem mais significativamente na soldabilidade dos aços é o carbono presente nas ligas a serem soldadas. Para que o metal de adição seja compatível com o metal base, procura-se definir através de forma semi-empírica, o cálculo do carbono equivalente que leva em conta os elementos de liga presentes na estrutura do material. Geralmente, os aços com valores baixos de carbono equivalente entre 0,2 e 0,3 possuem uma excelente soldabilidade. <sup>[22]</sup>

O processo de soldagem MIG/MAG é um dos mais empregados na indústria atualmente devido a seus altos rendimentos, alta deposição de material, além de ser um processo semi-automatizado e de fácil controle quando comparado com outros processos. <sup>[23]</sup> Na figura esquemática 2.1 observa-se o processo de soldagem MIG/MAG.



**Figura 2.1: Processo de soldagem MIG/MAG (Fonte: Marques<sup>[22]</sup>)**

A soldagem dos aços galvanizados microligados tipo BLAR apresenta certos cuidados devido principalmente aos elementos de liga presentes.

De acordo com Modenesi (2001), as estruturas soldadas são particularmente propensas à falha por fratura frágil devido às tensões residuais e distorções causadas pelo aquecimento das regiões unidas. <sup>[24]</sup>

As adições de elementos de liga nas soldas influenciam a microestrutura da junta soldada, pelo aumento da temperabilidade (por exemplo, inibindo a transformação da ferrita) e pelo controle da qualidade da solda e/ou processo (pré e pós-aquecimento) e/ou tipo de gás utilizado (atmosfera inerte ou reativa). O aumento do teor de carbono aumenta o teor de ferrita acicular com o decréscimo da ferrita de contorno de grão.

O manganês tem também grande influência sobre a temperabilidade da solda. Considerando as mesmas condições de parâmetros de soldagem de uma liga de aço BLAR, 20 PPM de titânio são suficientes para modificar a microestrutura da ferrita. O silício pode aumentar a ferrita acicular na região de solda. O nióbio aumenta a temperabilidade e anula as reações de ferrita e perlita, no entanto precipita no contorno de grão durante a solidificação e isto causa uma alta temperabilidade local e a formação de redes isoladas de martensita. [25]

Na utilização e escolha dos processos de soldagem para a união de partes e ou componentes é inevitável o estudo antecipado para avaliar a influência dos elementos de liga na composição microestrutural dos materiais a serem soldados e dos consumíveis a serem utilizados.

## 2.5 AÇOS MICROLIGADOS

Aços microligados são conhecidos como aços de baixa liga e alta resistência mecânica (BLAR), sendo constituídos por um grupo específico de aços com composição química especialmente desenvolvida para alcançar elevados valores de propriedades mecânicas. [26]

Segundo a *Auto Steel Partnership* (2000), aços microligados BLAR podem ser definidos em um contexto onde os valores de limite de escoamento estão na faixa de 275 a 420 MPa. [27] Conforme a norma SAE J2340, os aços BLAR são classificados segundo o seu limite de escoamento que pode variar de 300 a 550 MPa. [28]

A composição química desses materiais pode variar muito devido, principalmente, ao tipo de aplicação, propriedades requeridas e processos empregados na fabricação e transformação dos mesmos. [29]

### 2.5.1 Mecanismos de endurecimento de metais

Os mecanismos de endurecimento de metais propiciam obter ligas com elevada resistência mecânica, conjugada com alta tenacidade. As técnicas de endurecimento em metais contam com princípios simples: quanto maior for a restrição ao movimento de discordâncias, maior será a resistência de um material metálico. <sup>[30]</sup>

Os principais mecanismos de endurecimento de metais segundo Kern *et al* (1992), podem ser resumidos em: <sup>[31]</sup>

1. Endurecimento pela redução do tamanho de grão
2. Endurecimento pela formação de solução sólida
3. Endurecimento por encruamento
4. Endurecimento por dispersão de partículas

#### 1. Endurecimento pela redução do tamanho de grão

Em um metal policristalino, o tamanho dos grãos exerce influência sobre as propriedades mecânicas. Grãos adjacentes possuem diferentes orientações cristalinas e um contorno de grão em comum. Como os grãos possuem orientações diferentes, uma discordância que se movimenta do grão A para o grão B, deve mudar sua direção de movimento. A desordem atômica na região de um contorno de grão resulta em uma descontinuidade do plano de escorregamento de um grão para o outro. Portanto, as discordâncias não ultrapassam contornos de grão de alto ângulo, mas a tensão gerada no plano de escorregamento de um grão pode ativar fontes de novas discordâncias. <sup>[32]</sup>

Materiais com grãos finos são mais resistentes que materiais com grãos grosseiros porque há maior quantidade linear de contornos de grão e assim dificulta a movimentação de discordâncias.

## **2. Endurecimento pela formação de solução sólida**

O endurecimento pela formação de solução sólida consiste na adição de elementos de liga, visando a formação de soluções sólidas substitucionais ou intersticiais, dependendo da relação de tamanhos atômicos entre o solvente e o soluto. [32]

As ligas metálicas são mais resistentes que metais puros porque os átomos do elemento de liga (soluto) impõem tensões e deformações no retículo ao redor destes átomos. A interação entre estes campos de tensão e as discordâncias provoca conseqüentemente, uma restrição no movimento das discordâncias, endurecendo a liga. [30]

## **3. Endurecimento por encruamento**

O endurecimento por encruamento é um processo de endurecimento, no qual um metal dúctil torna-se mais resistente e duro na medida em que é deformado plasticamente. Muitas vezes este tipo de endurecimento é chamado de endurecimento a frio (*cold hardening*) ou endurecimento por trabalho mecânico (*work hardening*). Este foi provavelmente o primeiro mecanismo de endurecimento de metais conhecido pelo homem. Em 1540, um livro clássico, *De La Pirotechnia*, já mencionava que os metais ao serem deformados, tornavam-se mais resistentes a deslocamento. [26]

## **4. Endurecimento por dispersão de partículas**

Os contornos entre diferentes fases (precipitado e matriz) em uma liga são defeitos planares e interferem na movimentação de discordâncias provocando conseqüentemente, aumento de resistência e dureza. A ocorrência de precipitados incoerentes é muito mais freqüente que os precipitados coerentes. [33]

Os precipitados ou fases incoerentes não apresentam coerência entre os reticulados cristalinos do precipitado e matriz. Os precipitados coerentes apresentam a mesma estrutura

cristalina da matriz. As diferenças entre os parâmetros de reticulado da matriz e da fase são de, no máximo, 15% e o tamanho dos precipitados coerentes é de até 1000 vezes menor que o de precipitados incoerentes. Quanto menores forem os precipitados, maior será a dispersão destes; assim, para a mesma fração de fase, menor o efeito de restrição de movimento de discordâncias. [34]

### **2.5.2 Efeito dos elementos de liga nos aços BLAR**

O vertiginoso desenvolvimento dos aços BLAR, particularmente no campo das aplicações estruturais, navais e petrolíferas se deve basicamente às melhores características de tenacidade desses materiais para níveis relativamente altos de resistência mecânica e boa soldabilidade.

[35]

Sob este aspecto, a laminação controlada se revelou um tratamento termomecânico indispensável para se conseguirem tais características a partir das ligas de aços microligados ao nióbio, titânio e manganês. Outros elementos de liga, no entanto, podem ser inseridos dependendo de que características estão sendo buscadas e a aplicação para o aço BLAR.

O tratamento termomecânico é a combinação de operações de aquecimento e a aplicação de esforço proporcionado pelos rolos de laminação, realizado em condições tais que conduzem a uma mudança parcial da estrutura e conseqüentemente a modificação das propriedades mecânicas das ligas BLAR. [36]

A laminação controlada de aços microligados requer o conhecimento prévio de suas temperaturas críticas. Entre elas se encontram suas temperaturas de não-recristalização, que diminuem o intervalo em que a austenita apresenta recristalização incompleta entre os passes de laminação. O limite superior dessa faixa é chamado de  $T_{95\%}$ , a temperatura onde 95% de recristalização da austenita ocorre antes que seja interrompida pelo início da precipitação de carbonitretos de elementos de liga. Já seu limite inferior é  $T_{5\%}$ , temperatura sob a qual apenas

5% da austenita se recristaliza antes da precipitação. As demais temperaturas críticas ocorrem no início e fim da transformação da austenita em ferrita. Estas faixas de temperatura corretas determinam as fases da laminação controlada. [37]

Tradicionalmente, aços submetidos ao recozimento em caixa (descontínuo) eram aplicados para a obtenção de elevada conformabilidade. Nestes aços, o controle da precipitação do nitreto de alumínio, principalmente, é crítico para a obtenção das propriedades desejadas. [38]

O aço BLAR escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, ZSTE 380, está ilustrado na tabela 2.5, onde são apresentados os valores de resistência mecânica, composição química, norma e grau do aço.

As letras Z, ST, E vem do alemão *Ziehgüte, Stahl, E-modul*, ou seja, Z é o grau de embutimento, *St* de aço, E é o módulo de elasticidade e o valor 380 é o limite de escoamento mínimo do material.

**Tabela 2.2: Propriedades do aço BLAR tipo ZSTE 380.**

Norma SEW 093	Grau	Composição Química (Máx.)								Propriedades Mecânicas			
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ti (%)	Al (%)	Nb (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento	
												Base (mm)	Mínimo (%)
	ZSTE 380	0,10	0,50	1,20	0,03	0,03	0,22	0,02	0,09	380	460	80	18

LE = Limite de escoamento mínimo; LR = Limite de resistência mínimo  
Alongamento para espessuras de 0,9 a 2,7 mm.

Geralmente, os aços microligados possuem uma quantidade de carbono em sua composição química que pode variar de 0,05% a 0,25%. Podem ainda fazer parte da composição química destes aços pequenas quantidades de cromo, níquel, molibdênio, cobre, nióbio, titânio e/ou zircônio usados em diferentes proporções.

Para as faixas de limite de escoamento a partir de 300 MPa, os substratos são microligados ao nióbio, contando com adições de manganês. O nióbio é adicionado na liga para reduzir o tamanho de grão, aumentando a resistência mecânica do aço e a tenacidade. Os aços BLAR

podem ser resumidamente classificados segundo sua estrutura e propriedades devido a inclusão de componentes químicos em cinco categorias. <sup>[32]</sup>

1- Segundo o desgaste a meios corrosivos, contém pequenas quantidades dos elementos cobre e fósforo, para amenizar os efeitos da corrosão atmosférica.

2- Microligados de estrutura ferrítica + perlita, contam em sua composição química com pequenas quantidades de carbonetos ou carbonitretos de nióbio, vanádio, ou titânio (geralmente em quantidade inferiores a 0,10%) em precipitação, com grãos refinados.

3- Estrutura perlítica globular, ligas com quantidades de manganês e outros elementos para melhorar a soldabilidade, conformação, resistência e dureza.

4- Estrutura ferrítica acicular de baixo carbono (quantidade inferior a 0,05% de carbono), apresenta excelente combinação de alta resistência (acima de 600 MPa), boa soldabilidade, conformação e dureza.

5- Estrutura dupla fase, aços com uma microestrutura martensítica dispersa e uma matriz de ferrita permitindo uma boa combinação de ductilidade e alta resistência.

Os efeitos da inclusão de elementos de liga em aço BLAR afetam suas propriedades, de modo que cada elemento altera algum tipo de propriedade do aço. Muitas vezes vai depender de qual propriedade se necessita e de qual aplicação será dada ao aço. <sup>[39]</sup>

O carbono geralmente está restrito a percentuais inferiores a 0,15 % com o objetivo de se eliminar a ocorrência de trincas a frio durante a soldagem. Além disso, o material apresentará maior tenacidade. A redução de teor desse elemento faz com que ocorra o desaparecimento de regiões martensíticas. Isso efetivamente melhora a tenacidade do material sem que ocorra perda significativa de resistência mecânica.

O nióbio é utilizado para se refinar o grão durante o processo de laminação a quente e nas fases de austenitização dos tratamentos térmicos (quando necessário). Proporciona, ainda, algum endurecimento por precipitação no envelhecimento natural.

O alumínio é geralmente empregado na desoxidação do aço, contribuindo para o refino do grão. O titânio é utilizado para restringir o crescimento do grão austenítico durante o aquecimento da chapa ou placa, bem como inibir o crescimento dos grãos austeníticos recristalizados durante a laminação a quente. O manganês é adicionado na faixa entre 1,2 a 2,0%, em função da espessura da chapa e do nível desejado de resistência mecânica. Tal elemento melhora as propriedades mecânicas da chapa, suprimindo as transformações austenita-ferrita e austenita-perlita, sem que ocorra perda significativa de tenacidade.

Molibdênio, níquel, cobre e cromo podem ser adicionados em função da espessura da chapa e propriedades requeridas. O efeito do molibdênio e níquel nas propriedades mecânicas é similar ao do manganês.

### **2.5.3 Utilização e histórico dos aços BLAR**

Segundo o *ASM Handbook* (2001) um dos primeiros aços BLAR (HSLA – *high strength low alloy*) foi introduzido em 1930 nos USA com a denominação de COR-TEM (Marca da *USX Corporation*). Possuía uma resistência à corrosão cinco vezes maior comparativamente aos aços utilizados até então. Os modernos aços de baixa liga alta resistência são bastante utilizados em linhas de alta pressão para distribuição de gás, petróleo, pontes de auto-estradas entre outras aplicações principalmente nos Estados Unidos da América do Norte, tanques de armazenagem, barcas ou embarcações, equipamentos para agricultura, indústria automobilística entre outros.<sup>[32]</sup>

Nas décadas de 70 e 80, a indústria automobilística buscava de forma desenfreada o desenvolvimento de novos materiais, devido principalmente a crise do petróleo. Nesta mesma época o movimento para redução de peso dos veículos se torna um dos principais objetivos de projetistas, engenheiros e metalurgistas, envolvidos no desenvolvimento de novos produtos.<sup>[40]</sup>

Os aços de baixa liga e alta resistência ou BLAR, como são conhecidos, são utilizados em larga escala pela indústria automobilística devido a suas características de resistência, conformabilidade e soldabilidade. <sup>[41]</sup> Muitos veículos lançados no mercado apresentam soluções interessantes quanto a ganhos significativos de redução de massa e segurança. Um exemplo bastante utilizado por fabricantes de aços de baixa liga e alta resistência é o projeto ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body*), onde participaram empresas de vários países da Europa, desenvolvendo a parte estrutural e coberturas de um automóvel buscando elevados índices de segurança, redução de massa e aplicação de aços com limites de escoamento que vão de 400 MPa a 1400 MPa.

Atualmente, os aços BLAR são utilizados nos mais diversos campos de aplicação. Segundo Neves *et al* (2002) aços microligados são muito utilizados nos processos de forjamento a quente onde este tipo de processamento ocorre no campo austenítico, de modo que variáveis como deformação e temperatura influenciam a microestrutura final obtida. <sup>[26]</sup>

## CAPÍTULO 3

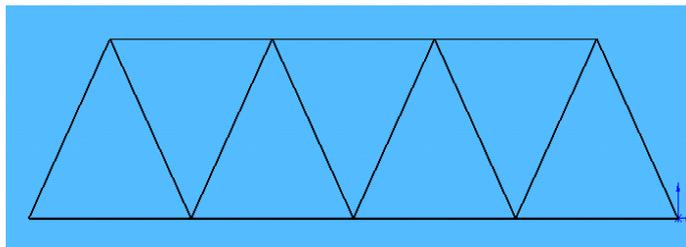
### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTRUTURA VEICULAR

#### 3.1 CONCEITO DE TRELIÇAS

Treliças são estruturas de barras ligadas entre si por nós articulados, cujas cargas se aplicam nesses mesmos nós. Com isso, resultam como esforço solicitante nas barras unicamente forças normais. As treliças têm campo de aplicação muito vasto: são usadas em estruturas de coberturas, edificações residenciais e industriais, coberturas de estádios, estações metroviárias, nas pontes rodoviárias e ferroviárias, bem como em estruturas veiculares.<sup>[42]</sup>

Segundo Ricardo (1978), todos os corpos existentes na Criação se deformam quando sujeitos a esforços. A estrutura é raramente solicitada, durante sua vida, por cargas que a deformem permanente. Por isso, em seu uso normal, elas se comportam linearmente. As estruturas lineares obedecem também ao Princípio da Superposição. Isto é, se dois ou mais esforços externos agirem sobre elas, cada um age como se os outros não existissem. Ou, em outras palavras, o efeito (deslocamento) devido a um deles se soma aos efeitos de todos os outros. O Princípio da Superposição simplifica muito o cálculo de deflexões, quando há, como é o caso comum, um esforço externo.<sup>[43]</sup>

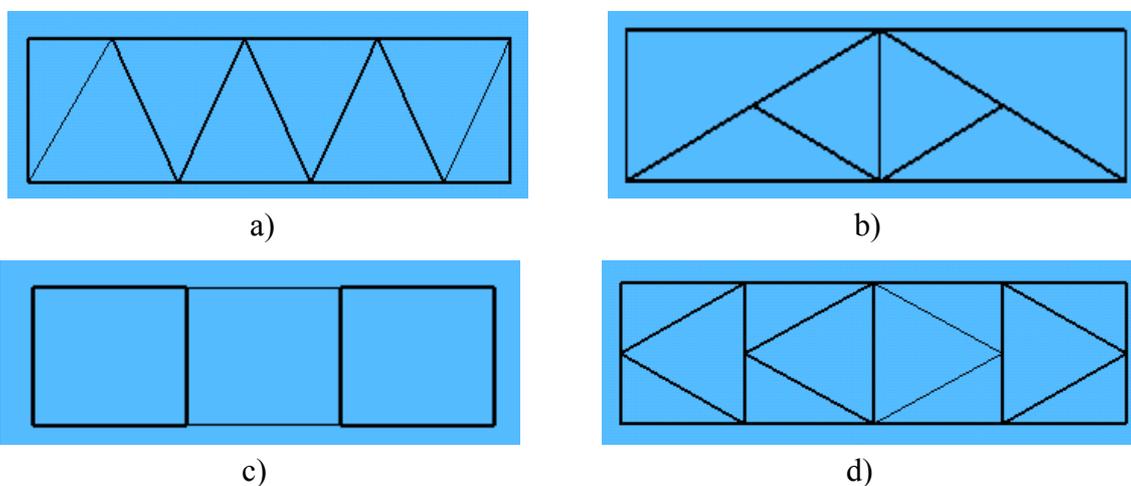
Do ponto de vista estrutural elas podem ser planas ou espaciais. As treliças são, como se vê na figura 3.1 peças leves, por causa do baixo consumo de material. Este tipo de treliça é conhecido como Treliça Warren ou Neville.



**Figura 3.1:** Treliça Isostática Warren ou Neville utilizadas em coberturas e em pontes.  
(Fonte: Marcopolo, 2004).

Como nas treliças há barras solicitadas à compressão, nas diagonais ou nos montantes, e, por exemplo, nas cordas superiores, há sempre dois perigos a serem combatidos: os de ocorrência de instabilidade por efeito de esbeltezz dessas barras comprimidas e o outro pode se dar por flambagem lateral da treliça como um todo.

A figura 3.2 mostra alguns exemplos comuns de treliças que são ou podem ser utilizadas em estruturas metálicas, como também em carrocerias para ônibus.



**Figura 3.2:** Treliças mais utilizadas em estrutura de carrocerias para ônibus. a) Treliça Pratt; b) Treliça Comum; c) Quadrada ou retangular; d) Treliça K. (Fonte: Marcopolo, 2004).

### 3.2 ESTRUTURAS TUBULARES

A utilização de tubos em estruturas levou os engenheiros a pesquisarem novas soluções, usando tubos de secção retangular, quadrada, circular, entre outras. Os perfis tubulares

redondos são conhecidos desde o século XIX, já os perfis retangulares começaram a ser fabricados a partir da década de 50.

Schumacher *et al* (1997) em seu estudo sobre treliças tubulares utilizadas em pontes aborda as especificações para a solda das juntas tubulares que formam as treliças de sustentação de pontes. <sup>[44]</sup>

A utilização de tubos em estruturas tubulares é também abordada por Toyoda *et al* (2004) em seu trabalho sobre aços de Baixa Liga Alta Resistência utilizados em suspensão automotiva. Segundo Toyoda, quando se trabalha com aços BLAR, o melhor caminho para se realizar um perfeito balanceamento entre resistência e conformabilidade (dobra, estampo) é o uso da composição microestrutural que consiste de fase dura (martensita com austenita retida) e ferrita em fase. Toyoda em seu trabalho fornece ainda parâmetros mínimos para dobra de tubos e sua conformação a frio. <sup>[45]</sup>

Nakagawa *et al* (2004) apresenta uma estrutura fabricada totalmente em alumínio de um carro conceito fabricado com perfis e tubos. Neste trabalho a busca se dá pela redução de massa do veículo, porém os perfis e tubos são fabricados por um processo de extrusão do alumínio. Por se tratar de um modelo conceito, modernas técnicas de fabricação foram aplicadas a estrutura (*Body*) tais como solda a laser, extrusão, entre outras. <sup>[46]</sup>

Thompson *et al* (1998) em seu trabalho apresentam uma estrutura totalmente fabricada com perfis tubulares da *NASCAR Winston Cup Series*. Neste trabalho os autores verificam como se comporta uma estrutura tubular quando submetida a esforços. <sup>[47]</sup>

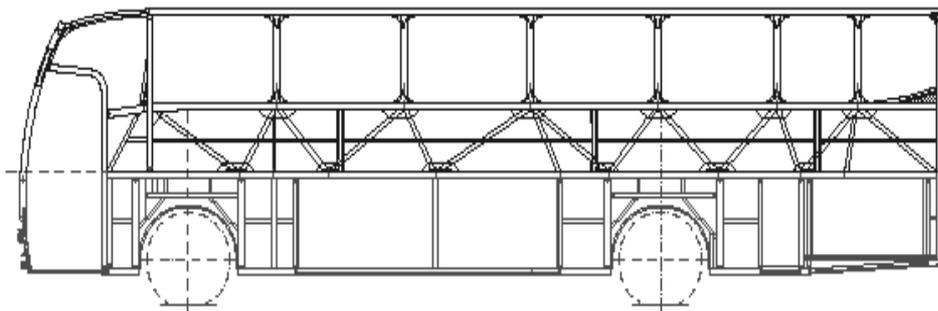
A aplicação de perfis tubulares em estruturas pode ser comprovada nos mais variados produtos desde estruturas para pontes, caminhões, carros, carrocerias, entre outros. A seleção da seção do tubo, ora circular, ora retangular ou quadrada são de inteira responsabilidade do projetista em confronto com a sua utilização. <sup>[48]</sup>

### 3.3 NORMA ECE R 66-00 - NORMA DE TOMBAMENTO DE ESTRUTURAS

A Norma Regulamentadora ECE R 66-00 possui entre outras definições e métodos de avaliação de itens e conjuntos pertencentes a estruturas veiculares para um só andar, uma secção que trata exclusivamente da estrutura dos veículos. [6]

Esta secção define os métodos de ensaios a que as estruturas dos veículos devem ser submetidas para a aprovação e define os termos normalmente utilizados pelos fabricantes de estruturas e que são tratados neste estudo.

Define-se “superestrutura” como as partes da estrutura do veículo que contribuem para a resistência deste em caso de acidente com capotagem. A secção da carroceria é uma secção que contém pelo menos dois montantes verticais idênticos de cada lado que seja representativo de uma ou mais partes da estrutura do veículo. Na figura 3.3 pode-se verificar um exemplo de superestrutura confeccionada com tubo de secção retangular e quadrada. Pode-se também verificar na figura as treliças que fazem parte da estrutura e suas uniões.



**Figura 3.3: Superestrutura, carroceria fabricada em aço tubular retangular e quadrado. (Fonte: Marcopolo 2005).**

O “espaço residual” é definido como o espaço que deve subsistir no compartimento dos passageiros durante e depois de um dos ensaios da estrutura, os quais são divididos em quatro métodos possíveis:

- 1- Ensaio de capotagem de um veículo completo
- 2- Ensaio de capotagem de uma ou mais secções da carroceria
- 3- Ensaio com um pêndulo de uma ou mais secções da carroceria
- 4- Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo

A “energia total” ( $E^*$ ) é a energia que se considera ser absorvida por toda a estrutura do veículo.

Neste estudo será realizada a verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo (Método de Elementos Finitos), porém os valores para a efetivação e comprovação da substituição dos materiais a serem analisados serão obtidos através de experimentos em laboratório para levantamento dos valores de cargas e de energia total da estrutura do veículo.

Os valores obtidos para a realização dos cálculos por elementos finitos estão baseados em experimentos realizados com corpos de prova que representam uma secção da estrutura. A figura 3.4 evidencia o procedimento para o cálculo dos valores de energia total de acordo com o modelo de estrutura escolhida.

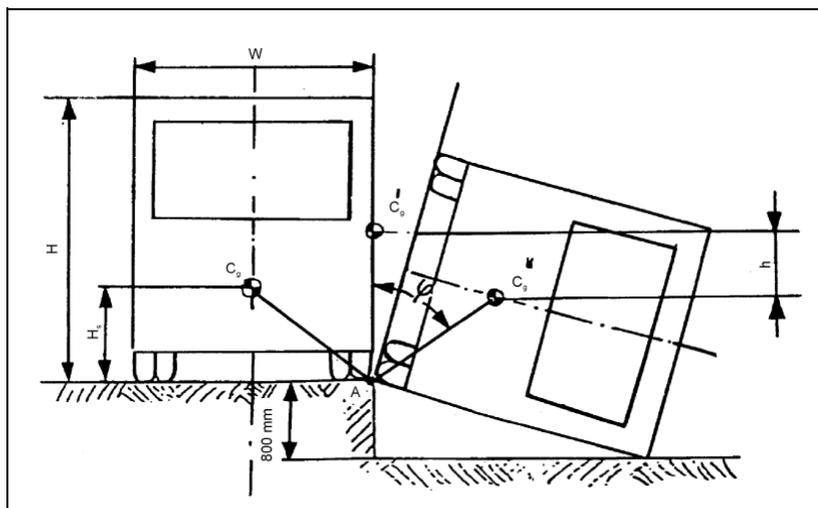


Figura 3.4: Figura esquemática para o cálculo da Energia Total (Fonte: Norma ECE R 66-00).

Enquanto a figura 3.4, possibilita identificar os valores e posição dos pontos a serem identificados em uma estrutura, a equação 3.1 permite a obtenção do valor de energia total da estrutura para os cálculos.

$$E^* = 0,75.M.g.\left[\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_s^2} - \frac{W}{2H}\sqrt{H^2 - 0,8^2} + 0,8\frac{H_s}{H}\right] \quad (\text{Nm}) \quad (3.1)$$

Onde:

$M$  = massa sem carga do veículo (kg)

$g$  = 9,8 m/s<sup>2</sup>

$W$  = largura máxima do veículo (m)

$H_s$  = Altura do centro de gravidade do veículo sem carga (m)

$H$  = altura do veículo (m)

$E^*$  = Energia total

### 3.4 RESOLUÇÃO CONTRAN 811/96

A resolução do CONTRAN 811/96 estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte coletivo de passageiros (ônibus e microônibus) de fabricação nacional e estrangeira. <sup>[7]</sup>

A estrutura do veículo poderá ser fabricada de qualquer material, tal como aço, alumínio ou ligas, porém, as regiões e/ou partes que a compõem deverão ser fixadas rigidamente entre elas. Esta fixação pode ser por solda, rebites ou parafusos, visando evitar e garantir resistência suficiente para suportar, nos pontos de concentração de carga (apoios, suportes, aberturas, uniões, montantes e etc.), todo tipo de esforços que venham a ser aplicados.

A estrutura da carroceria deverá resistir a uma carga sobre o teto que corresponda a 50% do peso máximo admitido pelo chassi durante no mínimo cinco minutos sem experimentar deformações, em qualquer ponto, que superem a 70 mm.

O módulo estrutural composto de no mínimo dois montantes deve suportar uma carga estática horizontal igual a 15% do peso máximo admissível do chassi. A carga deve ser aplicada e distribuída uniformemente sobre o módulo estrutural, aplicado à altura acima das janelas, sem que o mesmo sofra um deslocamento maior que 140 mm. A carga deverá manter-se por um intervalo de no mínimo 5 minutos.

### **3.5 FERRAMENTA DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

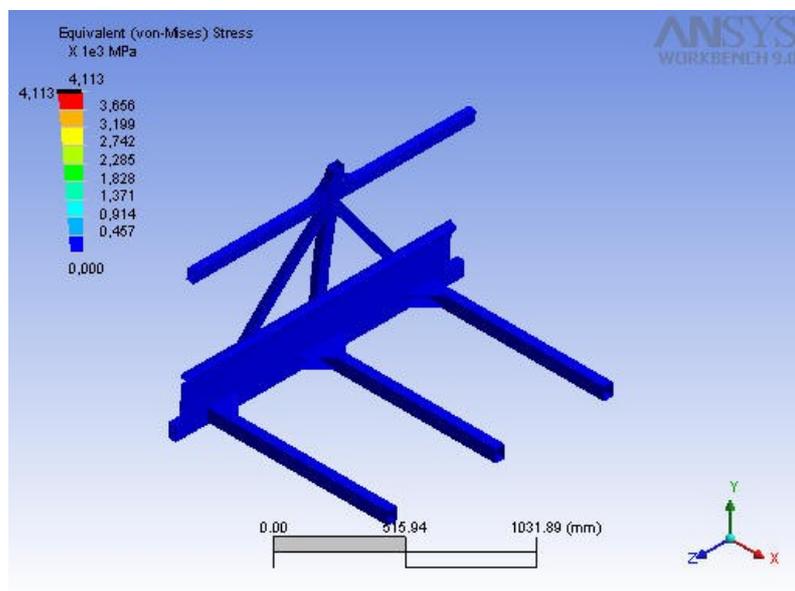
As idéias que deram origem ao que hoje se conhece como métodos de elementos finitos surgiram no início do século XX. Não se atribui a ninguém especificamente a autoria deste método, nem a data precisa em que surgiu. Contudo, Engenheiros, Físicos e Matemáticos trabalharam desde o início na elaboração e evolução do método.

Segundo Huebner (1982) “em engenharia este método foi usado pela primeira vez em 1960 por Clough num estudo sobre problemas de elasticidade plana”. A partir de Clough no início dos anos 60, o método de elementos finitos foi usado extensivamente para análise de tensões lineares, deflexão e vibração em diversas áreas. <sup>[49]</sup>

O método dos elementos finitos estuda o comportamento elástico de um corpo contínuo qualquer, submetido a um determinado carregamento, sendo feito mediante a subdivisão, ou discretização deste corpo em porções, chamadas de elementos finitos. Desta forma, define-se como discretização ou idealização estrutural, o procedimento de transformação da estrutura dada, numa outra constituída por uma união de elementos, unidos entre si através de um número finito de pontos, chamados nós e, admitindo-se compatibilidade de deslocamentos nos nós e ao longo das faces comuns dos elementos adjacentes. O carregamento é admitido agindo nos nós dos elementos. <sup>[50]</sup> Na figura 3.5 pode-se observar um nó estrutural submetido a uma determinada carga. Os valores verificados com a aplicação da carga se referem a tensão

de Von-Mises, valor geralmente comparado com o limite de escoamento do material em análise.

Segundo Sauter & Lauber (2003), a melhoria estrutural é uma das técnicas mais importantes no desenvolvimento virtual de produtos. Os componentes não são somente analisados, mas otimizados em cada fase do processo de desenvolvimento. Ainda, segundo os autores, o uso de elementos finitos possibilita ganhos significativos de tempo, custos e ensaios no desenvolvimento de produtos. [51]



**Figura 3.5:** Nó estrutural submetido a uma carga. Valores obtidos em MPa da tensão de Von-Mises através do software Workbench Ansys 9.0. (Fonte: Marcopolo, 2005).

Em um corpo elástico contínuo bidimensional ou tridimensional, a discretização estrutural corresponde evidentemente a uma aproximação. Esta aproximação será tanto maior, quanto maior for o número de nós pelos quais os elementos se interligam, ou também, quanto maior for o número de elementos em que a estrutura foi dividida. Quanto a forma, existe uma grande variedade de elementos para as estruturas bidimensionais, desde triângulos, retângulos, trapezóides, paralelogramos, aos elementos curvos. Para as estruturas tridimensionais têm-se formas cúbicas, prismáticas, tetraédricas, etc.

Segundo Ricardo *et al* (2000) o uso de elementos finitos para análise de estruturas veiculares requer procedimentos específicos e um desenho de processo muito bem definido, conforme a figura 3.6. Pode-se verificar que o desenho do processo é dividido em 3 diferentes etapas que devem convergir para a análise de durabilidade da estrutura formando um processo iterativo aliado a experiências, banco de dados de cálculos já executados, entre outros fatores.<sup>[50]</sup>

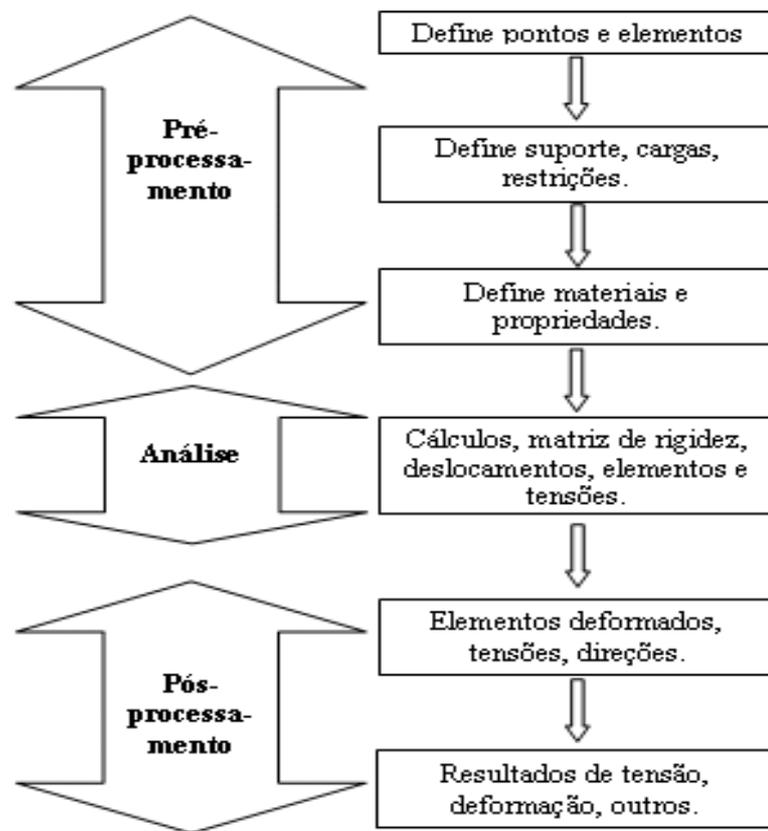
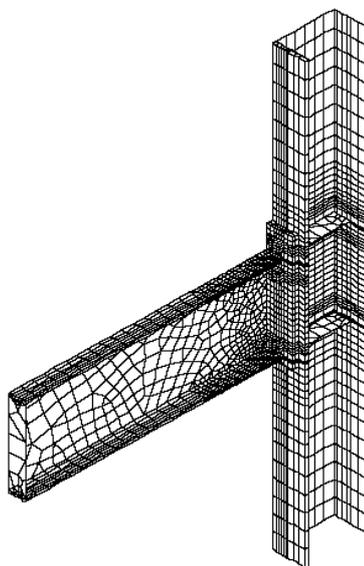


Figura 3.6: Fluxo de processo para análise de estrutura veicular com auxílio de CAE, adaptado de Ricardo, 2000. (Fonte: Ricardo, 2000)<sup>[50]</sup>.

O pré-processamento consiste na definição do problema de domínio e na discretização ou divisão do domínio em elementos. O tipo de elemento e o número de elementos irão depender da precisão e da qualidade das informações que se deseja de cada região a ser analisada; geralmente os programas de elementos finitos executam esta etapa automaticamente e cabe ao engenheiro determinar o grau de refinamento desejável. Os pontos de intersecção das linhas

descrevem os lados dos elementos que são referenciados como nós, e os lados são chamados de linhas ou planos nodais. Na figura 3.7 pode-se verificar uma estrutura com a malha determinada gerada automaticamente pelo software.



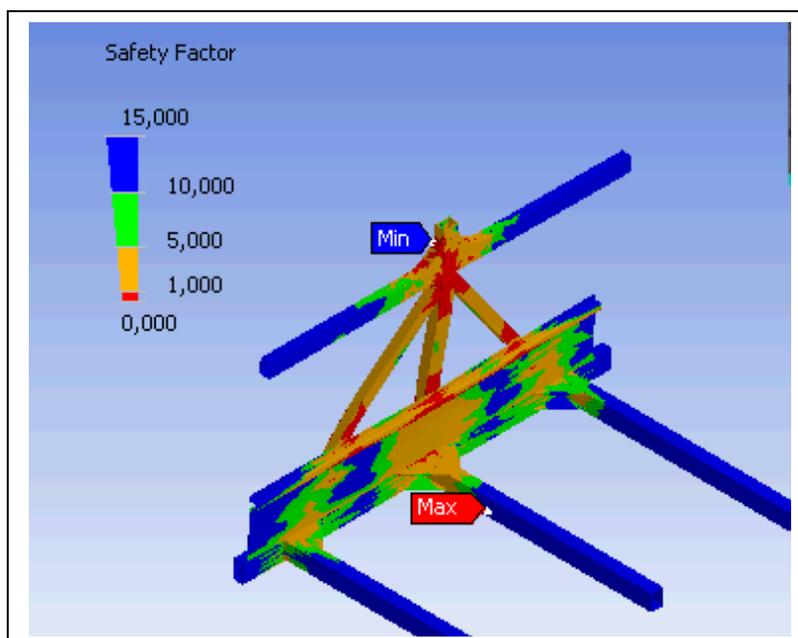
**Figura 3.7: Malha de um nó estrutural por elementos finitos CAE – Computer Aided Engineering.**  
(Fonte: Marcopolo, 2005).

Para que o processo de cálculo por elementos finitos tenha um resultado aceitável e confiável, os parâmetros de entrada referente aos carregamentos, suportes e as informações referentes ao material são muito importantes, pois, baseado nestas informações, o software irá executar todos os cálculos, principalmente de deslocamentos e tensões. As principais propriedades são: limite de escoamento, limite de resistência, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, densidade, limite de resistência à fadiga e coeficiente de Poisson.

O processamento ou análise é a etapa onde o software realiza a montagem das equações dos elementos a serem calculados. Dependendo do tipo de software utilizado, as equações podem variar e seus métodos também, além do tipo de problema em questão para uma solução linear ou não-linear.

No pós-processamento o que se verifica é a apresentação dos resultados ou visualização gráfica dos valores obtidos no processamento.

Um exemplo da visualização de pós-processamento do método de elementos finitos é apresentado na figura 3.8, onde se pode verificar uma estrutura tubular em aço submetida a ação de uma força, resultando em deslocamento. Ainda é possível verificar o fator de segurança nos vários pontos da estrutura variando de valores menores que 1 até 15.



**Figura 3.8:** Análise de estrutura por elementos finitos CAE – Computer Aided Engineering usando o software Workbench Ansys® 8.0 – 2004. (Fonte: Marcopolo, 2005).

### 3.6 CORROSÃO BRANCA E CORROSÃO VERMELHA

A corrosão atmosférica do aço carbono é um processo eletroquímico (isto é, a corrosão do metal envolve tanto reações químicas quanto fluxo de elétrons) onde o metal reage com a atmosfera para formar um óxido ou outro composto análogo ao minério do qual ele se originou.

A corrosão pode ser controlada quando submetemos o substrato a algum tipo de proteção, no caso dos materiais estudados (aço convencional e Liga BLAR) a proteção encontrada é a aplicação de uma camada fina de zinco conforme determina norma NBR 7008.

A corrosão branca se deve principalmente a formação de óxidos de zinco que se formam na superfície do material. A corrosão vermelha possui uma composição complexa, porém, basicamente, é constituído de compostos de forma  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A corrosão vermelha é mais conhecida como ferrugem.

Existem vários tipos de corrosão, porém os dois tipos mais importantes de ataque são: Corrosão uniforme que acontece em um ambiente homogêneo sem alterações de temperatura, pressão ou concentração o longo da interface, se caracteriza pela perda generalizada de massa em toda a superfície. A corrosão galvânica é outra forma de corrosão em meio aquoso e pode ocorrer quando dois metais diferentes são conectados eletricamente em um mesmo líquido condutor, formando uma pilha.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E MÉTODOS

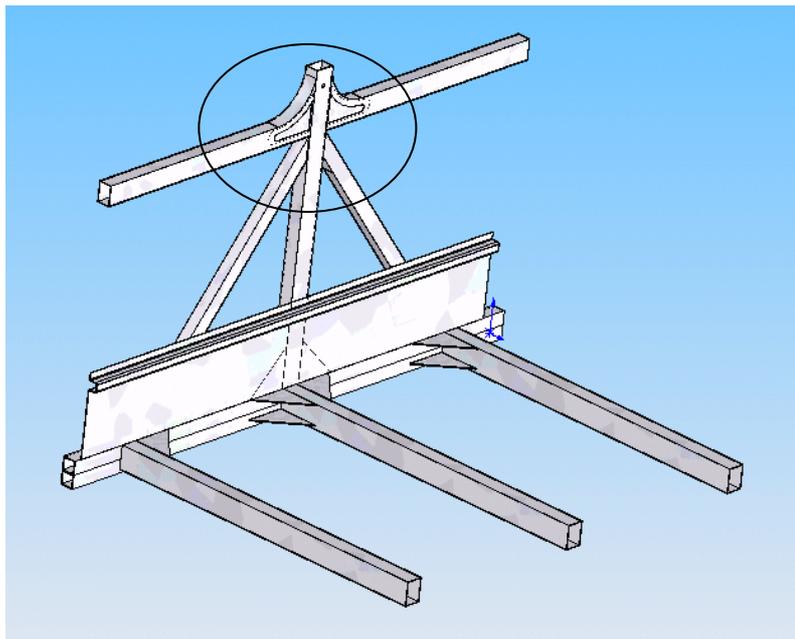
#### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os corpos de prova e as estruturas tubulares a serem ensaiadas foram produzidas de acordo com as especificações de projeto e soldadas pelo processo MIG/MAG. Os materiais utilizados para análise comparativa em laboratório, experimental e por elementos finitos seguem as normas SEW 093, ASTM A1011/A e 1011M-05 para os aços microligados (BLAR) e a norma NBR 7008/jul. 2003 para os aços convencionais. O aço BLAR é representado pelo ZSTE 380 e o aço convencional representado pelo ZAR 230.

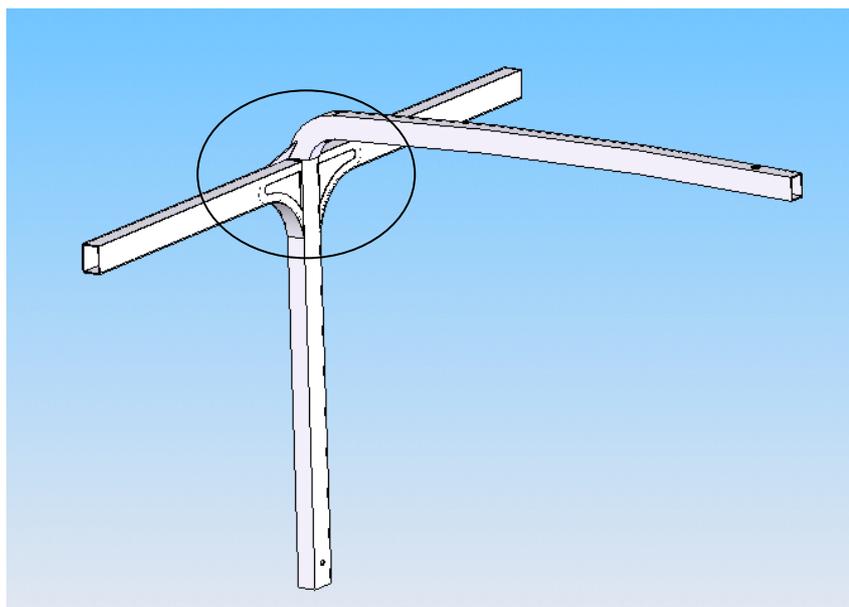
Os corpos de prova foram separados de acordo com o material e ensaio a ser executado. Para os ensaios em laboratório os corpos de prova foram denominados de CP  $n$  – corpos de prova seguidos de uma numeração ( $n$ ) que identifica cada corpo de prova ensaiado. A quantidade mínima de corpos de prova para cada material nunca é menor que dois, conforme procedimentos da empresa Marcopolo.

Os corpos de prova foram ensaiados concomitantemente, ou seja, no mesmo equipamento foram colocados os corpos de prova do material BLAR ZSTE 380 e do material aço ZAR 230.

As estruturas tubulares a serem ensaiadas foram denominadas de nós estruturais, “Nó I” e “Nó II”. O Nó I representa a união de diferentes secções de tubos e espessuras conforme se pode verificar na figura 4.1; o Nó II (figura 4.2) representa a união entre a estrutura lateral da carroceria com a estrutura, aqui denominada de teto da carroceria. É importante destacar que as espessuras e secções dos tubos do Nó II são diferentes do Nó I.



**Figura 4.1:** Nó estrutural união da lateral com o assoalho ( piso) da estrutura - Nó I (*Fonte: Arquivo Marcopolo, 2005*).



**Figura 4.2:** Nó estrutural união da lateral com o teto - Nó II (*Fonte: Arquivo Marcopolo, 2005*).

## 4.2 MODELOS E CORPOS DE PROVA

Para os cálculos de elementos finitos, os modelos foram desenhados tridimensionalmente em software específico para desenho chamado SolidWorks®. Os desenhos dos Nós I e II representam uma parte da estrutura determinada pela Norma ECE R66-00. Os corpos de prova foram preparados para os ensaios mecânicos e químicos conforme norma. Os ensaios

químicos realizados em laboratório foram necessários para verificação das características dos aços quanto a corrosão; os mesmos são eliminatórios, ou seja, se a camada de zinco depositada na superfície do aço apresentar algum sinal de corrosão, o material é descartado.

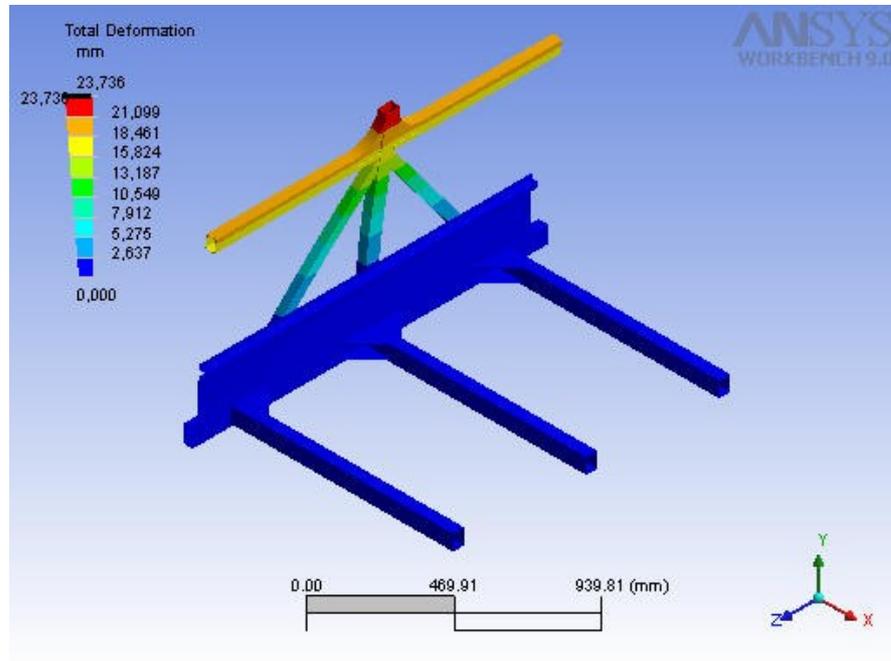
Para os ensaios de laboratório em névoa salina foram utilizados corpos de prova de 2,7 x 100 x 150 mm dos aços analisados. Para os ensaios de tração foram retirados corpos de prova de chapa laminada a frio zincada e dos tubos e perfis conformados a frio. Foram confeccionados corpos de prova soldados para verificação da região de solda: resistência a tração da solda e análise macrográfica da região soldada.

### **4.3 CÁLCULO DAS ESTRUTURAS POR ELEMENTOS FINITOS**

Para os cálculos estruturais, análises e comparações dos ensaios dos dois materiais em estudo (ZAR 230 x ZSTE 380) utilizou-se o software comercial Ansys® Workbench versão 9. Para os cálculos utilizando elementos finitos fez-se necessária a aquisição experimental das cargas. Estes valores experimentais são os dados de entrada para analisar o comportamento dos corpos de prova via software. Além dos dados referentes aos carregamentos a que a estrutura está submetida e dos nós analisados, foram utilizados os valores e dimensionais segundo norma ECE R66-00 também como dados de entrada para o software de elementos finitos. As análises em elementos finitos servem para avaliar os valores experimentais, verificar e buscar a melhoria dos nós estruturais e possíveis reduções de massa dos mesmos. Procedimento semelhante foi utilizado por Glad & Bechtel (2005), porém focado para a indústria automobilística. [52]

Na figura 4.3 verifica-se um exemplo de saída de valores obtidos pela análise com o software de elementos finito utilizado (Ansys® Workbench 9.0). De acordo com a carga aplicada, o componente sofre um deslocamento e tensão resultante da mesma; neste caso representado por faixas de cores e valores. Ereke & Yay (1999) utilizaram em seu trabalho

elementos finitos para análise de uma estrutura de ônibus, porém, avaliaram o comportamento da estrutura quanto a rigidez torcional. [53]



**Figura 4.3:** Figura fornecida pelo software Ansys® na análise do deslocamento do nó estrutural (Nó I) submetido a uma força, sendo a deslocamento dado em mm. (Fonte: arquivo Marcopolo, 2005).

#### 4.4 SOLDA DOS CORPOS DE PROVA E NÓS

Os materiais e equipamentos utilizados para a soldagem dos corpos de prova e dos conjuntos estruturais submetidos aos ensaios foram: arame de solda Gerdau AWS A 5.18 ER70S6, gás de proteção CO<sub>2</sub> sem mistura fornecida pela White Martins e máquina de solda ESAB LAB 320. Os parâmetros de processo de soldagem utilizados foram:

- Tensão do arco de 18 a 23 volts
- Corrente do arco de 140 a 180 ampéres
- Fluxo de gás de 16 litros por minuto
- Soldagem manual
- Velocidade de soldagem de 40 centímetros por minuto

Na figura 4.4 é possível verificar os corpos de prova e aço BLAR já soldados para o ensaio de tração. Foram confeccionados oito corpos de prova para cada material. Os corpos de prova do aço convencional foram soldados com os mesmos parâmetros.



**Figura 4.4:** Corpos de prova para ensaio de tração, aço BLAR ZSTE 380. (Fonte: *Arquivo Marcopolo, 2005*).

Os mesmos parâmetros de solda e processo foram utilizados para os nós estruturais e os conjuntos ensaiados.

#### **4.5 PROCEDIMENTO APLICADO**

O procedimento utilizado para a validação da substituição do material ZAR 230 (aço convencional) pela liga de aço BLAR ZSTE 380, consiste de quatro etapas, conforme segue:

Primeiramente, a etapa de avaliação dos materiais através de ensaios em laboratório, que consistem em:

- 1- Ensaios de névoa salina, conforme norma DIN 50021: 1988.
- 2- Ensaio de dureza dos corpos de prova.
- 3- Ensaio de tração dos corpos de prova soldados.

4- Ensaio metalográfico da região soldada pelo processo MIG/MAG e da solda dos tubos pelo processo ERW.

5- Ensaio de imersão em pH básico e pH ácido.

A segunda etapa consiste do projeto dos nós estruturais com a auxílio de ferramentas computacionais. A terceira etapa consiste da avaliação experimental dos nós estruturais comparativamente à computacional. Os ensaios em laboratório dos nós I e II auxiliam na calibração do software para a avaliação dos módulos estruturais. Sendo uma avaliação comparativa entre os dois materiais, mantendo as mesmas espessuras e geometria dos perfis e tubos utilizados atualmente esta etapa permite a avaliação e calibração para a utilização dos dados de entrada para o cálculo dos módulos.

A quarta fase é o cálculo do módulo estrutural, melhoria e validação da estrutura, que consiste da avaliação dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os nós estruturais I e II, agora utilizando como base e referência as deformações máximas permitidas pela Norma Regulamentadora ECE R 66-00 e resolução CONTRAN 811/96 para validação dos resultados e conseqüente substituição do material. Nesta fase a análise se dá de forma a analisar um módulo completo que seja representativo da estrutura. O processo se dá de forma interativa utilizando-se as cargas encontradas nos ensaios (segundo determina as Normas Regulamentadora ECE R66-00 e CONTRAN 811/96) em laboratório (experimental). Para os cálculos de elementos finitos e caracterização dos nós os valores adotados foram os máximos encontrados em laboratório. A fase conclusiva se dá ensaiando experimentalmente um módulo estrutural otimizado de acordo com a resolução CONTRAN 811/96. <sup>[6]</sup><sup>[7]</sup>

## **4.6 ENSAIOS DOS MATERIAIS E DAS ESTRUTURAS**

### **4.6.1 Ensaio de Névoa Salina (*Salt Spray Test*)**

Os ensaios de névoa salina são importantes devido aos materiais ZAR 230 e ZSTE 380 estarem sujeitos aos mais variados ambientes. Os ensaios em laboratório são meramente comparativos entre os dois tipos de materiais. Os ensaios são realizados conforme norma DIN 50021: 1988.

Os ensaios em névoa salina (*salt spray*) não são conclusivos, porém, conforme parâmetros internos para aprovação deste tipo de material (zincado), são aceitáveis pontos de corrosão vermelha com 200 horas e pontos de corrosão branca com 60 horas, após início do ensaio.

### **4.6.2 Ensaio de imersão em pH Básico e Ácido**

Este tipo de ensaio permite verificar como o material se comporta quando submetido a pH ácido e pH básico, assumindo valores de pH 2 e pH 10. O tempo de imersão varia conforme o tipo de material, sendo que para os aços galvanizados são especificadas 500 horas em imersão em cada solução.

Para os ensaios de imersão foram utilizados os valores segundo o grau de enferrujamento da norma NBR 5770-Dez 1984.

### **4.6.3 Ensaio de dureza**

Devido principalmente aos tipos de conformações que os componentes sofrem (dobra, curvatura, solda, corte, estampagem) havia a necessidade de avaliar a dureza do material. Caso as diferenças entre os dois materiais fossem muito grandes, poderia haver dificuldade

em executar alguns dos processos de produção. As propriedades mecânicas dos aços são afetadas, em princípio, por dois fatores:

- composição química
- microestrutura

Devido a liga BLAR possuir em sua composição elementos de liga diferente do aço convencional o que aumenta a sua resistência mecânica e conseqüentemente sua dureza se faz necessário este tipo de ensaio.

#### **4.6.4 Ensaio de tração**

Os ensaios de tração foram realizados em dois laboratórios, Laboratório da Universidade de Caxias do Sul e Laboratório da empresa Marcopolo S.A. Os corpos de prova foram retirados no sentido de laminação. Para os ensaios de tração do material soldado, os corpos de prova foram retirados de tubos com seção retangular ou quadrada conformados a frio. Tal procedimento é necessário para que se avaliem as propriedades mecânicas após a conformação. Os valores encontrados nos ensaios não podem ser menores que os valores referenciados na norma do material. Para todos os corpos de prova utilizaram-se os mesmos parâmetros de soldagem. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente (23°C) em máquina EMIC, conforme norma NBR ISO 6892:2002.

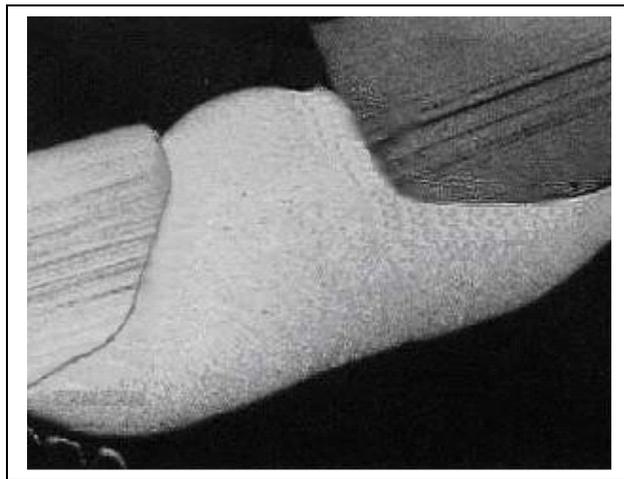
#### **4.6.5 Macrografia de solda**

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e em regra atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macroestrutura. O exame é feito à vista desarmada ou com auxílio de uma lupa com ampliação de cerca de 10 vezes. <sup>[54]</sup>

A técnica do preparo de corpos de prova da macrografia abrange as seguintes etapas:

- a) escolha e localização da secção a ser estudada;
- b) preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido;
- c) ataque dessa superfície por um reagente químico adequado. Os reagentes mais usuais para aço carbono são: reativo de iodo (iodo sublimado 10 g, iodeto de potássio 20g e água 100ml) e nital 2% (solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico).

Na figura 4.5 pode-se verificar uma junta soldada pelo processo MIG/MAG de dois materiais dissimilares (Aço Inox AISI 304 – LNE 38, 12,5 x).



**Figura 4.5: Macrografia de região soldada. (Fonte: UCS, 2004)**

O que macrograficamente se pode constatar, em consequência da ação do reativo, resulta do contraste que se estabelece entre as áreas de composições químicas diferentes ou entre as de microestruturas diferentes. O contraste decorre do fato de certas regiões escurecerem muito mais do que outras.

#### 4.6.6 Micrografia

Segundo Colpaert (1974) a metalografia microscópica (ou micrografia dos metais) estuda os produtos metalúrgicos, com auxílio do microscópio, visando à determinação de seus constituintes e de sua textura. Este estudo é feito em superfícies previamente polidas e, em geral, atacadas por um reativo adequado. Os metais, de um modo geral, são agregados cristalinos cujos cristais (perfeitamente justapostos e unidos) tanto podem ser quimicamente idênticos, como ser de composição química diferente. São idênticos no caso do ferro, cobre alumínio, etc., puros, ou então nas soluções sólidas apresentadas por certas ligas como, por exemplo, a de cobre e níquel. E são distintos nos demais casos, entre os quais estão os aços em geral. <sup>[54]</sup>

Com auxílio de uma técnica apropriada, consegue-se tornar visível a textura microscópica do material, pondo assim em evidência os diversos grãos de que é formado. A importância deste exame decorre do fato de as propriedades mecânicas de um material dependerem não só da sua composição química como também da sua textura.

A técnica de um ensaio micrográfico corrente pode ser dividida nas seguintes etapas:

- a) escolha e localização da secção a ser estudada;
- b) preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido;
- c) exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque;
- d) ataque da superfície por um reagente químico adequado;
- e) exame ao microscópio para a observação da textura;

Os reativos empregados na micrografia da ligas ferro carbono são numerosos, porém, os mais utilizados para o aço carbono são: solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico (Nital 2%) e solução de ácido pícrico a 4% em álcool etílico (Picral).

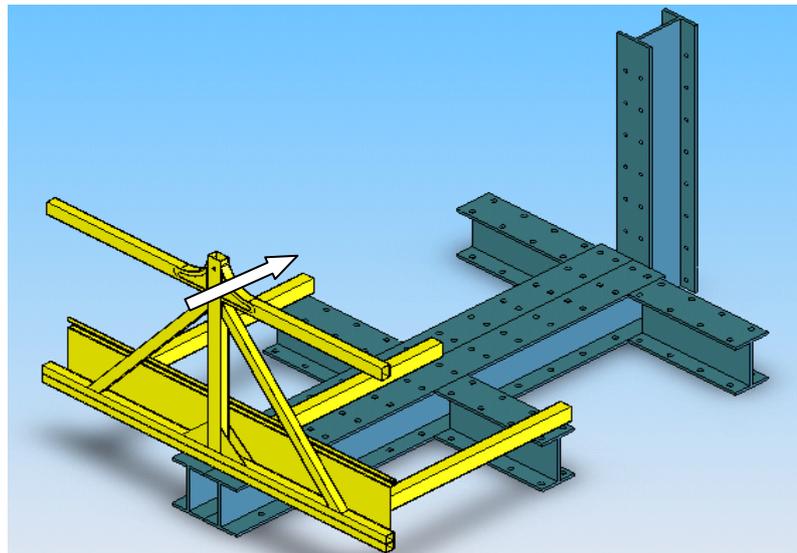
Depois do ataque podem-se observar os tipos de fases presentes, distribuição de fases, defeitos microestruturais, tamanho de grão e possível presença de constituintes estranhos. É possível constatar a existência de encruamento, descarbonetação superficial e trincas.

Para a análise metalográfica foram retiradas amostras da secção transversal à direcção de soldagem, incluindo a placa base e o metal de solda. As amostras foram embutidas em resina, lixadas até a grana 600 e finalmente polidas em pasta de diamante com granulometria de 3 e 1 $\mu$ m. Finalmente, as amostras foram atacadas com nital 2% e analisadas através de microscopia ótica.

#### **4.6.7            Ensaio dos nós I e II**

Para os ensaios dos nós I e II (nós estruturais) se utilizou equipamento específico para o ensaio, conforme figura 4.6. O equipamento consiste de uma estrutura fabricada em perfil estrutural conforme Norma ASTM-A513, sendo fixada no solo por meio de parafusos. Uma célula de carga com capacidade para 5000 kgf (aproximadamente 50 kN) é fixada junto a uma talha manual com curso de 1500 mm e capacidade de 50 kN. Usa-se um inclinômetro, com faixa de varredura angular de  $-45^\circ$  a  $+45^\circ$ , de modo que para o inclinômetro cada 1 volt corresponde a 16,667 graus. Para a célula de carga cada 1 mV corresponde a 1 kgf (9,81 N) ou 1 V a 1000 kgf (9,81 kN). Não é necessária a calibração da célula de carga em cada um dos testes realizados. Ao computador deve-se acoplar placa de conversão e instalar software específico para o teste. O corpo de prova a ser ensaiado deve estar fixado na estrutura do dispositivo de modo que a estrutura não sofra qualquer tipo de deslocamento (ou seja, rígido). O dispositivo deve somente permitir o deslocamento do corpo de prova a ser ensaiado ou do conjunto em teste.

Para todos os dados armazenados em cada ensaio devem ser registrados os diferentes graus (ângulo de inclinação) versus força aplicada. A seta na figura 4.6 identifica o sentido da aplicação da força.



**Figura 4.6:** Figura esquemática para ensaio de nó estrutural para atendimento de norma ECE R 66-00 para Tombamento de Veículos (Fonte: Arquivo Marcopolo S.A. - 2005).

Os ensaios em laboratório fornecem, como dados de saída, um gráfico da carga aplicada versus a inclinação do corpo de prova. A carga limite equivale a um determinado máximo conforme se pode verificar na figura 4.7 onde se tem o gráfico gerado para um corpo de prova. Pode-se verificar que, a partir de determinada carga, o ângulo de inclinação atinge um patamar com leve queda posterior, porém o que é representativo neste tipo de ensaio é a carga limite que determina o ângulo de inclinação sofrido. A partir da carga limite ou máxima, o material do corpo de prova entra em regime plástico, diminuindo gradativamente os valores de carga.



## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

#### 5.1 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os ensaios realizados em laboratório fornecem parâmetros básicos e importantes para que se possa comparar os dois tipos de aço utilizados para fins deste trabalho. Com os resultados obtidos em laboratório é possível definir o prosseguimento dos demais ensaios e cálculos.

Os resultados obtidos em laboratório nos ensaios de névoa salina fornecem valores comparativos entre os aços ZAR 230 e BLAR ZSTE 380, ambos com camada de zinco Z275, conforme norma ABNT 7008:2003. Segundo a norma, Z275 refere-se a camada de zinco depositada sobre o substrato, equivalente a uma massa mínima de 100 g/m<sup>2</sup> de zinco por face. Nas tabelas 5.1 e 5.2 a seguir é possível verificar os resultados obtidos em ensaios de laboratório em câmara de névoa salina, conforme norma DIN 50021:1988.

**Tabela 5.1: Ensaio de névoa salina conforme norma DIN 50021, para o aço BLAR ZSTE 380.**

ENSAIO DE SALT SPRAY ZSTE 380		
CORPO DE PROVA	C V	C B
CP 1	338	75
CP 2	318	68
CP 3	292	78
CP 4	312	63
CP 5	291	65
Média		
Desvio Padrão	19,6	6,4

CP - Corpo Prova; CV - Corrosão Vermelha em horas; CB - Corrosão Branca em horas; Fonte: MARCOPOLO 2005.

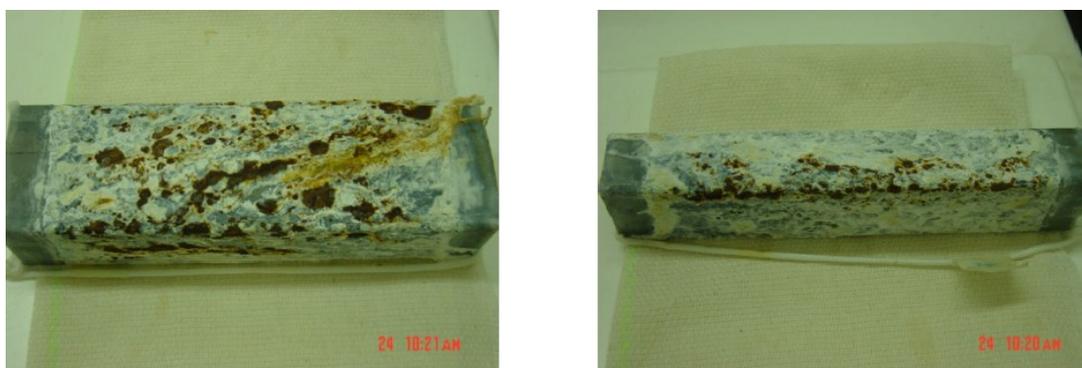
**Tabela 5.2: Ensaio de névoa salina conforme norma DIN 50021, para o aço convencional ZAR 230.**

ENSAIO DE SALT SPRAY ZAR 230		
CORPO DE PROVA	C V	C B
CP 1	256	72
CP 2	278	61
CP 3	290	65
CP 4	285	63
CP 5	275	68
Média		
Desvio Padrão	13,0	4,3

CP - Corpo Prova; CV - Corrosão Vermelha em horas; CB - Corrosão Branca em horas; Fonte: MARCOPOLO 2005.

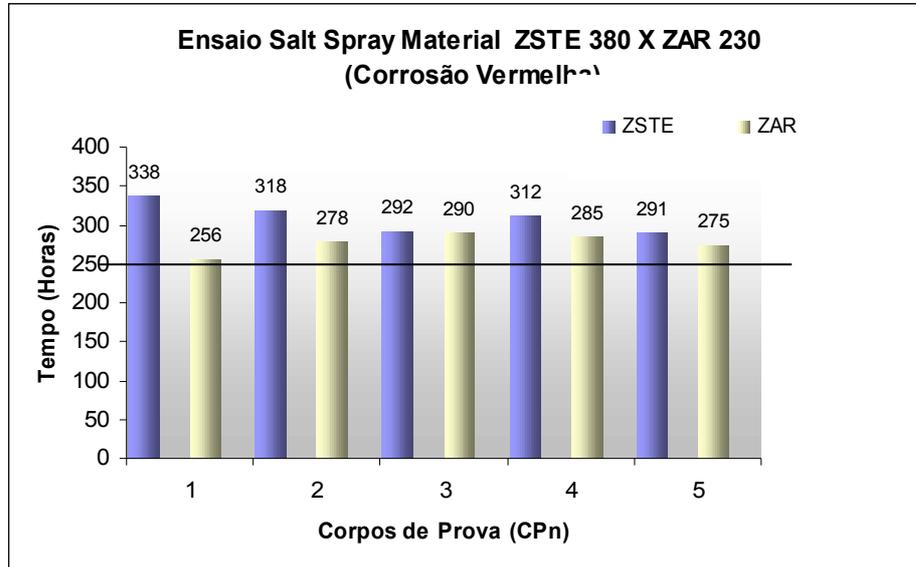
Na figura 5.1 observa-se como os corpos de prova CP1 e CP2 do aço microligado ZSTE 380 ficaram após o término dos ensaios em névoa salina. De acordo com parâmetros adotados pela empresa Marcopolo, os ensaios são considerados satisfatórios quanto atingem 250 horas sem corrosão vermelha (CV), contudo nesse caso preferiu-se prolongar os ensaios para verificar o comportamento da camada de zinco depositada.

Nos ensaios de névoa salina (*salt spray*) a corrosão branca é um referencial para se verificar o tempo que o substrato (aço) pode ficar estocado em ambiente úmido ou desprotegido. De acordo com a quantidade de horas deve-se avaliar o tipo de proteção a aplicar, camada de óleo, pré-pintura entre outros.



**Figura 5.1: Fotografia dos corpos de prova (ZSTE 380, CP1 e CP2) após o final do ensaio em névoa salina (Fonte: Marcopolo, 2005).**

Na figura 5.2 pode-se verificar através do gráfico o comportamento dos materiais analisados quanto a corrosão (somente corrosão vermelha – CV).



**Figura 5.2:** Gráfico de barras comparativo entre os corpos de prova avaliados, ensaio de corrosão, linha determina limite de aprovação 250 horas (névoa salina) (Fonte: *Marcopolo, 2005*).

Os ensaios de imersão em solução com pH básico e pH ácido servem de parâmetros para avaliação da camada de zinco, isto é, a camada protetora do substrato (aço). Nas tabelas 5.3 e 5.4, a seguir, pode-se verificar o desempenho do aço BLAR ZSTE 380 ensaiado. O parâmetro de aprovação neste ensaio é não apresentar corrosão vermelha (CV) antes das 500 horas.

**Tabela 5.3: Ensaio imersão pH 10 para aço BLAR ZSTE 380.**

CORPO DE PROVA	ENSAIO IMERSÃO pH 10	
	C V	C B
CP 1	780	387
CP 2	620	390
CP 3	680	378
CP 4	720	382
CP 5	640	401
Média		
Desvio Padrão	64,2	8,8

CV - Corrosão Vermelha em horas; CB - Corrosão Branca em horas; Fonte: *MARCOPOLO 2005*.

**Tabela 5.4: Ensaio imersão pH 2 para aço BLAR ZSTE 380.**

CORPO DE PROVA	ENSAIO IMERSÃO pH 2	
	C V	C B
CP 1	503,0	99
CP 2	524,0	85
CP 3	547,0	103
CP 4	517,0	95
CP 5	601,0	112
Média		
Desvio Padrão	38,4	9,9

CV - Corrosão Vermelha em horas; CB - Corrosão Branca em horas; Fonte: MARCOPOLO 2005.

Na figura 5.3 pode-se verificar o corpo de prova CP1 após as 503 horas de ensaio em pH 2 para a liga de aço BLAR ZSTE 380.

Os ensaios de imersão para o aço convencional não foram realizados, pois o histórico do material o aprovava nas mesmas condições.



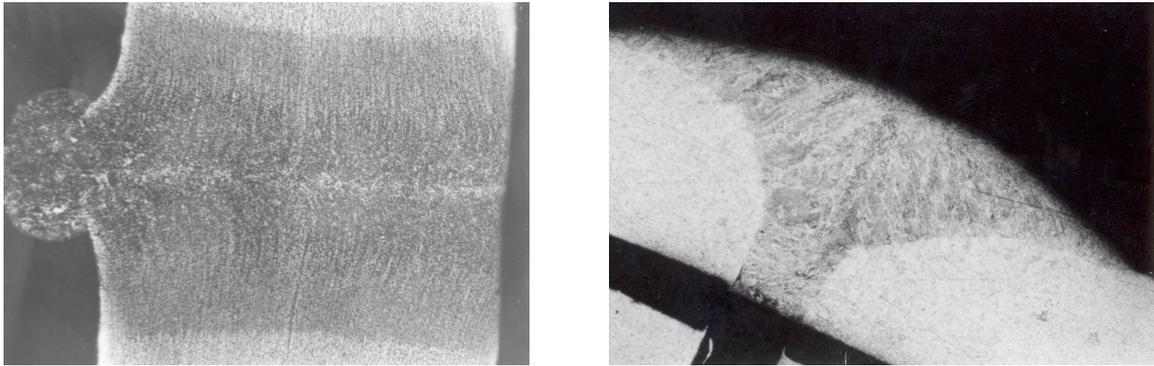
**Figura 5.3: Fotografia do corpo de prova CP1, após as 503 horas de ensaio em pH2 (Fonte: Marcopolo, 2005).**

Na figura 5.4 pode-se verificar o resumo do comportamento do aço microligado ZSTE 380 em forma de gráfico.

---

**Figura 5.4: Gráfico de barras do aço microligado em ensaio de pH2 e pH 10 para verificação do comportamento do revestimento de zinco, material ZSTE 380, linha determina o limite para aprovação, 500 horas. (Fonte: Marcopolo, 2005).**

A análise metalográfica das regiões soldadas é muito importante para que se possa avaliar a homogeneidade desta região, pois a estrutura veicular está sujeita a esforços dinâmicos, provocando uma diminuição da vida útil no caso de falhas como porosidades, incrustações e falta de fusão. Na figura 5.5 pode-se verificar a região de solda dos corpos de prova ZSTE 380 soldados pelo processo MIG/MAG e a região soldada pelo processo ERW (costura dos tubos soldados). Nota-se que tanto a solda ERW como a solda MIG/MAG apresentam boa penetração e uma fusão perfeita entre o material-base e o material de adição. As soldas dos perfis e dos tubos de aço convencional não foram avaliadas, pois estão devidamente validadas pela Marcopolo, ou seja, atendem os valores mínimos determinados por norma e especificação do material.



**Figura 5.5: Região da costura do tubo (ERW) e região soldada dos corpos de prova para ensaios de tração pelo processo MIG/MAG, ampliação 12,5x (Fonte: UCS, 2005).**

Os ensaios de dureza do material são necessário devido principalmente aos tipos de processos que o aço convencional e o aço BLAR estão sujeitos ao longo da linha de montagem das carrocerias dos veículos. A dureza está diretamente relacionada aos processos de fabricação, caso exista diferenças significativas de dureza entre os materiais os processos de fabricação devem ser avaliados. |Ao longo da linha de produção processo como corte, dobra, estampo, conformação e solda são largamente utilizados devido principalmente ao tipo de estrutura, (tubular, soldada). Os valores são comparativos ao aço atualmente utilizado (ZAR 230). Os valores obtidos dos dois materiais devem estar próximos entre si, pois com isso pode-se garantir que não haverá problemas com os processos envolvidos. Na tabela 5.5 pode-se verificar os valores de dureza encontrados para os dois materiais em estudo (aço convencional ZAR 230 e liga BLAR ZSTE 380), cuja escala de dureza utilizada é Rockwell B. Na média os valores obtidos são aceitáveis. A diferença de dureza não pode ultrapassar 20 pontos.

**Tabela 5.5: Ensaio de dureza, aço convencional ZAR 230 e microligado ZSTE 380.**

<b>ENSAIO DE DUREZA HRB</b>		
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>ZAR 230</b>	<b>ZSTE 380</b>
CP 1	68,0	76,0
CP 2	68,5	73,0
CP 3	70,5	75,0
CP 4	72,0	74,5
CP 5	72,5	78,3
CP 6	74,0	78,8
CP 7	69,5	78,8
CP 8	68,5	77,8
CP 9	71,0	77,0
CP 10	70,5	78,1
<b>Média</b>	<b>70,5</b>	<b>76,7</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>1,9</b>	<b>2,0</b>

*Fonte: Marcopolo, 2005*

Para os ensaios de tração de juntas soldadas foram utilizados três corpos de prova de cada material, designados por CP1, CP2 e CP3, tanto para aço convencional ZAR 230 quanto para o aço BLAR ZSTE 380. Os valores encontrados nos ensaios de tração são apresentados nas tabelas 5.6 a 5.8, tanto para o material-base como para o material soldado.

**Tabela 5.6: Ensaio de tração para o aço convencional ZAR 230 soldado.**

<b>ENSAIO DE TRAÇÃO ZAR 230 - soldado</b>				
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento %</b>
CP 1	2,63	12,5	302,7	36,2
CP 2	2,60	12,6	348,5	31,8
CP 3	2,60	12,6	330,8	33,8
<b>Média</b>	---	---	<b>327,3</b>	<b>33,9</b>
<b>Desvio padrão</b>	---	---	<b>23,1</b>	<b>2,2</b>

*Fonte: Marcopolo, 2005*

**Tabela 5.7: Ensaio de tração para o aço microligado ZSTE 380 soldado.**

<b>ENSAIO DE TRAÇÃO ZSTE 380 - soldado</b>				
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento %</b>
CP 1	2,67	12,6	367,5	27,0
CP 2	2,67	12,6	380,2	28,4
CP 3	2,67	12,5	384,2	29,0
<b>Média</b>	---	---	<b>377,3</b>	<b>28,1</b>
<b>Desvio padrão</b>	---	---	<b>8,7</b>	<b>1,0</b>

*Fonte: Marcopolo, 2005*

Para os ensaios de tração do material ZSTE 380 (metal-base) foi utilizado um número maior de corpos de prova, sendo possível constatar que alguns ensaios apresentaram valores de limite de escoamento (LE) levemente inferiores ao estabelecido por norma (LE = 380 MPa).

O material-base ZAR 230 sem solda não necessitou de ensaios devido ao histórico do mesmo apresentar valores de limites de escoamento mínimo superiores aos estabelecidos por norma.

**Tabela 5.8: Ensaio de tração do aço microligado ZSTE 380 (chapa), sem solda.**

ENSAIO DE TRAÇÃO ZSTE 380 – metal base				
CORPO DE PROVA	Espessura (mm)	Largura (mm)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento %
CP 1	2,67	12,5	372,2	23,1
CP 2	2,67	12,5	378,0	27,9
CP 3	2,65	12,5	360,3	24,7
CP 4	2,66	12,5	379,2	26,6
CP 5	2,67	12,5	384,3	22,4
CP 6	2,65	12,5	375,8	22,7
CP 7	2,64	12,5	393,1	22,0
CP 8	2,65	12,5	372,7	23,4
<b>Média</b>	---	---	<b>377,0</b>	<b>24,1</b>
<b>Desvio padrão</b>	---	---	<b>10,9</b>	<b>0,7</b>

*Fonte: Marcopolo, 2005*

Os ensaios dos nós estruturais I e II são apresentados nas tabelas 5.9 a 5.12, de acordo com a carga aplicada em cada nó, ocorrendo um deslocamento proporcional, medida pela inclinação do conjunto testado e o pico da força aplicada. Os nós estão designados por sua posição e pelo tipo de material que os constitui. A norma utilizada para os ensaios dos nós se resume à aplicação de uma carga perpendicular ao corpo de prova (figura 4.6). Os dados de saída do ensaio consistem na força aplicada e inclinação sofrida. Para os cálculos utilizou-se o valor máximo de força; a inclinação em graus foi transformada em mm para comparar com os valores encontrados nos cálculos. A média reflete o controle dos ensaios e a quantidade de corpos de prova está diretamente relacionada ao histórico dos ensaios já executados.

**Tabela 5.9: Ensaio do Nó Estrutural I, aço BLAR ZSTE 380, conforme Norma Interna Marcopolo.**

<b>ENSAIO NÓ ESTRUTURAL I ZSTE 380</b>		
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
ZSTE 1	6372,9	14,89
ZSTE 2	6417,9	13,27
ZSTE 3	6301,1	13,96
<b>Valor Máximo Força</b>	<b>6417,9</b>	<b>14,89</b>
<b>Média</b>	<b>6364,0</b>	<b>14,04</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>58,9</b>	<b>0,81</b>

*Fonte: Marcopolo 2005*

**Tabela 5.10: Ensaio do Nó Estrutural I, aço convencional ZAR 230, conforme Norma Interna Marcopolo.**

<b>ENSAIO NÓ ESTRUTURAL I ZAR 230</b>		
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
ZAR 1	5891,5	16,38
ZAR 2	5858,0	15,50
ZAR 3	5779,0	14,75
<b>Valor Máximo Força</b>	<b>5891,5</b>	<b>16,38</b>
<b>Média</b>	<b>5842,8</b>	<b>15,54</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>57,7</b>	<b>0,82</b>

*Fonte: Marcopolo 2005*

**Tabela 5.11: Ensaio do Nó Estrutural II, aço BLAR ZSTE 380, conforme Norma Interna Marcopolo.**

<b>ENSAIO NÓ ESTRUTURAL II ZSTE 380</b>		
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>
ZSTE 1	2490,5	13,95
ZSTE 2	2586,6	14,71
ZSTE 3	2466,8	15,73
<b>Valor Máximo Força</b>	<b>2586,6</b>	<b>15,73</b>
<b>Média</b>	<b>2514,6</b>	<b>14,80</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>63,4</b>	<b>0,89</b>

*Fonte: Marcopolo 2005*

**Tabela 5.12: Ensaio do Nó Estrutural II, aço convencional ZAR 230, conforme Norma Interna Marcopolo.**

<b>ENSAIO NÓ ESTRUTURAL II ZAR 230</b>		
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Ângulo (graus)</b>

<b>ZAR 1</b>	1867,8	11,80
<b>ZAR 2</b>	1939,4	10,81
<b>ZAR 3</b>	1963,8	9,89
<b>Valor Máximo Força</b>	<b>1963,8</b>	<b>11,80</b>
<b>Média</b>	<b>1923,6</b>	<b>10,83</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>49,9</b>	<b>0,96</b>
<i>Fonte: Marcopolo 2005</i>		

## 5.2 CÁLCULOS DOS NÓS ESTRUTURAIS

De posse dos resultados dos ensaios realizados em laboratórios, buscou-se a validação e calibração dos nós estruturais (I e II) através de análise por elementos finitos. Os valores das cargas serviram como dados de entrada para a análise, bem como os valores das propriedades dos materiais. A utilização dos valores experimentais serve como base de dados para o cálculo da parte da estrutura que representa uma parcela significativa do veículo, conforme determina a norma regulamentadora ECE R66-00.

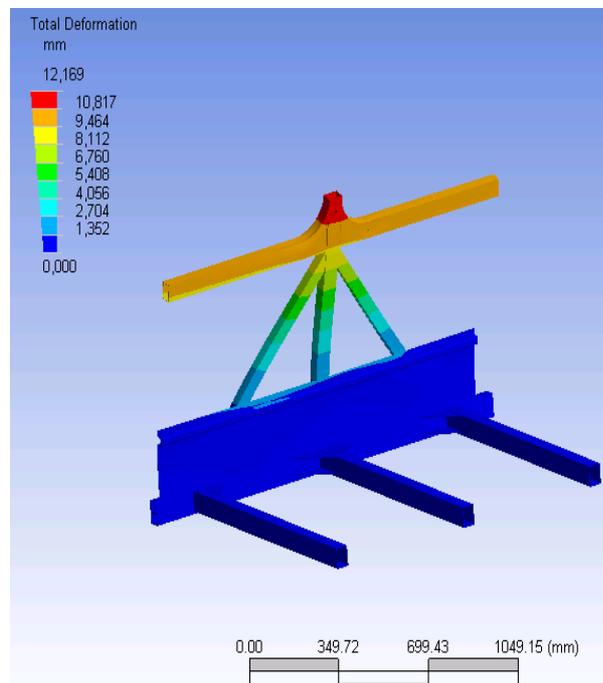
Os dados de entrada para o software de elementos finitos podem ser verificados na tabela 5.13. Na figura 5.6 pode-se verificar os valores obtidos para o nó estrutural I fabricado em material ZSTE 380 quando submetido à carga máxima conforme ensaio experimental. Pode-se verificar ainda, na figura, a deformação resultante da carga aplicada. Os valores estão em milímetros e a carga aplicada em N. A variação de cores na figura representa a deformação ou deslocamento do nó. A carga aplicada no modelo de elementos finitos está localizada no mesmo local da aplicação da carga quando dos ensaios.

**Tabela 5.13: Dados de entrada para o software de elementos finitos.**

PARÂMETROS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS			
PROPRIEDADES	AÇOS		UNIDADES
	ZSTE 380	ZAR 230	

<b>DENSIDADE</b>	$7,85 \times 10^{-6}$	$7,85 \times 10^{-6}$	kg/mm <sup>3</sup>
<b>COEFICIENTE DE POISSON</b>	0,3	0,3	adimensional
<b>LIMITE DE ESCOAMENTO (norma)</b>	380	230	MPa
<b>LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</b>	460	310	MPa
<b>LIMITE DE FADIGA</b>	137,6	86,2	MPa
<b>MÓDULO DE YOUNG</b>	206.000	206.000	MPa
<b>COEF. EXPANSÃO TÉRMICA</b>	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	1/ °C
<b>ALONGAMENTO (MÍNIMO)</b>	18	23	% (base 80 e 50 mm)
<b>CICLOS DE VIDA INFINITA</b>	1 milhão	1 milhão	Ciclos
<b>TIPO DE CONTATO</b>	Colado / perfeito	Colado / perfeito	Tolerância 3 mm
<b>TEMPERATURA</b>	23	23	°C

Fonte: Marcopolo, 2005



**Figura 5.6:** Nó estrutural I – material: aço BLAR ZSTE 380, submetido a uma carga de 6370 N, deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).

As tabelas 5.14 e 5.15 fornecem os valores obtidos de deslocamento dos nós quando submetidos à carga determinada experimentalmente nos ensaios para o aço ZAR 230. Estes valores se referem aos valores máximos obtidos nos ensaios e utilizados para os cálculos por elementos finitos. Obviamente, esperavam-se valores muito próximos para os dois materiais.

**Tabela 5.14: Valores obtidos por cálculo de elementos finitos no Nó Estrutural I: força e deslocamento máximos e modo de frequência (primeiro).**

<b>NÓ ESTRUTURAL I</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>Força máxima (N)</b>	<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>	<b>Modo I Frequência (Hz)</b>
<b>ZAR 230</b>	5890	11,3	46,1
<b>ZSTE 380</b>	5890	11,1	46,5

*Fonte: Marcopolo 2005*

**Tabela 5.15: Valores obtidos por cálculo de elementos finitos no Nó Estrutural II: força e deslocamento máximos e modo de frequência (primeiro).**

<b>NÓ ESTRUTURAL II</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>Força máxima (N)</b>	<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>	<b>Modo I Frequência (Hz)</b>
<b>ZAR 230</b>	1963	13,8	62,6
<b>ZSTE 380</b>	1963	13,6	63,0

*Fonte: Marcopolo 2005*

Nos cálculos executados por software buscou-se o modo de frequência para avaliar como se comportam os materiais, somente como análise comparativa. Tal procedimento não é utilizado para avaliar os módulos estruturais, muito embora os nós possuam valores muito semelhantes dos módulos de frequência.

### **5.3 MELHORIA ESTRUTURAL**

Os métodos de análise estrutural e sua melhoria através do software Ansys® são utilizados por engenheiros como uma ferramenta auxiliar no desenvolvimento de estruturas complexas. Melhoria e otimização podem ser realizadas em problemas estáticos, onde o tempo não é um fator em função da carga, ou em problemas dinâmicos, onde a carga aplicada é uma função do tempo. <sup>[55]</sup>

Na melhoria estrutural buscou-se de forma objetiva uma diminuição de espessura das paredes dos perfis e tubos utilizados na estrutura. Outros métodos de melhoria ou mesmo de otimização poderiam ser utilizados, porém, optou-se pela melhoria somente das espessuras

dos materiais para evitar investimentos em equipamentos e novos processos.<sup>[56][57]</sup> Os primeiros cálculos se referem a um módulo estrutural com os dois materiais em questão, ZAR 230 e ZSTE 380. Isto se fez necessário para uma análise comparativa entre os dois materiais, ou seja, utilizando a mesma carga, avaliou-se como se comporta cada estrutura em termos de deslocamento. De posse dos valores de deslocamento, se inicia a melhoria tendo como base e limites superiores os valores aceitáveis para a Resolução ECE R 66-00.

Na figura 5.7 pode-se verificar o deslocamento do módulo estrutural em aço convencional ZAR 230, causada pela aplicação da carga padrão. Os dados referentes à estrutura e características do veículo para a análise do módulo estrutural são apresentados na tabela 5.15, onde se pode verificar as dimensões externas da estrutura, a Energia Total  $E^*$ , as distâncias do centro de gravidade tanto em relação a frente do veículo, quanto em relação ao solo e o fabricante do chassi e modelo.

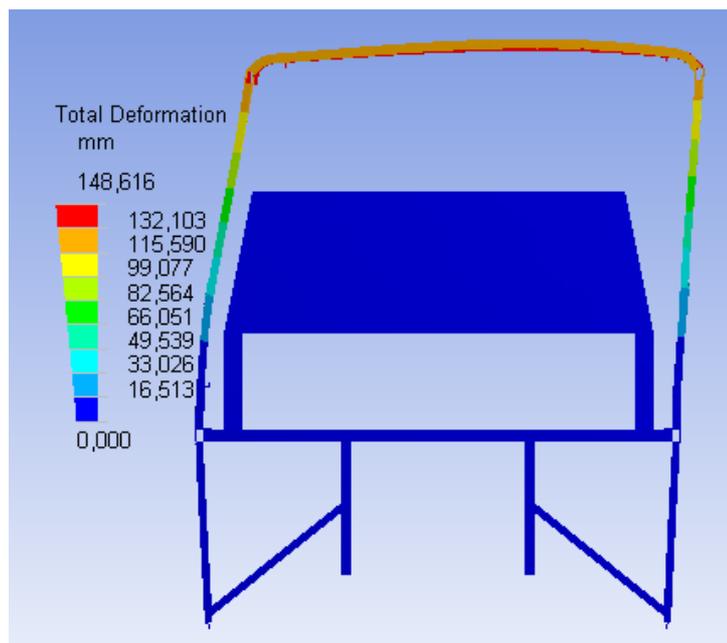
Em seu trabalho Giorda *et al* (2001) analisam o comportamento plástico de uma estrutura de ônibus em condições de tombamento através da norma regulamentadora ECE R66-00 e o tipo de simulação apresentado no trabalho avalia a estrutura tubular de ônibus com 13550 kg. O enfoque do trabalho, porém, é voltada a melhoria de forma de perfis utilizados na estrutura do veículo.<sup>[58]</sup>

**Tabela 5.16: Tabela de dados referente a estrutura do veículo para análise dos módulos estruturais em aço convencional ZAR 230, aço BLAR ZSTE 380 e estrutura otimizada em ZSTE 380.**

CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA DO VEÍCULO		
Descrição	Valores	Unidades
Massa Total	15293	kg
Massa da Estrutura Tubular	2560	kg
Comprimento	12500	mm

<b>Altura</b>	3650	mm
<b>Altura do centro de gravidade</b>	1260	mm
<b>Distância do centro de gravidade /frente</b>	6690	mm
<b>Largura do Veículo</b>	2560	mm
<b>Energia total, <math>E^*</math> (calculada pela equação 3.1)</b>	104,2	kJ
<b>Tipo de estrutura</b>	Tubular	-----
<b>Chassi</b>	MBB	O500

MBB – Mercedes Benz do Brasil. Fonte: Marcopolo 2005



**Figura 5.7: Módulo estrutural de aço ZAR 230 submetido a uma energia de deslocamento conforme a equação 3.1 (Energia Total); deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).**

Pode-se verificar a existência de um gabarito, internamente ao módulo estrutural da figura 5.7, disposto conforme determina a Norma Regulamentadora ECE R66-00. Como o deslocamento da estrutura não teve contato com o gabarito colocado internamente, conclui-se que a estrutura está aprovada para esta condição. Na figura 5.8 pode-se verificar o módulo estrutural já otimizado, sob o conceito de melhoria. Para o primeiro passo de melhoria utilizou-se uma regra prática muito utilizada por algumas empresas na melhoria de chapas e perfis.<sup>[59]</sup> Esta é uma forma de aproximação das espessuras, porém, se faz necessário um estudo profundo e sistemático de outros fatores envolvidos na melhoria, principalmente por que a regra é válida para itens e componentes isolados.

Então, segundo Skärken (2005), pode-se chegar a uma aproximação das espessuras utilizando-se a fórmula 5.1, isto é <sup>[59]</sup>:

$$t_{HS} = t_{MS} \sqrt{\frac{LE_{MS}}{LE_{HS}}} \quad (5.1)$$

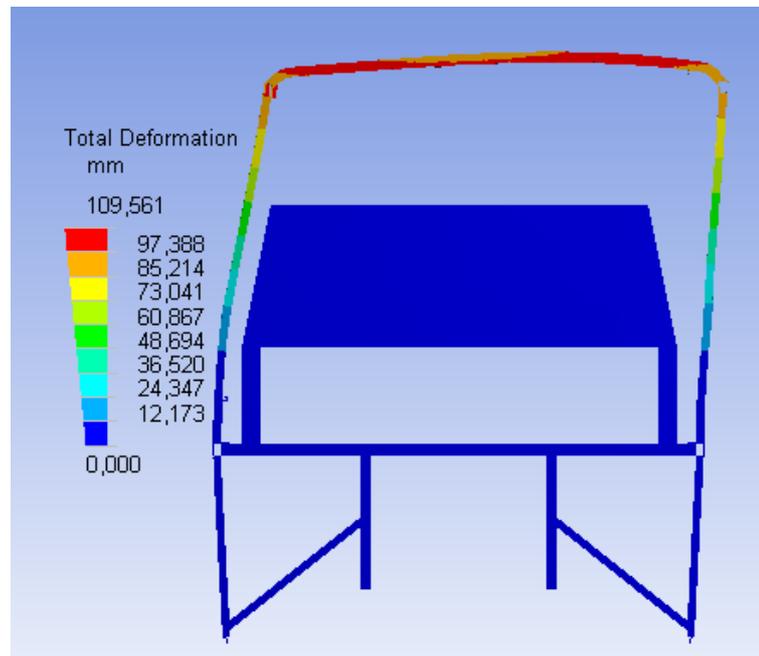
Sendo:

$t_{HS}$  = espessura otimizada (mm)

$t_{MS}$  = espessura do material inicial (mm)

$LE_{MS}$  = limite de escoamento do material inicial (MPa)

$LE_{HS}$  = limite de escoamento do novo material (MPa)



**Figura 5.8:** Módulo estrutural de aço microligado ZSTE 380 submetido a uma energia de deslocamento conforme a equação 3.1 (Energia Total), deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).

O procedimento de melhoria da estrutura iniciou-se pela utilização de um artifício de mudança de espessuras. Este artifício é utilizado geralmente para aproximação grosseira em componentes fabricados em aço. Este modelo é conhecido como “*Rule of Thumb*”.

De posse de valores aproximados, buscou-se um método interativo de análise por elementos finitos, onde após cada novo cálculo se avalia as deformações máximas obtidas

com a mesma carga. Quando o deslocamento máximo se aproxima do valor utilizado como base ZAR 230, estes novos valores de espessura são adotados.

## 5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados é comprovada pela análise e experimentação dos módulos estruturais, segundo as normas vigentes. O processo de validação seguiu um fluxo a partir de ensaios realizados em laboratório, comparativamente ao material convencional e atualmente aplicado nas estruturas veiculares de ônibus (ZAR 230). O módulo estrutural otimizado e confeccionado em aço ZSTE 380 foi submetido aos processos de validação segundo a Norma Regulamentadora ECE R66-00, através do método de elementos finitos, também tendo o módulo em aço convencional como referência. Em termos experimentais, o módulo estrutural otimizado foi submetido às especificações e ensaios de norma nacional específica do CONTRAN, definida pela Resolução número 811 de 08 de abril de 1996, em seu anexo II, itens 1 e 2. Os ensaios foram realizados conforme segue. <sup>[6][7]</sup>

### 5.4.1 Dados do ensaio experimental do módulo otimizado em aço ZSTE 380

#### a) CARGA DE TRAÇÃO LATERAL

$$T = \frac{0,15 \cdot P_{mach}}{NP} \quad (5.2)$$

Onde:

$P_{mach}$  = peso máximo admitido pelo chassi (N);

$NP$  = número de pórticos da superestrutura.

$T$  = Carga em Newton

Para o presente caso, tem-se  $P_{mach} = 245.250$  N e  $NP = 9$ , resultando:

$$T^* = 4086,1 \text{ N}$$

\* Este valor de força deve ser aplicado sobre cada pórtico de janela. Em função de estar sendo aplicada a força no centro de dois pórticos, duplica-se a carga. Logo,

$$T = 8172,2 \text{ N}$$

O módulo estrutural foi fixado em condições semelhantes ao sistema de fixação no chassi, conforme figura 5.9. Na tabela 5.17 pode-se verificar os valores encontrados para a carga, conforme determina a resolução CONTRAN 811/96.



**Figura 5.9:** Módulo estrutural em aço BLAR ZSTE 380 submetido a uma tração lateral, conforme determina a resolução 811 CONTRAN (Fonte: Marcopolo, 2005).

**Tabela 5.17:** Tabela de deslocamentos referente a ensaio de tração lateral de um módulo estrutural otimizado em aço microligado ZSTE 380.

Força (N)	Deslocamento (mm)
0	0
2452,5	23
4905,0	45
7357,5	71
* 8191,4	81
0	** 0,7

\* VALOR NOMINAL (APÓS 5 MINUTOS)

\*\* DESLOCAMENTO PERMANENTE

O ponto de referência para a aplicação da força no ensaio de tração lateral é a união da longarina (tubo) longitudinal do teto, com a longarina superior da lateral.

Para efetuar a leitura no ensaio de tração foi utilizada uma escala milimétrica, acoplada a um dispositivo fixo na base da estrutura, que determinava a leitura dos dados, na medida em que o módulo estava sendo submetido às cargas especificadas.

#### b) CARGA SOBRE O TETO

$$C = \frac{0,5.P_{mach}.2.P_{max}}{L_t} \quad (5.3)$$

Onde:

$P_{mach}$  = peso máximo admitido pelo chassi; (N).

$P_{max}$  = passo máximo das janelas (colunas), isto é, a distância (mm) entre as colunas da superestrutura;

$L_t$  = comprimento do veículo (mm).

Para o presente caso, tem-se  $P_{mach} = 245.250$  N,  $P_{max} = 1600$  mm,  $L_t = 14.000$  mm. Isto resulta:

$$C = 28.018 \text{ N}$$

A carga foi aplicada através de chapas de aço galvanizado, com 28 kg cada, nas seguintes dimensões: 2290 x 1000 x 1,55 (mm).

Para o ensaio de compressão do teto (figura 5.10), a carga foi aplicada sobre as duas colunas (metade da carga sobre cada coluna) e a leitura foi efetuada em etapas, à medida que ia sendo feita a deposição das chapas sobre o teto do módulo. Na tabela 5.18 estão os dados obtidos no ensaio.



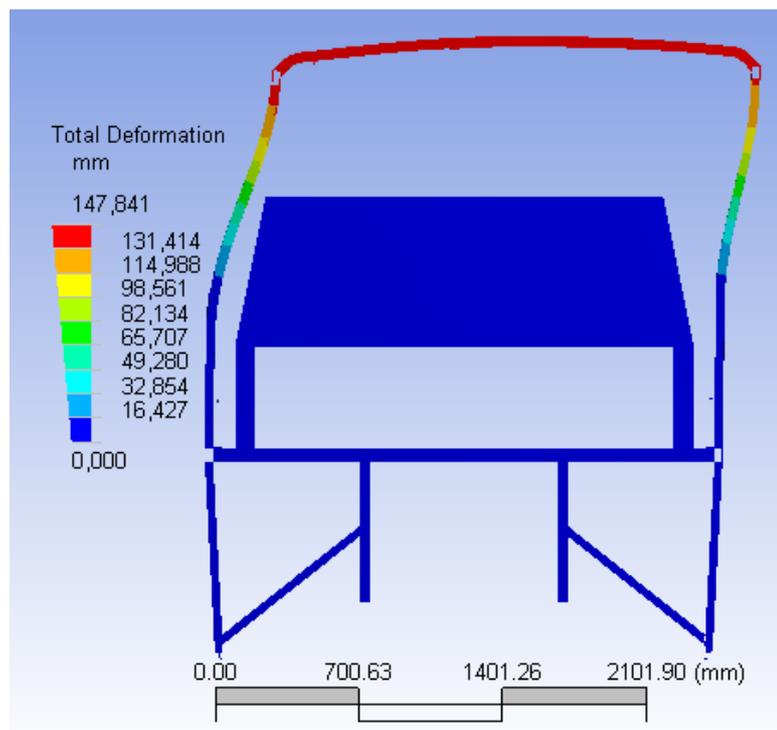
**Figura 5.10:** Módulo estrutural em aço BLAR ZSTE 380 submetido a uma carga (C) no teto da estrutura, conforme determina a resolução do CONTRAN (Fonte: *Marcopolo, 2005*).

Para medir o deslocamento do teto também foram utilizadas escalas milimétricas, fixadas em pontos determinados.

**Tabela 5.18:** Tabela de deslocamentos referente a ensaio de compressão do teto de um módulo estrutural otimizado em aço BLAR ZSTE 380.

No. DE CHAPAS	Força (N)	Deslocamento (mm)
0	0	0
24	6592,3	8,5
48	13184,6	17
72	19776,9	26
96	26369,3	37
103	28292,0	41
* 120	32961,6	50

\* VALOR NOMINAL (APÓS 5 MINUTOS)



**Figura 5.11: Módulo estrutural otimizado de aço BLAR ZSTE 380 analisado por elementos finitos, submetido a uma energia de deslocamento (Nm) conforme a equação 3.1 (Energia Total), deslocamento em mm (Fonte: Marcopolo, 2005).**

Os deslocamentos da estrutura otimizada são apresentados na figura 5.11, onde os valores encontrados não podem ser superiores aos valores encontrados no módulo calculado em aço ZAR 230, ou seja, 148,6 mm.

Segundo Aljawi (2004), valores calculados e experimentais próximos a 10% são relativamente normais de serem encontrados e comparados. Valores mais precisos ou abaixo de 10% geralmente requerem uma acuracidade maior dos equipamentos envolvidos nos ensaios, do tratamento dos dados e principalmente no conhecimento avançado do corpo técnico envolvido no trabalho.<sup>[60]</sup> Algumas empresas, tais como SSAB, IDIADA e BKS Advantech, trabalham com valores na faixa de 5% a 15%, comparativamente aos ensaios em laboratório. Isto se deve principalmente ao banco de dados já formado e corpo técnico qualificado para trabalhar com elementos finitos.

Na validação por software para fins deste trabalho os valores encontrados poderiam estar afastados de um máximo de 15 % dos valores experimentais, considerando os deslocamentos máximos obtidos com aplicação das cargas em questão.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os resultados encontrados no processo que envolveu a substituição de um aço convencional ZAR 230 por um aço BLAR ZSTE 380 podem-se identificar quatro fases conforme a figura 6.1. As etapas do trabalhos estão resumidas.

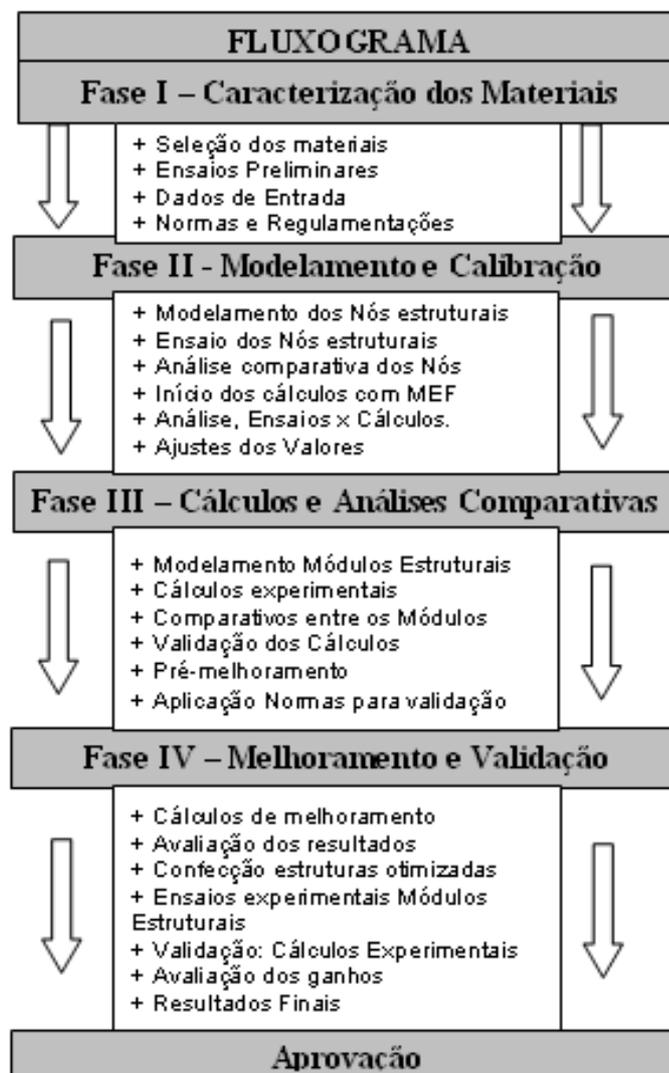


Figura 6.1: Etapas do desenvolvimento do trabalho e as respectivas fases até a aprovação. (Fonte: Marcopolo, 2005).

Os resultados encontrados nos ensaios experimentais e simulados podem ser resumidos conforme a tabela 6.1, sendo possível verificar os valores médios encontrados, sempre comparando os dois tipos de materiais objeto deste estudo: aço convencional ZAR 230 versus aço microligado BLAR ZSTE 380.

**Tabela 6.1: Validação experimental e calculada obtida pelos ensaios na estrutura de aço microligado em estudo (ZSTE 380) em substituição ao aço convencional ZAR 230.**

<b>VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Material</b>		<b>Unidade</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Status</b>
	<b>ZAR 230</b>	<b>ZSTE 380</b>			
Névoa salina - CV	276,8	310,2	horas	250	aprovado
Névoa salina - CB	65,8	69,8	horas	60	aprovado
Imersão pH 10	603	688	horas	500	aprovado
Imersão pH 2	513	538,4	horas	500	aprovado
Solda	OK	OK	NE	NE	aprovado
Dureza	70,5	76,7	HRb	NE	aprovado
Tração Metal Base (ZAR 230 Histórico)	305	377	MPa	LE	restritivo *
Alongamento	23	18	%	18	aprovado
Tração, CP soldado.	327	377	MPa	LE	aprovado
Nó Estrutural I	13,6	11,2	mm	13,6	aprovado
Nó Estrutural II	12,5	12,8	mm	12,5	aprovado
<b>Cálculos de deslocamento máximos por MEF (Ansys®)</b>					
Nó Estrutural I	11,3	11,1	mm	13,6	aprovado
Nó Estrutural II	13,8	13,6	mm	12,5	reprovado
Módulo Estrutural (Normalizado)	148,6	109,5	mm	148,6	aprovado
ECE R 66-00 – MEF	-	137,2	mm	150	aprovado
<b>Validação do Módulo Melhorado</b>					
Módulo Estrutural melhorado	NC	147,8	mm	148,6	aprovado
CONTRAN (Teto) - Experimental	-	50	mm	70	aprovado
CONTRAN (Lateral) - Experimental	-	81	mm	140	aprovado
Redução de Massa no Veículo	1965,6	1607,3	kg	1965,6	-358,3
NC - Não calculado; NE - Não especificado; LE - Limite de Escoamento; (Fonte: Marcopolo, 2005).					
* Restritivo devido ao valor mínimo aceitável para o material ser 380 MPa, porém correções para os demais lotes já foram adotadas.					

Os ensaios de névoa salina e imersão forneceram resultados quanto a proteção de zinco aplicada sobre o substrato para os dois materiais ensaiados. Os resultados atenderam as normas de 250 horas sem pontos de corrosão vermelha em névoa salina e 500 horas em imersão.

Na análise por elementos finitos verificou-se que o nó estrutural II não atingiu os valores de referência ou parâmetro para aprovação. Este fato não pode ser avaliado isoladamente, pois os ensaios e validação do módulo estrutural mostram um campo bastante significativo para trabalho quando comparado com os valores aceitáveis pelas normas.

Os ensaios metalográficos se fizeram necessário devido principalmente ao tipo de conformação que estão submetidas as chapas para se chegar aos perfis e tubos utilizados, conformação a frio de perfilamento. A avaliação foi comparativa e visual, verificando a penetração da solda do processo utilizado (ERW).

A dureza dos materiais em questão é importante devido principalmente aos tipos de processos a que estão sujeitos: conformação, dobra, solda, corte por plasma, corte com ferramenta, entre outros. Caso as durezas dos materiais tivessem uma diferença muito grande, alguns processos de fabricação teriam que ser revistos e/ou estudados novamente. Como os ensaios não mostraram uma diferença significativa entre o ZAR 230 e ZSTE 380, os processos atuais podem ser mantidos.

Os ensaios de tração foram relevantes para comparar as propriedades mecânicas encontradas nos corpos de prova com os valores mínimos determinados em cada norma. Os corpos de prova soldados utilizados demonstraram que os valores encontrados estão de acordo com os corpos de prova sem solda.

Os ensaios em laboratório dos nós estruturais se constituíram no ponto de partida para uma avaliação mais profunda do comportamento dos materiais em estudo e serviram de modelos para a calibração do software de elementos finitos utilizado. Analisando-se os valores encontrados nos ensaios de laboratório e os valores encontrados nos cálculos, pode-se afirmar que as diferenças estão dentro do esperado, ou seja, menor que 10 %. Utilizaram-se várias simulações (explicadas a seguir) para que os resultados encontrados pudessem ser confiáveis.

O ponto mais importante do trabalho e deste estudo está na validação e substituição do material proposto. Os resultados decorrentes da substituição de aço convencional por liga BLAR no módulo estrutural permitiu a redução de massa utilizando-se para isto as normas ECE R 66-00 e CONTRAN 811/96. De posse dos valores obtidos nos ensaios dos nós estruturais e dos parâmetros básicos de entrada para o software, bem como do uso da equação 5.1, iniciou-se a determinação das novas espessuras das paredes dos tubos e perfis, esperando reduzir a massa do módulo estrutural estudado. Para isso foram avaliados todos os perfis e tubos envolvidos na confecção do módulo estrutural. Após cálculos preliminares, foram realizados interativamente cálculos e simulações, utilizando-se software de elementos finitos, de modo a verificar se o comportamento do módulo estrutural atenderia aos valores mínimos exigidos pelas normas.

Quando os valores de deslocamento do módulo estrutural melhorado chegaram próximos aos valores do material a ser substituído (ZAR 230), os cálculos foram concluídos e os valores de espessuras obtidos foram adotados como base na redução de massa da superestrutura. Na tabela 6.2 pode-se verificar os valores comparativos de deslocamento do módulo estrutural, considerando os dois materiais com as atuais espessuras de paredes e para o módulo estrutural já melhorado.

**Tabela 6.2: Valores calculados de deslocamento dos módulos estruturais submetidos a uma carga conforme determina a norma ECE R 66-00.**

<b>Material</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>
ZAR 230	148,6
ZSTE 380	109,6
ZSTE 380 (estrutura melhorada)	147,8
<i>(Fonte Marcopolo, 2005)</i>	

De posse destes valores partiu-se para a validação do módulo estrutural conforme determina a resolução CONTRAN 811/96, onde a estrutura é submetida a uma carga lateral e

a uma carga colocada sobre o teto da estrutura. Os valores encontrados estão referenciados na tabela 6.3, onde é possível verificar os valores obtidos nos ensaios e o que determina a Resolução do CONTRAN 811/96. <sup>[7]</sup>

**Tabela 6.3: Valores de deslocamento dos módulos estruturais submetidos a uma carga conforme determina CONTRAN 811/96.**

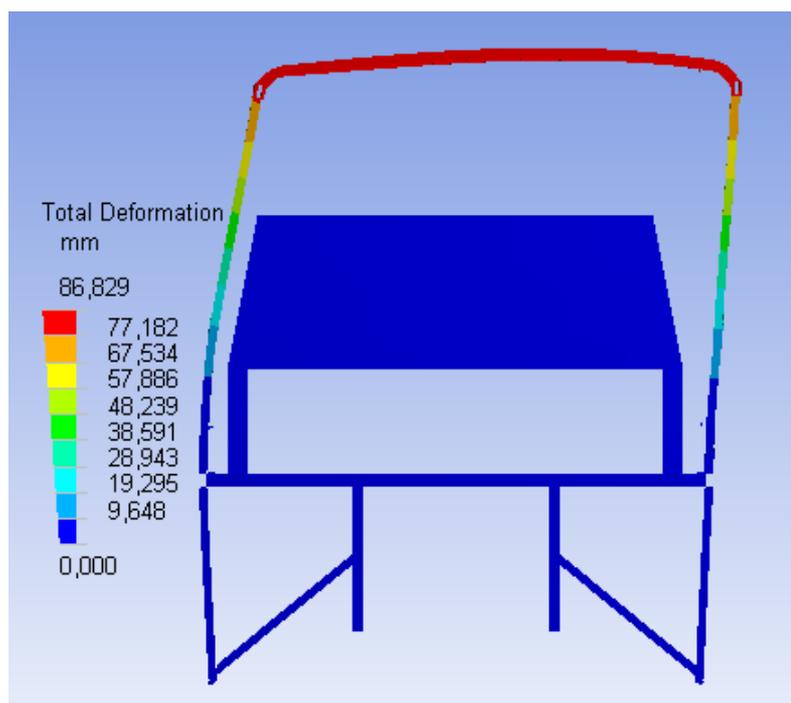
Posição	Deslocamento (mm)	Deslocamento máximo estabelecido pela Resolução CONTRAN 811/96 (mm)
Teto	50	70
Lateral	81	140

*(Fonte Marcopolo, 2005)*

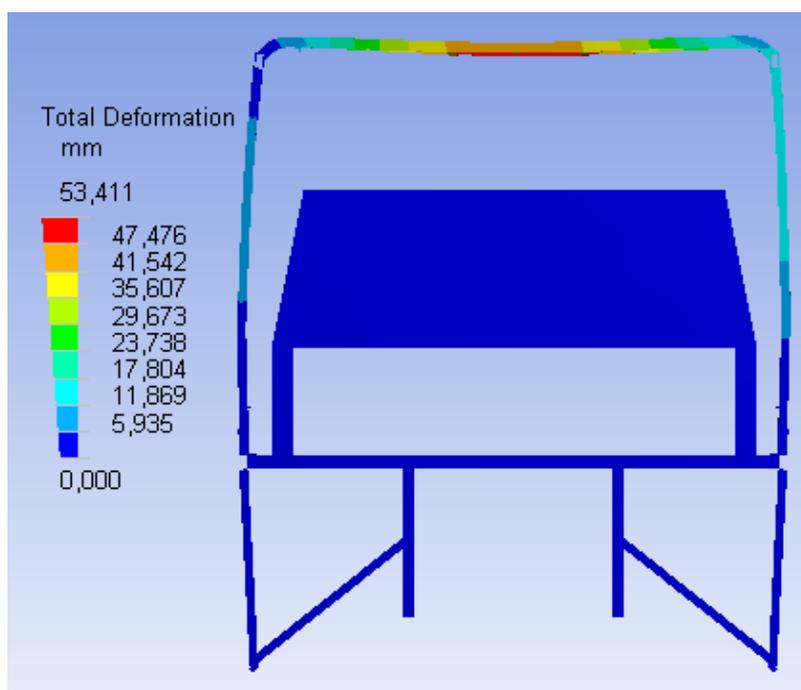
De acordo com os valores encontrados nos cálculos utilizando-se o software de elementos finitos e valores obtidos experimentalmente no módulo estrutural, pode-se concluir que a melhoria está validada. O ganho com esta substituição de materiais se reflete diretamente na redução de massa de cerca de 360 kg para a estrutura completa do veículo, refletindo indiretamente na redução de consumo de combustível, redução de emissão de poluentes e redução do consumo de pneus, devido a menor massa total do veículo.

De acordo com a tabela 6.1 e os ensaios experimentais conforme CONTRAN 811/96 pode-se verificar que os parâmetros e valores encontrados permitem afirmar que o método de elementos finitos utilizado e os ensaios em laboratório são por si capazes de homologar o aço BLAR ZSTE 380 em substituição ao aço convencional ZAR 230.

O deslocamento calculado no módulo melhorado em aço microligado ZSTE 380 pode ser verificado nas figuras 6.2 e 6.3. A tabela 6.4 apresenta o resumo comparativo dos ensaios experimentais e valores encontrados por cálculo.



**Figura 6.2:** Modelo melhorado em ZSTE 380, tração lateral conforme determina CONTRAN 811/96, utilizando-se software de elementos finitos Ansys®. (Fonte: Marcopolo, 2005).



**Figura 6.3:** Modelo melhorado em ZSTE 380, carga sobre o teto conforme determina CONTRAN 811/96, utilizando-se software de elementos finitos Ansys®. (Fonte: Marcopolo, 2005).

**Tabela 6.4: Tabela comparativa entre os valores encontrados experimentalmente no módulo melhorado ZSTE 380 e valores calculados por elementos finitos.**

<b>COMPARATIVO NO ENSAIO EXPERIMENTAL DA RESOLUÇÃO CONTRAN 811/96 x CALCULADO (Ansys®)</b>				
<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>EXPERIMENTAL (mm)</b>	<b>CALCULADO (mm)</b>	<b>DIFERENÇA (%)</b>	<b>NORMA 811/91 (mm)</b>
<b>TETO</b>	50	53,4	6,8	70
<b>LATERAL</b>	81	86,8	7,1	140

*Fonte Marcopolo, 2005*

Avaliando os ensaios experimentais e o valor encontrado pelos cálculos pode-se dizer que os mesmos estão muito próximos entre si (cerca de 7%), o que valida de forma conclusiva a substituição do aço convencional ZAR 230 por aço BLAR ZSTE 380, visto que as diferenças entre os valores calculados versus os valores experimentais são inferiores a 10 %, conforme cita Aljawi (2004).<sup>[60]</sup>

Estes valores da tabela 6.4, além de serem aceitáveis, também contribuem para o fator de segurança. Muitos fatores podem ser responsáveis por esta diferença de 7 % entre eles pode-se citar: os defeitos referentes a solda, as diferenças de geometria entre o modelo virtual e experimental, as propriedades mecânicas dos materiais, visto que se utilizou valores mínimos para os cálculos, entre outros fatores pertinentes as medições e sistemas utilizados para medição.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES**

Nada mais gratificante e importante para um trabalho de dois anos que a chegada ao final tendo-se ganhos e aprendizados. Primeiramente, por poder unir a ciência dos materiais com a engenharia mecânica, segundo por evidenciar os ganhos quando se utiliza um procedimento claro, objetivo e baseado em normas que regulamentam as atividades técnicas de projetos.

O estudo do comportamento de aços microligados avança a passos largos e a cada dia surgem novas técnicas, novos materiais e conseqüentemente novas dúvidas. Neste trabalho buscou-se de maneira clara verificar a possibilidade de contribuir tanto para ciência dos materiais como para o crescimento e aplicabilidade do conhecimento em problemas que hoje a indústria automotiva mundial busca soluções. Aplicabilidade de materiais que proporcionem maior conforto ao usuário, menor peso estrutural, menos poluição e principalmente menor consumo de combustível.

Neste trabalho pode-se afirmar que o objetivo foi alcançado. Iniciou-se com o estudo das propriedades básicas dos materiais estudados ZAR 230 e ZSTE 380. Verificaram-se desde a deposição de zinco para evitar a corrosão dos substratos, ensaios de dureza, pensando nos processos de fabricação, ensaios dos nós estruturais e módulos, até uma efetiva e exaustiva busca da menor massa estrutural, ainda atendendo às normas hoje vigentes no Brasil e na Europa no que tange a tombamento de veículos de transporte coletivos de passageiros.

Com os objetivos alcançados e um ganho de aproximadamente 360 kg em uma estrutura que pode em muitos casos, dependendo do comprimento do veículo e de suas características, ultrapassar a 2560 kg, (ganho de 14% de redução de massa na estrutura), tem-se a

possibilidade de acrescentar mais 5 lugares (passageiros) em um veículo convencional. Os ganhos observados com a substituição do material ZAR 230 por aço BLAR ZSTE 380 não necessitaram de mudanças significativas nos processos de conformação, o que refletiu diretamente em ganhos de aproximadamente 8% na redução de custos comparativamente ao material utilizado anteriormente, ZAR 230.

Para este trabalho, todas as exigências das normas foram cumpridas de acordo com o que hoje existe de mais moderno tanto para os ensaios como para os cálculos, porém, se faz necessária a construção de um veículo para que, de forma sistêmica, se avaliem os resultados obtidos neste trabalho e compare com valores de campo. Atualmente, ensaios desta natureza necessitam de pelo menos 36 meses e mais de 100.000 km rodados em diversos tipos de terrenos, muito embora os valores citados possam ser diferentes para cada fabricante de ônibus. Podem também ser otimizados, utilizando-se ensaios acelerados em pistas de testes, ou simulações via métodos numéricos, similarmente o que se verifica na indústria automobilística.

Além dos ganhos na redução de massa e custos, o trabalho apresenta o pioneirismo no Brasil a utilizar aços microligados na confecção de estruturas para ônibus. O desenvolvimento desta aplicação gerou a oportunidade de novos trabalhos em redução de massa e custos em outros produtos e estruturas de veículos fabricados no Brasil para o transporte de passageiros.

## CAPÍTULO 8

### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Avaliar o comportamento desta estrutura em campo utilizando sensores tipo *strain-gages*, em especial o comportamento das juntas e uniões soldadas;
- 2- Estudar o comportamento em fadiga deste novo material utilizado em estrutura para ônibus, por se tratar de um material não-convencional no Brasil para esta aplicação.
- 3- Avaliar o comportamento metalúrgico-mecânico do aço BLAR ZSTE 380 nas regiões unidas pelo processo de soldagem devido à influência dos elementos de liga.
- 4- Calcular a estrutura alterando a geometria e a secção dos perfis e tubos envolvidos, buscando-se otimizações de forma, mudanças de conceitos e tipo de estrutura.
- 5- Criar um procedimento para a substituição e implantação de melhorias na substituição de materiais em estruturas submetida a esforços dinâmicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IISI. **International Iron and Steel Institute**. Steelmaking Conference, 2000. Disponível em: <[www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)>. Acesso em: jul. 2005.
- [2] AEI. Automotive Engineering International. **Automakers apply advanced materials to stem the rising tide of weight from increasing safety and convenience features**, Vol.113, nº.8, 2005. Disponível em: <[www.aei-online.org](http://www.aei-online.org)>. Acesso em: ago. 2005.
- [3] SANTOS M. M. M. A. **Aços galvanizados para indústria automobilística**. IGEA – Área de Operações Industriais 2 – AO2, Porto Alegre, Outubro, 2000 Disponível em: <[www.igea.com.br](http://www.igea.com.br)>. Acesso em: 15 jan. 2005.
- [4] ULSAB. Ultra light steel auto body consortium. **Final report, v. 1.0.2**, Phase 2 march, 1998. Disponível em: <[www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org)>. Acesso em: dez. 2005.
- [5] MAGNABOSCO, R. **Aço ARBL para fabricação de rodas automotivas – microestruturas, comportamento mecânico e vida em fadiga**. XVI – COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), nov. 2001.
- [6] SEDATEC. **Manual classificado de reglamentación**. R3: Resistencia al vuelco. Autocares (T.C.P.): Reglamento 66R00. Diciembre 1997.
- [7] CONTRAN. **Resolução CONTRAN n. 811/96**. Estabelece os requisitos de segurança para veículos de transporte coletivo (ônibus e microônibus) de fabricação nacional e estrangeira. CONTRAN, 1996.
- [8] SOUTH AFRICAN STANDARD. **The strength of large passenger vehicle super-structures (roll-over protection)**. South African: The South African Bureau of Standards, 1992.
- [9] ANSYS USER GUIDE. **Department of mechanical engineering**. Ansys user guide. University of Sheffield, Miami, USA. s/d.
- [10] ATS. International Steelmaking Conference. **High-strength structural and high-strength low-alloy steels**, Art.75, 2005. Disponível em: <[www.key-to-steel.com/articles/art75.htm](http://www.key-to-steel.com/articles/art75.htm)>. Acesso em: jul. 2005.
- [11] AWS. American Welding Society. **Materials and applications – Part 2**. 8th Edition, Vol. 4. Miami, USA. 1998.

- [12] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992.
- [13] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7008**. Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [14] WALLENTOWITZ, H.; LEYERS, J.; PARR, T. **Materials for future automotive body structures**. Business briefing: global automotive manufacturing e technology. 2003.
- [15] JEANNEAU, M.; PICHANT, P. **The trends of steel products in the European automotive industry**. 55<sup>th</sup> Congress of ABM, Brazil, p. 1399-1408, Nov., 2000.
- [16] PENHA J., F. **O zinco e suas aplicações**. [mensagem pessoal] flavio@cmm.com.br em jun. 2005.
- [17] AGA. AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Sustainable Development & Hot-Dip Galvanizing. **Committed to a better environmental social economic future**, USA, p1-7, 2002. Disponível em <www.galvanizeit.org>. Acesso em: ago. 2005.
- [18] AUTO/STEEL PARTNERSHIP. **A guide to corrosion protection**, an analysis of corrosion related issues for passenger car and light truck underbody structural components. Michigan: USA, 1999. Disponível em: <www.as-p.org>. Acesso em set. 2005.
- [19] IZA. Zinc coatings protections steel. **International Zinc Association**, Brussels, Belgium p. 1-17, 2000. Disponível em: <www.zincworld.org>. Acesso em: set.2005.
- [20] AGA. AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. **Welding & hot-dip galvanizing**, USA, p1-8, 2002. Disponível em: <www.galvanizeit.org>. Acesso em: ago. 2005.
- [21] CUNHA, L. J. G. da. **Solda**: como, quando e por quê. 2 ed. Porto Alegre: Luzzatto, 1989.
- [22] MARQUES, P. V. **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte: ESAB, 1991.
- [23] SSAB TUNNPLAT. **Sheet steel joining handbook**. Sweden. SSAB Tunnplat, 2004. Disponível em: <ssabdirect.com >. Acesso em: jan. 2006.
- [24] MODENESI, P. J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. UFMG. Belo Horizonte: ESAB, 2001.
- [25] BRAZ, M. H. P. **Propriedades de fadiga de soldas de alta resistência e baixa liga com diferentes composições microestruturais**. 1999. 118 p. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo: 1999.

- [26] NEVES, F. O.; REGONE, W.; BUTTON, S.T. **Análise do comportamento microestrutural de um aço microligado por simulação física análoga ao forjamento a quente**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. São Paulo, s/d.
- [27] International Steelmaking Conference. High-strength structural and high-strength low-alloy steels, 2000. Disponível em: <[www.key-to-steel.com/viewArticles/asp?ID=85](http://www.key-to-steel.com/viewArticles/asp?ID=85)>. Acesso em: ago. 2004.
- [28] SAE. **Surface vehicle recommended practice**. Warrendale: SAE J2340, Out. 1999.
- [29] International Iron & Steel Institute. **Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines**. March, 2005. Disponível em: <[www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org)>. Acesso em: jan. 2005.
- [30] SENUMA, T. **Present status of and future prospects for precipitation research in the steel industry**. Japan: September, 2001.
- [31] KERN, A.; DEGENKOLBE, B.; SCHRIVER, U. **Computer modeling for the prediction of microstructure development and mechanical properties of HSLA steel plates**. Germany, 1991.
- [32] ASM INTERNATIONAL. **High-strength low-alloy steels**. Ohio, USA, 2001.
- [33] ASM INTERNATIONAL. **Metallographer's guide - practices and procedures for irons and steels**. The materials information society. Ohio, 2001.
- [34] DEARDO, A.J. **Physical metallurgy of the thermo mechanical processing of microlloyed steels**. University of Pittsburgh. Basic metals processing research institute. USA, 1998.
- [35] GORNI, A. A.; MEI, P. R. **Aços alternativos ao HY-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido**. Metalurgia e Materiais. Ouro Preto, p. 287-293. Out. 2003.
- [36] GORNI, A. A. et al. **Fatores que afetam a razão elástica de chapas grossas de aço microligado**. 39º Seminário de Laminação – Processo e Produtos Laminados Revestidos, ABM, Ouro Preto: Out., 2002.
- [37] GORNI, A. A.; CAVALCANTI, C. G. **Modelamento matemático das temperaturas críticas da laminação controlada através de equações empíricas e redes neurais**. 53º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte: Set., 1998.
- [38] SILVA, A. L.V. C. e; AVILLES, R. R. de; CORDEIRO, N. B. **Modelos para a solubilidade de precipitados relevantes para a laminação a quente de aços**. 54º Congresso da ABM, São Paulo: Jul., 1999.

- [39] GORNI, A. A.; CAVALCANTI, C. G. **Efeito dos elementos de liga sobre a resistência à deslocamento a quente de aços ao carbono e microligados**. 2º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, ABM, São Paulo: Out., 1997.
- [40] TAKITA, M.; OHASHI, H. **Application of high-strength steel sheet for automobiles in Japan**. ATS International Steelmaking Conference Paris, Nippon Steel Corporation. October, 2001.
- [41] KRUPITZER, R. P. **Designing and manufacturing vehicles with advanced high-strength steels**. Galvatech 04 Conference Proceedings, American Iron and Steel Institute, 2004.
- [42] BUCHAIM, R. **Treliças isostáticas**. Departamento de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, UEL / CTU, 1999.
- [43] RICARDO, Luiz Carlos Hernandes. **Utilização do método dos elementos finitos na indústria automotiva**. São Paulo: SAE Brasil, 1978.
- [44] SCHUMACHER, A.; NUSSBAUMER, A.; HIRT, M. A. **Modern tubular truss bridges**. Steel Structures Laboratory, 2001.
- [45] TOYODA, S.; SUZUKI, K.; SATO, A. **High strength steel tubes for automotive suspension parts**. p. 32-37. JFE Technical Report, May, 2004.
- [46] NAKAGAWA, H.; MATSUMARA Y.; ITO, S.; SHIRATORI, A.; YOSHIDA, M.; FULII, K.; MORI, H. **Development of Mitsubishi "I" body**. Technical review, nº16, p. 33-40, 2004.
- [47] THOMPSON, L. L.; LAMPERT, J. K.; LAW, E. H. **Design of a twist fixture to measure the torcional stiffness of a Winston cup chassis**. SAE, vol. 1, p. 1-10, Michigan: November, 1998.
- [48] CORUS. **Design of SHS welded joints**. Corby, Northlands, UK, 2001. Disponível em: <[www.corusgroup.com](http://www.corusgroup.com)>. Acesso em: set., 2005.
- [49] HUEBNER, K.; THORNTON, E. **The finite element method for engineers**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons.
- [50] RICARDO, L.C.H.; MIRANDA, R.J.P.C.; DELIJACOV, S. **Producers to apply finite elements analysis in automotive structures**. [mensagem pessoal] fluz.ricardo@poli.usp.br, University of São Paulo, São Paulo: nov. 2005.

- [51] SAUTER, J.; LAUBER, B. **Structural optimization** – Integration and Gaps in Workflows of Numerical Simulation Processes. Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe, Deutschland. TRW automotive, November, 2003.
- [52] GLAD, M.; BECHTEL, M. M. **Thickness optimization as a tool for evaluation of structures**. Germany, April, 2005.
- [53] EREK, M. I.; YAY, K. **Computer-aided design analysis of bus structures**. Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Istanbul Gümüssuyu. Istanbul, 1999.
- [54] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1974.
- [55] EPSTEIN, K. **Analysis and optimization of complex structures**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. New York, 2001.
- [56] DECICCO, J. M. **Steel and Iron Technologies for Automotive Light weighting**. Environmental Defense, March, 2005.
- [57] GASTALDIN, D.; MARTELLA, P. **Analise numerica del ribaltamento di un autobus: valutazione delle conseguenze sui passeggeri**. AIAS, XXXI - Convegno Nazionale, Parma: September, 2002.
- [58] GIORDA A.; MARTELLA, P.; PERONI, L.; VADORI, R. **Analisi del comportamento strutturale di un bus in condizioni di roll-over com il metodo multibody**, AIAS 2001 – XXX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analise delle Sollecitazioni, Alghero (SS), 12-15 Settembre 2001.
- [59] SKÄRHEM, Sara. **High strength steel, upgrading tubes for bus structure**. Caxias do Sul: SSAB, Reg. nr. 05024, Nov. de 2005.
- [60] ALJAWI, A.A.N.; ABD-RABOU, M.; ASIRI, S. **Finite element and experimental analysis of square tubes under dynamic axial crushing**. ECCOMAS – European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Jyvaskyla: July, 2004.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5770**. Determinação do grau de enferrujamento de superfícies pintadas. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 1984.

ASHBY, M.F.; CEBON, D. **Materials selection mechanical design**. Paris, june, 1993.

\_\_\_\_\_. **Thin-walled welded steel tube forming**. Manufacturing, ago. 2002.

\_\_\_\_\_. The microstructure of submerged arc-weld deposits for high-strength steels. **Journal of Material Science**, n. 24, 1989.

BARONE, M. **The process improvement impact on the styling workflow of an industrial design company**. The Eurographics Association, 2004.

BURG, T.; CROSKY, A. **Materials for aeronautical engineering**. School of Materials Science and Engineering University of New South Wales, 2001.

CAVALERI, L.; PAPIA, M. **A new dynamic identification technique**: application to the evaluation of the equivalent strut for infilled frames. *Engineering Structures* 25, 2003.

CETIN, O.L.; SAITOU, K. **Decomposition-based assembly synthesis for structural modularity**. v. 126. Michigan: march, 2004.

CHUZHOY, L. (org.). **Materials development**. Integrated approach for development of energy-efficient steel components for heavy vehicle and transportation applications. Progress Report, 2003.

COGURE, Linda; MACIEL, Márcia Lopes. **Alta performance**. Siderurgia 1, abr. 2003.

CPICA. **Reglamento para la habilitacion de vehiculos de autotransporte publico de pasajeros**. Buenos Aires: Ministério de Obras y Servicios Publicos, abr. 1988.

CSN. Companhia Siderúrgica Nacional. **Aço zincado por imersão a quente**. Rio de Janeiro: CSN, s/d.

DESIGNATION A 1008/A 1008M-05. **Standard specification for steel, sheet, cold-rolled, carbon, structural, high-strength low-alloy with improved formability, solution hardened, and bake hardenable**. West Conshohocken, s/d.

DESIGNATION A 1011/A1011M-05. **Standard specification for steel, sheet and strip, hot-rolled, carbon, structural, high-strength low-alloy and high-strength low alloy with improved formability.** West Conshohocken, s/d.

DESIGNATION A 653/A 653M-05. **Standard specification for steel sheet, zinc-coated (galvanized) or zinc-iron alloy-coated (galvannealed) by the hot-dip process.** West Conshohocken, s/d.

DIN 50017. **Condensation water test atmospheres.** Berlin, out. 1982.

DIN 50021. **Salt spray testing.** Berlin, jun. 1988.

FIAT AUTO NORMAZIONI. **Norma Materiali 52815.** Lamie e nastri di acciaio multiphase ed ultra-altoresistenziali laminate a caldo ed a freddo. Fev. 2003.

FIGUEIRA, Ricardo Jorge Costa de Moraes. **CAD / CAE / CAM / CIM.** Porto: Instituto Politécnico do Porto, 2003.

FORD MOTOR COMPANY. **Engineering material specification.** Ford Global Technologies, Inc., s/d.

GARDIOLA, B. et al. **Determination and prediction of the inherited ferrite texture in a HSLA steel produced by compact strip production.** Materials Science and Engineering A303, 2001.

GIORDA, A. et al. **Analisi del comportamento strutturale di un bus in condizioni di roll-over con il metodo multibody.** Departamento di Meccanica – Politecnico di Torino, s/d.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D. da; ALMEIDA FILHO, C. de. **Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço I.F. laminadas a frio.** Ouro Preto: Outubro, 2002.

HARLIN, N.; JONES, T. B.; PARKER, J. D. **Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steel.** Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 448–453.

JOCE. Resistência da superestrutura. **Jornal Oficial das Comunidades Européias.** Fev. 2002.

KLAIBER, F. W.; WIPF, T. J.; FANOUS, F. S. **strengthening of two continuous-span steel stringer bridges.** Construction and Building Materials, Vol. 12, N°. 23, pp. 151-159, 1998.

LARCHER, N. V. et. Al. **Aços ARBL zincados por imersão a quente para aplicações automotivas parte II.** 58° ABM - Congresso Rio de Janeiro, julho, 2004.

MATLOCK, D.K.; ALLEN, B.J.; SPEER, J.G. **Aging and properties of ultra-low carbon bake-hardening steels**. Germany: march, 1998.

MONTEIRO, Ricardo; LESSA, Daniela. **Aço em alta**. TN Petróleo, 1998.

NOGUEZ, M.E. et al. Propriedades mecánicas de aceros de bajo carbono com estamos y diferentes contenidos de elementos residuales. **Revista Ciência e Ingeniería**. n. 03. v. 23. México: 2002.

OLSON, G. B. **System's design of hierarchically structured materials**: Advanced steels. Journal of Computer-Aided Materials Design, 4, 1997.

PANNONI, Fabio Domingos. **Proteção de estruturas metálicas frente ao fogo e à corrosão**. Coletânea de artigos técnicos. Minas Gerais, s/d.

PRASAD, S. N.; MEDIRATTA, S. R.; SARMA, D. S. **Influence of austenitisation temperature on the structure and properties of weather resistant steels**. Materials Science and Engineering A358, 2003.

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

SENUMA, Tekehide. **Physical metallurgy of modern high strength steel sheets**. n. 6. p. 52-532. v. 41. September, 2000.

SEW 097. **Warm-und kaltgewaltze flacherzeugnisse aus merphasigen stahlen zum kaltumformem**. Dusseldorf, jan. 2000.

SHI, Zihai, et al. **A separate method for evaluating the ultimate load-carrying capacity of aging and renovated sewage structures**. Construction and Building Materials 15.

SILVA, A. V. da C. e; AVILLES, R. R. de; CORDEIRO, N. B. **Modelos para a solubilidade de precipitados relevantes para a laminação a quente de aços**. 54º Congresso da ABM, São Paulo, 25 a 29 de julho de 1999.

SOUZA, G. F.M. de. **Análises de confiabilidade de estruturas**. Rio de Janeiro, 2003.

SPERLE, Jan Olof; NILSSON, Tony. **The application of high strength for fatigue structures**. Sweden, 1992.

TURGEMAN, S.; GUESSAB, B.; GUESSASMA, M. **Yield design theory: an efficient static method formulation**. Eur. J. Mech., A/Solids, 17, no 3, 499-513, 1998.

WILSON, J. A.; CRAVEN, A. J. **Improving the analysis of small precipitates in HSLA steels using a plasma cleaner and ELNES**. Ultramicroscopy 94, 2003.

XIADONG, Zhu; SHAOHUI, Ma; LI, Wang. **Current status of advanced strength steel for auto-marking its development in baosteel**. Baosteel research institute. China: s/d.

XUE, Q. et al. **Constitutive response of welded HSLA 100 steel**. Materials Science and Engineering A354, 2003.

YOKOYAMA, Hiroyasu; MITAO, Shinji; TAKEMASA, Mineyasu. **Development of high strength pearlitic steel rail (SP Rail) with excellent wear and damage resistance**, s/d.

ZHANG, Yan. et al. **Lightweight design of automobile component using high strength steel based on dent resistance**. Materials and Design 27, 2006.