

ANDERSON ELIAS FURTADO

**INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO TÉRMICO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE UM AÇO XC48
APLICADO A COMPONENTES AUTOMOTIVOS VISANDO
ATENDIMENTO AO PROJETO ULSAB.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista – Unesp, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá

2006

F992i	<p>Furtado, Anderson Elias</p> <p>Influência do processamento térmico sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de um aço XC48 aplicado a componentes automotivos visando atendimento ao projeto ULSAB / Anderson Elias Furtado . – Guaratinguetá : [s.n.], 2006</p> <p>148 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 139-148</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2006</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira</p> <p>1. Aço – tratamento térmico I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.3</p>
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO TÉRMICO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAS DE UM AÇO XC48
APLICADO A COMPONENTES AUTOMOTIVOS VISANDO
ATENDIMENTO AO PROJETO ULSAB.**

ANDERSON ELIAS FURTADO

ESSA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Orientador / UNESP-FEG

Prof. Dr. João Zangrandi Filho
UNESP-FEG

Prof. Dr. José Rubens de Camargo
UNITAU

Dezembro de 2006

DADOS CURRICULARES

ANDERSON ELIAS FURTADO

NASCIMENTO: 31.05.1977, Resende – RJ

FILIAÇÃO: Waldir de Oliveira Furtado
Maria de Fátima Elias Furtado

1995 – 1999 Graduação em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia, UNESP – Guaratinguetá

À minha noiva, Nívea,
que foi promovida a esposa no decorrer do mestrado.
E a meus pais que sempre me incentivaram ao longo de minha vida,
acadêmica ou não.

AGRADECIMENTOS

A DEUS;

Ao meu orientador, Marcelo dos Santos Pereira, que jamais deixou de me incentivar e acreditar na realização deste mestrado, apesar do pouco tempo de que eu dispunha para dedicar ao mesmo;

Aos meus chefes, Vladimir Bojco e Franck Turkovics, que me permitiram me ausentar do trabalho por repetidas vezes possibilitando a obtenção dos créditos e realização da parte experimental;

A minha esposa, Nívea, que sempre acreditou na minha capacidade e, aliás, até a superestima;

Aos meus pais, Waldir e Fátima, sempre presentes e confiantes apesar de minha impaciência;

Aos amigos, tanto do trabalho, quanto da FEG, que contribuíram de alguma forma para este trabalho, Alexandre Silva, Fábio Moreira, Celso Yoshino, Rinaldo Camacho, Maria Cristina Freitas, Paulo Imai, Juliana Espinossi Roza, e tantos outros que não poderia citar todos;

Aos mestres, Tomaz Manabu Hashimoto e Herman Jacobus Cornelis Voorwald, que, através de suas valiosas aulas na pós-graduação, me permitiram aprofundar meus conhecimentos na área de materiais e possibilitaram as análises contidas nesta dissertação;

Aos amigos e técnicos do laboratório, Humberto Lopes Rodrigues, José Manoel Bernardes, Célio José de Souza, Wilson Roberto Monteiro, Domingos Hasmann Neto, Ely de Almeida Fornitano e Odir Vieira da Silva, que tanto contribuíram na confecção de corpos de prova e mesmo na realização dos ensaios, seja realmente acompanhando os testes ou os enriquecendo com seus conhecimentos;

Àquelas que não gostaria de chamar funcionárias, mas sim amigas da Biblioteca da FEG, devido à grande presteza, carinho e dedicação com que realizaram seu trabalho e me ajudaram na realização deste mestrado.

Aos alunos de iniciação científica, Renato Cesar Gueroni e Renato Araújo Barros, que contribuíram de forma significativa na realização deste trabalho.

“Je connais une planète où il y a un monsieur cramoisi.
Il n’a jamais respiré une fleur. Il n’a jamais regardé une étoile.
Il n’a jamais aimé personne. Il n’a jamais fait d’autre que des additions.
Et, toute la journée il répète comme toi: ‘Je suis un homme sérieux!
Je suis un homme sérieux!’, et ça le fait gonfler d’orgueil.
Mais ce n’est pas un homme, c’est un champignon!”

Antoine de Saint-Exupéry - Le Petit Prince

FURTADO, A. E. **Influência do processamento térmico sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de um aço XC48 aplicado a componentes automotivos visando atendimento ao projeto ULSAB.** 2006, 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

RESUMO

Objetivando um maior compromisso com o meio ambiente, as montadoras ao redor do mundo passaram a investir em veículos menos poluentes e para tanto, um dos caminhos adotados foi a redução do peso para diminuir o consumo de combustível. Um dos meios para atingir esse objetivo foi a utilização de materiais menos densos, como plásticos e o alumínio. Essa política fez cair significativamente a proporção de utilização do aço nos projetos automotivos nos últimos vinte anos. Desta forma, a fim de manter seu volume de vendas no mercado automobilístico, grandes siderúrgicas ao redor do mundo se uniram com o intuito de provar a viabilidade da construção de carros utilizando o aço e ainda assim obter um produto final mais leve e barato. Esse estudo iniciou-se em 1994 e ficou conhecido por Consórcio ULSAB (*Ultra-Light Steel Auto Body*). Esse trabalho tem como objetivos apresentar os projetos da família ULSAB, bem como realizar a análise de um componente da suspensão traseira de um veículo do segmento popular produzido atualmente em grande escala no Brasil (e em outros países) baseado nesta filosofia. Desta forma, através de diferentes rotas de tratamento térmico, foram obtidas diferentes estruturas (temperada, temperada e revenida, normalizada e bifásicas) para o componente em questão. Foi realizada a análise microestrutural e mecânica dos corpos-de-prova para a definição de uma proposta de tratamentos térmicos alternativos para o componente estudado. Dentre as estruturas obtidas pôde-se concluir que os aços bifásicos foram os que apresentaram melhores resultados, ou seja resistência mecânica muito próxima ao nível de resistência atual da superfície temperada do componente, e alongamento (por analogia, tenacidade) próximo aos níveis atuais atingidos no núcleo do componente.

PALAVRAS CHAVE: ULSAB, ULSAB-AVC, Aços de alta resistência, indústria automobilística.

FURTADO, A. E. **Thermal processing influences in the mechanical and micro structural properties of XC48 steel used in automotive parts with target at ULSAB program.** 2006, 148f. Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) – Guaratinguetá College of Engineering, São Paulo State University, 2006.

ABSTRACT

The adoption of friendly environmental politics leads OEMs all over the world to invest in low emissions vehicles. A way to achieve this goal is mass reduction in order to improve fuel consumption. This mass reduction can be achieved using lighter materials as plastics and aluminum. This politics caused an important reduction in the proportional use of steel in car projects in last twenty years. So, in order to maintain their market share in automotive new projects, thirty-five steel-makers from the five continents have made a partnership which objective was to prove the viability to build lighter and cheaper steel intensive vehicles. Project team started working in 1994 and was named ULSAB (*Ultra-Light Steel Auto Body*). This dissertation has as guidelines the presentation of ULSAB family programs and also analyzing a rear suspension part of a small size car produced in large scale in Brazil (and other countries too) based on this philosophy. Thus, using different thermal treatments, different structures (Quenching and tempering and dual-phase steels) have been achieved for the component. Mechanical and Micro-structural analyses of these different materials permitted to propose alternative treatments for the component. The best results among the achieved structures were reached by dual phase steels: mechanical strength very near from the quenched surface and elongation values almost the same as the non treated center of the component.

KEYWORDS: ULSAB, ULSAB-AVC, High Strength Steels, Automotive Industry.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	O PROJETO ULSAB (<i>ULTRALIGHT STEEL AUTOBODY</i>)	23
2.1.1	ULSAB – Fase 1 (1994-1995), o desenvolvimento conceitual	26
2.1.2	ULSAB – Fase 2 (1995-1998), a validação do conceito	32
2.2	O PROJETO ULSAC (<i>ULTRALIGHT STEEL AUTO CLOSURES</i>)	40
2.3	O PROJETO ULSAS (<i>ULTRA LIGHT STEEL AUTO-SUSPENSIONS</i>)	48
2.4	O PROJETO ULSAB – AVC (<i>ADVANCED VEHICLE CONCEPTS</i>)	54
2.4.1	O critério segurança dentro do projeto ULSAB-AVC	60
2.4.2	A responsabilidade ambiental	65
2.4.3	A viabilidade econômica do projeto ULSAB-AVC	68
2.5	DESCRIPTIVOS DE PROCESSOS UTILIZADOS NOS PROJETOS ULSAB	69
2.5.1	Hidroconformação	70
2.5.2	Soldagem de precisão (<i>Tailor Welded Blanks e Tailor Welded Tubes</i>)	75
2.6	OS MATERIAIS UTILIZADOS NOS PROJETOS ULSAB	79
2.6.1	Os aços Martensíticos	85
2.6.2	Os aços de Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP)	87
2.6.3	Os aços bifásicos	91
3	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE EM ESTUDO	96
3.1	FLUXOGRAMA DE FABRICAÇÃO DO COMPONENTE	100
3.1.1	Fabricação do bruto	100
3.1.2	Fabricação e controle do componente acabado	100
3.2	CONDIÇÃO DE CARGAS DO COMPONENTE	101
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	102
4.1	O MATERIAL	102
4.2	CORPOS DE PROVA	103
4.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS	104
4.3.1	Definição das temperaturas e rotas dos Tratamentos Térmicos	107
4.4	MICROSCOPIA ÓTICA	109
4.4.1	Preparação das amostras metalográficas	109
4.4.2	Ataque químico	111
4.4.3	Análise de imagens	111
4.5	ENSAIOS DE TRAÇÃO	113

4.6	MEDIÇÕES DE DUREZA	114
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
5.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	116
5.2	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	117
5.2.1	Material como fornecido	117
5.2.2	Normalizado	119
5.2.3	Temperado	120
5.2.4	Temperado e revenido	121
5.2.5	Têmpera intercrítica de 740⁰ C	121
5.2.6	Têmpera intercrítica de 760⁰ C	122
5.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	124
5.3.1	Material como fornecido	124
5.3.2	Normalizado	125
5.3.3	Temperado	126
5.3.4	Temperado e revenido	126
5.3.5	Têmpera intercrítica de 740⁰ C	127
5.3.6	Têmpera intercrítica de 760⁰ C	128
5.3.7	Um comparativo entre os tratamentos térmicos realizados	129
5.3.7.1	Têmpera completa sem revenimento	131
5.3.7.2	Têmpera seguida por revenimento	132
5.3.7.3	Têmpera intercrítica	133
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
6.1	CONCLUSÕES	136
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	138
	REFERÊNCIAS	139

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Repartição dos materiais utilizados na produção de um automóvel na década de 90.	18
FIGURA 2 – Empresas membro do consórcio ULSAB	23
FIGURA 3 – Painel lateral externo do projeto ULSAB: descritivo das diferentes espessuras e limites de escoamento utilizados na definição do <i>Tailor Welded Blank</i>	30
FIGURA 4 – Estrutura desenvolvida no projeto ULSAB. Vista frontal superior	31
FIGURA 5 – Modelo do projeto ULSAB-fase 2, com malha de elementos finitos, utilizado para as simulações de <i>crash tests</i>	34
FIGURA 6 – Resultados das simulações realizadas para validação dos ensaios de impacto	35
FIGURA 7 – Etapas da produção dos subconjuntos e montagem dos veículos de demonstração	37
FIGURA 8 – Representação gráfica dos resultados obtidos com o projeto ULSAB	38
FIGURA 9 – Painel interno dianteiro da porta do projeto ULSAC. Constituído por duas chapas com limite de escoamento de 140 MPa, porém com diferentes espessuras: 1,0 mm e 1,2 mm.	44
FIGURA 10 – Estrutura da porta. Tubos verticais em aço, hidroconformados e horizontais em aços de alta e ultra-alta resistência	45
FIGURA 11 – Ensaio de intrusão quase estático	46
FIGURA 12 – Conjuntos de suspensão traseira, considerados o “estado-da-arte” na fase de <i>Benchmark</i> do projeto ULSAS.	49
FIGURA 13 – Representação do conceito ULSAB-AVC para veículo da classe C	57
FIGURA 14 – Representação do conceito ULSAB-AVC - Classe PNGV	58
FIGURA 15 – Plataforma comum utilizada para o ULSAB-AVC PNGV e classe C	59
FIGURA 16 – Representação do ensaio Euro-NCAP de impacto frontal <i>offset</i> contra uma barreira deformável e suas especificações	61
FIGURA 17 – Representação do ensaio US-NCAP de impacto frontal contra uma barreira rígida e suas especificações	61
FIGURA 18 – Representação do ensaio US-SINCAP de impacto lateral e suas especificações	62
FIGURA 19 – Representação do ensaio de impacto contra poste e suas especificações	62
FIGURA 20 – Percentagem de reciclagem dos principais materiais na comunidade europeia no ano de 1996	66
FIGURA 21 – Processos de manufatura utilizados no projeto ULSAB-AVC	69
FIGURA 22 – Ferramenta utilizada pela Porsche para hidroconformação de um componente da porta do projeto ULSAC	71
FIGURA 23 – Estrutura principal do ULSAB-AVC classe C, com destaque para os componentes hidroconformados.	74

FIGURA 24 – Rodas desenvolvidas para o projeto ULSAB-AVC, utilizando o conceito de TWB.	77
FIGURA 25 – Comparativo entre o número de peças constituintes de um veículo e do número de tubos soldados por precisão, demonstrando o compromisso com a redução de componentes através da aplicação da tecnologia.	79
FIGURA 26 – Percentual dos diferentes aços aplicados na estrutura do veículo classe C do projeto ULSAB-AVC	80
FIGURA 27 – Curva representando a proporção de utilização dos aços de alta resistência em relação ao total dos aços ao longo dos últimos 20 anos no Japão. E curva da variação de massa das carrocerias no mesmo período e local	81
FIGURA 28 – A evolução na proporção dos diferentes materiais utilizados na fabricação das carrocerias dos veículos BMW no fim da década de 90 e início dos anos 2000.	82
FIGURA 29 – Correlação entre conformabilidade e resistência de diferentes tipos de aços, entre eles os de ultra-alta resistência.	84
FIGURA 30 – Influência da quantidade de carbono e da temperatura de revenimento na dureza dos aços, ilustrando a relação direta de proporcionalidade entre as propriedades mecânicas da martensita e o teor de carbono.	86
FIGURA 31 – Representação esquemática do efeito TRIP	89
FIGURA 32 – Comparação da curva tensão – deformação entre um aço de alta resistência e baixa liga (HSLA 350/450) e outro Bifásico (DP 350/600), ilustrando as diferenças de propriedades para aços com um mesmo limite de escoamento	94
FIGURA 33 – Eixo traseiro do veículo em questão. Lado direito completo e lado esquerdo com braço de suspensão suprimido, dando destaque ao terminal de eixo, em verde, na parte superior esquerda da figura	96
FIGURA 34 – Nova imagem do eixo traseiro, agora representado em transparência, destacando os terminais de eixo (em verde) nas duas extremidades do eixo traseiro.	97
FIGURA 35 – Dimensões do terminal de eixo analisado neste trabalho. O mesmo é obtido por extrusão e posterior usinagem de um aço de médio carbono temperado superficialmente por indução	98
FIGURA 36 – Material na forma do componente final (terminal de eixo), a qual foi entregue ao DMT/FEG/UNESP.	102
FIGURA 37 – Ilustração da seção transversal do componente	103
FIGURA 38 – Representação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e foto da fresadora do Laboratório de Usinagem de Precisão e de Comando Numérico Computacional do DMT/FEG/UNESP	104
FIGURA 39 – Forno tipo mufla do Laboratório de Tratamentos Térmicos DMT/FEG/UNESP	105
FIGURA 40 – Fotos ilustrativas dos tratamentos térmicos realizados no Laboratório de Tratamentos Térmicos do DMT/FEG/UNESP	106

FIGURA 41 – Equipamento Tempopress do DMT/FEG/UNESP onde foram realizados os embutimentos das amostras para a análise metalográfica	110
FIGURA 42 – Politriz Panambra AP2 do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP	110
FIGURA 43 – Microscópio CARL ZEISS JENE NEOPHOT 30	112
FIGURA 44 – Máquina de tração EMIC do laboratório de ensaios mecânicos	113
FIGURA 45 – Durômetro OTTO WOLPERT-WERKE, DMT/FEG/UNESP	115
FIGURA 46 – Microestrutura obtida na região central do material como fornecido. Em (a) aumento de 200x e em (b), 500x (corpos de prova 1 a 4).	118
FIGURA 47 – Microestrutura com aumento de 500x obtida na superfície do material como fornecido (corpos de prova 1 a 4).	118
FIGURA 48 – Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra após tratamento de normalização (corpos de prova 5 a 8).	119
FIGURA 49 – Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra após tratamento de têmpera (corpos de prova 9 a 12).	120
FIGURA 50 – Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento de têmpera, seguido de revenimento (corpos de prova 13 a 16).	121
FIGURA 51 – Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento na região intercrítica 740 ⁰ C (corpos de prova 17 a 20).	122
FIGURA 52 – Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento na região intercrítica 760 ⁰ C (corpos de prova 21 a 24).	122
FIGURA 53 – Correlação entre alongamento e limite de escoamento obtidos para cada tratamento térmico realizado.	129
FIGURA 54 – Correlação entre alongamento e limite de escoamento obtidos para cada tratamento térmico realizado, indicando o compromisso buscado para o componente em questão.	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Porcentagens em massa dos diferentes materiais utilizados na construção dos Mercedes Classe S da geração anterior e da atual	20
TABELA 2 – Referências para veículos futuros e metas do projeto ULSAB relativas à massa e rigidez estática da carroceria	28
TABELA 3 – Classificação dos diferentes aços utilizados no projeto ULSAB	29
TABELA 4 – Resultados em redução de massa e melhoria da rigidez estática do projeto ULSAB fase 1	31
TABELA 5 – Comparação de massas, resultados da fase conceitual do projeto ULSAC	42
TABELA 6 – Comparação de custos, em US\$, resultados da fase conceitual do projeto ULSAC	42
TABELA 7 – ULSAC e Benchmark: Comparação massa	45
TABELA 8 – Análise dos custos de produção da porta ULSAC	47
TABELA 9 – Resumo dos resultados do projeto ULSAS – comparativo em relação aos objetivos de massa e custo	51
TABELA 10 – Desempenho estrutural teórica do projeto ULSAB-AVC	63
TABELA 11 – Potencial dos veículos do projeto ULSAB-AVC em relação à classificação <i>star rating</i> dos testes NCAP	64
TABELA 12 – Desempenho estrutural das carrocerias ULSAB-AVC	65
TABELA 13 – Valores calculados para emissão de CO ₂ e consumo de combustível dos veículos ULSAB-AVC	67
TABELA 14 – Custos de produção do veículo ULSAB-AVC em sua versão gasolina	68
TABELA 15 – Nomenclatura dos aços utilizados no programa ULSAB-AVC	83
TABELA 16 – Especificação de composição química (percentagem em peso) do aço AFNOR XC48	97
TABELA 17 – Tratamentos Térmicos realizados sobre os corpos-de-prova	105
TABELA 18 – Composição química do aço recebido	116
TABELA 19 – Frações volumétricas das fases presentes em cada condição de tratamento térmico	123
TABELA 20 – Espessuras total e de camada temperada do componente	124
TABELA 21 – Dureza Vickers HV do componente como recebido	124
TABELA 22 – Características mecânicas do material como recebido	125
TABELA 23 – Características mecânicas do material normalizado	125
TABELA 24 – Características mecânicas do material temperado	126
TABELA 25 – Características mecânicas do material temperado e revenido	126
TABELA 26 – Características mecânicas do material bifásico 740 ⁰ C	127
TABELA 27 – Características mecânicas do material bifásico 760 ⁰ C	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	- Aços de Alta Resistência
AAAR	- Aços Avançados de Alta Resistência
AFNOR	- Association Française de Normalisation
AHSS	- Advanced High Strength Steel
AISI	- American Iron and Steel Institute
ARBL	- Aços de Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	- American Society for Testing and Materials
BH	- Bake Hardenable
CAD	- Computer Aided Design
CAE	- Computer Aided Engineering
CAM	- Computer Aided Manufacturing
CP	- Complex Phase Steel
CTA	- Centro Tecnológico Aeroespacial
DP	- Dual Phase Steel
DMT	- Departamento de Materiais e Tecnologia
EUCAR	- The European CO ₂ Reduction Program
FEA	- Finite Element Analysis
FEG	- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FMVSS	- Federal Motor Vehicle Safety Standard
HLE	- Haute Limite Elastique
HSLA	- High Strength Low Alloy
HSS	- High Strength Steel
IF	- Interstitial Free Steel
IS	- Isotropic Steel
LE	- Lotus Engineering
MIT	- Massachusetts Institute of Technology
NCAP	- New Car Assessment Program
NDEC 2000	- New European Driving Cycle
NHTSA	- National Highway and Traffic Safety Association
NVH	- Noise, Vibration, Harshness
OEM	- Original Equipment Manufacturer (Montadora de automóveis)
PES	- Porsche Engineering Services
PNGV	- U.S. Partnership for a New Generation of Vehicles
R&D	- Research and Development
SAE	- Society of Automotive Engineers
TRIP	- Transformation Induced Plasticity
TWB	- Tailor Welded Blanks
TWT	- Tailor Welded Tubes
UHSS	- Ultra High Strength Steel
ULCB	- Aços Ultra-Baixo Carbono

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ULSAB	- Ultra Light Steel Auto Body
ULSAB-AVC	- Ultra Light Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concept
ULSAC	- Ultra Light Steel Auto Closures
ULSAS	- Ultra Light Steel Auto Suspensions
UNESP	- Universidade Estadual Paulista

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, as ligas de ferro-carbono são as mais importantes ligas metálicas, sendo portanto as mais utilizadas. Esta importância pode ser ilustrada pelo volume de produção de ferro-gusa e dos aços que, no início da década de oitenta, era dez vezes maior que a produção de todos os outros metais e ligas juntos (GULHÁEV, 1981).

Se voltada essa análise exclusivamente para a indústria automobilística, percebe-se novamente uma importância significativa na utilização das ligas ferrosas e, em especial dos aços. Um exemplo desta importância pode ser observado na proporção de materiais utilizados pela indústria automobilística na década de 90 ou na composição do Peugeot 607, lançado comercialmente no ano 2000, conforme Figura 1.

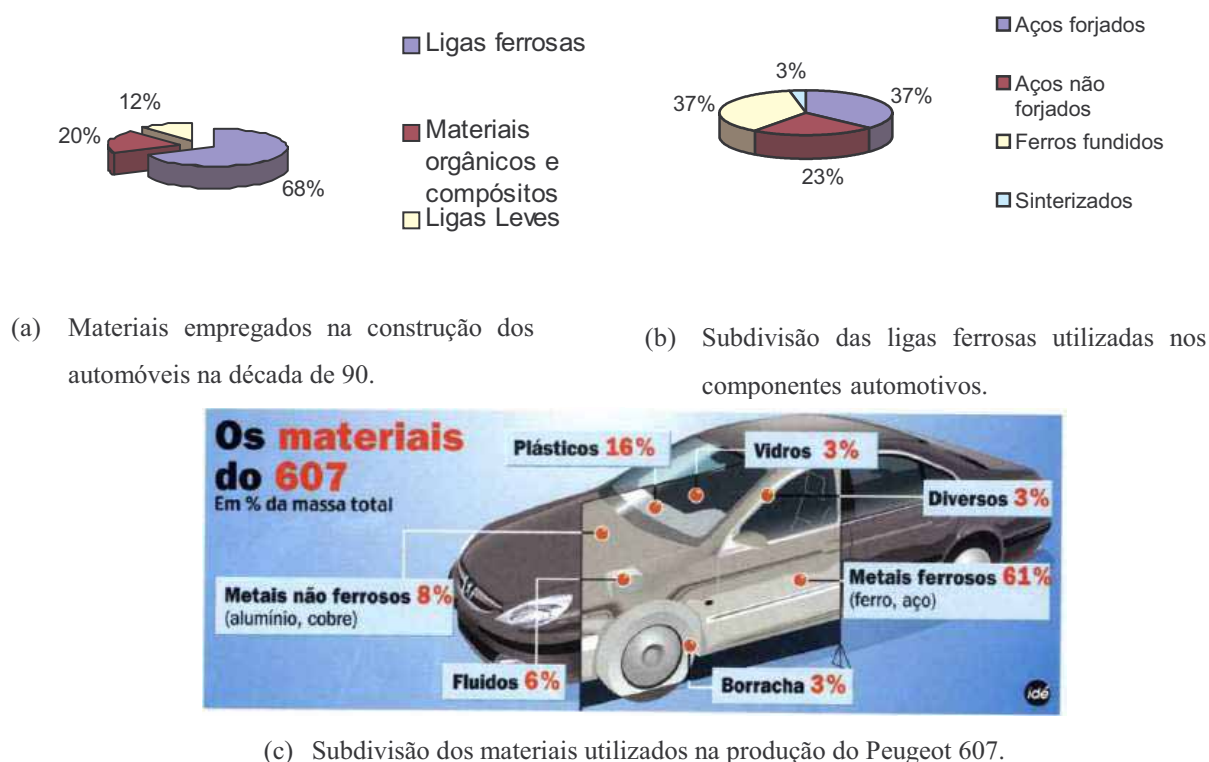


Figura 1 - (a) e (b) Repartição dos materiais utilizados na produção de um automóvel na década de 90 (adaptado de POURPRIX, 2000) e (c) Composição do Peugeot 607 (PLANETA, 2002).

O aço sempre constituiu a maior parte dos automóveis e é pouco provável que um dia ele seja completamente excluído deste mercado. Entretanto, as siderúrgicas reconhecem que o aço enfrentará novos desafios se quiser participar do crescimento da indústria automobilística (BROGE, 2000).

Atualmente, com o maior enfoque da conservação ambiental, há uma pressão crescente sobre as indústrias do setor automotivo no sentido de produzir veículos com melhores índices de consumo de combustível. Estudos mostram que uma redução de 10 % em massa, sem alteração de outros fatores, pode acarretar redução de 6 a 7 % no consumo de combustível (ASHLEY, 1995).

Estudos recentes focados na redução de massa dos veículos basearam-se na aplicação de materiais mais leves em sua construção, tais como ligas de alumínio e plásticos. Esses estudos apresentaram resultados realmente significativos, chegando a atingir reduções de massa da ordem de 40% na estrutura do veículo. O maior problema deste tipo de enfoque é o custo elevado tanto das ligas de alumínio quanto dos materiais compósitos. Essa implicação econômica pode ser absorvida para veículos de pequeno volume de produção e alto custo de venda, como foi o caso do Audi A8. Mas haverá grandes dificuldades em implementá-la para veículos de produção em massa, como os do segmento pequeno (A e B) e médio (C) (ASHLEY, 1995).

Ainda assim, o uso de materiais alternativos ao aço continuou em progressão. Uma forma de ilustrar essa nova idéia de concepção pode ser a comparação entre os materiais utilizados na geração anterior e atual (cujo projeto data de 1999) da Mercedes-Benz Classe S, conforme a Tabela 1, onde se pode notar claramente o aumento na utilização do alumínio e plásticos em detrimento dos aços.

Tabela 1 - Porcentagens em massa dos diferentes materiais utilizados na construção dos Mercedes Classe S da geração anterior e da atual (KIMBERLEY; ROGERS, 1999).

MATERIAL	NOVO CLASSE S	ANTIGO CLASSE S
Aços e ferros	53	63
Alumínio	14	6
Ligas não ferrosas	2,5	Ver outros materiais
Plásticos	10	8
Borracha	3	3,5
Vidro	3	Ver outros materiais
Combustível e lubrificantes	6	4,5
Outros materiais	8,5	14

As grandes siderúrgicas sentindo-se ameaçadas pelo avanço do alumínio buscaram entender o motivo das principais vantagens na utilização deste material. Percebe-se nesse momento que as companhias produtoras de alumínio estavam comparando o seu material a projetos sub-otimizados construídos em aço. O AISI (*American Iron and Steel Institute*) aprovou então um projeto dividido em três fases que visava aperfeiçoar os aços e processos utilizados na produção de estruturas automotivas. Esse projeto, logo foi encampado por grandes siderúrgicas americanas e posteriormente do restante do mundo (SAWYER, 1995).

Desta forma, em 1994, os principais produtores mundiais de aço uniram-se num consórcio denominado ULSAB (*UltraLight Steel Auto Body*). Os objetivos principais do projeto ULSAB foram (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998):

- (a) Desenvolver um novo conceito de fabricação de automóveis, focado na utilização de aços por meio da otimização dos processos de produção e das ligas a serem utilizadas;

- (b) Proporcionar uma redução significativa de massa em comparação a um conceito de “veículo do futuro”, sem aumento significativo de custo final de produção;
- (c) Atingir objetivos funcionais e estruturais, ou seja, garantir os índices de segurança e conforto do veículo;
- (d) Disponibilizar conceitos que serão futuramente aplicáveis ao desenvolvimento de novos veículos.

Um dos avanços do referido projeto foi a utilização de novos tipos de aço, bem como de novos ou aprimorados processos de produção no projeto deste veículo.

No caso dos novos aços, durante o projeto ULSAB, destacam-se os de alta resistência (HSS) e de ultra-alta resistência (UHSS). Esses aços eram constituídos notadamente pelos Aços Isotrópicos (IS), Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA), Ultra-Baixo Carbono com Interstícios Livres (ULCB e IF) e *Bake Hardenable* (BH). Já no projeto ULSAB-AVC, destacaram-se os chamados Aços de Alta Resistência de Última Geração (AHSS). Dentre eles, pode-se destacar os aços multifásicos, que incluem os bifásicos (DP), os de plasticidade induzida por transformação (TRIP) e os de fases complexas (CP). Para componentes de suspensão foram utilizados os bainíticos (que são uma subsérie dos bifásicos onde a martensita é substituída por bainita). Ainda fazem parte deste grupo os aços martensíticos (MART) (ANDRADE; TAISS; ROSA, 2002).

Em relação aos novos processos, foram utilizados os processos de *Tailored Welded Blanks* (privilegiando, sobretudo as soldas a laser), hidroconformação de tubos e conformação hidro-mecânica de chapas (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

1.1. OBJETIVOS

- Revisão das propostas, análises e resultados dos projetos ULSAB, ULSAC, ULSAB-AVC e ULSAS, tendo em vista sua importância por se tratarem de projetos de repercussão mundial que buscam mostrar a importância dos aços, em especial os de alta resistência, na construção de veículos para o século 21. Estes automóveis deverão apresentar elevado índice de segurança tanto para ocupantes quanto para pedestres e redução de emissão de poluentes, sem que para tanto apresentem custos de produção inibidores. Essa revisão apresentará ainda um detalhamento dos diversos tipos de aços e processos de produção utilizados na busca dos objetivos supracitados e dos definidos em cada um dos projetos em questão;

- análise das possibilidades de melhoria das propriedades mecânicas do terminal de eixo utilizado na suspensão traseira de um veículo do segmento popular produzido em série no Brasil. Esse estudo será baseado na manutenção do material de base, AFNOR XC48 temperado superficialmente por indução, e variação na sua microestrutura por meio de tratamentos térmicos;

- definição e otimização de rotas de tratamentos térmicos para o aço em questão. Para tanto, será analisada a influência dos diferentes tratamentos térmicos sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas finais do material, buscando melhor combinação de propriedades mecânicas, aliando altos níveis de resistência e alongamento;

- caracterização microestrutural por meio de identificação e quantificação das fases presentes nas estruturas obtidas. Essas características serão correlacionadas com as propriedades mecânicas do material no que tange à resistência mecânica, limite de escoamento e ductilidade, tendo em vista que as novas estruturas devem atender todas as solicitações de projeto previamente estabelecidas para o componente na condição atual, ou seja, XC48 temperado superficialmente;

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O PROJETO ULSAB (*ULTRALIGHT STEEL AUTOBODY*).

O projeto ULSAB (*Ultralight Steel AutoBody*) representou a reação da comunidade siderúrgica mundial ao aumento da utilização de materiais alternativos ao aço (em especial, as ligas de alumínio). Um consórcio de 35 produtores de aço, de 18 diferentes países (Figura 2), financiou o projeto que teve como meta o desenvolvimento de soluções em aço para a indústria automobilística. Fizeram parte do consórcio duas siderúrgicas brasileiras, a CSN e a USIMINAS (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

Aceralia	POSCO
AK Steel	Preussag
Bethlehem	Rouge Steel
BHP Steel	SIDERAR
British Steel	SIDMAR
Cockerill Sambre	SOLLAC
CSN	SSAB
Dofasco	Stelco
Hoogovens	Sumitomo
Inland	Tata
Kawasaki Steel	Thyssen
Kobe	US Steel Group
Krakatau	USIMINAS
Krupp Hoesch	VSZ
LTV Steel	VOEST-ALPINE
National Steel	WCI
Nippon Steel	Weirton
NKK	

Figura 2 - Empresas membro do consórcio ULSAB (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

O projeto teve início em 1994, duração de quatro anos e orçamento de 22 milhões de dólares (VEHICLE NEWS, 1998). Esse projeto foi a primeira ação deste porte realizada pela indústria do aço e foi dada à *Porsche Engineering Services, Inc.* (PES), sediada em Troy, Michigan (USA), a responsabilidade pelo gerenciamento do programa. A construção, testes e análise estrutural numérica do veículo de demonstração foram realizados no *Porsche R&D Center* (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento) em Weissach (Alemanha). Para atingir os objetivos do programa, as responsabilidades da PES incluíam (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998):

- Planejamento e desenvolvimento do programa;
- Gerenciamento da construção do veículo de demonstração;
- Construção do veículo de demonstração;
- Avaliação e escolha dos fornecedores / industrializadores;
- Projetar os componentes da estrutura;
- Análises numéricas (CAE);
- Testes físicos sobre os veículos de demonstração;
- Estudo de análise econômica.

Os materiais leves, com especial destaque para as ligas de alumínio e materiais plásticos, ganhavam espaço nos projetos automotivos em função de sua menor densidade somada à necessidade de redução de peso voltada à obtenção de melhores índices de consumo de combustível. Nesta época, veículos como o Audi A8, construídos praticamente em sua totalidade em alumínio, mostraram grande redução de massa em relação aos concorrentes construídos em aço. Houve casos expressivos de redução de massa em até 40% (ASHLEY, 1995). Entretanto, esse dado não deve ser considerado friamente, pois se trata de uma estratégia de marketing dos produtores de alumínio, já que comparam seus projetos aos de carrocerias em aço sub-otimizadas (SAWYER, 1995).

O problema principal na aplicação do alumínio ou plásticos é o preço dos mesmos, além do aumento dos custos de fabricação. A questão do fornecimento de matéria-prima também é um problema, já que seria necessário um tempo considerável até que fosse possível adequar a oferta, ainda baixa, à nova demanda.

Conhecendo a necessidade principal de redução de peso, o projeto ULSAB teve sua grande meta definida: a de desenvolver uma carroceria em aço, mais leve, porém que não comprometesse nem a segurança nem as propriedades estruturais, sem qualquer aumento de custo para as montadoras (LOWE, 1998). O consórcio precisou ainda que os resultados dos estudos e da concepção fossem muito positivos, a carroceria devia ainda ser passível de construção utilizando-se dos meios de produção disponíveis comercialmente.

Desta forma, as condições de contorno do projeto foram fortemente baseadas pela redução de peso e melhora de performances. A equipe de projeto optou por partir do zero, adotando um conceito de desenvolvimento holístico onde a estrutura foi considerada como uma única peça ao invés de um conjunto de componentes, possibilitando, através da melhoria de algumas áreas estratégicas, reduzir peso em outras (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 1998 b). Para perder peso e melhorar o desempenho estrutural, a carroceria ULSAB baseou-se na aplicação de aços de alta resistência (limite de escoamento entre 210 e 550 MPa) e de Ultra-alta resistência (acima de 550 MPa), com espessuras que variaram entre 0,65 mm e 2,00 mm, os quais compuseram mais de 90% da estrutura da carroceria (BUCHHOLZ, 1998).

Outra fonte de redução de peso e melhora da resistência estrutural foi o aprimoramento de processos de produção, em especial, a hidroconformação, *Tailored Welded Blanks* – TWB (soldagem de precisão de chapas) e *Tailored Welded Tubes* – TWT (soldagem de precisão de tubos) (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 1998 c).

Para facilitar seu desenvolvimento, o projeto ULSAB foi dividido em duas etapas. A primeira fase, de análise conceitual, iniciou-se em 2004 e teve seus resultados divulgados em setembro de 1995. Essa fase consistiu de um estudo de mercado e definição de objetivos que permitissem o desenvolvimento do projeto completo de uma carroceria, realizado integralmente através de sistemas considerados o “estado da arte” em Engenharia Auxiliada por Computador (CAE, na sigla em inglês). Esses estudos consideraram análises estáticas de resistência e deformação, bem como foram desenvolvidos modelos computacionais, fundamentados na Análise por Elementos Finitos (FEA, na sigla em inglês), capazes de simulações dinâmicas de choque. Estas análises proporcionaram uma correlação com os *crash tests* permitindo prever o nível de segurança esperado pela carroceria em questão. A segunda fase foi a etapa da validação. A estrutura, inicialmente desenvolvida, agora seria manufaturada, pesada e testada a fim de validar os resultados da fase conceitual. Durante a realização da fase 1, algumas especificações de segurança evoluíram, o que levou a um refinamento do estudo na busca de uma melhora do projeto para a fase 2. Ao fim da construção e teste dos veículos de demonstração, a estrutura se mostrou leve, segura, factível e economicamente interessante; superando inclusive, diversos dos objetivos definidos na fase conceitual (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

2.1.1. ULSAB – Fase 1 (1994-1995), o desenvolvimento conceitual.

Como já citado anteriormente, a *Porsche Engineering Services* foi a empresa contratada para desenvolver o projeto ULSAB. O ponto de partida do estudo foi a definição dos macro-objetivos do projeto (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998):

- Considerando uma carroceria e estrutura predominantemente em aço, obter uma redução significativa de massa em comparação a um veículo de referência do futuro;

- Atingir metas estruturais (rigidez torcional e flexional e durabilidade, por exemplo) e funcionais (dirigibilidade, ruídos e vibração (NVH), segurança, nível de conforto para os ocupantes, etc...);

- Desenvolver conceitos de aplicação de materiais bem como de métodos de processamento que possam ser aplicados para veículos de nova geração.

A fim de definir estas metas, o PES iniciou um estudo de *Benchmark*, utilizando o que se considerava o “estado da arte” no mercado automobilístico da época. Para a definição das dimensões do veículo, 32 diferentes carros foram analisados. Com base nessa análise de mercado definiu-se que o projeto ULSAB deveria dar origem a um sedan de quatro portas, para cinco passageiros, com tração dianteira, motorização V6, com 2.700 mm de entre-eixos, comprimento total de 4.800 mm, 1.800 mm de largura, 420 litros de volume no porta-malas e peso do veículo equipado, mas sem passageiros, de 1.350 kg (BUSHHOLZ, 1998).

Para a definição das características de rigidez da estrutura, novamente foi realizado um *benchmark* dos veículos disponíveis na época. Os veículos utilizados para definição dos objetivos foram: Ford Taurus, Mazda 929, Toyota Cressida, Honda Accord, Chevrolet Lumina, Acura Legend, Lexus LS400, Mercedes Classe E e BMW série 5 (ASHLEY, 1995). Como cada um desses veículos apresentava um entre-eixos diferente e essa dimensão é fundamental nos cálculos de rigidez estática, para permitir uma comparação direta do desempenho destes nove veículos, sua média e o ULSAB, a PES fez uma correlação linear, ajustando os valores destes veículos ao objetivo do projeto ULSAB: um entre-eixos de 2700 mm (VEHICLE NEWS, 1998). Em função deste estudo foram definidas as características de referências para veículos futuros e as metas do projeto ULSAB conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Referências para veículos futuros e metas do projeto ULSAB relativas à massa e rigidez estática da carroceria (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

CARACTERÍSTICA	MÉDIA DO ESTUDO DE MERCADO NO ANO 1994	REFERÊNCIA PARA PRODUÇÃO DE VEÍCULOS FUTUROS	METAS ULSAB*
Massa	271 kg	250 kg	< 200 kg
Rigidez Torcional	11.531 Nm / °	> 13.000 Nm / °	> 13.000 Nm / °
Rigidez Flexional	11.902 N/mm	> 12.200 N/mm	> 12.200 N/mm
1° modo de vibração	38 Hz	40 Hz	> 40 Hz

* Todas as características com vidros, exceto massa.

Além destes objetivos, foi definido que a carroceria a ser projetada deveria atender aos requisitos legais relativos aos ensaios de impacto, ou seja, deveriam atender às normas de *crash tests* em vigor tanto na Europa (EURONCAP) quanto às americanas (NHTSA – *National Highway and Traffic Safety Association*).

Para atingir os citados objetivos a PES iniciou um projeto de desenvolvimento holístico de uma nova estrutura partindo de uma “folha branca”. O objetivo era, através desta filosofia, poder definir a estrutura como uma peça única e não como um conjunto de peças. Desta forma, e sempre através de um estudo iterativo, onde a cada passo a frente o projeto era reavaliado como um todo através de avançados modelos numéricos de CAE, pôde-se trabalhar no reforço de certos pontos da estrutura visando melhorias em outras áreas, o que permitiu grandes reduções de massa. Essa metodologia permitiu uma otimização significativa da estrutura.

Chapas menos espessas, porém de aços mais resistentes, foram usadas em substituição aos aços ao carbono normalmente utilizados na indústria automotiva, especialmente onde deformação e absorção de energia ao impacto se mostram necessárias. Produzidos em várias composições e diferentes espessuras, esses aços “especiais”, de alta ou ultra-alta resistência, representam 90% em peso da estrutura do projeto ULSAB (LOWE, 1998). Esse valor representa um aumento significativo se comparado aos 10% do ano de 1991 e 30 % em 1998, ano de conclusão do projeto (MANN, 1998).

Os aços utilizados no projeto ULSAB foram classificados segundo seu limite de escoamento mínimo e divididos em seis classes, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação dos diferentes aços utilizados no projeto ULSAB (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

Limite de Escoamento Inferior [MPa]	Categoria
140	Aços Doces
210	Alta Resistência
280	Alta Resistência
350	Alta Resistência
420	Alta Resistência
Acima de 550	Ultra-Alta Resistência

O progresso em relação à redução de peso na estrutura ULSAB é devido, tanto a utilização de novos aços, quanto aos novos processos de fabricação e construção desenvolvidos nas últimas décadas (LOWE, 1998).

Uma inovação recente e bastante utilizada no projeto ULSAB são as *Tailored Welded Blanks* (TWB). Ela consiste em soldar chapas de diferentes materiais ou espessuras antes do processo de conformação final. Essa tecnologia permite ao projetista determinar exatamente o ponto onde precisa de mais rigidez ou de maior absorção de energia e definir o material adequado para aquele ponto, desta forma permite um perfeito compromisso entre características mecânicas e peso, já que, por um lado, permite a utilização de materiais perfeitamente adequados às solicitações de cada ponto da estrutura e, por outro, elimina material onde ele não seria importante. Essa tecnologia permite, desta forma, reduzir alguns suportes e reforços, reduzindo assim o número de componentes da estrutura, possibilitando uma redução de custo de fabricação (ALDERDICE; CAMPBELL, 1998). Um exemplo de utilização de TWB no projeto ULSAB foi o painel lateral externo, que teve um *blank* definido em cinco chapas soldadas entre si, com espessuras variando de 0,7 mm a 1,7 mm e limite de escoamento variando de 210 MPa a 350 MPa, conforme Figura 3.

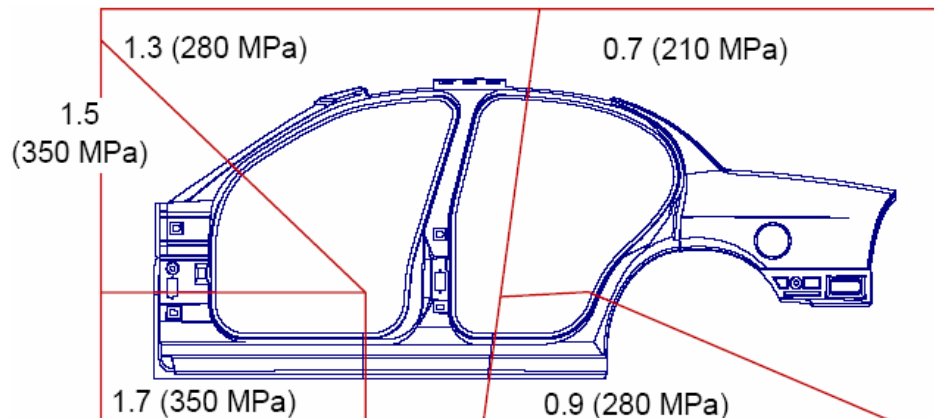


Figura 3 - Painel lateral externo do projeto ULSAB: descritivo das diferentes espessuras e limites de escoamento utilizados na definição do *Tailor Welded Blank* (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

O projeto ULSAB – fase 1 culminou com a publicação, em setembro de 1995, do relatório de projeto do conceito de estrutura veicular baseada em aço mostrado na Figura 4.



Figura 4 - Estrutura desenvolvida no projeto ULSAB. Vista frontal superior (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

O resultado mais significativo da fase 1 do projeto ULSAB foi a comprovação de que uma redução de massa de aproximadamente 25% na estrutura – em relação aos nove veículos utilizados como *benchmark* – seria possível sem comprometer a segurança ou características funcionais do veículo (HUGET, 1999). Além disso, obteve-se melhorias consideráveis nos índices de rigidez estática (tanto no índice relativo à torção, quanto no relativo à flexão), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados em redução de massa e melhoria da rigidez estática do projeto ULSAB fase 1 (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

CARACTERÍSTICA	REFERÊNCIA PARA PRODUÇÃO DE VEÍCULOS FUTUROS	METAS ULSAB*	RESULTADOS ULSAB FASE 1*
Massa	250 kg	< 200 kg	205 kg
Rigidez Torcional	> 13.000 Nm / °	> 13.000 Nm / °	19.056 Nm / °
Rigidez Flexional	> 12.200 N/mm	> 12.200 N/mm	12.529 N/mm
1º modo de vibração	40 Hz	> 40 Hz	51 Hz

* Resultados de rigidez estática calculados com vidros, valores de massa obtidos sem vidros.

Um estudo de custo realizado pela *Ibis Associated*, sediada em Wellesley (Massachusetts, USA), mostrou que a estrutura ULSAB seria constituída de 169 componentes e custaria 989 dólares. Um ganho significativo se comparado à média em 1995 de, aproximadamente, 200 peças e 1116 dólares de custo de produção (SAWYER; 1995). Esse estudo de custo independente, baseado no cenário de produção norte americano, mostrou que o conceito desenvolvido na fase 1 poderia custar menos para ser produzido do que estruturas comparáveis produzidas em série. Esse resultado indicou que uma estrutura mais leve poderia fazer uso exaustivo de aços de alta resistência, *taylor welded blanks*, hidroconformação, soldas a laser e, ainda assim, apresentar menores custos se comparada às estruturas atuais de mesmo tamanho e maior massa utilizando aços e processos mais convencionais (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

2.1.2. ULSAB – Fase 2 (1995-1998), a validação do conceito.

O foco da indústria automotiva estava direcionado ao projeto ULSAB quando, em setembro de 1995, foram anunciados os resultados da fase conceitual. Os resultados foram considerados tão positivos que deram novo ânimo às siderúrgicas, levando ao início da chamada fase 2: a validação do conceito.

A idéia da fase 2 era a construção de veículos de demonstração que pudessem comprovar a factibilidade e ainda permitir realizar fisicamente os testes de rigidez torcional e flexional, bem como o cálculo da massa. Além destes resultados físicos foram incluídos ensaios numéricos de *crash tests*, utilizando o “estado da arte” em CAE.

Os objetivos funcionais da fase 2 foram os mesmos da fase 1, ou seja, redução de peso sem comprometimento da segurança ou rigidez estrutural. Sem alterar as metas agressivas de redução de massa e desempenho estrutural, as especificações de segurança foram acrescidas em resposta às novas demandas de segurança impostas pelas montadoras e regulamentações governamentais.

A estrutura ULSAB – fase 2, que também se baseou no desenvolvimento de um veículo de produção em larga escala: 100.000 unidades por ano (ALDERDICE; CAMPBELL, 1998), sofreu vários ajustes e modificações na transição da fase 1, conceitual, passando pelo estágio de design final, para o veículo de demonstração resultante da fase 2. Essas diferenças devem-se aos novos limites nos testes de impacto, limitações dimensionais da carroceria, processo de produção e limitações nas aplicações dos materiais (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

O desenvolvimento da fase 2 seguiu o mesmo princípio que norteou a fase 1: um desenvolvimento holístico, baseado na iteração constante entre todos os elos da cadeia (siderúrgicas, fornecedores e PES). Dessa forma, cada modificação necessária em uma das etapas de produção era automaticamente analisada e validada pelos envolvidos em todas as fases do projeto. Outro ponto que também repetiu a fase 1, foi a utilização do que havia de mais avançado em simulação por computador, tanto no desenvolvimento quanto na validação do projeto.

Desta forma uma otimização do projeto tornou-se possível através do empenho das siderúrgicas no desenvolvimento de novos aços de alta e ultra-alta resistência que serviram de base para as *Tailored blanks* e os tubos hidroconformados. Para validação deste novo projeto foram aplicadas duas ferramentas:

- (a) Engenharia assistida por computador (CAE), que permitiu as previsões de massa e resistência estática, além da simulação de ensaios de impacto.

- (b) Ensaios mecânicos, realizados sobre estruturas físicas construídas em ferramentais representativos da produção seriada, que comprovaram as projeções realizadas por CAE no que tange a massa, os ensaios de rigidez estática e modo de vibração. Nenhum teste físico de impacto foi realizado, já que o mesmo deve ser realizado com um veículo completo e não somente a carroceria, ficando os mesmos portanto, fora do escopo deste estudo.

Para a análise dos resultados de *crash tests* foram desenvolvidos modelos numéricos para análise por elementos finitos e nesses modelos foi necessário incluir elementos como rodas, pneus, tanque de combustível, etc. O nível de detalhamento deste modelo, que pode ser visto na Figura 5, foi bastante elevado, sendo o mesmo constituído por 178.386 elementos e 174.532 nós (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

Essas análises mostraram que o projeto ULSAB satisfaz os requisitos de impacto vigentes. Nos casos de impacto frontal e traseiro, os testes de impacto foram realizados em velocidades que excederam os requisitos de segurança normalizados em até 17% e ainda assim, apresentaram resultados positivos.

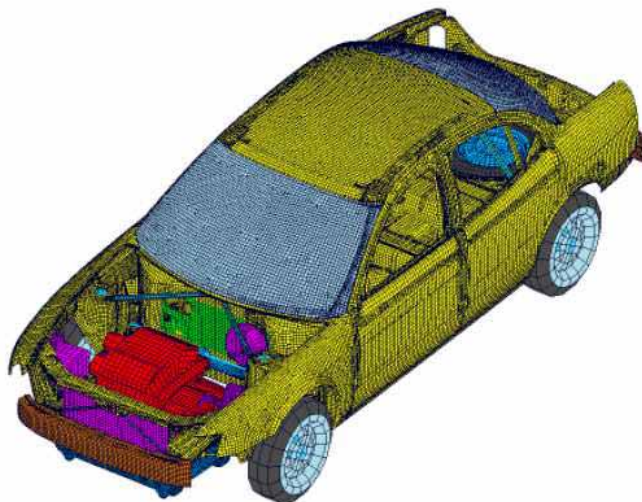


Figura 5 - Modelo do projeto ULSAB-fase 2, com malha de elementos finitos, utilizado para as simulações de *crash tests*.

A Figura 6, a seguir, ilustra os resultados finais das simulações realizadas para validação do veículo de demonstração segundo as normas de impacto:

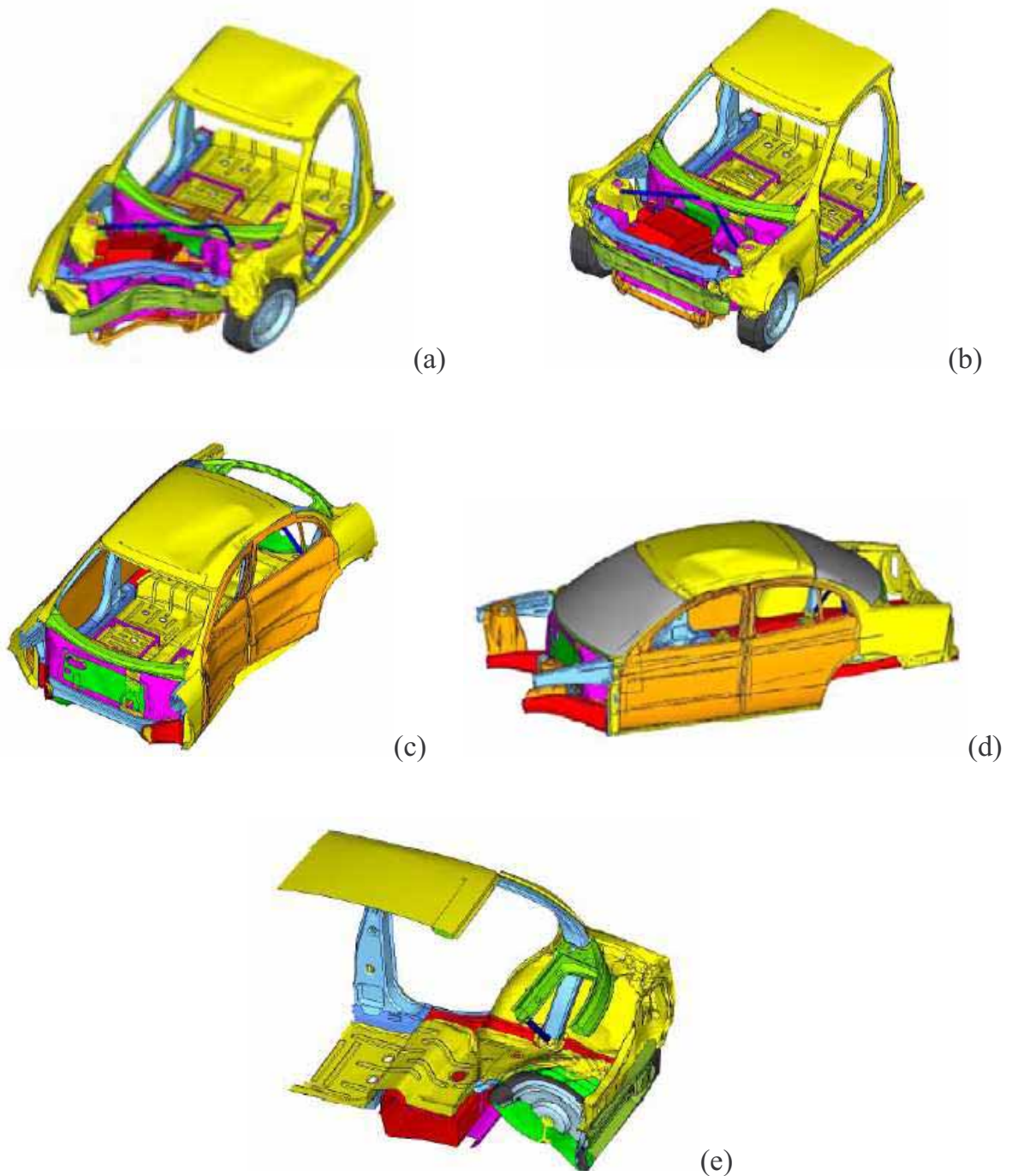


Figura 6 - Resultados das simulações realizadas para validação dos ensaios de impacto. (a) AMS impacto frontal parcial, (b) NCAP impacto frontal, (c) impacto lateral a 50 km/h, (d) amassamento de teto – para segurança em capotamentos e (e) FMVSS impacto traseiro.

Para fabricação dos subconjuntos que formariam a estrutura final foram escolhidas cinco empresas, duas alemãs e três norte-americanas. O critério fundamental na escolha foi a qualidade dos fornecedores, além da competitividade em preços e capacidade de trabalhar com sistemas CAD / CAM, compatíveis com o CATIA. Todas as ferramentas utilizadas no processo de fabricação dos subconjuntos eram do tipo *soft-tool*, exceto aquelas utilizadas para a hidroconformação que, devido às grandes pressões de trabalho, precisaram ser construídas como ferramentais definitivos de produção. De qualquer forma, foi adotado o princípio de que as peças deveriam sair do ferramental acabadas, e que não sofreriam qualquer tipo de retrabalho ou acabamento manual, o que não seria tolerável numa produção seriada de grande volume.

Dando continuação ao projeto, foram construídos os treze veículos de demonstração que seriam utilizados para a realização das medidas físicas dos valores de massa e rigidez estática. Devido a sua experiência em soldas laser, o Centro de R&D da Porsche em Weissach, na Alemanha, foi escolhido para a execução destes veículos.

A Figura 7 mostra algumas das etapas do processo de fabricação dos subconjuntos, da montagem dos veículos de demonstração e a estrutura final do veículo de demonstração.

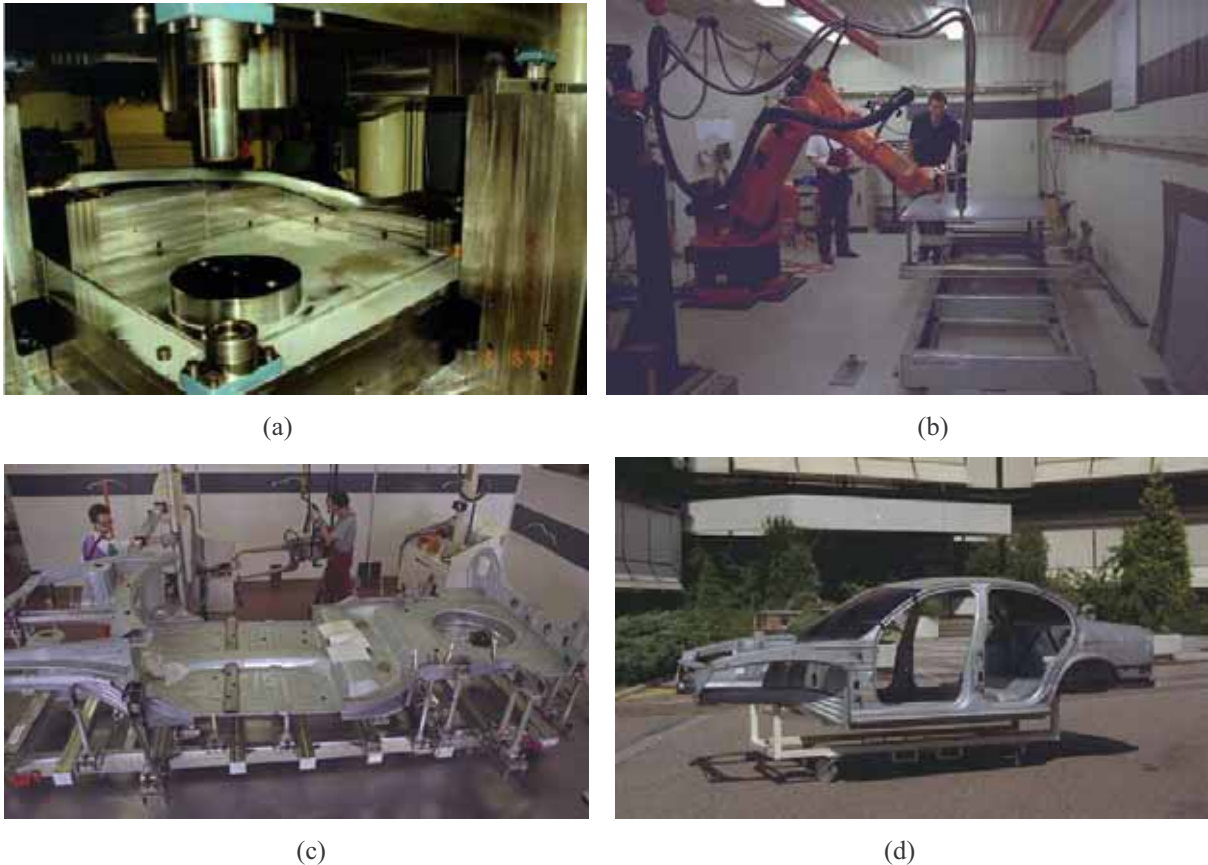


Figura 7 - Etapas da produção dos subconjuntos e montagem dos veículos de demonstração. (a) ferramenta de hidroconformação, (b) cabine de solda e corte a laser, (c) detalhe da montagem do assoalho completo, (d) estrutura final do veículo de demonstração pronto.

Após a finalização da construção dos veículos de demonstração, os mesmos foram submetidos aos ensaios físicos de rigidez flexional e torcional, primeiro modo de vibração; além de terem sido utilizados para a confirmação da massa da estrutura. Os resultados obtidos nesta fase podem ser observados na Figura 8, a seguir.

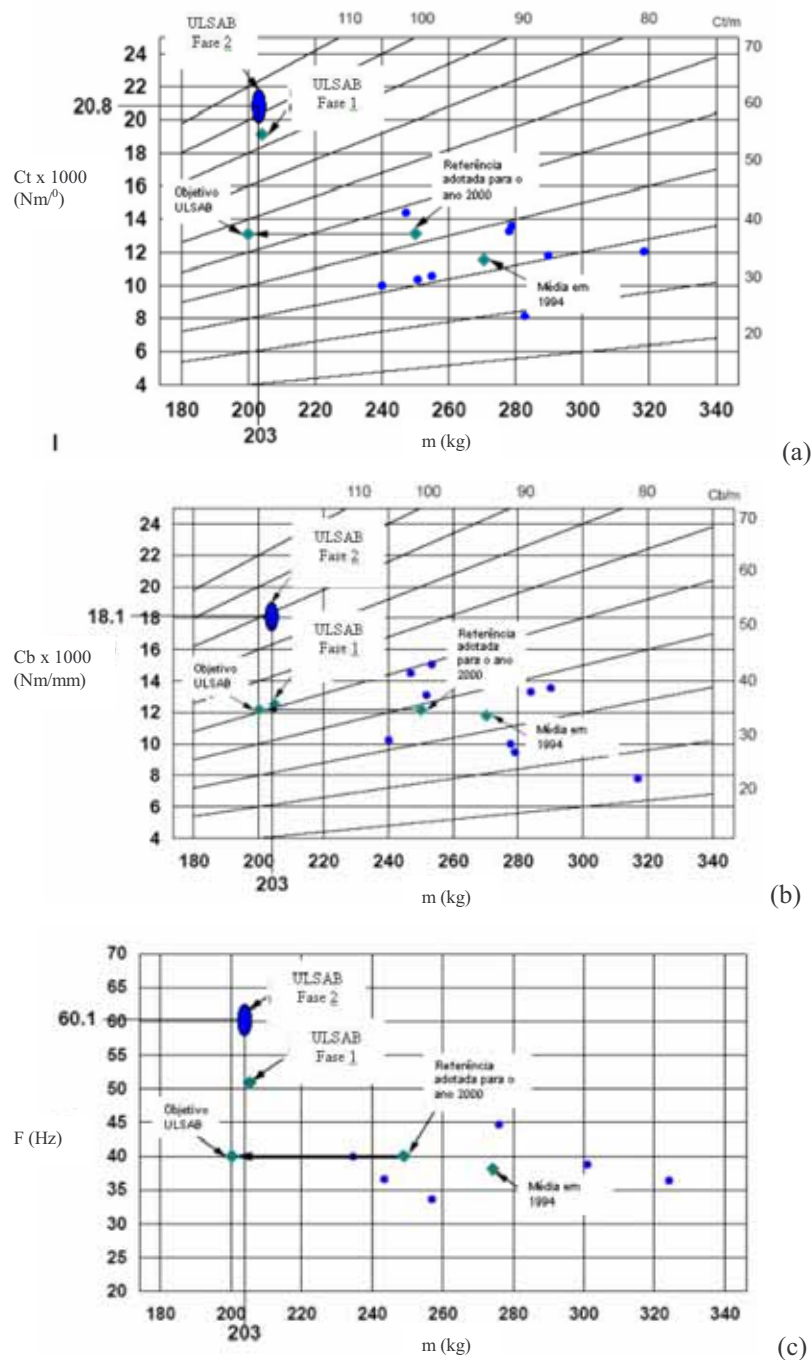


Figura 8 - Representação gráfica dos resultados obtidos com o projeto ULSAB. (a) Comparativo da rigidez torcional (Ct) em relação à massa entre o veículo de demonstração ULSAB e os veículos de mesmo segmento. (b) Comparativo da rigidez flexional (Cb) em relação à massa entre o veículo de demonstração ULSAB e os veículos de mesmo segmento. (c) Comparativo do primeiro modo de vibração em relação à massa entre o veículo de demonstração ULSAB e os veículos de mesmo segmento (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

Conforme mostram os gráficos acima, a estrutura do veículo de demonstração construído na fase 2 do projeto ULSAB pesou apenas 203 kg (25% menos do que a média de mercado no ano do projeto) e apresentou significativas melhoras nos índices de rigidez: acréscimo de 80% na rigidez torcional, 52% na rigidez flexional e 58% no primeiro modo de vibração (ALDERDICE; CAMPBELL, 1998).

Toda a tecnologia utilizada para confecção deste veículo de demonstração está disponível no mercado. Porém, apesar dos projetistas terem utilizado processos únicos, passíveis de patentes, o consórcio optou por tornar de domínio público todo o *know-how* adquirido com o desenvolvimento destas carrocerias.

Mesmo tendo provado sua viabilidade técnica, outro ponto fundamental para a comprovação da exequibilidade do projeto ULSAB é baseado na sua análise econômica. Nesta nova fase, o estudo de viabilidade econômica foi bastante mais detalhado e aprofundado que na fase 1 do projeto. A fim de permitir uma comparação do tipo “e se...”, toda a análise de custos realizada pela *Porsche Engineering Services* foi baseada num modelo desenvolvido pela *Camano Associates* (um grupo de pesquisas do MIT) e pela *IBIS Associates*. Este modelo leva em conta os custos de produção (investimentos em planta, ferramental, fabricação...) dos Estados Unidos. O modelo foi utilizado para calcular os custos do projeto ULSAB e de um automóvel sedan de quatro portas a ser produzido no ano 2000 (idealizado pelos projetistas da PES), denominado veículo de referência.

Essa análise mostrou um custo de produção por unidade de U\$ 947,00 para a estrutura do projeto ULSAB e U\$ 979,00 para o veículo de referência, produzido de forma convencional (BUSHHOLZ, 1998). Desta forma ficou demonstrado que é possível atingir uma substancial redução de peso sem necessidade de elevar o custo de produção. Sendo ainda mais otimista, o projeto demonstra grande potencial para reduções ainda mais significativas de peso.

Desta forma, através do projeto ULSAB, as indústrias siderúrgicas em conjunto com as indústrias automobilísticas demonstraram a viabilidade de fabricação de uma estrutura de aço mais leve e estruturalmente superior, oferecendo aos produtores de automóveis a oportunidade de reduzir o peso dos veículos, aliado a uma diminuição nos custos e uma melhoria do desempenho de seus veículos (LOWE, 1998).

Como conclusão final do projeto ULSAB, pode-se dizer que ele derrubou três mitos em relação ao aço (BUSHHOLZ, 1998):

- Que uma estrutura mais resistente precisaria ser mais pesada;
- Que uma estrutura mais leve represente necessariamente aumento de custos;
- Que a utilização de aço sempre esteja associada a aumento de peso.

2.2. O PROJETO ULSAC (*ULTRALIGHT STEEL AUTO CLOSURES*).

Vislumbrado o sucesso do projeto ULSAB, o consórcio mundial de siderúrgicas partiu, em 1997, para um novo projeto, denominado ULSAC (*Ultra-Light Steel Auto Closures*). Este projeto tratou do projeto de portas, capôs, tampas traseiras (no caso de veículos *hatches*) ou tampas de porta-malas (no caso de veículos *sedans*), Estes componentes foram analisados tendo em vista representarem por volta de 6% da massa de um veículo (BUCHHOLZ, 1998) e, portanto possibilitarem, além de outros possíveis atrativos, uma redução significativa da massa final do veículo.

Esse projeto também foi financiado por um consórcio internacional de grandes produtores de aço para auxiliar seus clientes do ramo automotivo, fornecendo-lhes soluções viáveis de redução de massa. Mais uma vez, foi contratada a PES (*Porsche Engineering Services, Inc.*) para realizar a concepção e desenvolvimento das fases de conceitual e de validação do programa.

O projeto iniciou-se, assim como o anterior, por um *benchmark* dos veículos em produção. Nesta fase, foram analisados 18 veículos produzidos no ano de 1997. Esse estudo estabeleceu a massa (sem vidro), dimensões e resistência estrutural para estes componentes. Foi necessário normalizar estes valores a fim de permitir uma comparação mais apurada entre os mesmos. Os resultados foram normalizados dividindo a massa total de um componente por pela área de sua superfície real, obtendo-se um valor em kg/m^2 , o que permite comparações diretas entre componentes de diferentes dimensões (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

Objetivos foram traçados para massa, resistência estrutural e dimensões para cada um destes componentes.

As metas dimensionais, à exceção da tampa traseira para veículos *hatches*, foram baseadas no *design* do projeto ULSAB, pois as dimensões do mesmo eram muito próximas às médias obtidas no *benchmark* do projeto ULSAC.

Os objetivos estruturais foram definidos como um valor médio entre as diversas especificações e solicitações de diferentes montadoras. Já o *target* de massa foi posicionado em 10% menor que o melhor valor encontrado nos veículos analisados (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

A fase conceitual apresentou como resultados novos designs das partes móveis da carroceria, os quais atingiram ou superaram os objetivos estruturais, com redução significativa da massa e, sobretudo apresentado nenhum ou pequeno aumento de custo. Uma comparação dos resultados de massa e custos pode ser realizada através das Tabelas 5 e 6 (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

Tabela 5 – Comparação de massas, resultados da fase conceitual do projeto ULSAC.

	Benchmark [kg/m ²]		Objetivo [kg/m ²]	ULSAC	
	Intervalo	Média		[kg/m ²]	[kg]
Porta – cobertura integrada	17,0 – 23,4	19,7	15,5	15,1	13,2
Porta – estrutura integrada				15,5	13,2
Porta – <i>frameless</i>				14,3	11,4
Capô – convencional*	8,8 – 14,2	11,5	8,0	7,9	13,3
Capô – tomada de ar integrada*				7,9	13,7
Capô – convencional**				8,5	14,3
Capô – tomada de ar integrada**				8,4	14,7
Tampa do porta-malas*	8,9 – 16,1	11,2	8,0	8,0	9,8
Tampa do porta-malas**				8,6	10,6
Tampa traseira - tubo hidroconformado	12,5 – 15,2	13,9	11,3	10,3	6,7
Tampa traseira – TWB				10,6	6,9
Tampa traseira – chapa hidroconformada				9,5	6,2

Tabela 6 – Comparação de custos, em US\$, resultados da fase conceitual do projeto ULSAC.

	Base de análise	ULSAC
Porta – cobertura integrada	67	67
Porta – estrutura integrada	Porta de estrutura integrada	72
Porta – <i>frameless</i>		65
Capô – convencional*	40	44
Capô – tomada de ar integrada*	46	52
Capô – convencional**	40	40
Capô – tomada de ar integrada**	46	46
Tampa do porta-malas*	31	36
Tampa do porta-malas**	31	33
Tampa traseira - tubo hidroconformado	29	36
Tampa traseira – TWB	29	33

*Painel interno construído em chapa sanduíche.

** Painel interno construído em chapa de aço.

A fase conceitual abrangeu todos os componentes supracitados. Já a fase de validação foi realizada exclusivamente sobre uma porta de conceito *frameless*, pois:

- Apesar da construção e validação de cada um dos componentes implicarem em alto custo, o consórcio desejava apresentar algo palpável, ficando definida a construção e validação de um único componente representativo (BUCHHOLZ, 1998);
- Esse componente incorporava a maioria dos avanços importantes em estrutura, tecnologia e uso de aço, desenvolvidos na fase conceitual e seria desta forma uma demonstração de sua factibilidade.

A fase de validação teve como escopo o refino do projeto da fase conceitual, além da construção e testes de um componente de demonstração, a fim de provar a factibilidade do projeto e validar os resultados numéricos, obtidos através de CAE, da fase conceitual.

Como a fase conceitual levou em conta diversos tipos de porta, sem focar aquelas de conceito *frameless* (sem estrutura, numa tradução livre para o português), um *benchmark* adicional foi realizado com o intuito de encontrar o “estado-da-arte” em portas realizadas neste conceito. Três portas, escolhidas de veículos em produção seriada e vendidos ao redor do mundo, foram compradas e testadas. Estas portas serão tratadas por A, B e C. Ainda para garantir a comparabilidade dos resultados, todas as portas foram testadas nos mesmos dispositivos (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

Assim como no projeto ULSAB, os projetistas realizaram o desenvolvimento baseados numa filosofia holística de projeto.

As empresas membro do consórcio ULSAC forneceram todos os dados e materiais usados na construção do componente de demonstração. Alguns materiais de alta e ultra-alta resistência foram empregados na construção das portas. Um bom exemplo pode ser o painel externo na porta, constituído de uma chapa de aço *Bake Hardenable* 260 MPa e espessura de 0,7 mm. Ou ainda o tubo inferior que tem como material de base um aço bifásico de ultra-alta resistência (DP800, com espessura de 1,56 mm).

Os processos aplicados também foram de grande importância para a redução de massa. Devem ser destacados as *Tailor Welded Blanks* (TWB) e os tubos hidroconformados.

Um dos primeiros passos na otimização dos projetos de portas é a supressão de reforços internos e aplicação de chapas produzidas por TWB (SHIN, 2002). O processo de TWB foi aplicado ao painel interno dianteiro da porta (Figura 9) por permitir aumento da segurança do veículo através da melhora das características estruturais, reduzir peso, reduzir número de componentes e ainda diminuir custos de montagem (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

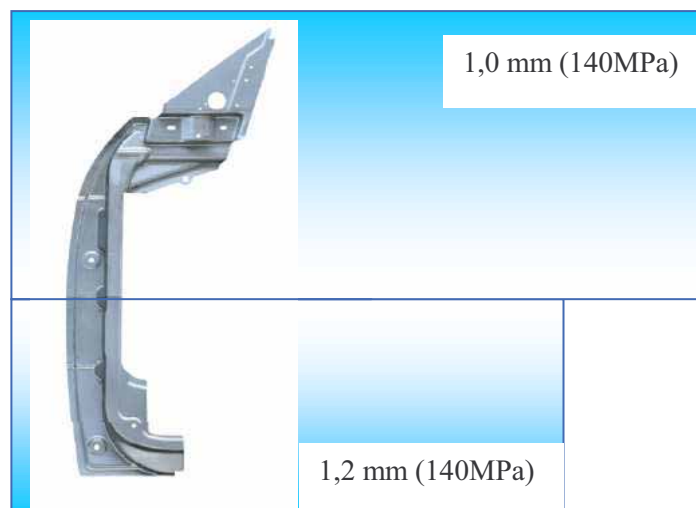


Figura 9 - Painel interno dianteiro da porta do projeto ULSAC. Constituído por duas chapas com limite de escoamento de 140 MPa, porém com diferentes espessuras: 1,0 mm e 1,2 mm.

A estrutura da porta consiste em quatro tubos (Figura 10), dos quais, o anterior e posterior são hidroconformados. Os outros dois são: um de perfil retangular em aço de ultra-alta resistência (tubo inferior) e outro de perfil circular em aço de alta resistência (tubo superior).



Figura 10 - Estrutura da porta. Tubos verticais em aço, hidroconformados e horizontais em aços de alta e ultra-alta resistência.

Os resultados da fase de validação foram surpreendentes. Em relação à massa, a porta produzida pesou 10,47 kg, resultado 1,76 kg abaixo do especificado na fase conceitual. Desta forma, a porta ULSAC ficou 42% mais leve que a média levantada na fase de validação e 33% mais leve que a melhor porta analisada na fase conceitual. Os detalhes em relação à massa podem ser vistos na Tabela 7.

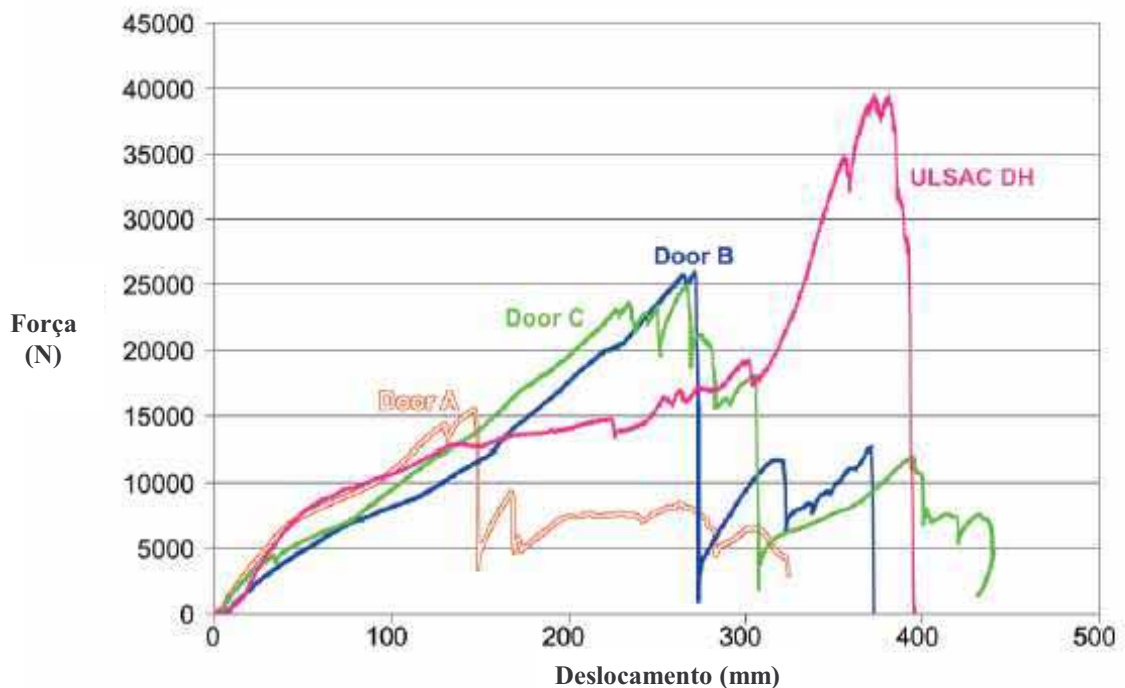
Tabela 7 - ULSAC e *Benchmark*: Comparação massa (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

	Massa normalizada [kg/m ²]	Massa [kg]
ULSAC – resultados da fase de validação	13,27	10,47
ULSAC – Objetivos da fase conceitual	15,50	12,23
Porta A	24,94	16,14
Porta B	19,76	15,55
Porta C	24,36	21,68
Média <i>benchmark</i> (fase de validação)	23,02	

Vários testes foram realizados com o intuito de provar a resistência e segurança das portas concebidas no conceito ULSAC. A Figura 11 ilustra o ensaio de intrusão quase estático, realizado segundo a FMVSS 214. O teste foi realizado sobre a porta ULSAC e sobre aquelas consideradas o “estado-da-arte” durante o *Benchmark*.



(a)



(b)

Figura 11 - Ensaio de intrusão quase estático. (a) dispositivo usado para os testes; (b) Resultados do teste realizados sobre a porta ULSAC e as três escolhidas durante o *Benchmark* (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

Os resultados do teste (ver Figura 11-b) mostram que a porta ULSAC apresenta melhores resultados que aquelas utilizadas para comparação. Desta forma, é razoável concluir que quando testada em um veículo completo ela irá também atender à legislação no que tange às especificações da norma FMVSS 214.

Para a análise de custos, foi utilizado o mesmo programa do projeto ULSAB e considerada uma produção de 225000 veículos/ano. O programa leva em conta todos os custos envolvidos na produção, desde a seleção de materiais até os diferentes valores para cada tipo de processos produtivo e montagem. Os resultados desta análise econômica podem ser vistos na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Análise de custos de produção da porta ULSAC (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

	ULSAC Porta esquerda e direita [US\$]	Estado da Arte Porta esquerda e direita [US\$]
Fabricação das peças	79	91
Matéria-Prima	28	48
Estampagem	15	16
Estampagem TWB	12	20
Hidroconformação	15	0
Componentes comprados	9	7
Montagem	54	47
Custo total da porta (2 unidades)	133	138

Esses resultados, divulgados em abril de 2000 pela PES, mostram que é possível produzir em grande escala uma porta de características mecânicas similares ou melhores às produzidas atualmente, com uma redução significativa na massa, e sem aumento no custo de produção; o que repete a conclusão do projeto ULSAB: Aços são viáveis para a produção de veículos mais leves, sem aumento de custos.

2.3. O PROJETO ULSAS (*ULTRA LIGHT STEEL AUTO-SUSPENSIONS*)

O projeto ULSAS (*Ultra Light Steel Auto-Suspensions*) foi o terceiro elemento na iniciativa das grandes indústrias siderúrgicas em desafiar o aumento da utilização de metais leves, como o alumínio e o magnésio, e dos materiais poliméricos.

Esse programa, assim como os anteriores, tem como objetivo mostrar a viabilidade da utilização de aços de alta resistência na concepção de veículos mais leves e, por consequência, mais econômicos e menos poluentes. Pretende ainda desenvolver sistemas de suspensão com elevado desempenho, segurança passiva e eficiência.

O consórcio de siderúrgicas resolveu analisar as suspensões automotivas, tendo em vista que elas representam, em média, 12% do peso de um veículo, ficando atrás apenas da carroceria, correspondente a 20%, e do sistema de *powertrain* (motor e transmissão), que representa 18% de peso de um carro (EUROPEAN AUTOMOTIVE DESIGN, 2000).

Desta vez, o projeto foi conduzido pela *Lotus Engineering*, localizada no Reino Unido, e teve duração de aproximadamente dois anos, sendo concluído em 2000 (VAUGHN; MARTIN, 2000). Os engenheiros da Lotus concentraram seus esforços na suspensão traseira, já que nelas o ganho em massa poderia ser maior, especialmente nas grandes estruturas *multi-link*. Além do fato de as suspensões traseiras apresentarem uma variedade muito maior que as dianteiras, as quais, à exceção de algumas *double wish-bone* (duplo triângulo), são baseadas no conceito *MacPherson* (EUROPEAN AUTOMOTIVE DESIGN, 2000).

O Projeto foi dividido em duas fases, a primeira de *benchmark* e definição de objetivos, e a segunda de projeto. Durante a primeira fase, iniciada em 1997 com duração de dez meses (EUROPEAN AUTOMOTIVE DESIGN, 2000), foram analisadas as suspensões de 16 veículos considerados pela Lotus como “os melhores da categoria” em *ride and handling* (dirigibilidade) e NVH (ruídos e vibrações) (ULSAS – PRESENTATION, 2000):

- Nove Europeus: Audi A6, Peugeot 306, Fiat Brava, Vauxhall Astra, Vauxhall Vectra, BMW série 5, Nissan Primera, Volkswagen Golf e Ford Mondeo;
- Quatro Norte-Americanos: Ford Taurus, Mercury Cougar, Dodge Intrepid e Chevrolet Lumina;
- Três Asiáticos: Hyundai Elantra, Honda Accord e Toyota Camry.

Esse estudo inicial permitiu reduzir o número de casos a analisar para quatro, ou seja, seria analisada apenas a suspensão considerada o “estado-da-arte” em cada sistema encontrado no *benchmark* realizado ao redor do mundo. Os quatro diferentes sistemas a analisar, em função do tipo de veículo estão representados na Figura 12, a seguir (ULSAS-ENGINEERING REPORT, 2001).

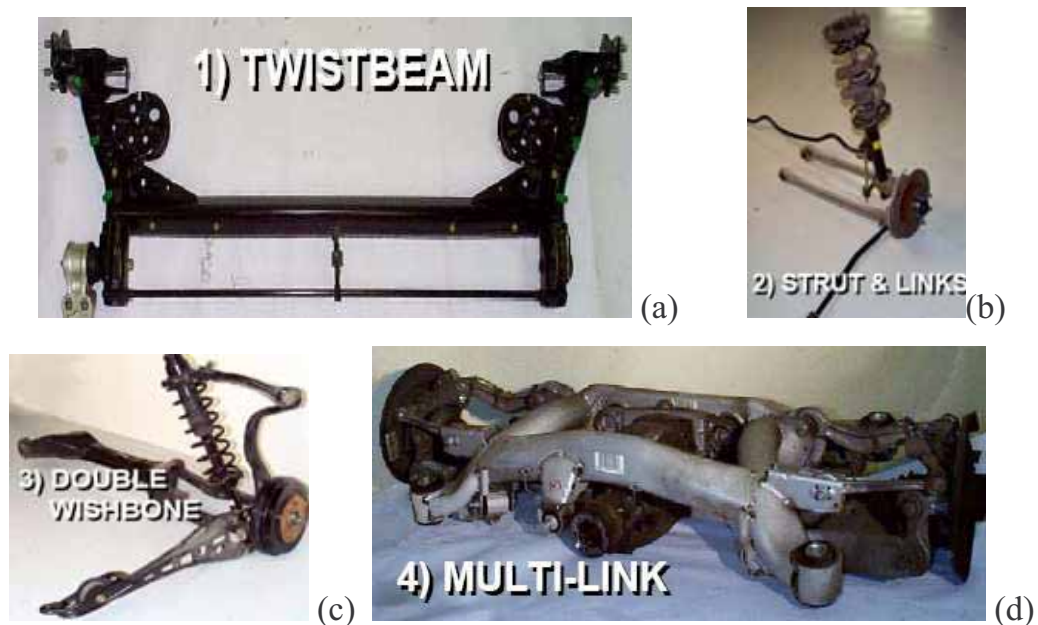


Figura 12 - Conjuntos de suspensão traseira, considerados o “estado-da-arte” na fase de *Benchmark* do projeto ULSAS. (a) *Twistbeam* – eixo de torção, (b) *strut & links*, (c) *double wishbone* – duplo triângulo e (d) *multi-link*.

Foi então definido que seriam projetados cinco diferentes sistemas de suspensão ULSAS, uma correspondente àquela considerada o “estado-da-arte” em cada sistema; e ainda uma quinta, denominada modelo Lotus, onde os engenheiros estariam livres para conceber o que achassem ideal em termos de suspensão traseira.

Definidos os modelos de suspensão a conceber, passou-se à descrição dos objetivos de ganhos em massa e/ou custo para cada diferente sistema. Ficou definida uma distinção para modelos baseados em aço ou que tivessem o alumínio como material de base. Desta forma, os objetivos foram:






- Para suspensões com projetos intensivos em aço, o projeto ULSAS deveria apresentar reduções de massa de 20 %, sem aumento de custo;
- Para suspensões com projetos baseados no alumínio, o resultado deveria ser de redução de 20% em custo, sem aumento significativo na massa do conjunto;
- Além disso, em paralelo foram estabelecidos 16 critérios de desempenho que deveriam ser atingidos pelas suspensões desenvolvidas (EUROPEAN AUTOMOTIVE DESIGN, 2000).

O único modelo que apresentava em série a utilização realmente intensiva do alumínio era a suspensão *multi-link*.

Outra observação importante em relação aos objetivos é que, como o projeto da suspensão modelo Lotus foi baseado numa adaptação dos modelos *double wish-bone*, para verificação dos seus resultados, ela foi comparada à *double wish-bone* melhor conceituada no *benchmark*.

A Tabela 9 mostra os objetivos e resultados obtidos por cada modelo de suspensão considerado no projeto ULSAS:

Tabela 9 - Resumo dos resultados do projeto ULSAS – comparativo em relação aos objetivos de massa e custo (adaptado de ULSAS-ENGINEERING REPORT, 2001).

Modelo de suspensão Figuras ULSAS	Reduções de custo		Reduções em massa	
	Objetivo	Resultado	Objetivo	Resultado
Eixo de torção 	0%	6%	20%	32%
<i>Strut and links</i> 	0%	2%	20%	25%
Duplo Triângulo 	0%	0%	20%	17%
<i>Multi-link *</i> 	20%	30%	0%	3%
Modelo Lotus ** 	0%	22%	20%	34%

* Comparada a sistemas com uso intensivo de alumínio

** Comparada ao sistema de duplo triângulo

Esses resultados foram obtidos através do uso intensivo de ferramentas computacionais para desenvolvimento e análise do projeto. A Lotus utilizou análises lineares e não lineares por elementos finitos, análises dinâmicas utilizando o *software* ADAMS e desenho auxiliado por computador, através do CATIA. Uma das palavras chaves desse estudo foi que, ao mesmo tempo em que a Lotus focalizou seu estudo na redução de massa, aproveitou-se para a otimização dos projetos em relação à desempenho. Os parâmetros de desempenho incluem severas medidas de dirigibilidade e NVH dos veículos (VAUGHN; MARTIN, 2000).

A redução de massa ou ganho em custos foi obtida através da utilização intensiva de aços de alta e ultra-alta resistência além de processos avançados de conformação e produção, como a hidroconformação e cortes a plasma. É importante ressaltar a importância da utilização de aços bainíticos (uma subclasse dos bifásicos) nos componentes de suspensão (ANDRADE; TAISS; ROSA, 2002).

Um exemplo de como se pode ganhar com a aplicação destes materiais de alta-resistência é a barra-estabilizadora, elemento utilizado para melhorar o refinamento das suspensões, no sentido de reduzir os balanços transversais de carroceria. A Lotus trabalhou em projetos de barras tubulares, construídas em aços de alta-resistência. Uma forma básica de tubo foi desenvolvida utilizando os parâmetros desejáveis para o sistema *Multi-link*. Os resultados foram de 36 a 48% mais leves, necessitando de materiais com resistência mecânica aumentada em 5 a 10% (VAUGHN; MARTIN, 2000).

Outro exemplo de elemento de suspensão através do qual podemos mostrar a importância da evolução dos materiais de base são as rodas. A utilização de aços a alto limite de elasticidade de estrutura bifásica (ferrítica-martensítica) permitiu reduzir a espessura das mesmas. Somadas a esse fator as novas possibilidades de conformação (entre elas, as chapas soldadas), foi possível obter importantes ganhos em massa: 5,1 kg contra 7,7 kg, para rodas de 15 polegadas, por exemplo (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 1999).

Em 2001, a Lotus modificou a suspensão do seu esportivo Lotus Elise de alumínio para aço, possibilitando uma redução de custos de aproximadamente US\$190,00 por veículo (uma redução de aproximadamente 64% em relação ao projeto inicial). Destacou-se neste novo projeto, a utilização dos aços forjados resfriados a ar, que foram aplicados devido a sua dureza que decresce da parte exterior para o centro e da sua maior facilidade de processamento. Essa redução de custo foi obtida com um pequeno aumento de massa, inferior a 3,5 libras (aproximadamente 2 kg), mas que permitiu uma melhora significativa no desempenho do veículo (ANDERSON; LORINCZ, 2001).

Apesar do projeto ULSAS ter sido realizado apenas em ambiente computacional, sem a construção de protótipos para testes físicos, com o final de mais este projeto, ratifica-se a idéia de que é possível construir veículos mais leves e mais baratos utilizando o aço como material de base, destacando ainda os benefícios da utilização de aços de alta e ultra-alta resistência.

Esses benefícios podem ser ainda ilustrados concretamente pela utilização do conceito num veículo de produção seriada atual, o Lotus Elise, no qual a aplicação dos conceitos ULSAS permitiu uma redução significativa de custo e melhora de desempenho sem aumento significativo de massa.

2.4. O PROJETO ULSAB – AVC (*ADVANCED VEHICLE CONCEPTS*)

Com a conclusão dos projetos ULSAC e ULSAS, sua difusão no ano de 2000 e a boa recepção destes relatórios por parte da comunidade automobilística mundial, as grandes siderúrgicas vislumbraram a possibilidade de realização de um trabalho ainda mais amplo, o qual foi realizado por um novo consórcio, denominado ULSAB – AVC (*Ultra-Light Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts*) e constituído pelas seguintes empresas (ULSAB-AVC, OVERVIEW REPORT, 2002):

ACERALIA Corporación Siderúrgica, S.A. – Espanha
 AK Steel Corporation – Estados Unidos
 Shanghai Baosteel Group Co. – China
 Bethlehem Steel Corporation – Estados Unidos
 BHP Steel – Austrália
 China Steel Corporation – Taiwan
 CorusGroup – Holanda
 CorusGroup – Reino Unido
 Dofasco Inc. – Canadá
 Iscor Flat Steel products – África do Sul
 Ispat Inland, Inc. – Estados Unidos
 Kobe Steel, Ltd. – Japão
 LTV Steel Company, Inc. – Estados Unidos
 National Steel Corporation – Estados Unidos
 Nippon Steel Corporation – Japão
 NKK Corporation – Japão
 NOVÁ HUT, a. s. – República Tcheca
 Pohang Iron and Steel Co., Ltd. (POSCO) – Coréia do Sul
 Rautaruukki Oyj – Finlândia
 Rouge Steel Company – Estados Unidos
 Steel Authority of Índia Limited (SAIL) – Índia
 Salzgitter AG – Alemanha
 SIDERAR S.A.I.C. – Argentina

SSAB Tunnplat AB – Suécia
Stelco Inc. – Canadá
The Tata Iron and Steel Company, Ltd. (TISCO) – Índia
ThyssenKrupp Stahl AG – Alemanha
Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (USIMINAS) – Brasil
USINOR Groupe – França
United States Steel LCC – Estados Unidos
VALLOUREC GROUPE – França
Voestalpine STHAL GmbH – Áustria
Weirton Steel Corporation – Estados Unidos

O ULSAB-AVC consiste na mais recente realização das siderúrgicas mundiais, oferecendo uma série de soluções em aço para os desafios enfrentados atualmente pelas montadoras, ou seja, aumentar a eficiência do consumo de combustível, aprimorando a segurança e mantendo a viabilidade econômica. Esse projeto foi conduzido pela Porsche Engineering Services e focou a produção de veículos do ano 2004 e século XXI, os quais devem apresentar um compromisso com o meio-ambiente, serem seguros, rentáveis e possíveis de construção num futuro próximo. O programa concluiu que esses objetivos só poderiam ser atingidos através da combinação entre novos aços multifásicos de alta resistência, processos sofisticados de manufatura e conceitos inovadores de projeto.

O ULSAB-AVC divergiu do projeto ULSAB, pois, enquanto este trabalhou apenas utilizando materiais que se encontravam disponíveis no mercado na época da concepção do projeto (concluído em 1998), as empresas membro do programa *Advanced Vehicles Concepts*, definiram que deveriam considerar também os materiais inovadores, ainda que alguns deles só fossem estar disponíveis para utilização em série no ano de 2004 (ADAM, 2002).

Essa política foi necessária devido aos objetivos muito mais rigorosos do projeto ULSAB-AVC em relação às iniciativas anteriores da indústria do aço. Isso ocorreu em função do paradoxo entre a necessidade de aumentar os índices de segurança dos veículos (o que aumentaria seu peso) imposta pelas montadoras e novas legislações para o ano de 2004, e a demanda crescente pela redução de emissão de poluentes (a qual passa pela redução de massa). Foram essas características conflitantes que propiciaram a oportunidade única de exploração de novos aços durante o projeto ULSAB-AVC (KAVANAGH, 2002).

O projeto ULSAB-AVC apresentou conceitos avançados de projeto que visavam auxiliar as montadoras na utilização mais eficiente do aço e prover uma plataforma que permitisse (ULSAB-AVC, OVERVIEW REPORT, 2002):

- ✓ Antecipar os requisitos relativos a ensaios de impacto (*Crash Tests*) do ano de 2004;
- ✓ Melhora significativa da eficiência no consumo de combustível;
- ✓ Responsabilidade ambiental otimizada, através da melhora nos índices de emissões, redução na utilização de matérias-primas e reciclabilidade;
- ✓ Possibilitar a produção seriada de grande volume, permitindo ganhos de escala e custos de produção atraentes.

Na determinação das metas do projeto ULSAB-AVC, foram de vital importância dois outros programas: o EUCAR (*The European CO₂ Reduction Program*) e o *U.S. Partnership for a New Generation of Vehicles* (PNGV). Além destes projetos, outra categoria adotada para o *benchmark* foi a dos veículos com peso em torno de 900 kg.

Desta forma, o projeto foi focado no desenvolvimento de uma plataforma única a ser utilizada por dois projetos: Um da Classe-C Européia (também conhecida com a classe do Golf) e outro que pudesse ser classificado como um *sedan* médio americano (PNGV). Foram desenvolvidas superfícies em 3D que mostram representações dos conceitos de veículos resultantes do projeto ULSAB-AVC. Elas podem ser vistas nas Figuras 13 e 14, a seguir.



Figura 13 - Representação do conceito ULSAB-AVC para veículo da classe C. Em (a) vista frontal e em (b) vista lateral (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).



Figura 14 - Representação do conceito ULSAB-AVC - Classe PNGV. Em (a) vista frontal e em (b) vista lateral (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A fim de tornar os dados mais precisos, dois veículos foram comprados, desmontados e avaliados em detalhes: O Ford Focus (Classe C) e o Peugeot 206 (Classe B). O Ford Focus foi escolhido por ser um veículo recente, representante da classe C, e que atinge os requisitos de segurança. Já o Peugeot 206 foi selecionado em função da sua massa de aproximadamente 909 kg em sua versão básica sem opcionais. Para a classe PNGV, os dados foram obtidos a partir de veículos de tamanho similar (como o Audi A6 e Mercedes Classe E).

Como forma de ilustrar a importância da classe C na Europa basta dizer que ela representa mais que um terço de *market share* no velho continente (ADAM, 2002). São exemplos de veículos da classe C, o Volkswagen Golf, os Citroën Xsara e C4, o Peugeot 307, Fiat Stilo, Renault Mégane, Ford Focus, GM Astra, Toyota Yaris e Audi A3, entre outros.

Como o PNGV é mais longo que o Classe C, a parte traseira da plataforma do primeiro é alongada em relação ao segundo, o que pode ser visto na Figura 15. Entretanto, a concepção holística do projeto ULSAB-AVC permitiu que, através da plataforma única desenvolvida, os veículos propostos compartilhassem 22% de seus componentes, além de apresentarem a mesma frente (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

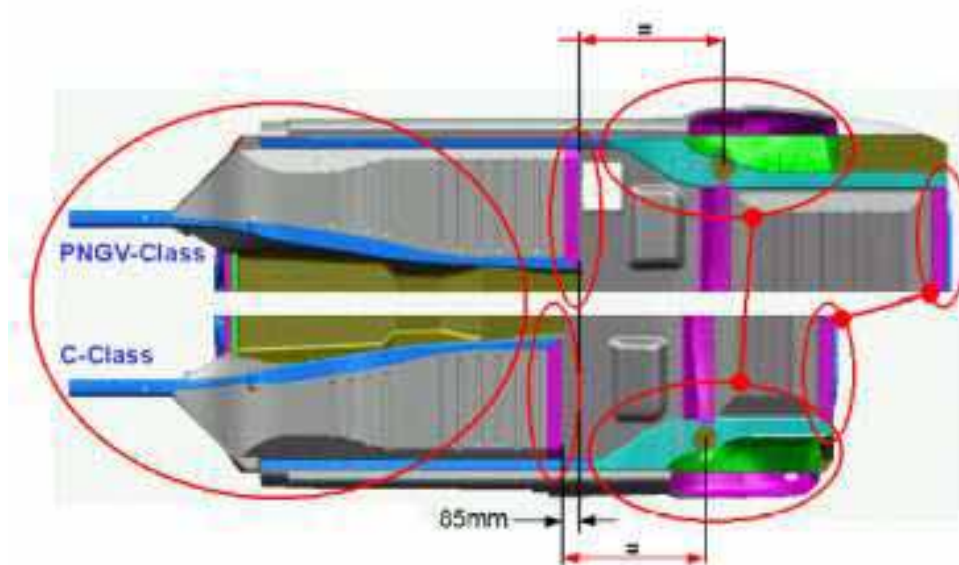


Figura 15 - Plataforma comum utilizada para o ULSAB-AVC PNGV e classe C (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A partir destas análises, foram definidos objetivos bastante ambiciosos para o projeto ULSAB-AVC, os quais podem ser divididos em três grupos principais de metas:

- Segurança;
- Responsabilidade ambiental (eficiência no consumo de combustíveis, redução de emissões de poluentes e reciclabilidade);
- Viabilidade econômica;

2.4.1. O critério segurança dentro do projeto ULSAB-AVC

Para avaliação do quesito segurança, foram realizadas simulações de ensaios de impacto, as quais deveriam levar em conta tanto a segurança dos ocupantes do veículos quanto dos pedestres em caso de colisão. Para avaliação dos critérios de impacto, foram utilizadas as normas ligadas ao NCAP – *New Car Assessment Program* (DITTLO; SANZ; SCHNEIDER, 2003).

Os ensaios escolhidos para as análises de *crash-tests* foram aqueles que seriam representativos do ano de 2004, tanto na Europa quanto nos Estados Unidos:

- Euro – NCAP → Combinação de três testes: ensaio de colisão frontal parcial (apenas 40% da área frontal do veículo se choca contra a barreira deformável), outro de impacto lateral e ainda um terceiro, de impacto contra um poste.
- US – NCAP → Ensaio de impacto frontal contra uma barreira rígida;
- US – SINCAP → Ensaio de colisão lateral;

As Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram uma representação esquemática destes testes, bem como suas especificações de ensaio e objetivos de resultados.


Euro – NCAP (frontal <i>offset</i>)	Características
<p data-bbox="228 398 826 517">64 km/h (40 mph), choque frontal parcial de 40% da área frontal do veículo contra uma barreira deformável, impacto a 0°.</p> 	<p data-bbox="842 398 1445 472">Deslocamento da coluna A inferior a 50 mm;</p> <p data-bbox="842 479 1445 553">Intrusão da região dos pés inferior a 150 mm;</p> <p data-bbox="842 560 1445 678">Deslocamento da coluna de direção inferior a 80 mm na direção do deslocamento.</p>

Figura 16 - Representação do ensaio Euro-NCAP de impacto frontal *offset* contra uma barreira deformável e suas especificações (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).


US – NCAP (Impacto frontal)	Características
<p data-bbox="228 1267 826 1386">35 mph (56 km/h), choque total frontal contra uma barreira rígida. Ângulo de impacto de 0°</p> 	<p data-bbox="842 1267 1445 1341">Deformação dinâmica total inferior a 650 mm;</p> <p data-bbox="842 1348 1445 1467">Deslocamento máximo da coluna de direção de 80 mm na direção do deslocamento.</p>

Figura 17 - Representação do ensaio US-NCAP de impacto frontal contra uma barreira rígida e suas especificações (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

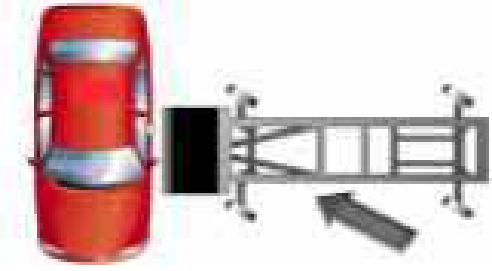
US – SINCAP (Impacto Lateral)	Características
<p>Impacto lateral realizado por um mecanismo de 1370 kg, deslocando-se a 63° em relação ao eixo longitudinal do veículo a uma velocidade de 38,5 mph (62 km/h).</p> 	<p>Velocidade máxima de penetração: 6 m/s a 7 m/s.</p>

Figura 18 - Representação do ensaio US-SINCAP de impacto lateral e suas especificações (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

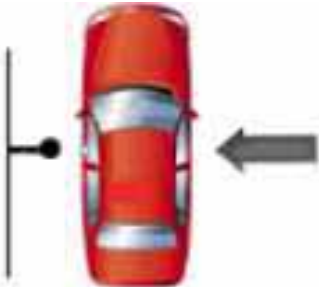
Euro – NCAP (impacto contra poste)	Características
<p>Impacto a 32 km/h contra um cilindro rígido de diâmetro 254 mm alinhado com o centro de gravidade da cabeça do ocupante. Esse cilindro deve ir de 100 mm acima da altura do solo até acima da linha do teto do veículo</p> 	<p>Velocidade máxima de intrusão do cilindro no momento do choque com o ocupante inferior a 8 m/s.</p>

Figura 19 - Representação do ensaio de impacto contra poste e suas especificações (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

É importante ressaltar a contradição entre os ensaios de impacto frontal realizados na metodologia europeia em relação à americana. No ensaio US-NCAP é necessário que as partes estruturais do veículo absorvam muita energia para garantir um momento de impacto pequeno. Por outro lado, o ensaio Euro-NCAP especifica uma penetração mínima na região dos pés dos ocupantes, o que se obtém através de um momento de impacto longo e menor absorção de energia. O que permitiu aos dois veículos do projeto ULSAB-AVC obterem um resultado satisfatório foi a utilização dos aços multifásicos e seu efeito de endurecimento a grandes deformações (ADAM, 2002).

Ainda para ilustrar a importância da utilização dos aços com melhores características na obtenção de bons resultados nos ensaios de impacto, podemos ressaltar que o primeiro veículo a receber cinco estrelas (nota máxima) no ensaio Euro-NCAP foi o Renault Mégne II, o que aconteceu graças à utilização dos aços HLE – de Alto Limite Elástico (BLANCHET, 2002).

Tabela 10 - Desempenho estrutural teórica do projeto ULSAB-AVC (ADCOCK, 2002).

Desempenho teórico em ensaio de impacto frontal Euro-NCAP			
Euro-NCAP (impacto frontal)	Objetivo	Classe C	Classe PNGV
Intrusão máxima na região dos pés (mm)	150	115	130
Deslocamento máx. coluna de direção (mm)	80	25	20
Deslocamento máximo da coluna A (mm)	50	10	10

A Tabela 10 mostra, a título ilustrativo, os objetivos e resultados obtidos pelos conceitos ULSAB-AVC no ensaio Euro-NCAP de impacto frontal *offset*. Partindo dos resultados obtidos nas simulações por computador para os ensaios de impacto e comparando-os aos resultados obtidos por veículos atuais tomados como referência no estudo de *benchmark*, concluiu-se que o veículo da classe C do projeto ULSAB-AVC poderia atingir uma classificação de quatro ou cinco estrelas no ensaio US-NCAP e cinco estrelas no teste US-SINCAP. Já o veículo ULSAB-AVC da classe PNGV

apresenta potencial para atingir cinco estrelas em ambas as normas americanas (US-NCAP e US-SINCAP). Além disso, tanto o veículo classe C como PNGV do projeto ULSAB-AVC poderiam obter cinco estrelas no teste europeu (Euro-NCAP). A Tabela 11, a seguir, ilustra estes resultados.

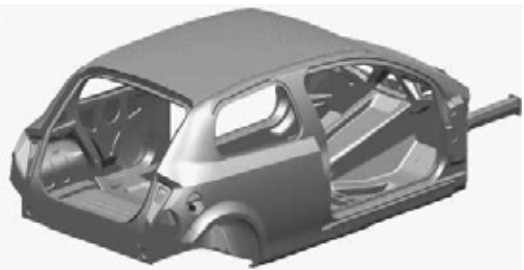

Tabela 11 - Potencial dos veículos do projeto ULSAB-AVC em relação à classificação *star rating* dos testes NCAP (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Potencial do projeto ULSAB-AVC em relação à classificação <i>star rating</i>		
Critério de avaliação	ULSAB-AVC classe C	ULSAB-AVC classe PNGV
Euro-NCAP	★★★★★	★★★★★
US-NCAP	★★★★★ ou ★★★★★★	★★★★★
US-SINCAP	★★★★★	★★★★★

É importante lembrar ainda que os resultados de impacto contra pedestres devem apresentar também excelentes resultados em função da posição quase horizontal adotada para o motor e da suspensão dianteira sem torres verticais para as molas. Desta forma, não há pontos duros sob o capô, o que é necessário para uma ótima deformação do mesmo em caso de um impacto contra pedestre (ADAM, 2002).

Ainda em relação à segurança, foram realizados ensaios de rigidez da carroceria através de CAE. Para tal, analisou-se a rigidez flexional e torcional dos dois modelos de carroceria, além do primeiro modo de vibração. Mais uma vez, os resultados foram bastante positivos, confirmando a viabilidade da proposta de utilização de novos processos e aços de alta resistência. A Tabela 12 mostra os resultados obtidos pela simulação.

Tabela 12 - Desempenho estrutural das carrocerias ULSAB-AVC (adaptado de DITTLO; SANZ; SCHNEIDER, 2003).

		Rigidez Flexional (N/mm)	Rigidez Torcional (Nm/°)	1° modo de vibração (Hz)
Classe C 	Objetivo	11000	12000	35
	Resultado	17050	14350	49
Classe PNGV 	Objetivo	12000	13000	40
	Resultado	17150	17400	44

Deste modo, o ULSAB-AVC forma uma base perfeita para veículos com um desempenho em segurança sem precedentes. Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS, na sigla em inglês) permitiram melhorar os resultados nas simulações de impacto enquanto simultaneamente reduziram a massa e o custo do veículo, o que faz do ULSAB-AVC um padrão no qual os futuros projetos de veículos deverão se focar (CHAINER, 2002).

2.4.2. A responsabilidade ambiental

Fator crucial para o aumento da eficiência de consumo de combustível foi o aumento da utilização de materiais de alta resistência e aprimoramento do projeto da estrutura, os quais possibilitaram a redução de massa do veículo. Comparado com a média de peso de um veículo atual da Classe C (1150 kg), o ULSAB-AVC, com seus 933 kgm, obteve uma redução de massa de mais de 200 kg (KAVANAGH, 2002).

A redução de massa e utilização intensiva de aço possibilitam ainda dois outros ganhos ambientais. O primeiro é que a redução de massa significa menos utilização de matéria-prima e, portanto mais respeito ao ambiente. O segundo fator está relacionado à reciclabilidade do aço, pois quanto mais um material puder ser reciclado menos ele precisará ser extraído de jazidas e beneficiado. O aço está entre os materiais mais reciclados no mundo. A Figura 20 ilustra a relevante reciclabilidade dos aços.

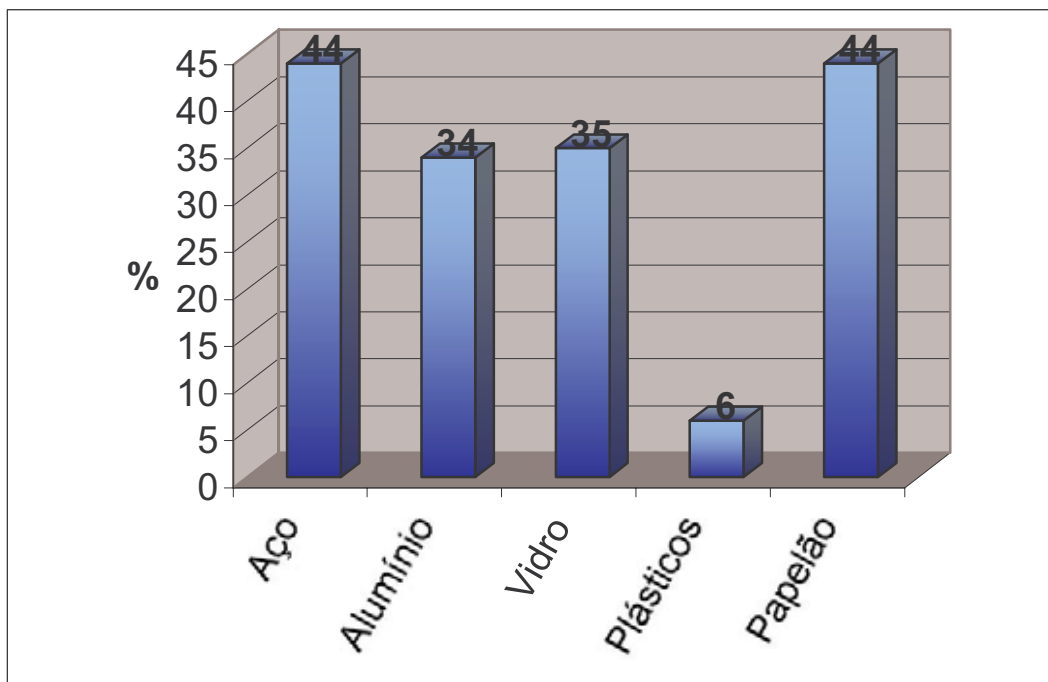


Figura 20 - Percentagem de reciclagem dos principais materiais na comunidade europeia no ano de 1996 (BLANCHET, 2002).

Além da redução em massa, foi muito importante a adoção de motores mais modernos de maior eficiência. Para a versão gasolina, por exemplo, foi utilizado um motor de 3 cilindros, 12 válvulas, 1,2 litros, 61 kW, 108 N.m de torque e 85 kg (DITTLO; SANZ; SCHNEIDER, 2003).

Estudos comprovaram que a utilização de uma caixa de câmbio automática possibilitaria melhor eficiência de consumo. Optou-se pela utilização de uma transmissão manual com um atuador automatizado (conhecida pelo nome genérico de

Tip-Tronic), a fim de possibilitar a redução de massa e melhora na emissão de poluentes e reduzir o número de componentes. Desta forma, o condutor tem autonomia para decidir se prefere conduzir no modo automático, reduzindo o consumo de combustível, ou fazer uma condução menos econômica, utilizando o modo manual (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Dois métodos foram utilizados para o cálculo da emissão de poluentes e consumo de combustível: o ciclo europeu NDEC 2000 (*New European Driving Cycle*) e o americano combinado FTP 75. Todos os resultados (os quais podem ser vistos na Tabela 13) excederam às especificações (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Tabela 13 - Valores calculados para emissão de CO₂ e consumo de combustível dos veículos ULSAB-AVC (adaptado de ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

	Classe C		Classe PNGV	
	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
CICLO EUROPEU				
Emissão CO ₂ (NEDC 2000) [g/km]	106	86	108	89
Consumo [km/l]	22,7	31,2	22,2	29,4
CICLO AMERICANO				
Emissão de CO ₂ (combinado) [g/km]	105	86	108	92
Consumo combinado [km/l]	22,5	31,0	22,1	28,9
Consumo urbano [km/l]	20,8	28,1	20,4	26,4
Consumo auto-estrada [km/l]	26,0	35,7	25,5	33,2

Tendo-se comprovado a redução de massa, atendimento aos critérios de rigidez e segurança, o último ponto a considerar é a viabilidade econômica da produção do veículo projetado através da filosofia ULSAB-AVC.

2.4.3. A viabilidade econômica do projeto ULSAB-AVC

Um modelo de custos foi proposto para determinar quanto custaria produzir o automóvel definido no projeto ULSAB-AVC. Esse modelo tomou em conta todos os aspectos da manufatura do veículo, desde os investimentos na fabricação de todas as partes do mesmo, até o processo final de montagem. Focou-se o estudo principalmente no entendimento dos processos que envolviam novos métodos de fabricação, especialmente as TWB e a hidroconformação. Esse modelo foi apresentado na forma de uma planilha eletrônica a fim de permitir a qualquer usuário incluir os dados relativos à sua empresa e chegar a conclusões mais próximas de seu caso particular.

O projeto ULSAB-AVC considerou como base para a análise de custos, condições de contorno bastante realistas:

- Produção anual de 225000 veículos
- 240 dias trabalhados por ano
- Custo salarial de US\$ 44 / hora
- 2 turnos por dia

A Tabela 14, a seguir, mostra os resultados obtidos para as versões a gasolina. Para conhecer os custos com componentes e custos totais da versão diesel basta somar US\$ 700,00 aos valores correspondentes da versão gasolina.

Tabela 14 - Custos de produção do veículo ULSAB-AVC em sua versão gasolina (DITTLO; SANZ; SCHNEIDER, 2003).

	Classe C	Classe PNGV
Custo de fabricação de componentes [US\$]	7.905,00	8.163,00
Custo de montagem [US\$]	1.285,00	1.375,00
Custo total de manufatura [US\$]	9.190,00	9.538,00

A análise de custos do projeto ULSAB-AVC mostra que um conceito de veículo avançado e de eficiência em massa é economicamente viável quando produzido em aço. O aço, aliás, não é só um facilitador desses projetos eficientes, ele é a chave para veículos seguros e ambientalmente responsáveis de um futuro próximo (KAVANAGH, 2002).

2.5. DESCRITIVOS DE PROCESSOS UTILIZADOS NOS PROJETOS ULSAB

Para iniciar esse capítulo, é fundamental ratificar que a utilização de processos, ou novos, ou pouco utilizados até aquele momento pela indústria automobilística, deu uma contribuição significativa aos resultados positivos de melhora estrutural e redução de peso obtidos pelos projetos da família ULSAB.

A fim de mostrar a diversidade de processos utilizados, bem como identificar aqueles mais significantes no desenvolvimento destes projetos, a Figura 21 indica os diferentes processos utilizados no ULSAB-AVC.

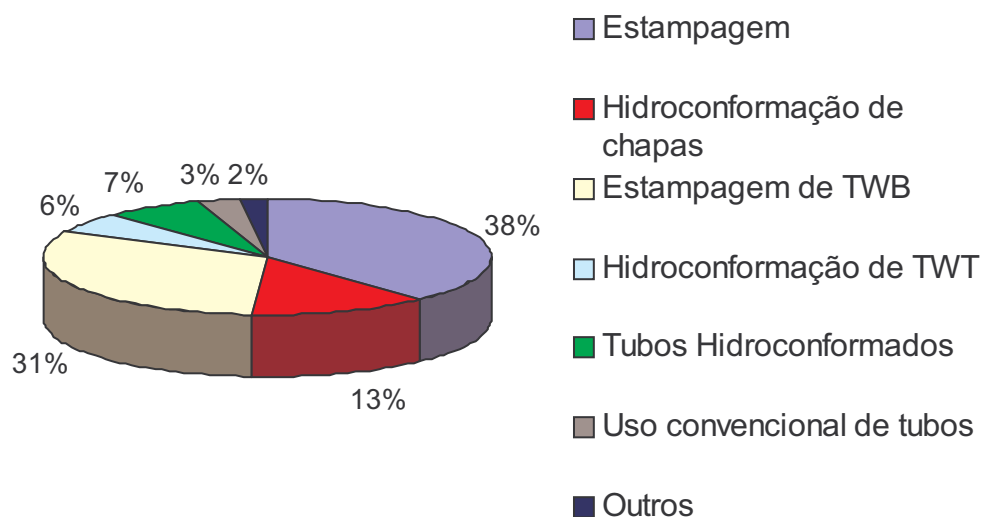


Figura 21 - Processos de manufatura utilizados no projeto ULSAB-AVC (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Desta forma podemos destacar, além da estampagem convencional, como de grande importância os processos de hidroconformação, *Tailor Welded Blanks* (TWB) e *Tailor Welded Tubes* (TWT). Esses processos serão descritos a seguir.

2.5.1. Hidroconformação

A tecnologia da hidroconformação de estruturas tubulares foi desenvolvida no período que precedeu a Segunda Guerra Mundial pela indústria aeronáutica alemã, porém, somente recentemente passou a ser utilizada na construção de automóveis (DIEFFENBACH; HANNIBAL, 1998).

Quinze anos atrás não se ouvia falar em hidroconformação na indústria automobilística. Hoje praticamente todas as grandes montadoras têm ao menos alguns componentes hidroconformados entre as peças de seus carros. Desta forma, o número de componentes produzidos por essa tecnologia tem dobrado a cada dois anos, sendo maior o crescimento na Europa, onde o interesse por veículos com estruturas tubulares tem aumentado significativamente (KOBE, 2001).

Para ilustrar esse crescimento, pode-se utilizar como exemplo o fornecedor *Vari-Form, Inc.* Esse fornecedor começou os estudos em hidroconformação de tubos em 1984, passando a produzir em grande escala (300 mil peças por ano) em 1990. No final da década de 90, sua produção já era de 3,5 milhões de peças por ano. Esse aumento de produção deveu-se principalmente às melhores capacidades de processo obtidas pela hidroconformação em relação aos processos de estampagem e soldagem que ela vinha substituir (MORPHY, 1998).

Segundo estudo realizado pela Arcelor, a demanda europeia por tubos hidroconformados tem uma previsão de aumento de 23.000 toneladas em 1999 para 128.000 toneladas em 2005 (TYRANT, 2003).

Existem diferentes processos e denominações para a hidroconformação (prensagem hidro-mecânica, hidroconformação dinâmica e hidroconformação de tubos), porém todos com o mesmo princípio: a utilização de um fluido (óleo ou emulsão a base de água) substituindo uma parte do ferramental.

São encontrados três elementos principais em todas as aplicações de hidroconformação (KOCHAN; POLLET, 2000):

- A prensa, cuja função se limita a manter o molde fechado;
- As matrizes, construídas em materiais idênticos aos utilizados na estampagem convencional;
- Um sistema de injeção e controle da pressão do fluido, que constitui o coração do processo.

A hidroconformação pode ser sucintamente descrita como a deformação plástica de um material, obtida através da aplicação de um fluido sob pressão. Essa pressão força o material contra uma matriz /molde de forma idêntica à que se pretende dar ao produto final, fazendo com que o mesmo adquira o formato desejado (SETTINERI; ROUX, 2002).



Figura 22 - Ferramenta utilizada pela Porsche para hidroconformação de um componente da porta do projeto ULSAC (ULSAC Engineering Report, 2000).

Podemos descrever de forma mais detalhada o processo de hidroconformação da seguinte maneira: Um tubo pré-formado é posicionado sobre a metade inferior da matriz, a qual está montada sobre a prensa de hidroconformação. A matriz é fechada. O componente tem suas extremidades vedadas por cilindros axiais hidráulicos. Nesse momento, o fluido sob pressão é injetado em seu interior. Durante a operação de conformação os cilindros axiais se deslocam comprimindo o tubo simultaneamente ao acréscimo da pressão que o “infla”, forçando o tubo contra o contorno da cavidade interna da matriz. Como o componente é conformado por uma pressão calibrada, sua forma corresponde exatamente à da matriz na qual foi produzido (LEITLOFF, 1999).

A hidroconformação busca a possibilidade de utilização de prensas mais baratas, limitar o número de ferramentas, acelerar a concepção e fabricação desses ferramentais e redução máxima do número de operações (INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE, 2001). Ela pode gerar redução de custos de produção já que menos operações são necessárias para obtenção do produto final. Por outro lado, o tempo de ciclo é maior que aquele obtido por estampagem profunda clássica. Desta forma, essa tecnologia é mais indicada para veículos que atendam a um nicho específico de cliente, ou seja, pequenos a médios volumes de produção (VAHL; HEIN; BOBBERT, 2000).

É importante lembrar que o principal interesse desta tecnologia é o de utilizar não mais conjuntos de peças dedicadas a uma função, mas tentar cumprir uma função completa através da utilização de um único componente. Essa condição pode ser obtida através da realização de formas complexas, permitindo (INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE, 1998 a):

- Redução do número de componentes e operações (passando para até três etapas ao invés das três a dez de processos convencionais);
- Utilização de um único ferramental por peça hidroconformada;
- Redução de peso, em função da possibilidade de redução da espessura tendo em conta o encruamento maior do material;

- Aumento da precisão dimensional e qualidade de acabamento em função das altas pressões do processo;
- Melhor conformabilidade, gerada pelo baixo atrito entre o ferramental e a peça.

Muitos exemplos de aplicações podem ser dados em relação à hidroconformação. As aplicações mais comuns são suportes de motor, Colunas A, B e C, suportes de radiadores, suportes do painel de instrumentos e componentes estruturais (DIEFFENBACH; HANNIBAL, 1998).

ULSAB e Porsche trabalharam sobre duas possibilidades do painel exterior de porta e provaram a possibilidade de substituir um *Bake Hardening* (BH 260) de 0,7 mm por um Bifásico (DP 600) de 0,6 mm graças à hidroconformação (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 2001).

Outra aplicação que pode se desenvolver significativamente é a de hidroconformação de tanques de combustível metálicos. Leis ambientais buscando a redução de emissão de hidrocarbonetos e aumento no rigor das especificações de segurança em relação aos testes de impacto vem aumentando as vantagens da utilização de chapas metálicas hidroconformadas na fabricação de tanques de combustível em relação aos tanques plásticos (VAHL; HEIN; BOBBERT, 2000).

O projeto ULSAB-AVC definiu as duas barras laterais de apoio do teto, tanto do veículo classe C quanto da PNGV, em tubos hidroconformados de aço bifásico (DP 500/800) com diâmetro de 85 mm e espessura de 1 mm (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002). A Figura 23 mostra a estrutura do veículo classe C, com destaque para os componentes em questão.

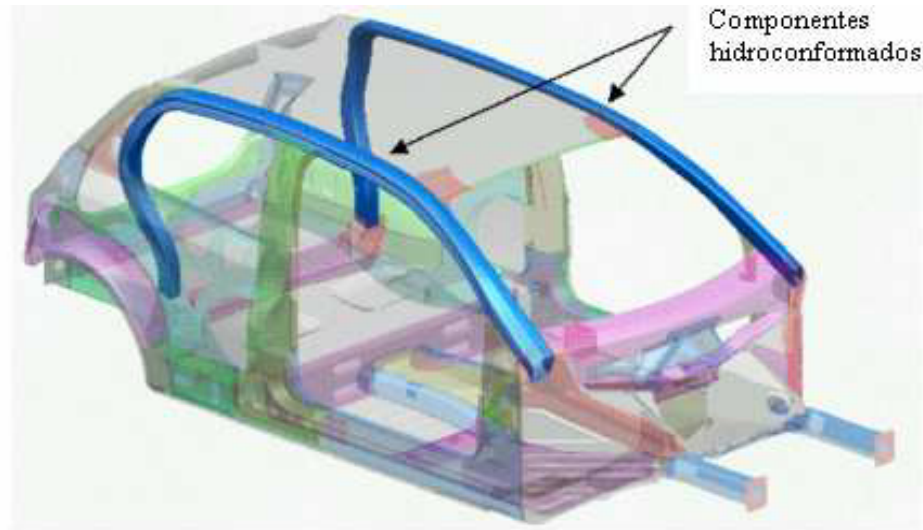


Figura 23 - Estrutura principal do ULSAB-AVC classe C, com destaque para os componentes hidroconformados (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A Mercedes foi uma das primeiras montadoras europeias a produzir em série, com altos volumes de produção, peças hidroconformadas. Sua fábrica de Hamburgo, na Alemanha, produz até 3,5 milhões de unidades por ano. Essas peças são utilizadas na produção dos veículos da Classe E e A (KOCHAN; POLLET, 2000).

Desde 1997, a Opel (marca Europeia do grupo GM) produz por hidroconformação o subchassi do Astra na sua planta de Bochum, na Alemanha. Atualmente, sua produção é de 800.000 peças por ano. Segundo a Opel, em comparação com o processo tradicional de fabricação, os custos de ferramentais foram reduzidos em 60%, os custos de produção em 20% e o peso do componente em 30% (LEITLOFF, 1999).

A Chrysler, nos Estados Unidos, optou por um suporte de radiador hidroconformado que reduz o número de componentes de dezessete para dez, resultando em uma massa 20% menor (DIEFFENBACH; HANNIBAL, 1998).

A General Motors, nos Estados Unidos, tem aplicado a hidroconformação nas longarinas do chassi do Corvette. Trata-se, provavelmente, do maior componente produzido com essa tecnologia, tendo o mesmo cerca de 4,5 metros de comprimento e pesando aproximadamente 34 kg (DIEFFENBACH; HANNIBAL, 1998).

Tendo em vista todos os exemplos citados, a hidroconformação prova sua viabilidade na produção de altos volumes na indústria automotiva, tanto em termos econômicos quanto técnicos (LEITLOFF, 1999). Entretanto, a decisão de incorporar elementos hidroconformados em um projeto deve ser baseada em uma rigorosa análise econômica, que leve em conta o volume de produção, o investimento no ferramental e a capacidade de utilização do mesmo (DIEFFENBACH; HANNIBAL, 1998).

2.5.2. Soldagem de precisão (*Tailor Welded Blanks e Tailor Welded Tubes*)

A máxima fundamental em matéria de construção de automóveis mais leves é: “utilizar material somente nos locais onde ele é realmente necessário” (BLOT et al, 1997). Dentro desta filosofia, *Tailor Welded Blanks* consistem em duas ou mais chapas de materiais com diferentes espessuras, resistência e/ou recobrimentos superficiais, unidos por uma solda de precisão. Esse processo permite ao engenheiro situar o aço ideal precisamente na área em que ele é necessário, o que possibilita redução de massa que não contribui efetivamente para o desempenho, utilizando o material certo para a função certa (ULSAC OVERVIEW REPORT, 2000).

A grande dificuldade no processo de soldagem a laser é manter um contato ótimo entre as chapas, considerando a espessura reduzida do feixe de laser: 0,1 mm. Desta forma, mesmo com um contato entre bordas perfeito, qualquer fenômeno de abertura proporcionado pela temperatura pode afastar as chapas e o feixe de laser passará por entre elas, gerando um defeito de solda. Para garantir uma solda excelente, as folgas entre as chapas não deve ultrapassar 0,08 mm (INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE, 1997).

Várias razões podem ser citadas para a aplicação desta tecnologia, entre elas (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2; 1998; LANGERAK, 1998):

- Redução de massa devida à possibilidade de alocação das características mecânicas e espessuras ideais, onde as mesmas são necessárias;
- Eliminação de reforços, através da escolha de materiais adequados;
- Simplificação logística, devido à redução do número de componentes;
- Redução nos investimentos em prensas, moldes, etc. devido ao menor número de operações necessárias;
- Melhor resistência à corrosão;
- Melhor rigidez estrutural e resistência à fadiga em comparação com chapas soldadas por resistência (solda ponto).

Acredita-se que a primeira aplicação de chapas soldadas de precisão tenha ocorrido no início dos anos 80, quando a *Thyssen* utilizou essa tecnologia na produção do assoalho do Audi 80. Essa aplicação foi utilizada para resolver um problema com as limitações de comprimentos das molas e não para a incorporação de aços com diferentes propriedades. Entretanto, ela serviu como catalisador para a evolução dos avançados processos de confecção de *blanks* utilizados nas indústrias automotivas (PALLETT; LARK, 2001).

Partindo da Alemanha, a utilização de chapas soldadas de precisão se propagou rapidamente por toda a Europa e aos Estados Unidos. As montadoras japonesas se engajam também nessa utilização. Essas utilizações estão associadas a três diferentes pontos de vista. Os americanos buscam a redução de peso. Os japoneses, uma redução nos refugos. E os europeus, a otimização da qualidade. Evidentemente, todos estão corretos e, no fim, tratam de uma melhora na utilização do aço, buscando veículos melhores para o século 21 (INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE, 1997).

Um exemplo de aplicação das *Tailor Welded Blanks* é o das rodas do projeto ULSAB-AVC (Figura 24). Elas são conformadas a partir de um *blank* com quatro diferentes chapas de aços de alta-resistência unidas através da solda de precisão. As duas partes externas da roda são produzidas em aço bifásico 350/600, com 1,2 mm de espessura. A parte interna é constituída por um aço ARBL 490/600 e espessura de 1,8 mm. Já o disco é de aço bifásico 500/800, com espessura de 2,1 mm (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

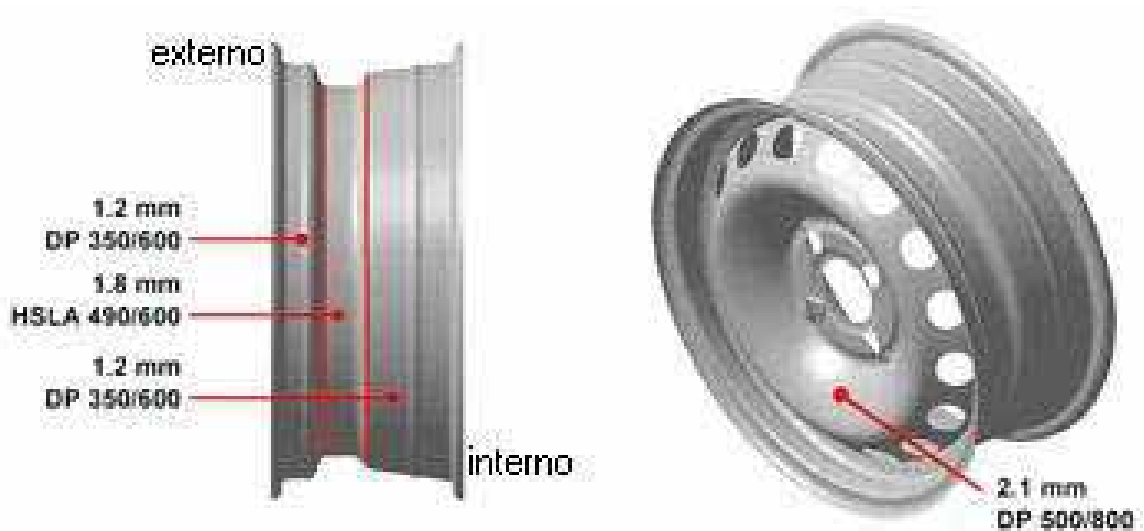


Figura 24 - Rodas desenvolvidas para o projeto ULSAB-AVC, utilizando o conceito de TWB (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

No fim da década de 90, cerca de 30 a 40% dos automóveis utilizavam chapas soldadas de precisão. Em 1999, praticamente todas as estruturas produzidas nos Estados Unidos eram construídas em chapas de aço, sendo notado um aumento significativo na percentagem daquelas que adotavam as soldas de precisão. Pode-se citar como exemplos de aplicação, as torres de amortecedores do Lincoln LS 2000 e as colunas B do Ford Focus 1999 (PALLET; LARK, 2001). Espera-se que até o ano de 2010, 100% dos veículos produzidos contenham ao menos um componente produzido por essa tecnologia (PONSCHAB, et al, 1997)

A Toyota, no final da década de 90, já consumia aproximadamente 4 milhões de peças produzidas por essa tecnologia por ano (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 1997).

Uma única fábrica da *Tailor Steel America*, filial da *Arcelor*, construída com o objetivo principal de atender à GM nos Estados Unidos, teve sua capacidade de produção de chapas soldadas aumentada de 1.200.000 peças por ano para 2.000.000, utilizando uma nova máquina de soldagem com dois pórticos. Um novo estudo encontra-se em curso com o intuito de aumentar ainda mais a capacidade desta unidade industrial (HERZFELD, 2004).

Dezoito componentes do Golf IV (ainda em série no Brasil) são produzidas através da tecnologia de TWB, num processo perfeitamente adaptado às chapas galvanizadas (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 1997).

Os tubos também podem ser soldados por precisão no processo denominado *Tailor Welded Tubes*. Atualmente, é possível obter esses tubos em diversas geometrias diferentes. A ThyssenKrupp, por exemplo, oferece as seguintes possibilidades (PATBERG; KNEIPHOF, 2002):

- Tubos cilíndricos soldados longitudinalmente;
- Tubos cilíndricos com espessura variável através da seção longitudinal do tubo;
- Tubos cônicos;
- Tubos cônicos achatados

O número de componentes pode ser reduzido drasticamente através da utilização de produtos inovadores em aço, como as chapas e tubos soldados por precisão. A Figura 25 ilustra a redução no número de componentes em um veículo em função do acréscimo de aplicação dos TWB, demonstrando o grande potencial de redução de componentes e massa através da aplicação desta tecnologia de produção, o qual vai ao encontro da proposta de utilização de material somente onde ele é realmente necessário. Desta forma, pode-se concluir que esta é uma tecnologia que apresenta as características necessárias para as novas filosofias de produção.

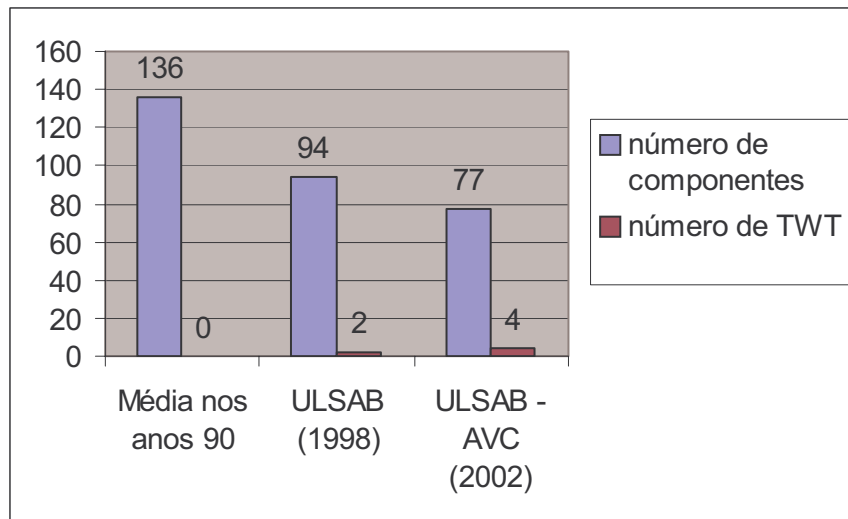


Figura 25 - Comparativo entre o número de peças constituintes de um veículo e do número de tubos soldados por precisão, demonstrando o compromisso com a redução de componentes através da aplicação da tecnologia (PATBERG; KNEIPHOF, 2002).

2.6. OS MATERIAIS UTILIZADOS NOS PROJETOS ULSAB

Um dos fatores cruciais para a obtenção das metas propostas para redução de massa dos projetos ULSAB foi a utilização de novos tipos de aços de alta resistência (AAR) e aços avançados de alta resistência (AAAR). Para ilustrar a importância destes materiais, a Figura 26 mostra que a estrutura ULSAB-AVC foi construída 100% com aços de alta resistência, sendo que cerca de 80% dos mesmos tratavam-se de aços avançados de alta resistência (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

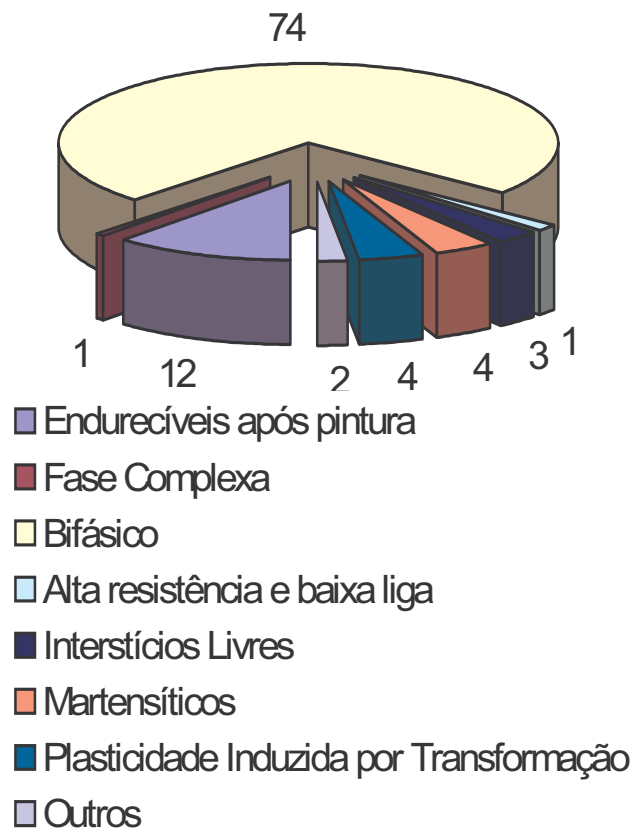


Figura 26 - Percentual dos diferentes aços aplicados na estrutura do veículo classe C do projeto ULSAB-AVC (adaptado de ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A Figura 27, a seguir, mostra a mudança na proporção de utilização dos aços de alta resistência nas carrocerias de veículos japoneses, bem como a redução de massa nos últimos vinte anos. Pode-se notar que, enquanto o peso das carrocerias começou a decrescer na década de oitenta, ao mesmo tempo, a aplicação dos aços de alta resistência aumentou, o que prova a tese de redução de peso através da utilização de aços de melhores propriedades mecânicas. A partir de 1995, tanto a massa dos carros quanto a proporção dos aços de alta resistência aumentaram. Essa nova condição pode ser atribuída à necessidade de melhora nas características de resistência ao impacto das carrocerias (TAKITA; OHASHI, 2001).

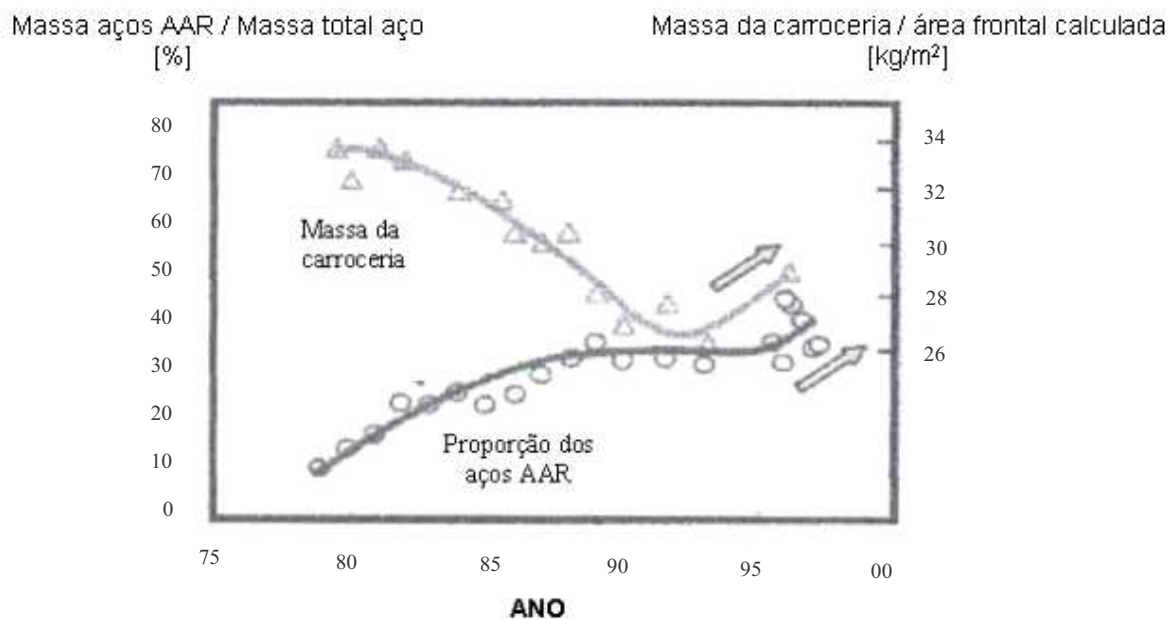


Figura 27 - Curva representando a proporção de utilização dos aços de alta resistência em relação ao total dos aços ao longo dos últimos 20 anos no Japão. E curva da variação de massa das carrocerias no mesmo período e local (adaptado de TAKITA; OHASHI, 2001).

O incremento na utilização de aços de alta resistência em relação aos aços comuns para estampagem pode ser ilustrado também pela proporção dos mesmos na constituição das carrocerias dos veículos BMW construídos recentemente, conforme mostra a Figura 28.

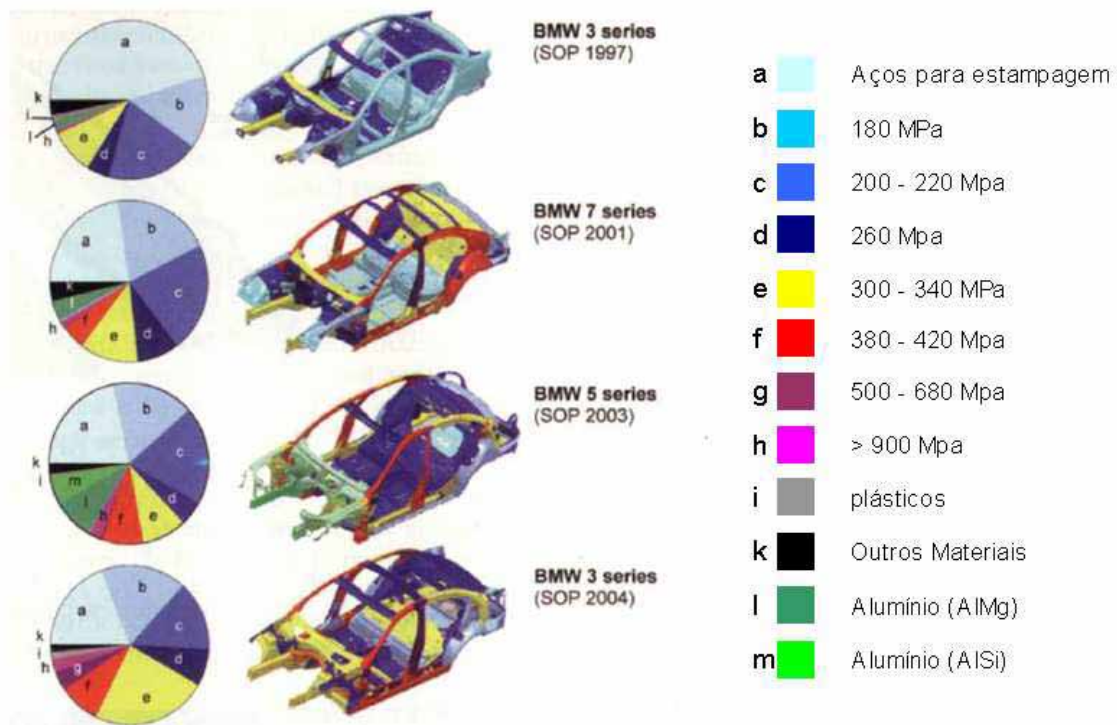


Figura 28 - A evolução na proporção dos diferentes materiais utilizados na fabricação das carrocerias dos veículos BMW no fim da década de 90 e início dos anos 2000 (adaptado de GEHM, 2006).

A fim de facilitar a compreensão em relação aos materiais selecionados, e conhecendo as divergências entre as nomenclaturas dos aços em diferentes países, o consórcio ULSAB-AVC adotou um sistema que utiliza o limite de escoamento e o de resistência à tração para a definição dos aços utilizados. Nesta nomenclatura, os aços são identificados com a seguinte codificação:

XX aaa / bbb

Onde:

XX → é o tipo de aço (ver Tabela 15)

aaa → é o valor mínimo do limite de escoamento

bbb → é o valor mínimo de resistência à tração

Tabela 15 - Nomenclatura dos aços utilizados no programa ULSAB-AVC (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Abreviação	Classificação	Abreviação	Classificação
Mild	Aços para estampagem	DP	Bifásicos (Dual-Phase)
IF	Interstícios Livres	SF	Bainíticos (Stretch Flangeable)
BH	Endurecíveis após Pintura (Bake Hardenable)	TRIP	Pasticidade Induzida por Transformação
CMn	Carbono Manganês	CP	Fase complexa
HSLA	Alta Resistência e Baixa Liga	Mart	Martensíticos
IS	Isotrópicos	MnB	Endurecíveis por Manganês e Boro

A diferenciação entre os aços de alta resistência e ultra-alta resistência é realizada através dos seus limites de escoamento e segue os mesmos critérios do projeto ULSAB. Ou seja, os aços com limite de escoamento entre 210 e 550 MPa são os de alta resistência e aqueles cujo limite de escoamento excede os 550 MPa são chamados de ultra-alta resistência (ULSAB OVERVIEW REPORT – PHASE 2, 1998).

A Figura 29, a seguir, ilustra o compromisso entre resistência e conformabilidade dos diferentes aços, mostrando a melhor relação apresentada pelos aços avançados de alta resistência em relação aos de alta resistência convencionais. Esta combinação de propriedades surge principalmente pela sua alta capacidade de encruamento, como resultado de uma baixa relação entre o limite de escoamento e a resistência à tração (PEREIRA, 2004)

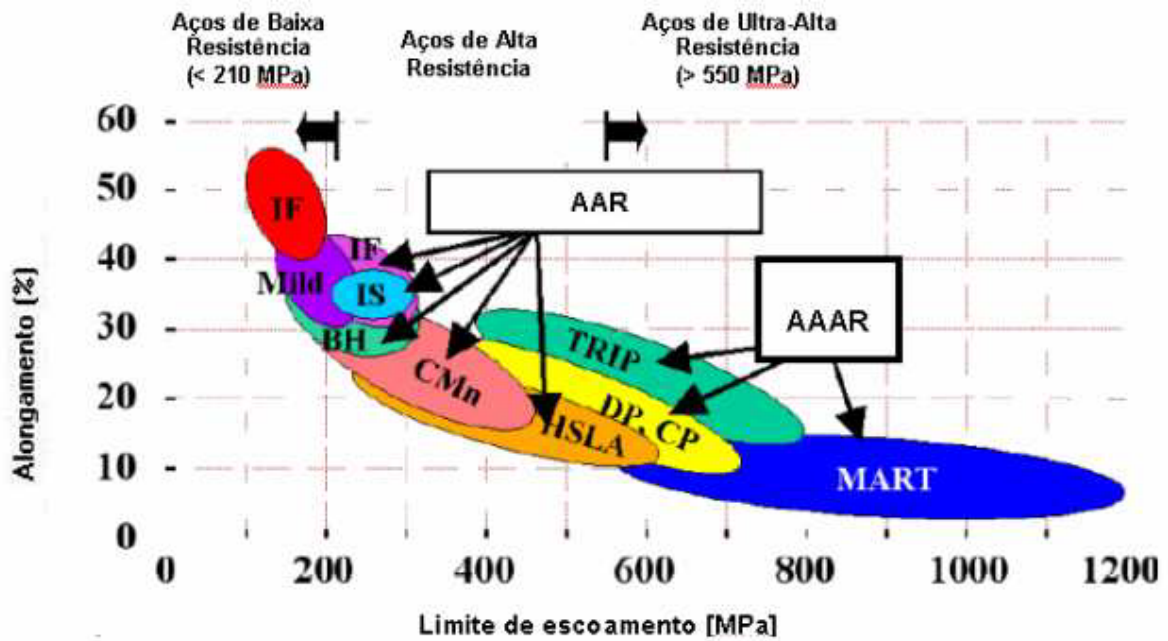


Figura 29 - Correlação entre conformabilidade e resistência de diferentes tipos de aços, entre eles os de ultra-alta resistência (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

As principais diferenças entre os aços convencionais de alta resistência e os avançados de alta resistência são relacionadas a suas microestruturas. Os aços avançados de alta resistência apresentam estruturas multifásicas, constituídas por uma matriz ferrítica contendo martensita, bainita e/ou austenita retida em quantidades suficientes para produzir características mecânicas únicas, combinando elevados valores de resistência mecânica e conformabilidade significativa. Entre estes materiais podemos citar especialmente os aços TRIP (de Plasticidade Induzida por Transformação), os de fases complexas e os bifásicos. Podemos ainda destacar os bainíticos, utilizados em componentes de suspensão, que constituem uma subclasse dos bifásicos.

2.6.1. Os aços Martensíticos (Mart)

Entre os aços, os martensíticos são aqueles que apresentam maior resistência à tração, ultrapassando os 1500 MPa. Nesses aços, a austenita existente durante o aquecimento do material é transformada quase que inteiramente em martensita durante o processo de resfriamento. Essa transformação pode ser obtida também posteriormente no tratamento de têmpera (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A grande resistência destes aços é devida à presença da martensita. A martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita. Desta forma, a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão. Ela é portanto uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado (tcc), uma forma distorcida do ferro cúbico de corpo centrado (ccc). Com o aumento do teor de carbono do aço, diminuem as temperaturas de início (M_i) e fim (M_f) de formação da martensita. Ela apresenta-se em forma de ripas (*lath*) nos aços de baixo carbono e na forma de agulhas (*thin plates*) nos de carbono mais elevado (COSTA E SILVA; MEI, 1988).

Segundo a teoria de Wechsler, a deformação plástica durante a transformação ligada à formação da martensita é composta por três contribuições: a deformação de Bain (transformação geométrica da rede cristalina da fase “mãe” – austenita - naquela da fase produto – martensita) e uma deformação por cisalhamento na rede cristalina invariável. Essa deformação secundária na rede cristalina invariável é indispensável para aliviar, ao menos parcialmente, as tensões internas geradas pela transformação de Bain. A combinação destas duas contribuições define um plano de cisalhamento não distorcido, chamado plano de hábito. Há ainda uma terceira contribuição que é a rotação do reticulado, de modo que o plano não distorcido tenha a mesma orientação espacial nos cristais da matriz e do produto (REED-HILL, 1982).

Carbono é adicionado aos aços martensíticos com a finalidade de aumentar a resistência mecânica da martensita e melhorar sua temperabilidade (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002), conforme ilustra a Figura 30. Molibdênio, silício, vanádio e níquel são também utilizados em diferentes combinações para melhorar a temperabilidade dos aços martensíticos (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

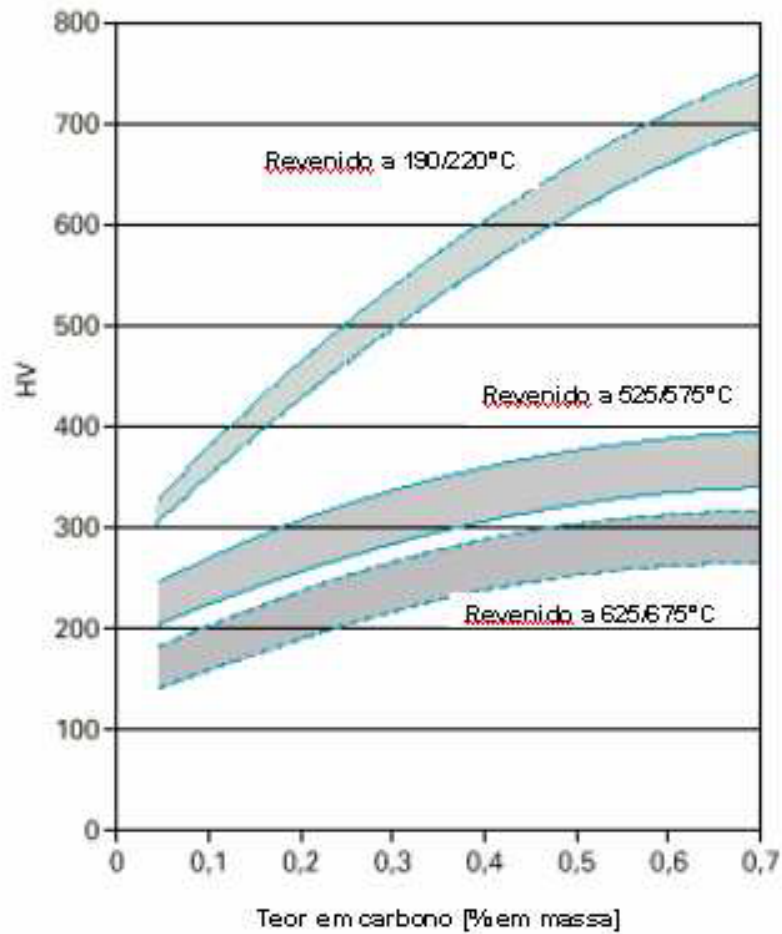


Figura 30 - Influência da quantidade de carbono e da temperatura de revenimento na dureza dos aços, ilustrando a relação direta de proporcionalidade entre as propriedades mecânicas da martensita e o teor de carbono (MURRY, 2002).

Apesar de não estarem entre os aços avançados, os martensíticos fazem parte do grupo dos aços de alta resistência e ainda são utilizados em grande quantidade na indústria automobilística.

Para as engrenagens de caixas de câmbio, o processo de carbonitreção seguido de têmpera em óleo, conhecido desde os anos 50, é o tratamento mais utilizado na Renault para melhora da resistência à fadiga (70%). Por outro lado, vislumbrando uma política ambiental, a Renault está desenvolvendo linhas de cementação à baixa pressão, seguidas de uma têmpera a gás. Esse processo permite eliminar a operação de limpeza e reduzir a poluição devido à não existência dos vapores dos banhos de óleo. Entretanto, hoje esse processo ainda não é viável devido à redução de 20% no limite de resistência à fadiga e uma diminuição de 30 a 40% da resiliência, devido à presença de uma camada de óxido que se forma na superfície. Para que apresente resultados positivos, a têmpera ao ar necessita de uma operação complementar de *shot pinning* para retirada desta camada (COSTA, 2004). De qualquer forma, estamos falando de aços com propriedades martensíticas.

No veículo da Classe C do projeto ULSAB-AVC, por exemplo, foram utilizados 7,86 kg de aço martensítico, o que corresponde a 4% em massa da carroceria. Os componentes em aços martensíticos foram aplicados em regiões onde a resistência era importante e a absorção de energia não se mostrava fator primordial, como, por exemplo, no reforço do túnel. Neste componente foi utilizado um aço martensítico MART 950/1200. Em outros reforços, na parte traseira do veículo, foram utilizados aços martensíticos de limite de resistência à tração de até 1520 MPa (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

2.6.2. Os aços de Plasticidade Induzida por Transformação (TRIP)

Os aços TRIP são aços com baixos teores de elementos de liga, entre eles o silício, alumínio e magnésio. Através de um tratamento térmico apropriado, “ilhas” de austenita (fase estável a altas temperaturas) absorvem carbono em um nível suficiente para não permitir sua transformação no retorno à temperatura ambiente, constituindo a fase chamada de austenita retida (MUDRY; LE BON; BULTHÉ, 2004). Nos aços

TRIP essa fase deve apresentar frações volumétricas superiores a 5% (USAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

A temperatura de transformação martensítica destas fases é muito baixa e inferior à temperatura ambiente. Desta forma, a austenita pode ser considerada estável em relação à temperatura nestas condições. Entretanto, ela é instável em relação à deformação plástica, o que faz com que ela se transforme quando submetida a uma deformação significativa. O material endurece, portanto, de maneira significativa em função do aparecimento da fase martensítica. Trata-se, portanto, de um material que evolui enquanto é conformado. Este efeito dá a esses aços uma capacidade elevada de absorção de energia em casos de impacto (MUDRY; LE BON; BULTHÉ, 2004).

Durante o processo de deformação de um aço, que contém austenita retida na temperatura ambiente, a transformação da austenita em martensita ocorre progressivamente, resultando em um aumento nos valores do alongamento. Este processo é denominado plasticidade induzida por transformação, ou efeito TRIP (HULKA, 2003).

Um modelo baseado na teoria de Wechsler de transformação martensítica é utilizado para calcular a deformação nos aços TRIP (BERVEILLER; CHERKAOUI; PATOOR, 2004). A Figura 31 descreve, de maneira esquemática, o processo de transformação da austenita em martensita propiciando uma grande deformação plástica do material. Uma explicação um pouco mais detalhada deste modelo pode ser encontrada na descrição da transformação martensítica no item 2.6.1 (aços martensíticos).

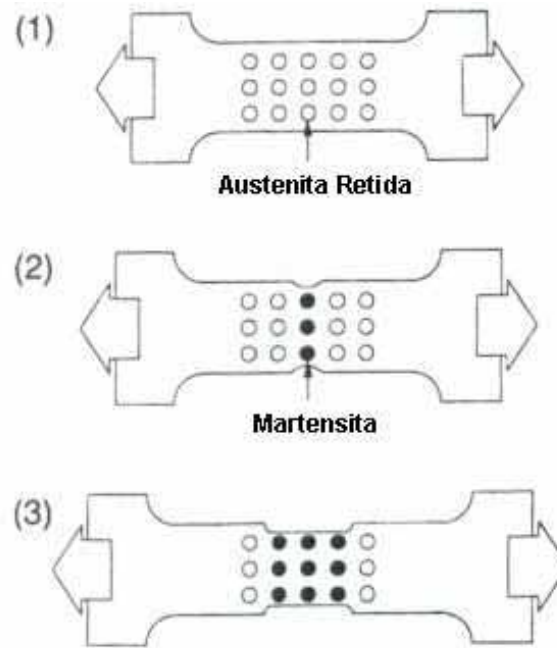


Figura 31 - Representação esquemática do efeito TRIP. Quando uma deformação por tensão é aplicada (1), a austenita retida se transforma em martensita na região de concentração de tensões (2), e, na seqüência, a transformação austenítica ocorre também nas vizinhanças a fim de eliminar as tensões de Bain geradas durante a transformação (YOKOI et al, 1996).

Para obtenção dos aços multifásicos, ou seja, a obtenção de uma quantidade significativa de austenita retida, e simultaneamente, a coexistência de outros microconstituintes em uma matriz ferrítica, têm sido propostos dois caminhos (PEREIRA, 2004):

- A laminação controlada para a obtenção de um aço multifásico laminado a quente, auxiliada pelo efeito TRIP;
- A combinação da austenitização parcial, ou seja, do tratamento intercrítico, aliada a tratamentos isotérmicos, no intervalo de temperatura de transformação bainítica.

O nível de deformação onde a austenita começa a se transformar em martensita pode ser controlado ajustando-se a quantidade de carbono. Níveis menores de carbono permitem que a transformação se inicie quase imediatamente ao início da deformação, aumentando a taxa de endurecimento por deformação durante a conformação. Já altos níveis de carbono estabilizam a austenita, fazendo que o início da transformação seja retardado e, ainda, que possa haver austenita retida mesmo no produto acabado. Essa condição pode ser importante, pois permite que a transformação só ocorra em eventos posteriores à produção - no caso da colisão de um veículo, por exemplo - aumentando sua resistência ao impacto, devido à maior capacidade de absorção de energia (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

O desenvolvimento dos aços TRIP permitiu um avanço importante em termos de melhoria no compromisso entre ductilidade e resistência mecânica: esses aços apresentam uma conformabilidade próxima a dos aços para estampagem com uma resistência à tração superior a 800 MPa. Em comparação aos aços clássicos de alto limite de escoamento micro-ligados, os aços TRIP apresentam o dobro do limite de ruptura para o mesmo limite de escoamento, tendo ainda um alongamento comparável (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 2001).

Este tipo de aço foi usado, por exemplo, pela Renault, para melhorar a absorção de energia, no seu Renault Modus (INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE, 2004).

No caso do projeto ULSAB-AVC, avaliações indicaram que a capacidade de conformação superior dos aços TRIP não era necessária para a fabricação da maioria dos componentes. Seria interessante sua aplicação no caso de um novo projeto, constituído por peças de geometria mais complexa. O único componente do projeto ULSAB-AVC constituído de aço TRIP 450/800 é o painel do assoalho. Este material foi escolhido em detrimento ao aço bifásico, devido à sua melhor capacidade de conformação (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

2.6.3. Os aços bifásicos (DP)

O consumo mundial de aço vem aumentando significativamente nos últimos anos. Se compararmos seu consumo no início dos anos 80 (por volta de 540 milhões de toneladas) ao dos dias atuais, notaremos um aumento de aproximadamente 75% em um quarto de século. Entre 2001 e 2003, ele sofreu um aumento de 24% no mundo. Essa alta espetacular pode ser explicada em grande parte pela explosão do consumo na China: 72% no mesmo período. (JEANNEAU, 2005).

Outro fator importante é que as características dos aços utilizados mudaram. Para exemplificar, podemos dizer que 60% dos aços utilizados no início da década de 90 não existiam cinco anos antes. A maior mudança foi o aumento da demanda por aços de alta e ultra-alta resistência. Nesse período, destaca-se o desenvolvimento daqueles com um bom compromisso entre a resistência e ductilidade (RENAUDIN, 2003). Uma família que aumentou muito foi a dos aços bifásicos laminados a quente e a frio com resistência à tração podendo chegar a 1400 MPa (OLSSON; BENEDETTO; DEL PRETE, 2000). Antes do desenvolvimento dos aços bifásicos, os aços com resistência igual ou superior a 550 MPa, que eram produzidos por tratamentos intercríticos, apresentavam pobre conformabilidade (GUIMARÃES, 1997).

Com características similares em sua composição química às dos aços de baixa liga, porém distintas em suas microestruturas (GUIMARÃES; PAPALÉO, 1981), os aços bifásicos (*Dual Phase Steels*) podem ser descritos como aços de baixo carbono que, através de um tratamento térmico denominado têmpera intercrítica, adquire uma constituição microestrutural formada, basicamente, por ferrita e martensita (PEREIRA, 1992). A primeira fase, por apresentar-se mole e dúctil, é a responsável pela ductilidade e conformabilidade do material; a segunda, com características de dureza e resistência, propicia ao aço alta resistência mecânica (DAVIES, 1978).

A microestrutura dos bifásicos é composta por ferrita de baixo carbono e, dependendo da resistência, entre 20 e 70% de fases duras, normalmente martensita (ULSAB AVC OVERVIEW REPORT, 2002). Na prática, as microestruturas dos aços bifásicos são mais complexas, podendo conter teores de bainita, perlita e austenita retida (ERDOGAN, 2003).

Vários fatores afetam as propriedades mecânicas dos aços bifásicos. Entre eles a fração volumétrica de martensita, as propriedades mecânicas de ambas as fases e a microestrutura (BERBENNI et al, 2004).

A utilização deste material tem possibilitado, principalmente à indústria automobilística, vantagens apreciáveis em comparação com os aços utilizados anteriormente. Os aços bifásicos, com a característica de poder desenvolver elevada tensão após pequena deformação plástica, proporcionam uma redução de até 30% na espessura das chapas utilizadas em alguns componentes dos automóveis (OWEN, 1980). Essa capacidade do aço bifásico de aliar propriedades antagônicas torna o material atrativo, não apenas para a indústria automobilística, mas também para a indústria de tubos e arames, assim como para a fabricação de componentes que envolvem processos de deformação a frio (GUIMARÃES, 1993).

Os aços bifásicos podem ser obtidos por duas diferentes rotas: a laminação de tiras a quente ou a têmpera intercrítica, sendo que a segunda é utilizada para chapas de espessuras inferiores a 2 mm, as quais devem necessariamente ser produzidas por laminação a frio.

O primeiro aço bifásico extraído diretamente do processo de laminação a quente foi produzido no final da década de 70, e foi o marco do surgimento da primeira geração deste material (DREWES, 1980).

A busca de um melhor comportamento em soldagem impõe a restrição na adição dos elementos de liga. Desta forma, cada vez mais, microestruturas complexas são obtidas através de aços com baixos teores de elementos de liga, através da melhora no controle dos esquemas de resfriamento. A fim de obter aços que apresentem um nível de resistência superior, é necessário resfriar a liga mais rapidamente a partir do momento em que se atinge a fração volumétrica esperada de ferrita. A austenita residual, desta forma, se transforma em martensita ou bainita, segundo sua composição química no momento da têmpera em função da velocidade local de resfriamento (SCHMITT, 2004).

O processo de têmpera intercrítica, apesar de apresentar custos mais elevados pela necessidade do tratamento térmico posterior, apresenta a vantagem de permitir a utilização de ligas com menores teores de elementos de liga (PEREIRA, 1992). Esses aços, com menores teores de elementos de liga, podem atingir valores similares em resistência à tração se comparados a outros de composições mais ricas e ainda apresentar melhores características de conformação a frio, combinadas à boa soldabilidade (Figura 32). Esse bom comportamento é o resultado do baixo valor da razão entre o limite de escoamento e a resistência à tração no material como fornecido e que termina com um elevado limite de escoamento após a conformação devido às suas propriedades de encruamento significativas (OLSSON; BENEDETTO; DEL PRETE, 2000).

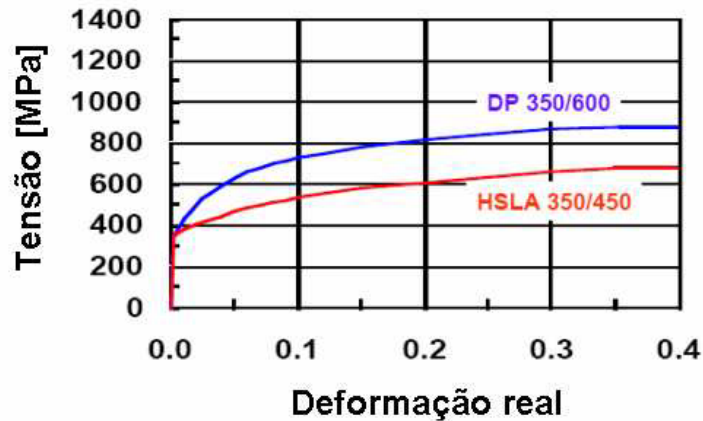


Figura 32 - Comparação da curva tensão – deformação entre um aço de alta resistência e baixa liga (HSLA 350/450) e outro Bifásico (DP 350/600), ilustrando as diferenças de propriedades para aços com um mesmo limite de escoamento (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

O processo de encruamento dos aços bifásicos pode ser dividido em três estágios. No primeiro (0,1 a 0,5% de deformação) ocorre, inicialmente, uma deformação homogênea da matriz ferrítica produzida pela movimentação das discordâncias. Nesse estágio há um encruamento bastante rápido do material, causado principalmente devido à incompatibilidade de deformação plástica das duas fases. O segundo estágio (0,5 a 4% de deformação) é associado a uma deformação de compressão da ferrita, causada pela presença de regiões rígidas de martensita e pela transformação da austenita retida. O terceiro estágio de encruamento (4 a 18% de deformação) inicia-se com a formação de estrutura celular de discordâncias, sendo que, posteriormente, a deformação será, provavelmente, governada por escorregamentos transversais e por um processo de recuperação dinâmica da ferrita e escoamento da martensita (GUIMARÃES, 1997).

Os aços bifásicos avançados exibem outro importante benefício quando comparados com os aços convencionais. O efeito do endurecimento após deformação e pintura (*bake-hardenability*) continua a aumentar com a elevação da deformação, diferente dos aços BH convencionais, nos quais a essa propriedade permanece constante para deformações superiores a 2% (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

No projeto ULSAB-AVC, os aços bifásicos são responsáveis por 74% do total dos aços aplicados na estrutura principal da carroceria, sendo utilizados na fabricação de suportes longitudinais e transversais, de componentes do conjunto da suspensão, de componentes de aumento da resistência ao impacto, de partes da fixação, da caixa de roda e das rodas, entre outros. Os aços bifásicos utilizados apresentam limite de escoamento entre 280 e 700 MPa e níveis de resistência a tração que variam de 500 a 1000 MPa (PEREIRA, 2004).

CAPÍTULO 3 DESCRIÇÃO DO COMPONENTE EM ESTUDO

Baseado na filosofia do projeto ULSAS, foi escolhido para este trabalho um componente de suspensão. O componente escolhido foi o terminal de eixo de um veículo do segmento popular produzido em série no Brasil desde o ano de 2001 até os dias atuais. As Figuras 33 e 34 ilustram o componente em sua configuração no veículo.

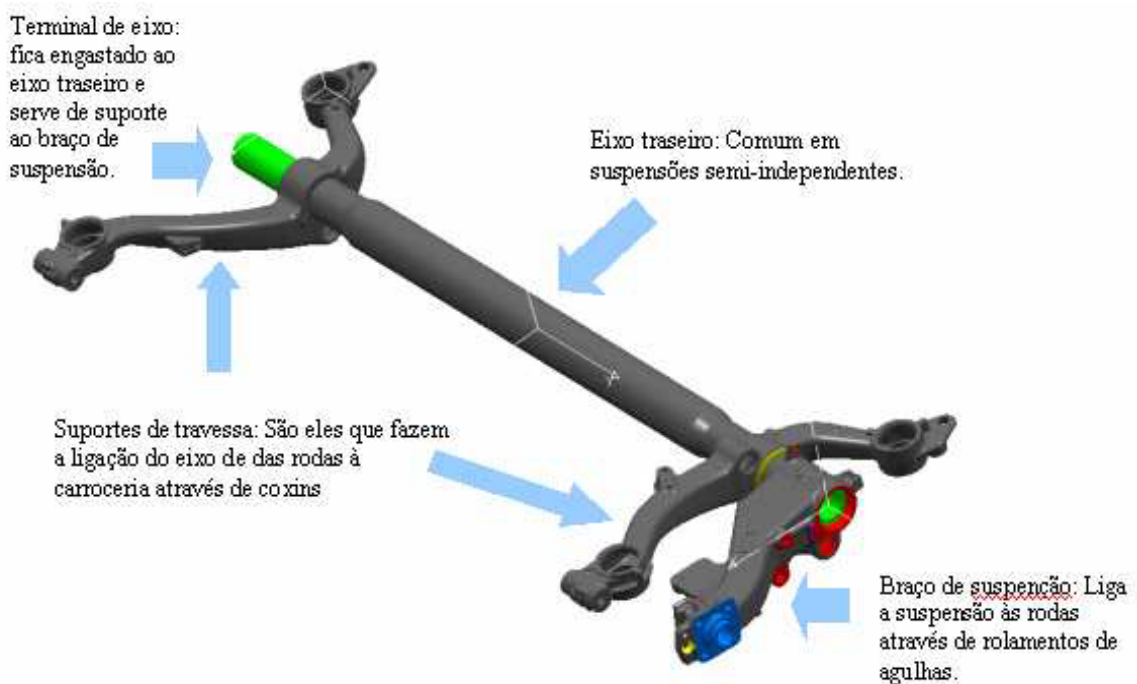


Figura 33 - Eixo traseiro do veículo em questão. Lado direito completo e lado esquerdo com braço de suspensão suprimido, dando destaque ao terminal de eixo, em verde, na parte superior esquerda da figura.

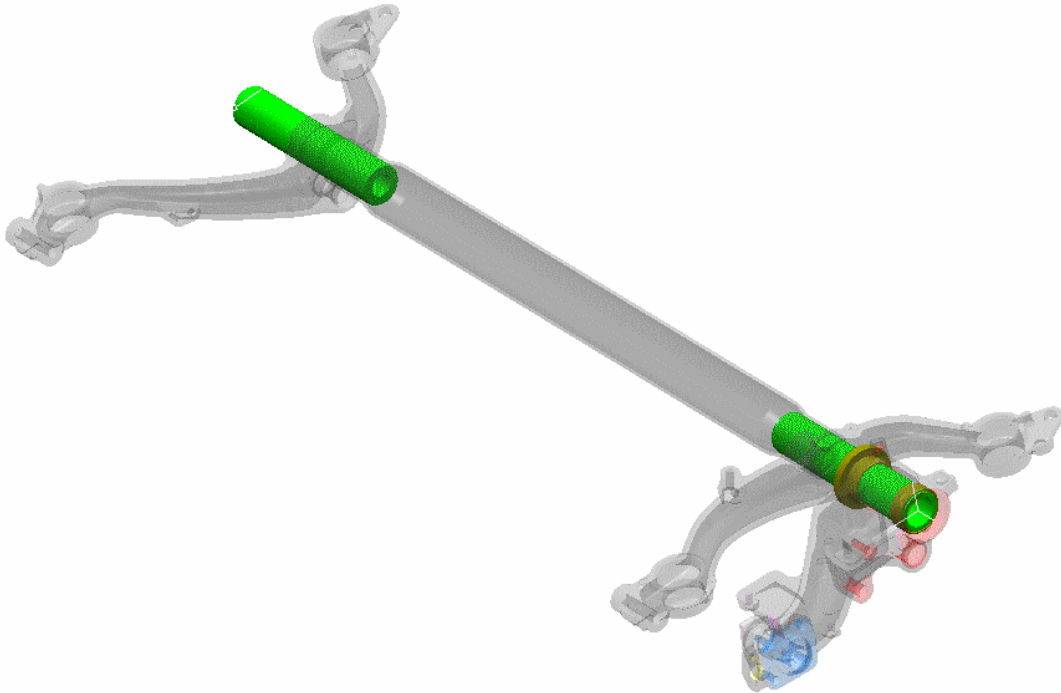


Figura 34 - Nova imagem do eixo traseiro, agora representado em transparência, destacando os terminais de eixo (em verde) nas duas extremidades do eixo traseiro.

O componente em questão é um tubo de aço extrudado e usinado. Suas dimensões podem ser vistas na Figura 35. O mesmo utiliza como matéria-prima um aço AFNOR XC48, cuja especificação pode ser encontrada na Tabela 16.

Atualmente, esse componente passa por um tratamento de têmpera superficial por indução que tem como objetivo aumentar sua resistência superficial.

Tabela 16 - Especificação de composição química (percentagem em massa) do aço AFNOR XC48.

C	Mn	Cu	Ti	Al	Si	S	P
0,44	0,50	< 0,30	< 0,010	0,020	0,10	< 0,040	< 0,035
0,51	0,80			0,050	0,40		

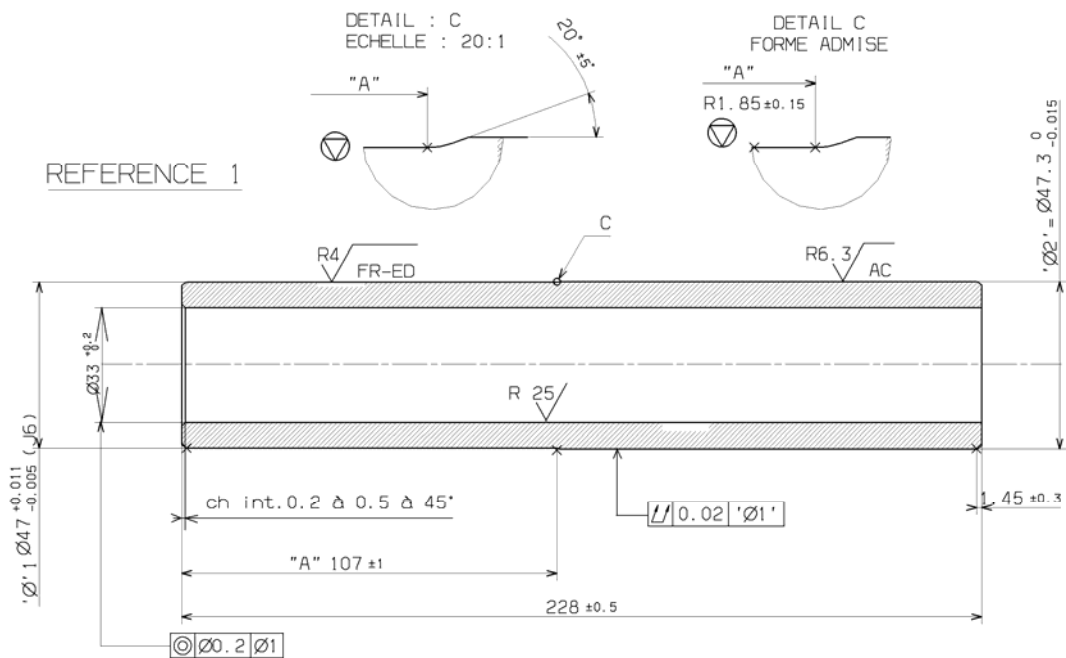


Figura 35 - Dimensões do terminal de eixo analisado neste trabalho. O mesmo é obtido por extrusão e posterior usinagem de um aço de médio carbono temperado superficialmente por indução.

Neste aço pode-se destacar a quantidade já significativa de carbono, o que nos permite classificá-lo como um aço de médio carbono, e favorece uma grande endurecibilidade do mesmo quando submetido a tratamentos de deformação da rede cristalina, como a têmpera, por exemplo.

O Manganês, também presente em uma quantidade elevada, confere ao aço algumas características interessantes. Quando dissolvido na ferrita, aumenta sua dureza e resistência mecânica, apesar de reduzir um pouco sua ductilidade. Quando presente na austenita, ele a estabiliza, aumentando moderadamente a temperabilidade. Entretanto, sua função principal é combinar-se com o enxofre, impedindo a formação do sulfeto de ferro (FeS), que fragiliza o aço, principalmente a temperaturas mais altas.

O Titânio é adicionado ao aço como desoxidante, sendo esta sua função principal. Ele é o elemento com maior tendência à formação de carboneto em altas temperaturas, de sulfeto e de nitreto. Para agir como elemento de liga, ele deveria estar presente em uma quantidade superior a 0,03 %. Abaixo disso, como no aço estudado, ele só age como desoxidante, não tendo influência significativa como formador de carboneto (SOUZA, 1989).

O silício aumenta a fluidez dos aços para fundição e melhora a resistência à fragilização pelo hidrogênio. No entanto, diminui a usinabilidade dos aços. Em aços para estampagem, é adicionado em conjunto com o alumínio para evitar o envelhecimento do aço, formando nitreto. Ele ainda contribui para o aumento da resistência a corrosão em ambiente alcalino. No aço em estudo, entretanto, os teores de silício não são muito significativos.

O alumínio é utilizado como desoxidante, desgazeificante, refinador de grão e, principalmente, para acalmar os aços de baixo carbono. Ele tem a capacidade de endurecer muito a ferrita por entrar em solução sólida nela. Esse elemento aumenta ainda moderadamente a temperabilidade do aço, quando dissolvido na austenita.

O cobre, em teores próximos a 0,25 %, caso do nosso aço, confere resistência à corrosão atmosférica, sendo útil para aços não revestidos. Quando em percentagens mais altas, ele aumenta a fluidez dos aços fundidos, além de elevar a resistência mecânica da ferrita, sem prejuízo da ductilidade de aços de baixo carbono.

3.1. FLUXOGRAMA DE FABRICAÇÃO DO COMPONENTE

3.1.1. Fabricação do bruto

Os tubos brutos de grande comprimento são obtidos por extrusão sucessiva. Nessas sucessivas passagens, são realizados os diâmetros exteriores em dimensões o mais próximas possível da dimensão final.

Com o auxílio de um macho auto-centrante é gerado o diâmetro interno, não havendo usinagem posterior.

Essas barras são a seguir, seccionados em tubos de comprimento final 1,5 mm maior que a dimensão final (sobre-metal para usinagem) e chanfrados em suas extremidades para manipulação pelas pinças automatizadas.

3.1.2. Fabricação e controle do componente acabado.

- Torneamento → Usina-se o tubo, dando o acabamento, em seu comprimento final e faz-se um primeiro passe sobre o diâmetro exterior.
- Tratamento Térmico → É realizada uma têmpera por indução sem revenimento posterior.
- Retifica → É realizada com moldes diamantados. É realizado o acabamento dos dois corpos externos, bem como a zona de transição entre eles (zona de segurança no desenho do componente).
- Controle unitário → Realizado com as peças girando, acompanhadas por três câmeras: busca de trincas na superfície, orientadas no sentido das geratrizes. Além da detecção de defeitos de forma automática e por comparação com um padrão dos defeitos potenciais (sanidade do material, traços do bruto, etc...).

3.2. CONDIÇÃO DE CARGAS DO COMPONENTE

Cada terminal de eixo está submetido à carga do eixo traseiro dividida por dois e deve ser considerado como a interface entre os suportes de travessa e, por conseqüência, o veículo, por um lado e, por outro, o braço de suspensão e todos os seus agregados (roda, pneu, mecanismo de freio, etc...). Esses esforços podem se traduzir por:

- Esforços de flexão
 - Um momento aplicado pelo suporte de travessa, no qual se encontra engastado o terminal de eixo.
 - Um momento exercido pelo braço de suspensão, cujo ponto de aplicação é o plano médio do rolamento de agulhas (distante 77 mm de sua extremidade).

- Esforços de compressão devidos ao engastamento no suporte de travessa.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. O MATERIAL

As amostras utilizadas neste trabalho foram extraídas de terminais de eixo acabados fornecidos pela Vallourec do Brasil ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP. O material de base deste componente pode ser definido como um aço de médio carbono com pequenas quantidades de elementos de liga, segundo especificações da Tabela 16. Esse aço foi produzido pela Siderca S.A.I.C., sediada em Buenos Aires.

Sabendo que o material foi fornecido na forma do componente acabado (Figura 36), o mesmo apresenta uma região superficial temperada não revenida e o seu núcleo com microestrutura como fornecida. Tendo o material sido fornecido na forma do componente final, suas dimensões eram idênticas às especificadas na Figura 35.



Figura 36 - Material na forma do componente final (terminal de eixo).

A fim de possibilitar uma melhor análise dos dados para o material como fornecido, sabendo que o mesmo apresenta diferentes estruturas e propriedades em sua região interna e em sua superfície, foi definida uma divisão em áreas, conforme a Figura 37. Essa divisão possibilitou ainda a análise de uma secção transversal com sua forma, permitindo definir a extensão da camada temperada.

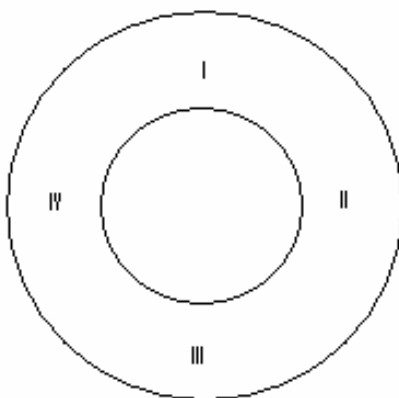
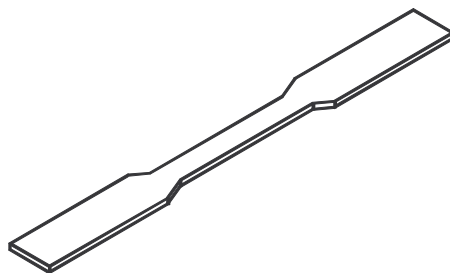
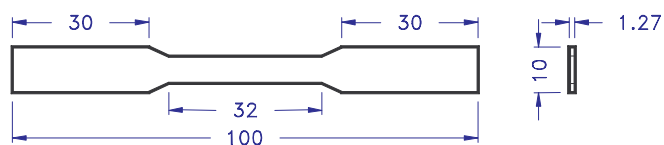


Figura 37 - Ilustração da secção transversal do tubo utilizada para a realização das análises microestruturais no material como fornecido e determinação da camada temperada.

4.2. CORPOS-DE-PROVA

Sabendo que os corpos-de-prova seriam extraídos do componente acabado, para facilitar sua confecção, foi realizado um tratamento de normalização do componente a fim de reduzir sua dureza superficial e facilitar o seccionamento do mesmo. Essa normalização foi realizada no Laboratório de Tratamentos Térmicos do DMT/FEG/UNESP e consistiu no aquecimento a 850°C por 20 minutos.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração e na análise metalográfica foram usinados no Laboratório de Usinagem de Precisão e de Comando Numérico Computacional do DMT/FEG/UNESP, de acordo com a norma ASTM E8M relativa a ensaios de tração. Para cada condição pesquisada foram produzidos quatro corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram usinados com dimensões reduzidas, do tipo *sub-size*, de seção retangular, com região útil de 25 mm e com eixo longitudinal coincidindo com a direção de extrusão do tubo (terminal de eixo). Na Figura 38 temos uma representação esquemática dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração, além de uma foto da fresadora utilizada para a confecção dos mesmos.



(a)



(b)

Figura 38 - (a) Representação dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração e (b) foto da fresadora do Laboratório de Usinagem de Precisão e de Comando Numérico Computacional do DMT/FEG/UNESP.

4.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS

A fim de permitir uma maior homogeneidade e facilidade de produção dos corpos-de-prova, inicialmente, os componentes foram submetidos a um tratamento de normalização a 850°C por 20 minutos, conforme Figura 39.



Figura 39 - Forno tipo mufla do Laboratório de Tratamentos Térmicos DMT/FEG/UNESP.

Em uma etapa posterior, buscando a obtenção de microestruturas alternativas para o material, os corpos-de-prova foram divididos em seis diferentes grupos, cada qual submetido a uma diferente rota de tratamento térmico, conforme síntese na Tabela 17 e detalhamento no item 4.3.1.

Tabela 17 - Tratamentos Térmicos realizados sobre os corpos-de-prova.

Grupo	Numeração Dos CdP's	Descrição simplificada da rota
0	1 a 4	Material como fornecido
1	5 a 8	Aquecimento a 850 °C por 20 minutos, seguido por resfriamento ao ar.
2	9 a 12	Aquecimento a 850 °C por 20 minutos, seguido por resfriamento em água.
3	13 a 16	Idem ao Grupo 2 seguido por aquecimento a 300 °C por duas horas e posterior resfriamento ao ar.
4	17 a 20	Aquecimento a 850 °C por 20 minutos, resfriamento lento até 760°, novo encharque por 20 minutos e resfriamento em água a 25°C.
5	21 a 24	Aquecimento a 850 °C por 20 minutos, resfriamento lento até 740°, novo encharque por 20 minutos e resfriamento em água a 25°C.

Os tratamentos térmicos foram realizados no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Guaratinguetá (Figura 40). Para estes tratamentos foi utilizado um forno do tipo mufla da QUIMIS Aparelhos Científicos Ltda, do modelo 0.318.24.D com potência de 4000W e temperatura máxima de 1200°C.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40 - Fotos ilustrativas dos tratamentos térmicos realizados no Laboratório de Tratamentos Térmicos do DMT/FEG/UNESP. Em (a) e (b), os corpos-de-prova sendo retirados do forno a uma temperatura de 850°C. Em (c) e (d) a têmpera em água.

4.3.1. Definição das temperaturas e rotas dos Tratamentos Térmicos

Para a definição das temperaturas de austenitização e de transformações isotérmicas foram utilizadas equações específicas desenvolvidas por Andrews de acordo com a composição química do material estudado. Essas equações podem ser escritas como (ANDREWS, 1965):

$$Ac_1 = 723 - 10,7Mn - 16,9Ni + 29,1Si + 16,9Cr + 290As + 6,38W \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$Ac_3 = 910 - 203\sqrt{C} - 15,2Ni + 44,7Si + 104V + 31,5Mo + 13,1W - (30Mn + 11Cr + 20Cu - 700P - 400Al - 120As + 400Ti) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$Ms = 539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 7,5Mo \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde Ac_3 representa a temperatura mínima de austenitização ou temperatura de tratamento de solução ou limite superior do intervalo crítico. A_{C1} representa o início do intervalo de transformação ou a temperatura eutetóide. M_S é a temperatura de início da transformação martensítica (ROZA, 2001).

Para o material utilizado neste trabalho, cuja composição química encontra-se na Tabela 18, a aplicação das equações 4.1, 4.2 e 4.3 resulta em:

$$Ac_1 \text{ (eq. 4.1)} \rightarrow 721 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Ac_3 \text{ (eq. 4.2)} \rightarrow 774 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$M_S \text{ (eq. 4.3)} \rightarrow 319 \text{ }^\circ\text{C}$$

A partir destes valores e de uma cuidadosa pesquisa bibliográfica, visando especialmente às rotas de tratamentos térmicos, foram definidas a temperatura intercrítica e os tempos de permanência nas respectivas temperaturas.

A temperatura de austenitização deve ser escolhida de maneira que, após a manutenção do componente nesta condição, não somente o carbono necessário ao endurecimento esteja em solução, mas também que o mesmo esteja dividido de maneira homogênea na austenita afim de que se possa obter no fim do processo uma dureza homogênea. Esse resultado pode ser obtido se a temperatura de austenitização é superior a A_{C3} , cuidando para que não seja muito superior a fim de evitar o aumento do tamanho de grão da austenita. Desta forma é possível obter diversos pares de temperatura e tempo de tratamento, podendo a temperatura ser tão mais próxima de A_{C3} quanto maior for o tempo de manutenção na mesma (MURRY, 1998). Para o material em questão, cuja temperatura A_{C3} segundo a equação de Andrews é de aproximadamente 780 °C, definiu-se como temperatura de tratamento 850°C por um tempo de 20 minutos.

Para aços de baixo teor de carbono, a fim de obter estruturas bifásicas ou aços apresentando o efeito TRIP, normalmente utilizam-se temperaturas por volta de 30 °C acima de A_{C1} (SAKUMA; MATSUMURA; TAKECHI, 1991). Aparentemente, é preferível a utilização de uma temperatura intercrítica baixa para a formação de microestruturas bifásicas. Pois, apesar delas diminuírem a fração volumétrica da austenita no campo intercrítico, elas propiciam um maior enriquecimento de carbono na fase γ , provocando um decréscimo na temperatura de início de transformação martensítica, o qual acaba por favorecer a presença da austenita retida em temperatura ambiente (PEREIRA, 2004). Com isso, as temperaturas intercríticas neste trabalho foram de 740°C e 760°C, já que a temperatura calculada pela equação de Andrews foi de aproximadamente 720°C.

4.4. MICROSCOPIA ÓPTICA

A caracterização microestrutural foi realizada no Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP e no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais – LAIMat da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP.

4.4.1. Preparação das amostras metalográficas

As amostras utilizadas na análise metalográfica do aço foram extraídas de cada uma das seis condições de processamento térmico, sendo retiradas da seção transversal à direção de extrusão. As principais etapas de preparação das amostras (seccionamento, embutimento, lixamento e polimento) serão descritas a seguir.

- Seccionamento: os corpos-de-prova utilizados para a análise metalográfica foram cortados na seccionadora de precisão ISOMET 1000 – BUEHLER do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP. Para o corte, foi utilizado um disco com núcleo metálico e borda com incrustações de diamante, o qual proporciona um corte de alta precisão e um bom acabamento. De acordo com o fabricante, esse disco permite a manutenção das amostras numa temperatura inferior a 200°C, evitando possíveis transformações de fase que pudessem ocorrer nos aços multifásicos durante o corte.

- Embutimento: foi realizado no equipamento STRUERS-TEMPOPRESS do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP (Figura 41). Foi utilizada uma resina epóxi do tipo Struers Multi Fast Brown. O tempo de embutimento foi por volta de dez minutos para cada amostra.



Figura 41 - Equipamento Tempopress do DMT/FEG/UNESP onde foram realizados os embutimentos das amostras para a análise metalográfica.

- Lixamento: Utilizaram-se lixas d'água com granulometrias de 400, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000, nesta seqüência e logo após o embutimento. Essa seqüência foi definida, sem utilização de lixas de granulação mais grosseira, devido ao acabamento equivalente (nível semelhante de deformação e rugosidade) ao da utilização das mesmas proporcionado pelo corte com o disco de diamante.

- Polimento: Utilizou-se uma POLITRIZ AP2 Panambra (Figura 42). A rotação para o polimento foi de 500 rpm. Como abrasivo, foi utilizada Sílica Coloidal OP-S Struers. Para controle da qualidade do polimento e planicidade final elevada, foi utilizado para auxiliar o processo um microscópio óptico de bancada.



Figura 42 - Politriz Panambra AP2 do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP.

4.4.2. Ataque químico

Com o objetivo de revelar características específicas das estruturas dos aços, diferentes ataques químicos vêm sendo desenvolvidos, sendo a maneira mais amplamente utilizada para visualização de uma microestrutura real. Para revelar alguns microconstituintes presentes na estrutura multifásica quando há coexistência de diversos constituintes após tratamentos térmicos ou termomecânicos, uma das soluções encontradas foi a variação nos tipos e quantidades de reagentes químicos aplicados.

No desenvolvimento deste trabalho o ataque químico foi o Nital. Este ataque pode ser realizado normalmente com a diluição de 2 a 5% de ácido nítrico em álcool etílico.

Neste estudo, utilizou-se o Nital 2%. Esse procedimento foi adotado por ser um procedimento padrão, de elevado grau de reprodutibilidade e capaz de revelar os microconstituintes dos aços carbono de baixa e média liga.

4.4.3. Análise de imagens

Todas as imagens deste trabalho foram capturadas no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMat) do DMT – FEG/UNESP, seguindo a norma ASTM E1382, através da utilização de um microscópio CARL ZEISS JENE NEOPHOT 30 (Figura 43).



Figura 43 - Microscópio CARL ZEISS JENE NEOPHOT 30 do Laboratório de Metalografia do DMT/FEG/UNESP.

Para captura, armazenamento e processamento das imagens foram utilizados os softwares *Media Cybernetics Image Pro Plus 4.0* e *Material Pro Analyser 3.1*. A resolução utilizada foi de 640 x 480 pixels.

A fim de poder definir bem a microestrutura e permitir ainda uma visão mais ampla da estrutura, foram utilizados aumentos de 500x e 200x. Isso permitiu definir claramente cada região, bem como fazer uma análise de homogeneidade, das diferentes composições por região da amostra, visão de regiões adjacentes, etc.

Seguindo o especificado na norma ASTM E1382, foram capturados, pelo menos, 20 campos para cada amostra, utilizando a coloração natural proporcionada pelos ataques químicos. Para permitir a realização de uma análise quantitativa da estrutura, foram obtidas também imagens em preto e branco. Essas imagens foram selecionadas e capturadas de forma aleatória dentro de cada amostra a fim de permitir uma real análise qualitativa e quantitativa da estrutura.

Para cada condição de tratamento térmico foram extraídos 20 campos representativos da microestrutura do material. Foi então aplicada a essas imagens uma rotina de processamento para uma análise quantitativa das fases e para análise morfológica da estrutura. As rotas empregadas para análise quantitativa foram:

- *measure phases*: segmentação das imagens, a partir do seu histograma de brilho, o que permite sua divisão em quantas partes forem necessárias. Neste trabalho, para o reagente Nital, o histograma foi dividido em duas partes. De acordo com a norma ASTM E1382, foi realizado o ajuste dessa segmentação para a primeira imagem, aleatoriamente selecionada pelo programa e esse ajuste foi aplicado às demais imagens capturadas.

- *measure phases statistics*: análise estatística dos resultados gerados, através do *measure phases*, para determinação da fração volumétrica das fases presentes.

4.5. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da FEG/UNESP, segundo a norma ASTM E8M-95a, a qual trata dos ensaios de tração para materiais metálicos à temperatura ambiente. Foi utilizada a máquina de tração EMIC, com célula de carga com capacidade de 10 kN (Figura 44).



Figura 44 - Máquina de tração EMIC do Laboratório de Ensaio Mecânicos.

A velocidade de deslocamento durante o ensaio foi de 1,0 mm/min. As grandezas obtidas através do ensaio de tração foram:

- Limite de escoamento → Para os casos em que as curvas tensão-deformação não apresentaram escoamento contínuo, foi utilizado o método *offset* a 0,2%.
- Limite de resistência à tração → calculado a partir do carregamento máximo registrado dividido pela área inicial da seção útil do corpo-de-prova.
- Alongamento → Definido pela variação percentual do comprimento da região útil do corpo-de-prova após o rompimento.

Buscando maior exatidão no cálculo do alongamento, foi utilizado um projetor de perfis Carlzeiss-Jena MP320 para medição do comprimento final da região útil dos corpos-de-prova após o rompimento. O equipamento, do Laboratório de Metrologia da FE-G/UNESP, tem como principais características iluminação episcópica e precisão de leitura milesimal. Um aumento de 20 vezes foi aplicado no perfil dos corpos-de-prova fraturados.

4.6. MEDIÇÕES DE DUREZA

As medições de dureza foram realizadas no Laboratório de Tratamentos Térmicos do DMT/FEG/UNESP e para as mesmas foi utilizado um durômetro OTTO WOLPET-WERKE do modelo Dia Testor 2 Rc (Figura 45) e permite fazer análises de durezas HV, HR_B e HR_C. Neste estudo as medições de dureza foram realizadas na escala Vickers.



Figura 45 - Durômetro OTTO WOLPERT-WERKE do DMT/FEG/UNESP.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Inicialmente, realizou-se uma análise da composição química do material como fornecido a fim de verificar se o mesmo atendia às especificações de projeto, segundo a Tabela 16, de especificações do material. Essa composição química foi fornecida pelo fabricante do componente e é aquela correspondente ao lote do qual foram produzidos os componentes ensaiados.

Tabela 18 - Composição química do aço recebido

Composição química do aço (% em massa)							
C	Mn	S	P	Si	Cu	Al	Ti
0,467	0,74	0,004	0,011	0,204	0,218	0,027	0,003

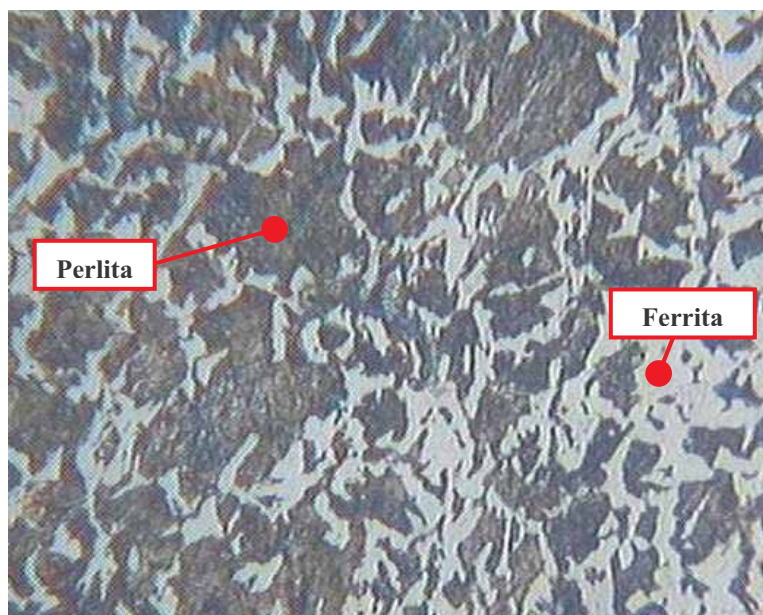
Uma analogia rápida entre a Tabela 18 (material recebido) e a Tabela 16 (composição química especificada) permite concluir que o material do lote em questão estava dentro do especificado, tratando-se portanto, de componentes quimicamente conformes e podendo ser definido o material de base como XC48.

5.2. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

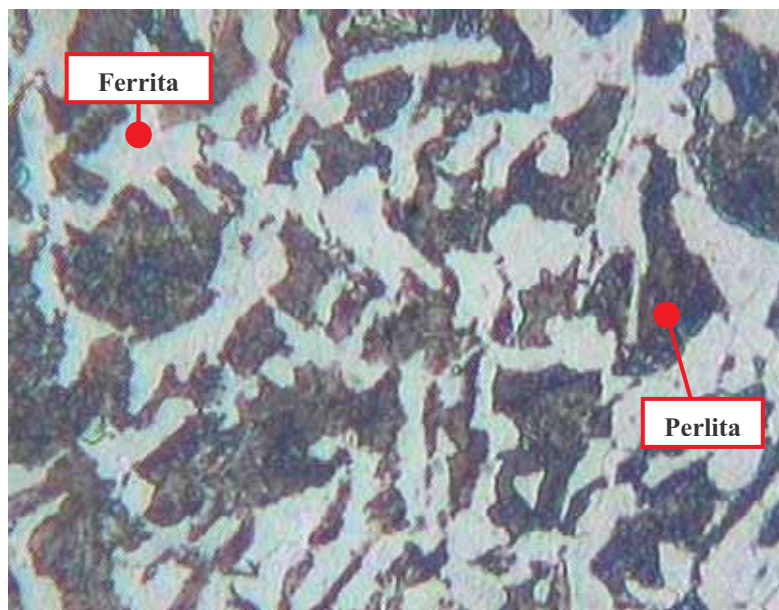
5.2.1. Material como fornecido

A análise microestrutural do componente como fornecido confirmou os resultados esperados para o componente, levando-se em conta as características de processo e tratamentos térmicos aos quais o componente é submetido ao longo da sua produção.

A superfície do componente apresentou uma camada externa composta por martensita (Figura 47), que era a estrutura esperada devido ao tratamento de têmpera superficial por indução. O núcleo apresentou uma microestrutura composta de ferrita e perlita (Figura 46 (a) e (b)), indicando que o mesmo não foi afetado pela têmpera e manteve assim sua estrutura de material como fornecido. Essa estrutura do núcleo é a mesma esperada para um material normalizado ou recozido, por exemplo.



(a)



(b)

Figura 46 - Microestrutura obtida na região central do material como fornecido (corpos-de-prova 1 a 4). A fase escura é composta de perlita enquanto ferrita aparece na fase clara das imagens. Em (a) aumento de 200x e em (b), 500x.

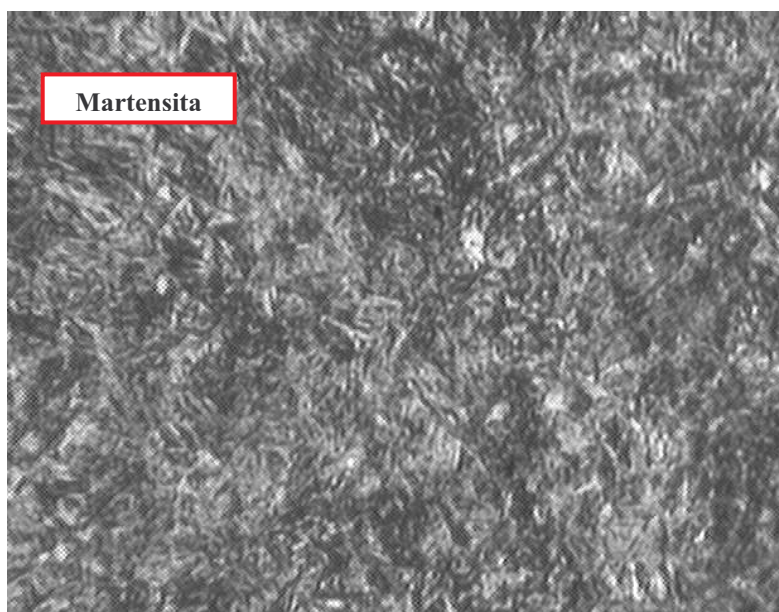


Figura 47 - Microestrutura com aumento de 500x obtida na superfície do material como fornecido (corpos-de-prova 1 a 4). Pode-se identificar claramente a estrutura acicular da martensita.

5.2.2. Normalizado

Como citado anteriormente, o tratamento de normalização foi realizado com o intuito de facilitar a confecção dos corpos-de-prova. Além disso, foi realizada uma análise microestrutural e das características mecânicas a fim de permitir uma comparação dos resultados com os obtidos no núcleo do material como fornecido.

A análise metalográfica realizada tanto no núcleo do material como fornecido (Figura 46) quanto no material normalizado (Figura 48), apresentou resultados similares, ou seja, estruturas perlíticas numa matriz ferrítica. Estruturas estas, típicas de aços hipoeutetóides resfriados lentamente a partir da região de austenitização.

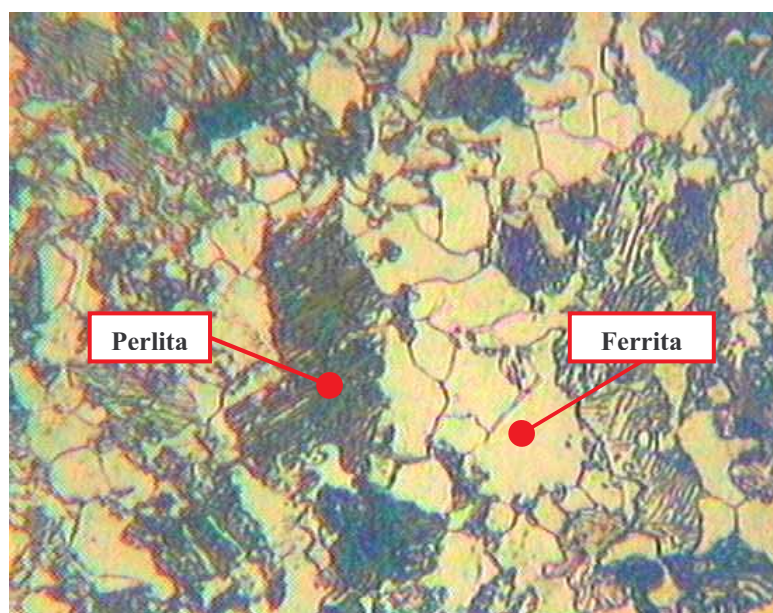


Figura 48 - Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra após tratamento de normalização (corpos-de-prova 5 a 8). Nota-se uma estrutura de matriz ferrítica (zonas claras) incrustada por regiões perlíticas, as quais podem ser identificadas como as áreas escuras da imagem.

5.2.3. Temperado

As Figuras 49 e 50 mostram estruturas tipicamente relacionadas a materiais temperados, onde a grande velocidade de resfriamento gera deformações na rede cristalina, transformando a austenita diretamente em martensita, não permitindo tempo suficiente para a difusão do carbono que geraria estruturas com menor tensão interna e distribuição mais equilibrada do carbono. Desta forma, o que se pode avaliar por intermédio destas imagens é uma estrutura metaestável 100% martensítica, obtida através do resfriamento da austenita em água a temperatura ambiente.

A comparação das Figuras 49 e 50 à Figura 47 permite concluir que o componente recebido realmente havia passado por um tratamento de têmpera superficial. Neste caso, obtido através de um processo indutivo.

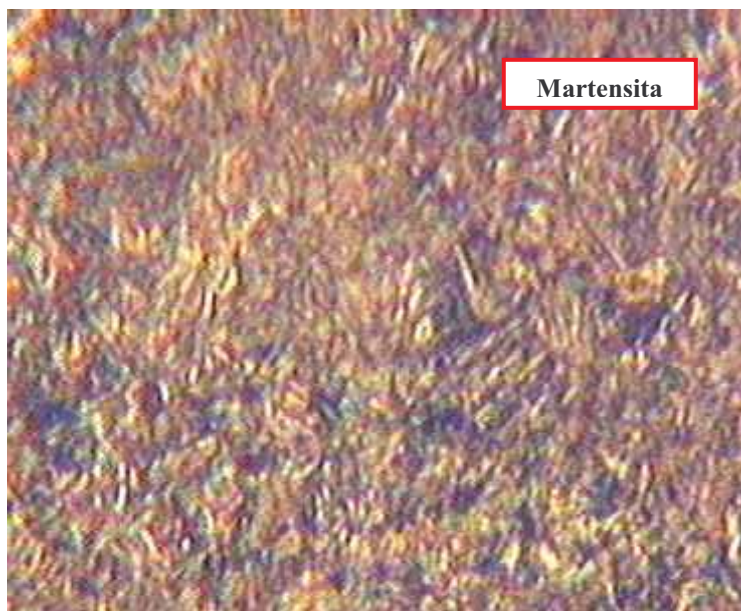


Figura 49 - Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra após tratamento de têmpera (corpos-de-prova 9 a 12). Estrutura acicular da martensita claramente identificada.

5.2.4. Temperado e revenido

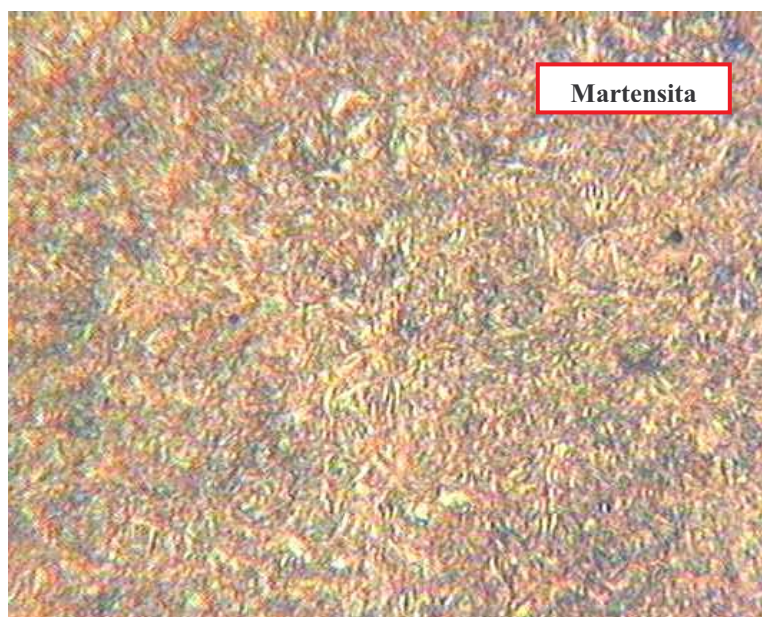


Figura 50 - Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento de têmpera, seguido de revenimento (corpos-de-prova 13 a 16). Estrutura constituída 100% de martensita, apresentando morfologia acicular.

5.2.5. Têmpera Intercrítica de 740⁰ C

As Figuras 51 e 52 representam o aço nas condições submetidas a tratamentos térmicos intercríticos em diferentes temperaturas, ou seja, 740⁰ C e 760⁰ C. Em ambos os tratamentos, o aço apresenta uma estrutura bifásica, constituída de ferrita, caracterizada pela tonalidade branca ou cinza clara, e martensita, caracterizada pela tonalidade cinza escura.

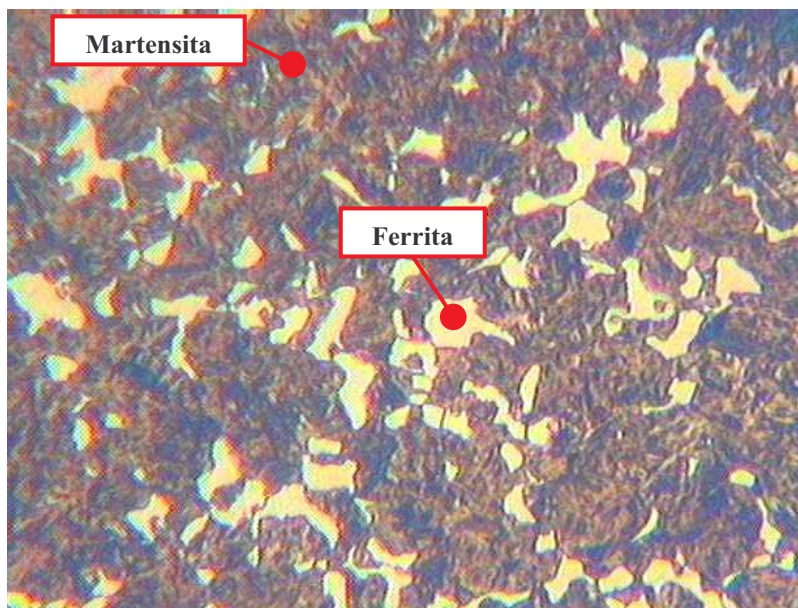


Figura 51 - Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento na região intercrítica 740°C (corpos-de-prova 17 a 20). Estrutura ferrítico-martensítica (martensita na área escura).

5.2.6. Têmpera Intercrítica de 760°C

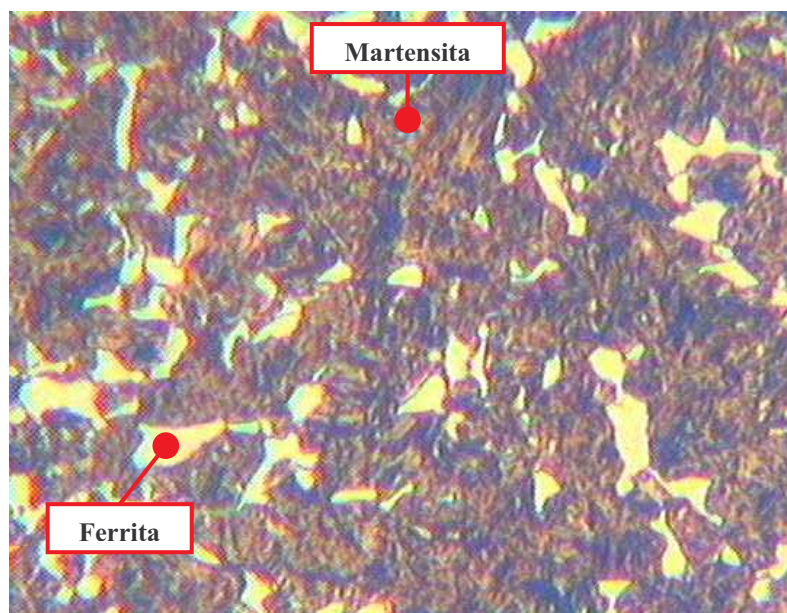


Figura 52. Microestrutura com aumento de 500x realizada na amostra submetida a tratamento na região intercrítica 760°C (corpos-de-prova 21 a 24). Estrutura ferrítico-martensítica (ferrita na área clara).

Visualmente, pode-se perceber que o aço mantido a 760⁰ C apresenta maior fração de martensita em relação àquele mantido a 740⁰ C. Este fato poderia ser explicado pela maior fração de ferrita presente na região intercrítica quanto menor for a temperatura de tratamento (regra da balança aplicada a região intercrítica no diagrama ferro carbono).

De toda forma, a fim de confirmar esta hipótese, foram medidas, segundo procedimento descrito no capítulo anterior, as frações das fases, não só para os bifásicos, como também para todas as condições ensaiadas. Os resultados encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Frações volumétricas (%) das fases presentes em cada condição de tratamento térmico.

	Ferrita	Perlita	Martensita
Como fornecido	48,6 ± 2,4	51,4 ± 2,4	-
Normalizado	47,4 ± 2,1	52,6 ± 2,3	-
Temperado	-	-	100
Temperado e revenido	-	-	100
Bifásico (740 ⁰ C)	46,3 ± 2,2	-	53,7 ± 2,5
Bifásico (760 ⁰ C)	35,2 ± 2,9	-	64,8 ± 2,7

Na Tabela 19, para as estruturas do núcleo da amostra como fornecida e do material normalizado observa-se estatisticamente a mesma fração volumétrica de ferrita e perlita (aproximadamente 50% de cada fase, com um pouco mais de perlita em relação à ferrita).

Além disso, confirma a hipótese de que o material bifásico submetido à menor temperatura intercrítica (740⁰ C) apresenta maior fração de ferrita em relação àquele tratado termicamente a 760⁰ C. Em contrapartida, a fração de martensita foi maior para o aço submetido a maior temperatura de tratamento (760⁰ C), confirmando a maior austenitização na região intercrítica para o aço a 760⁰ C.

5.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os valores de limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza para todas as condições analisadas, foram dispostos na forma de Tabelas por condição de tratamento térmico e encontram-se abaixo.

5.3.1. Material como fornecido

Para análise do material como fornecido, sabendo que o mesmo apresenta características diferentes em sua superfície e em seu núcleo, foi respeitada a divisão de áreas, conforme a Figura 37.

A primeira medição realizada foi a de espessura da camada temperada. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Espessuras total e da camada temperada encontradas no componente conforme recebido pelo DMT/FEG/UNESP.

	Áreas				
	I	II	III	IV	Média
Espessura total [mm]	6,4	6,2	6,3	6,4	6,4
Espessura camada temperada [mm]	2,2	2,15	2,2	2,0	2,2

O próximo passo foi a determinação da dureza em cada região do material, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de dureza Vickers (HV) por região e considerando a influência da camada temperada, encontrados no componente como recebido pelo DMT/FEG/UNESP.

	Áreas				
	I	II	III	IV	Média
Região temperada [HV]	630 ± 8	638 ± 9	632 ± 7	634 ± 7	634 ± 8
Região não temperada [HV]	255 ± 4	259 ± 5	260 ± 6	262 ± 6	259 ± 6

Os ensaios de tração foram realizados exclusivamente na massa do material, ou seja, na região não temperada. Os resultados obtidos, assim como os enviados pelo fornecedor do material encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Limite de escoamento, resistência à tração e alongamento, obtidos no ensaio de tração para o material como fornecido.

	Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]
Dados obtidos no DMT	700 ± 16	910 ± 15	11 ± 2
Dados recebidos fornecedor	-	919	15

5.3.2. Normalizado

Os dados obtidos nos ensaios de tração e medição de dureza para os corpos-de-prova realizados com o material normalizado encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza encontrados para o material normalizado.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HV]
670 ± 12	894 ± 15	12 ± 2	246 ± 8

Poder-se-ia acreditar que os valores de limite de escoamento e resistência à tração deveriam ser os mesmos tanto para o material normalizado (Tabela 23) quanto para a região central do material como fornecido (Tabela 22). Entretanto as características de resistência mecânica do material normalizado foram inferiores às do material como fornecido.

Esta diferença pode ser explicada em função do processo de fabricação do componente final. Durante a produção do componente, o material passa por um processo de extrusão. As deformações a frio produzidas por esse processo mecânico, geram acúmulos de discordâncias, dificultando a deformação e aumentando a resistência mecânica num processo comumente chamado de "encruamento" do material. É este encruamento que permite características de resistência levemente superiores ao material como fornecido em relação ao material normalizado.

5.3.3. Temperado

Os dados obtidos nos ensaios de tração e medição de dureza para os corpos-de-prova realizados com o material temperado encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza encontrados para o material temperado.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HV]
1874 ± 25	2290 ± 28	6 ± 1	627 ± 12

5.3.4. Temperado e revenido

Os dados obtidos nos ensaios de tração e medição de dureza para os corpos-de-prova realizados com o material temperado e revenido encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza encontrados para o material temperado e revenido.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HV]
996 ± 16	1660 ± 20	8 ± 1	513 ± 11

O material temperado, conforme o esperado, foi o que apresentou melhores características de resistência mecânica. O limite de escoamento, por exemplo, é da ordem de 1850 MPa (praticamente o triplo dos 670 MPa encontrados para o material normalizado). Entretanto, devido à elevada presença de tensões internas, o material se torna também extremamente fragilizado, sendo o que apresenta menor alongamento, de apenas 6%.

O tratamento de revenimento reduz sensivelmente as características mecânicas em relação ao material temperado e não revenido (uma redução de praticamente 50% no limite de escoamento), sem elevar na mesma proporção a ductilidade do material (atingindo apenas 8%, ao invés do 6% do material somente temperado).

A análise das durezas permite notar que ela, assim como todas as outras características mecânicas, é consideravelmente maior para o corpo-de-prova que não sofreu revenimento. Além disso, uma analogia entre os valores encontrados para a superfície temperada do componente (Tabela 21) e para os corpos-de-prova temperados sem revenimento (Tabela 24), ambas por volta de 630 HV, comprova que realmente não houve revenimento no componente como fornecido.

5.3.5. Têmpera Intercrítica de 740⁰ C

Os dados obtidos nos ensaios de tração e medição de dureza para os corpos-de-prova realizados com o material bifásico 740⁰ C encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza encontrados para o material bifásico 740⁰ C.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HV]
1492 ± 19	2076 ± 28	10 ± 1	540 ± 11

5.3.6. Têmpera Intercrítica de 760⁰ C

Os dados obtidos nos ensaios de tração e medição de dureza para os corpos-de-prova realizados com o material bifásico 760⁰ C encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - Limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e dureza encontrados para o material bifásico 760⁰ C.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HV]
1643 ± 22	2220 ± 31	9 ± 1	563 ± 10

Os materiais bifásicos, conforme esperado, apresentaram valores elevados de resistência mecânica, entretanto inferiores aos obtidos para o material temperado. A grande vantagem destes materiais é que, sem redução significativa em sua resistência mecânica (o aço bifásico a 740⁰C apresenta 90% de resistência a tração do temperado (2070 MPa contra 2300 MPa), eles apresentam uma ductilidade muito superior. Em nosso caso, os 10% de alongamento do material bifásico foram os que mais se aproximaram dos 11% encontrados na parte não temperada do material como fornecido.

Entre os materiais bifásicos, pode-se notar que aquele temperado a 760⁰ C apresenta características que se aproximam bastante das do material temperado. Isso indica que a temperatura intercrítica talvez tenha sido demasiadamente elevada. Entretanto, ela possibilitou um material com resistência mecânica praticamente similar ao temperado (praticamente a mesma resistência à tração e pequena redução no limite de escoamento) e um ganho significativo na ductilidade: praticamente 50% em relação ao temperado (9% de alongamento para o bifásico 760⁰ C contra 6% do aço temperado).

5.3.7. Um comparativo entre os tratamentos térmicos aplicados

Este tópico tem como objetivo permitir um comparativo entre as características mecânicas obtidas para cada tratamento térmico aplicado, bem como tentar indicar soluções alternativas para o temperado superficial do componente produzido em série atualmente.

Na Figura 53, foram plotados os dados de limite de escoamento e alongamento para cada tratamento.

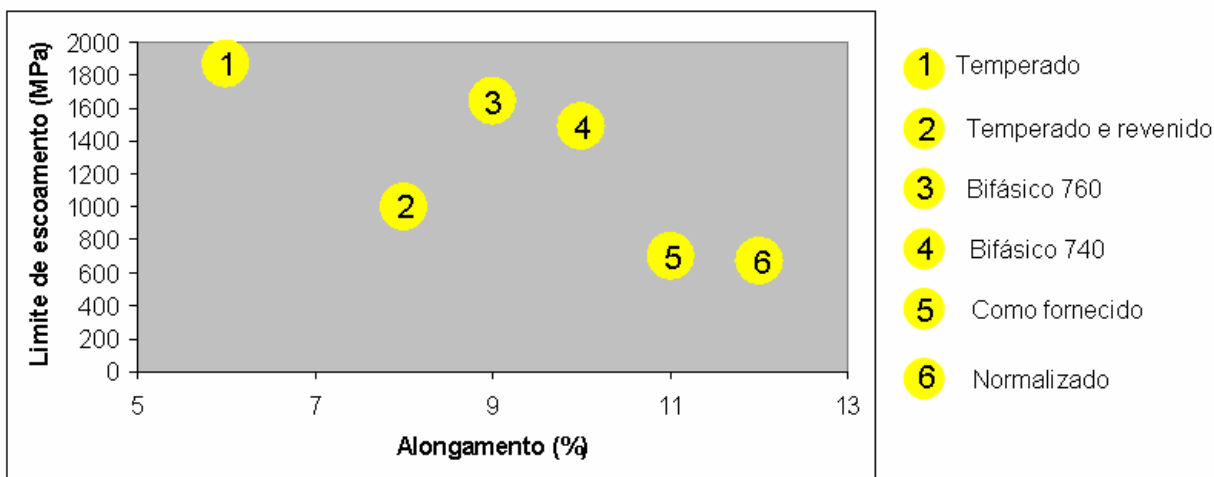


Figura 53 - Correlação entre alongamento (em %) e Limite de escoamento (em MPa) obtidos para cada tratamento térmico realizado no desenvolvimento desta pesquisa.

Inicialmente, identificaram-se as propriedades mecânicas necessárias para o componente em questão. Neste caso, a condição em que o componente é submetido à fadiga em flexão e compressão definiu o tratamento térmico escolhido para o componente em série: têmpera superficial por indução sobre um material de médio carbono. Um componente com este tipo de estrutura apresenta grande resistência ao desgaste devido à elevada dureza e resistência mecânica superficial e apresenta boas propriedades em fadiga devido ao núcleo que permanece tenaz. Esse conjunto de características indica que há necessidade de elevada resistência, sem perda significativa da tenacidade.

Ainda sobre o material como fornecido, pode-se notar, comparando os pares limite de escoamento / alongamento de número 5 e 6 da Figura 53, que a própria conformação mecânica (extrusão) aumenta a resistência mecânica do material por deformação a frio (encruamento), reduzindo, entretanto um pouco sua ductilidade. Isso, além da escolha de um material com quantidade já considerável de carbono, mostra que, devido aos grandes esforços de fadiga, mesmo o núcleo deve apresentar resistência mecânica significativa a fim de prolongar a vida útil do componente.

Desta forma, faz-se necessário para o componente em questão um compromisso importante entre o alongamento e a resistência mecânica após o tratamento térmico aplicado, o que se pode ver na Figura 54.

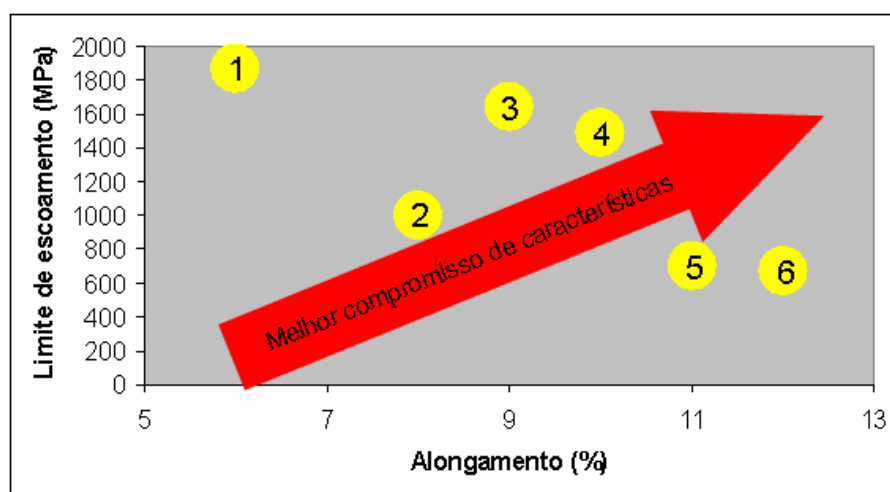


Figura 54 - Correlação entre alongamento (em %) e Limite de escoamento (em MPa) obtidos para cada tratamento térmico, indicando o compromisso buscado para o componente em questão.

5.3.7.1. Têmpera completa sem revenimento

Um tratamento de têmpera completa no componente propicia elevada resistência mecânica, com limite de escoamento da ordem de 1870 MPa, porém reduz significativamente sua capacidade de absorção de energia, apresentando alongamento de apenas 6%, o menor entre todos os tratamentos realizados neste trabalho.

Essa condição se deve ao fato de o endurecimento martensítico ocorrer em função da distorção na matriz do material, sem tempo suficiente para a difusão completa dos átomos. Essa distorção dificulta a movimentação de discordâncias, aumentando a resistência mecânica. Porém, ela também aumenta a concentração de tensões, reduzindo o alongamento e a capacidade de absorção de energia, fragilizando o material, conforme item 5.3.3.

Outra característica negativa de materiais temperados e não revenidos é a possível presença de trincas superficiais e instabilidades dimensionais sempre ocorridas em função do resfriamento rápido, o qual não permite difusão dos átomos de carbono e acaba gerando distorções no retículo cristalino, bem como a possível presença de elevados teores de austenita retida.

Desta forma, apesar da elevada resistência mecânica obtida para o material temperado (a maior entre todos os tratamentos realizados neste trabalho), o mesmo não é indicado para utilização no componente em questão, já que seria muito frágil para a aplicação do componente e apresentaria riscos importantes de fraturas frágeis e súbitas.

5.3.7.2. Têmpera seguida por revenimento

O revenimento é um tratamento aplicado para melhorar as propriedades físicas dos aços temperados. A difusão, propiciada pelo revenimento, produz uma estrutura menos frágil e dimensionalmente mais estável. O revenimento ocorre em cinco diferentes estágios, relacionados à composição química do material e às temperaturas de revenimento.

A primeira fase apresenta características distintas para aços de baixo carbono em relação aos aços de médio e alto carbono. Em aços com mais de 0,2% de carbono, uma fração do soluto (carbono) não consegue segregar no contorno das ripas de martensita, permanecendo nos interstícios normais. Nestes aços então, no primeiro estágio do revenimento, a temperaturas inferiores a 100^o C, ocorre a precipitação do carboneto ϵ , o qual apresenta estrutura hexagonal compacta e menor volume que a tetragonal de corpo centrado da martensita, ou seja, nesse primeiro estágio do revenimento o material sofre uma redução de volume.

Já no quarto estágio do revenido, começam a crescer partículas esferoidais pelo processo de difusão, já que partículas maiores possuem menores energias livres. Desta forma, quanto mais alta for a temperatura de revenimento, mais grosseiros serão os grãos.

Neste trabalho, para o tratamento temperado e revenido, foi constatada uma melhora significativa no alongamento, em relação ao temperado. Porém mesmo estes valores de alongamento se encontram ainda bastante inferiores aos encontrados na massa do material para conferir tenacidade e resistência à fadiga ao mesmo. Além disso, a perda na resistência mecânica foi muito grande (limite de escoamento ficou em torno de 1000 MPa), sendo mais elevada apenas que a do material normalizado. Submetido aos esforços de compressão, esse tratamento poderia não ser robusto para garantir a vida útil do componente.

Pode-se propor uma temperatura de revenimento um pouco maior a fim de melhorar os valores do alongamento, porém compromete-se ainda mais os valores de resistência mecânica. Desta forma, esta solução (temperar e revenir o material em toda sua massa) dificilmente seria um bom caminho para melhorar a vida e custos de produção do componente.

5.3.7.3. Têmpera Intercrítica

Os aços bifásicos foram os que mais se aproximaram do ideal compromisso entre resistência mecânica e alongamento. Eles permitiram obter valores de resistência mecânica muito próximos aos do aço temperado sem reduzir de maneira drástica o alongamento. A resistência à tração, por exemplo, do aço bifásico a 760^o C, assim como a do temperado, foi superior a 2200 MPa, um valor muito elevado para um aço com apenas 0,5% de carbono, conseguindo ainda apresentar 9% de alongamento contra os apenas 6% do aço temperado.

Comparando-se os dois aços bifásicos (Tabela 19), pode-se notar que aquele submetido à maior temperatura intercrítica apresentou maior proporção de martensita, maior resistência mecânica e alongamento um pouco inferior. Essa maior presença da martensita pode ser explicada pela maior quantidade de austenita que foi gerada no tratamento intercrítico em função da temperatura mais elevada. E é também a presença de uma fração mais significativa de martensita que explica as melhores propriedades mecânicas e a redução do alongamento em relação ao aço submetido a um tratamento intercrítico a temperatura mais baixa.

Analisando-se o alongamento do aço bifásico 740^o C, pode-se notar que o mesmo apresenta valores muito próximos aos obtidos para o material como fornecido, 10% e 11%, respectivamente. Ao se considerar os desvios padrão esses valores podem inclusive ser considerados equivalentes.

O alongamento muito próximo entre o bifásico a 740⁰ C e o material como fornecido pode ser explicado pelas frações volumétricas de ferrita praticamente idênticas após os dois tratamentos térmicos. No aço como fornecido a ferrita representou aproximadamente 48% da estrutura do material, enquanto que no aço bifásico a 740⁰ C ela respondeu por uma fração volumétrica de aproximadamente 46%. Mais uma vez, considerando os desvios padrão, os valores se cruzam e podem-se considerar as frações volumétricas equivalentes.

Atentando-se para o outro lado da balança, pode-se notar que este aço apresenta uma resistência mecânica muito maior que aquele como fornecido: Numa análise do limite de escoamento, por exemplo, o aço bifásico a 740⁰ C apresenta valores da ordem de 1500 MPa, enquanto material como fornecido, apresenta valores da ordem de 700 MPa. Isso se explica pelas características distintas entre a perlita, presente no material como fornecido, e a martensita, encontrada no material bifásico. A martensita, em função das deformações que gera no reticulado, apresenta propriedades mecânicas superiores às da perlita.

O aço bifásico a 760⁰ C, apesar do menor alongamento (9%), apresenta valores de limite de escoamento ainda mais elevados, da ordem de 1650 MPa, o que pode ser muito interessante para o caso da resistência ao desgaste. Mais uma vez, a explicação para este resultado em relação ao bifásico a 740⁰ C pode ser dada pela fração volumétrica das fases. Apresentando uma maior quantidade de martensita, o aço que ficou exposto à temperatura mais elevada apresenta maior resistência. Entretanto, sua menor fração volumétrica de ferrita, diminui seu alongamento e por conseqüência, sua ductilidade e tenacidade.

Assim, para utilização do aço bifásico a 760⁰ C seria necessária a verificação de que seu menor alongamento (e por analogia, menor capacidade de absorção de energia e tenacidade) não influenciaria negativamente na resistência à fadiga do componente.

Desta forma, os aços bifásicos seriam os mais indicados a substituir o tratamento de têmpera superficial por indução aplicado atualmente no componente. Em especial o aço bifásico 740⁰ C, por apresentar um alongamento praticamente idêntico ao como fornecido e uma resistência mecânica de valores muito próximos ao temperado da camada superficial e muito superiores ao do núcleo do componente.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES.

Os diversos tratamentos térmicos realizados sobre o aço XC48, constituinte do terminal de eixo analisado neste trabalho, bem como a análise do componente como fornecido, permitiram concluir que:

a) Uma comparação entre os valores obtidos para o material normalizado e a parte não temperada do terminal indica que os mesmos têm características mecânicas e microestruturais (praticamente mesmas frações volumétricas e constituintes) muito próximas e que a diferença encontrada pode ser explicada pelas deformações plásticas induzidas durante a conformação do componente através do processo de extrusão ao qual o mesmo é submetido;

b) A comparação entre os valores de dureza obtidos para a camada superficial do terminal de eixo e os valores obtidos para o corpo-de-prova temperado e para o temperado e revenido confirma que o componente durante seu processo de fabricação sofre uma têmpera superficial, com aproximadamente 2 mm de espessura de camada, sem revenimento, o que deixa o material com elevadas características de resistência, porém muito fragilizado; assim, o tratamento de têmpera total no terminal de eixo não seria indicado devido à fragilização excessiva do componente, a qual poderia causar redução da resistência à fadiga do mesmo;

c) Um tratamento de revenimento após têmpera poderia reduzir esta fragilização (reduzindo as tensões internas presentes na fase martensítica), porém reduziria também significativamente as propriedades mecânicas do material, podendo também influenciar negativamente na resistência à fadiga do mesmo, além de minimizar significativamente sua resistência ao desgaste;

d) O material bifásico a 740°C , em função da elevada resistência mecânica (próxima à da têmpera) conferida pela fase martensítica e do valor de alongamento muito próximo ao do núcleo do terminal de eixo não tratado (explicada pela fração praticamente idêntica de ferrita existente nas duas condições), é o mais indicado a substituir o tratamento de têmpera superficial possibilitando uma redução na espessura do tubo, por conseguinte menos material e menos massa do componente.

e) O material bifásico a 760°C apresenta características de resistência mecânica ainda mais próximas do temperado que o material tratado a 740°C . Entretanto, para sua utilização seria necessário validar a resistência à fadiga do componente sabendo que ele é um pouco mais frágil que o núcleo dúctil e tenaz do terminal de eixo de série; Essa diferença em relação ao bifásico a 760°C pode ser explicada em função das diferentes frações volumétricas de ferrita e martensita devido às diferentes temperaturas de tratamento intercrítico;

f) Para o material em questão e as características desejadas para o componente, a rota de tratamento térmico mais indicada seria a de têmpera intercrítica a 740°C , ou seja, aquecimento até a zona de austenitização, resfriamento lento até a zona intercrítica e estabilização nesta temperatura seguida por resfriamento em água.

g) Confirmando o já proposto nos projetos da família ULSAB, um aço de propriedades mais nobres, como os aços bifásicos acima, em especial aquele com tratamento intercrítico a 740°C , pode proporcionar uma redução de espessura do componente com mesmas propriedades mecânicas. Essa redução poderia ser obtida através de uma redução no diâmetro externo do eixo, possibilitando utilização de menos material na produção do componente, por conseguinte, menos massa e menor consumo de combustível do veículo.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

a) Realização de análises fractográficas dos corpos-de-prova, em especial, os aços bifásicos, a fim de determinar o modo de fratura e auxiliar na possível validação do aço bifásico com tratamento intercrítico a 760⁰ C;

b) Realizar ensaios de fadiga para todas as condições de tratamentos térmicos aplicadas, a fim de estimar e/ou definir a espessura necessária do terminal de eixo para cada estrutura encontrada;

c) Constituir uma análise de custos que possa identificar a solução que apresente o melhor compromisso custo/benefício e justificar economicamente a mudança de tratamento térmico;

d) Aplicação de recursos de microscopia eletrônica de varredura e de transmissão permitindo uma melhor caracterização das fases e seus constituintes, possibilitando uma melhor correlação entre as estruturas e propriedades mecânicas;

e) A fim de chegar o mais próximo possível da solução ótima para o componente, ampliar a gama de estruturas analisadas, incluindo, por exemplo, um estudo para aços multifásicos e bainíticos;

f) Pesquisar e desenvolver novos aços de alta-resistência, a fim de permitir redução ainda maior de material, menor consumo e, por conseguinte, melhor rendimento dos automóveis, em consonância a filosofia do projeto ULSAB.

REFERÊNCIAS

ADAM, H. The whole is more than the sum of its parts. **AutoTechnology**, n. 5, p.68-71, 2002.

ADCOCK, I. Steel works. **European Automotive Design**, n.4, p. 42-44. Apr. 2002.

ALDERDICE, R.; CAMPBELL, E. A. Process plant implications of ULSAB and High Strength autobody steels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 25, n. 6, p.435-442, 1998.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ULSAB Overview Report Phase 2 Findings – March 1998**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsab/>> . Acesso: ago. 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ULSAC Overview Report – May 2000**. Disponível em: <<http://www.ulsac.org>>. Acesso: fev. 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Ultra-Light Steel Auto Closures – Engineering Report, April 2000**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsac/>>. Acesso: set. 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Ultra-Light Steel Auto Suspension – Engineering Report, 2001**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsas/>>. Acesso: set. 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Ultra-Light Steel Auto Suspension (ULSAS) – Presentation**. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsas/>>. Acesso: set. 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ULSAB – AVC (Advanced Vehicles Concepts) Overview Report – January 2002.** Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsab-avc/>> . Acesso: ago. 2004.

ANDERSON, D.; LORINCZ, D. **Lotus uses steel-based technology to reduce cost and improve performance on its Elise sports car.** Detroit. Novembro de 2001. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsas/>>. Acesso: set. 2004.

ANDRADE, S.L.; TAISS, E.J.M.; ROSA, L.K. Os aços no projeto ULSAB-AVC. **Revista Metalurgia e Materiais**, p. 689-694, out. de 2002.

ANDREWS, K.W. Empirical Formulae for the calculation of some transformation temperatures. **Journal of the Iron and Steel Institute**, p. 731-727, 1965.

AMAR, K.; SPEER, J.G.; MATLOCK, D.K. Color tint-etching for multiphase steels. **Advanced Materials & Processes**, p.27-30, Feb. 2003.

ASHLEY, C. Steel Body Structures. **Automotive Engineer**, v. 20, n. 6, p. 28-32, Dec. 1995.

BERBENNI, S.; FAVIER, V.; BERVEILLER, M.; LEMOINE, X. Modélisation micromécanique du comportement élastique-viscoplastique des aciers IF et Dual-Phase. **La revue de Métallurgie – Cahiers des information Techniques**, n. 5, p. 381-389, mai. 2004.

BERVEILLER, M.; CHERKAOUI, M.; PATOOR, E. Comportement mécanique des aciers TRIP. **Mécanique et Industries**, v. 5, n. 4, p. 461-468, juil. 2004.

BLANCHET, G. L'acier et l'avenir de l'automobile: La métamorphose d'un matériau. **Auto Concept**, n. 44, p. 28-34, mai. 2002.

BLOT, B. et al. La construction légère: une voie difficile. **Ingénieurs de l'automobile**, n.712, p.44-50, Avril 1997.

BROGE, J.L. The battle of the metals: The emergence of high-strength steel. **SAE: Automotive Engineering International On Line**, Feb. 2000. Disponível em: <<http://www.sae.org/automag/metals/01>>. Acesso: set. 2006.

BUCHHOLZ, K. Lightweight body panel materials. **Automotive Engineering International**, v. 106, n. 12, p. 19-24, Dec. 1998.

BUCHHOLZ, K. ULSAB proves lighter is stronger. **Automotive Engineering International**, v. 106, n. 5, p. 36-38, May 1998.

CHAINER, J. Innovation in Motion – ULSAB Advanced vehicle Concept. **Steel Technology**, p. 69-73, July/Aug. 2002.

COSTA, F. Comparación de diferentes tipos de refroidissement après traitements thermoquímicos et influence sur les caractéristiques mecánicas et metalúrgicas. **Traitement Thermique**, n. 357, p. 24-27, août – sept. 2004.

COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P. **Aços e ligas especiais 2 ed.** Eletrometal: Sumaré, 1988. 528p.

DAVIES, R.G. The deformation behaviour of a vanadium-strengthened dual-phase steel. **Metallurgical Transaction**, vol. 9A, p. 41-52, 1978.

DIEFFENBACH, J.F.; HANNIBAL, T.A. Hydroformed structural elements: economic evaluation of the technology. **Automotive Engineering International**, v. 106, n. 6, p. 103-105, June 1998.

DITTLO, M.; SANZ, G.; SCHNEIDER, Ch.; La contribution d'ULSAB-AVC aux défis des constructeurs automobiles. **La revue de la Métallurgie – Cahiers d'Informations Techniques**, v. 100, n.6, p. 659-666, juin 2003.

DREWES, E. J. et al. Alloys for the eighties. **Climax Molybdenum Company**, Ann Arbor, 1980, p. 37-57.

EUROPEAN AUTOMOTIVE DESIGN. Steel reveals its lightweight potential. **European Automotive Design**, v. 4, n. 7, p. 61-63, Sept. 2000.

ERDOGAN, M. Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual-phase steel. **Scripta Materialia**, v. 48, p. 501-506, 2003.

GEHM, R. BMW mixes it up in BIW. **SAE: Automotive Engineering International**, p. 74-76. Apr. 2006.

GULHÁEV, A.P. **Metais e suas ligas: Estrutura, propriedades e aplicação industrial**. Editora MIR: Moscou, 1981, T. 1.

GUIMARÃES, J.R.C.; PAPALÉO, R. Aços bifásicos: características mecânico-metalúrgicas e aplicações potenciais. **Metalurgia - ABM**, v. 37, n. 288, p. 617-622, nov. 1981.

GUIMARÃES, V.A. **Estudo do comportamento em fadiga de aços bifásicos obtidos a partir de diferentes microestruturas iniciais**. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1993.

GUIMARÃES, V.A. **Influência da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e no micromecanismo de fratura de um aço microligado com Nióbio e Titânio.** 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

HERZFELD, R.W. Welding multiple thicknesses before stamping. **Industrial Laser Solutions**, v. 19, n. 1, p.21-24. Jan. 2004.

HUGET, L.D. Forming a stronger relationship with automotive manufacturers. **Automotive Technology International**, p. 129-136, 1999.

HULKA, K. Modern multi-phase steels for the automotive industry. **Materials Science Forum**, v. 414-415, p. 101-110, 2003.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Aciers TRIP et Usibor. Des innovations au service de la sécurité et de la consommations. **Ingénieurs de l'automobile**, n. 749, p. 43-45, nov.-déc. 2001.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Hydroformage: pour une production plus économique. **Ingénieurs de l'Automobile**, n. 719, p. 12-15, mars 1998 a.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. ULSAB: La réponse de l'acier. **Ingénieurs de l'Automobile**, n. 722, p. 32-33, juin/juil. 1998 b.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. L'acier en évolution constante. **Ingénieurs de l'Automobile**, n. 729, p. 60-61, août/sept. 1999.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Le programme ULSAB franchit un nouveau pas. **Ingénieurs de l'Automobile**, n. 718, p. 12-13, janv./févr. 1998 c.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Les peux acier expérimentent l'hydroformage, l'élastoformage, le sandwich et une mise en peinture simplifiée. **Ingénieurs de l'Automobile**, n.752, p. 54-57, avril 2002.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Matériaux: Une table des matières en constante évolution. **Ingénieurs de l'automobile**, n. 771, p. 16-24, sept. 2004.

INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE. Solblank raboute et soude au laser. **Ingénieurs de l'automobile**, n. 715, p. 12-13, août/sept. 1997.

JEANNEAU, M. 25eme Journées Sidérurgiques Internationales. **La Revue de la Métallurgie**, v. 102, n.1, p. 12-19, janv. 2005.

KAVANAGH, J. ULSAB – advanced vehicle concepts. **Metallurgia**, p. 9-10, Apr. 2002.

KIMBERLEY, W.; ROGERS, K. Before the gods of cost, weight and recyclability nothing is sacred. **Automotive Engineer**, v. 24, n. 2, p. 44-56, Feb. 1999.

KOBE, G. Manufacturing 2010 – new manufacturing technologies will change the face of the factory floor forever. **Automotive Industries**, v. 181, n.8, p. 25-28, Aug. 2001.

KOCHAN, A.; POLLET, F. Pièces complexes: choisissez l'hydroformage! **Le journal de la production**, n. 24, p. 22-28, mai. 2000.

LANGERAK, N. Lightweight car body desing. **Automotive Engineering International**, v. 106, n. 10, p. 106-110, Oct. 1998.

LEITLOFF, F.U. Hydroforming: exemples of application in the automotive industry. **ATA**, v.52, n. 3, p. 83-85, Mar. 1999.

LOWE, K. Driving the weight down. **Materials World**, v.6, p.281-282, May 1998.

LOWE, K. Lightning steel. **Manufacturing Engineer**, p. 122-124, June 1998.

MANN, D. On materials for lean weight vehicles. **Automotive Engineer**, v.24, n. 3, p. 44-56, Mar. 1998.

MORPHY, G. Tube hydroforming analysis. **Automotive Engineering International**, v.106, n. 7, p. 91-94, July 1998.

MUDRY, F.; LE BON, A.; BULTHÉ, R. Les aciers: Hier, aujourd'hui et demain. **La Revue de Métallurgie**, n. 11, p. 957-969, nov. 2004.

MURRY, G. **Aciers pour traitements thermiques. Propriétés et Guide de choix.** Techniques de l'Ingénieur, Taité Materiaux Métalliques M4 530, 16p, 2002. Disponível em: <<http://www.techniquesdelingenieur.fr>>. Acesso: nov. 2003.

MURRY, G. **Tratements Thermiques dans la masse des aciers. Partie 1.** Techniques de l'Ingénieur, Taité Materiaux Métalliques M 126, 25p, 1998. Disponível em: <<http://www.techniquesdelingenieur.fr>>. Acesso: set. 2003.

OLSSON, K.; BENEDETTO, A.; DEL PRETE, A. New High Strength and Ultra High Strength steels for cost-effective lightweight design of automotive body components. **ATA**, v. 53, n. 3-4, p. 105 a 111, Mar. / Apr. 2000.

OWEN, E.W. Can a simple heat treatment help to save Detroit? **Metals Technology**, p. 1-14. Jan. 1980.

PALLET, R.J.; LARK, R.J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 117, p.249-254, Sept. 2001.

PATBERG, L.; KNEIPHOF, U. Tailored Tubes applications for Steel Body Frames. **ATZ Worldwide**, v. 104, p. 28-29, Oct. 2002.

PEREIRA, M.S. **Caracterização microestrutural e mecânica de um aço multifásico, em consonância com o projeto ULSAB-AVC**. 138f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

PEREIRA, M.S. **O efeito do revenimento da martensita sobre o comportamento em fadiga de um aço bifásico**. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1992.

PLANETA; Reciclagem: um ciclo completo. **Planeta**, n. 5, p. 17-23, Verão de 2002.

PONSCHAB, H.; MÜLLNER, A.; RADLMAYR, K.M.; SZINYUR, J. Le flan raboté soudé au laser – un produit innovant qui permet l’allègement et l’amélioration des caractéristiques en construction automobile. **BHM**, n. 11, p. 443-450, 1997.

POURPRIX, Y. **Choix du traitement thermique des matériaux ferreux pour l’automobile**. Techniques de l’Ingénieur, Taité Matériaux Métalliques M1 405, 14p, 2000. Disponível em: <<http://www.techniquesdelingenieur.fr>>. Acesso: nov. 2003.

REANUDIN, T. Matériaux d’allègement: une lourde responsabilité. **Ingénieurs de l’automobile**, n. 762, p. 32-41, juil. 2003.

REED-HILL, R.E. **Princípios de metalurgia física**. 2 ed. Editora Guanabara dois: Rio de Janeiro, 1982. 776p.

ROZA, J.E. **Caracterização microestrutural, mecânica e fractográfica de um aço API-5L-X80, contendo molibdênio, com microconstituente bainítico**. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2001.

SAKUMA, Y.; MATSUMURA, O.; TAKESHI, H. Mechanical properties and retained austenite in intercritically heat-treated bainite-transformed steel and their variation with Si and Mn additions. **Metallurgical Transaction**, v. 22A, Feb. 1991.

SAWYER, C.A. Steel goes to war. **Automotive Industries**, v. 175, n. 9, p. 61-64, Sept. 1995.

SCHMITT, J.H. Durcissement par seconde phase dans les aciers. **Mécanique et industries**, v. 5, n. 4, p. 451-459, juil. 2004.

SETTINERI, L.; ROUX, F. Hydroforming of a camshaft: process and product optimization. **ATA**, v. 55, n. 7/8, p. 250-253, July / Aug. 2002.

SHIN, J.K. et al. Automotive door design with the ULSAB concept using structural optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 23, n. 4, p.320-327, May 2002.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. Editora Edgard Blucher Ltda: São Paulo, 1989. 134p.

TAKITA, M.; OHASHI, H. Application of high-strength steel sheets for automobiles in Japan. **La Révue de Métallurgie**, p. 899-909, oct. 2001.

TYRANT, J. L. Hydroformage. Sésame: la caisse en blanc. **Vehicle News**, n. 267, p. 64-67, mai. 2003.

VAHL, M.; HEIN, P.; BOBBERT, S. Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies. **La revue de la Métallurgie – Cahiers d’Informations Techniques**, p.1255-1263, oct. 2000.

VAUGHN, P.; MARTIN, D. **High and Ultra-High Strength steel crucial to lightweight, cost saving suspension designs**. Detroit. Maio de 2000. Disponível em: <<http://www.autosteel.org/ulsas/>>. Acesso: set. 2004.

VEHICLE NEWS. De l’acier plus léger: le bilan concernant la caisse en acier léger (ULSAB). **Vehicle News**, n. 232, p. 144-148, Juin 1998.

YOKOI, T.; KAWASAKI, K.; TAKAHASHI, M.; KOYAMA, K.; MIZUI, M.; Fatigue properties of high strength steels containing retained austenite. **JSAE Review**, v. 17, p. 210-212, 1996.