



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE  
MINAS GERAIS**



**Dissertação de Mestrado**

**Henrique da Cruz Amaral**

Avaliação das características e do desempenho de uma estrutura de paredes finas em ensaios quase estáticos a diferentes taxas de deformação.

**Belo Horizonte  
2017**



Henrique da Cruz Amaral

Avaliação das características e do desempenho de uma estrutura de paredes finas em ensaios quase estáticos a diferentes taxas de deformação.

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como parte integrante dos requisitos para aprovação.

Área de concentração: Ciência e desenvolvimento de materiais  
Linha de Pesquisa: Seleção, processamento e caracterização.  
Orientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

**Belo Horizonte**  
**2017**

Amaral, Henrique da Cruz.

A485a      Avaliação das características e do desempenho de uma estrutura de paredes finas em ensaios quase estáticos a diferentes taxas de deformação / Henrique da Cruz Amaral. – 2017.  
89 f. : il., fotos, grafs., tabs.  
Orientador: Nilton da Silva Maia  
Coorientador: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2017.

Bibliografia.

1. Ensaios Mecânicos. 2. Aço de alta resistência - Propriedades mecânicas. 3. Aço – Resistência à tração. 4. Resistência dos Materiais. I. Maia, Nilton da Silva. II. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. III. Título.

CDD: 620.1124



Henrique da Cruz Amaral

Avaliação das características e do desempenho de uma estrutura de paredes finas em ensaios quase estáticos a diferentes taxas de deformação.

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como parte integrante dos requisitos para aprovação.

---

Prof. Dr. Nilton da Silva Maia (Orientador) – CEFET MG

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (Coorientadora) – CEFET MG

---

Prof. Dr. Hermano Nascimento Júnior – FCA

---

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC-MG

Belo Horizonte, 17 de Agosto de 2017.

*A minha esposa e aos meus pais  
pelo incentivo e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela sabedoria que me deu para chegar até aqui.

Aos meus pais por todo apoio e motivação para continuar a caminhar e perseguir meus objetivos. A minha esposa pelos incentivos, força e paciência ao longo desta jornada. Aos amigos que sempre estiveram por perto para me animar.

Agradeço aos colegas da FCA pelo apoio durante a execução deste trabalho, SVP e Laboratório de Materiais, especialmente aos colegas Fabrício Cardinali, Hermano Nascimento e Fabiano Silva.

Aos mestres do CEFET-MG pelos ensinamentos durante todo o período acadêmico. Especialmente aos professores Nilton Maia e Elaine Carballo pelas orientações e dedicação.

## RESUMO

As estruturas de paredes finas estão presentes nos componentes estruturais da maioria dos meios de transporte. Durante um acidente, estas estruturas são responsáveis por suportar as cargas impostas a elas, de maneira que a integridade da região ocupada pelos passageiros seja mantida. Tal integridade é obtida convertendo-se a energia proveniente do impacto, em energia absorvida pela estrutura do veículo, por meio de deformação controlada. Neste aspecto, a avaliação de estruturas de paredes finas e a sua capacidade de absorção de energia, são importantes para determinar o nível de proteção ao impacto (*crashworthiness*). Nesta dissertação é analisado a capacidade de absorção de energia e o desempenho de uma estrutura tubular de paredes finas à diferentes taxas de deformação. A primeira etapa do trabalho foi direcionada à caracterização do material utilizado para fabricação das estruturas, produzidas em períodos distintos. Esta caracterização foi realizada por meio da avaliação da composição química, análise microestrutural e ensaios mecânicos de dureza e tração. Constatou-se que os materiais utilizados, eram aços bifásicos de resistência de tração nominal de 600 MPa. Durante estas análises constatou-se também a diferença entre os materiais adquiridos em períodos distintos (lote 1 e lote 2). Esta diferença pode ser atribuída à composição da matéria prima ou ao processamento do laminado. Apesar destas diferenças ambos os lotes foram classificados como aços bifásicos DP600. A segunda etapa do trabalho foi direcionada à avaliação da influência da taxa de deformação no desempenho e nas propriedades dos materiais em ensaios de tração axial e em ensaios de compressão quase estática. Os corpos de prova para os ensaios de tração foram obtidos a partir da estrutura de paredes finas. Ambos os lotes avaliados, exibiram sensibilidade positiva a taxa de deformação e tiveram um incremento na resistência mecânica em função do aumento da taxa de deformação. Durante os ensaios de compressão axial, levando-se em consideração que ambos os lotes foram classificados como aços bifásicos de níveis de resistência semelhantes, verificou-se que as estruturas de paredes finas tiveram um aumento da resistência mecânica devido à sensibilidade do material e à variação na taxa de deformação. Apesar das diferenças nas propriedades dos materiais do lote 1 e do lote 2, o desempenho das estruturas não foi influenciado significativamente, enquanto componente.

Palavras-chave: aços bifásicos, sensibilidade à taxa de deformação, tração axial, compressão axial.

## **ABSTRACT**

Thin-walled structures are present in the structural components of most means of transportation. During an accident, these structures are responsible for supporting the loads imposed on them, keeping the integrity of the area occupied by the passengers. Such integrity is achieved by converting the energy from the impact into energy absorbed by the vehicle structure through controlled deformation. Regarding that, the evaluation of thin-walled structures and their energy absorption capabilities are important to determine the crashworthiness of vehicle. It was analyzed the energy absorption capacity and the performance of a thin-walled tubular structure at different strain rates. The first stage of the work was dedicated to the characterization of the material used to manufacture the structures, produced in different periods. This characterization was carried out through the evaluation of the chemical composition, microstructural analysis and mechanical tests of hardness and tensile. It was found that the materials used were dual-phase steels with nominal tensile strength of 600 MPa. During these analyzes it was also found that there was a difference between the materials obtained in different periods (batch 1 and batch 2). This difference can be attributed to the composition of the raw material or the manufacturing process of the laminate. Despite these differences, both batches were classified as dual-phase steels DP600. The second stage of the work was directed to the evaluation of the influence of the strain rate on the performance and the properties of the materials in tensile testing and axial crushing. The specimens for the tensile tests were obtained from the thin-walled structure. Both batches evaluated had positive strain rate sensitivity and they presented an increase in the mechanical strength due to the increase in the strain rate. During the axial crushing tests, considering that both batches were classified as dual-phase steels of the same grade, thin-walled structures presented an increase in mechanical strength due to material sensitivity and strain rate variation. Despite the differences in the properties of the materials from batch 1 and batch 2, the performance of the structures was not significantly influenced as a component.

**Keywords:** dual-phase steel, strain rate sensitivity, tensile test, axial crushing.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 – TENDÊNCIA EM MORTES RELATADAS NO TRÂNSITO.....                                                | 15 |
| FIGURA 2 – NÚMERO DE ACIDENTES POR TIPO E GRAVIDADE.....                                                 | 15 |
| FIGURA 3 – AMOSTRAS DE DIFERENTES GEOMETRIAS SUBMETIDAS A<br>ENSAIO DE COMPRESSÃO.....                   | 19 |
| FIGURA 4 – AMOSTRAS DE BI-TUBOS UTILIZADOS PARA ENSAIOS DE<br>COMPRESSÃO.....                            | 20 |
| FIGURA 5 – CORTE ESQUEMÁTICO DE UM APARATO DE TESTES DE UM<br>PROCESSO DE INVERSÃO DE TUBOS.....         | 21 |
| FIGURA 6 – MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE TUBOS.....                                                             | 21 |
| FIGURA 7 – MODOS DE CARREGAMENTO/DEFORMAÇÃO PARA PROTEÇÃO<br>AO IMPACTO.....                             | 24 |
| FIGURA 8 – ESTRUTURAS AFETADAS DURANTE O IMPACTO FRONTAL.....                                            | 26 |
| FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM ESTRUTURAS DE FRONTAIS.....                                        | 26 |
| FIGURA 10 – MODO DE COLAPSO AXIAL.....                                                                   | 27 |
| FIGURA 11 – MODO DE COLAPSO POR FLAMBAGEM.....                                                           | 27 |
| FIGURA 12 – EVOLUÇÃO DOS AÇOS AVANÇADOS AO LONGO DAS ÚLTIMAS<br>TRÊS DÉCADAS.....                        | 30 |
| FIGURA 13 – ESQUEMA TRATAMENTO DE RECOZIMENTO INTERCRÍTICO<br>USADO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO..... | 32 |
| FIGURA 14 – MICROGRAFIA ÓPTICA DE MICROESTRUTURAS ATACADAS COM<br>NITAL 2%.....                          | 33 |
| FIGURA 15 – TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA DIFERENTES GRADES DE AÇOS<br>DP.....                                  | 34 |
| FIGURA 16 – COMPARATIVO TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇOS DP600.....                                                | 35 |
| FIGURA 17 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS AÇOS BIFÁSICOS, GNO E<br>AISI 304.....                          | 36 |
| FIGURA 18 – CLASSIFICAÇÃO DE TESTES RELATIVOS A TAXA DE<br>DEFORMAÇÃO SEGUNDO DIETER.....                | 37 |
| FIGURA 19 – EFEITO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO DP600<br>E TRIP600.....                       | 38 |
| FIGURA 20 – EFEITO DA TAXA DEFORMAÇÃO NA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DO<br>COBRE.....                           | 40 |
| FIGURA 21 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇOS TRIP E DP A<br>DIFERENTES TAXAS DE DEFORMAÇÃO.....             | 41 |
| FIGURA 22 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO QUASE ESTÁTICA.....                                                  | 42 |
| FIGURA 23 – SEÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE ESPESSURA<br>FUNCIONALMENTE GRADUADA.....                          | 43 |
| FIGURA 24 – PLATAFORMA DE QUEDA LIVRE.....                                                               | 44 |
| FIGURA 25 – ENSAIO DE IMPACTO SOBRE TRENÓ.....                                                           | 45 |
| FIGURA 26 – CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO TÍPICA DE UMA ESTRUTURA<br>DE PAREDES FINAS.....                    | 46 |
| FIGURA 27 - DIAGRAMA DA ETAPA 1 PARA AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE<br>ENTRE AS AMOSTRAS.....              | 48 |
| FIGURA 28 - DIAGRAMA DA ETAPA 2 PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA<br>CAIXA DE IMPACTOS.....                | 49 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 29 – ESTRUTURA DE PAREDES FINAS UTILIZADA PARA OS ENSAIOS.                                                                                 | 50 |
| FIGURA 30 – AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAIS.                                                                                           | 50 |
| FIGURA 31 – EMBUTIMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA.                                                                           | 52 |
| FIGURA 32 – MICROSCÓPIO ÓTICO UTILIZA NA AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA                                                                                  | 53 |
| FIGURA 33 – CORPO DE PROVA REDUZIDO CONFORME ASTM E8/E8M                                                                                          | 54 |
| FIGURA 34 – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO                                                                                                 | 55 |
| FIGURA 35 – MÁQUINA DE TRAÇÃO INSTRON 4467.                                                                                                       | 55 |
| FIGURA 36 - GRÁFICO LOGARÍTMICO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA.                                                                            | 57 |
| FIGURA 37 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL QUASE ESTÁTICA.                                                                            | 58 |
| FIGURA 38 – CAIXA DE IMPACTOS SUJEITA A COMPRESSÃO AXIAL QUASE ESTÁTICA.                                                                          | 59 |
| FIGURA 39 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA REQUERIDA SEGUNDO ASTM A1088                                                                                       | 60 |
| FIGURA 40 – MICROGRAFIA ÓTICA DOS AÇOS DO LOTE 1 E LOTE 2                                                                                         | 62 |
| FIGURA 41 – MICROESTRUTURA DE UM AÇO TEMPERADO A PARTIR DE DIFERENTES TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS.                                                 | 63 |
| FIGURA 42 – GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS DUREZAS MÉDIAS OBTIDAS NOS LOTES 1 E 2                                                                     | 64 |
| FIGURA 43 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO À TAXAS DE DEFORMAÇÃO PADRÃO.                                                                                | 66 |
| FIGURA 44 – COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LOTE 1 E LOTE 2.                                                                             | 67 |
| FIGURA 45 – PROPRIEDADES MECÂNICAS REQUERIDAS SEGUNDO ASTM A1088.                                                                                 | 68 |
| FIGURA 46 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA À TAXAS DE DEFORMAÇÃO AUMENTADA 60 VEZES.                                                | 69 |
| FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LOTE 1 E LOTE 2 À TAXA DE DEFORMAÇÃO AUMENTADA 60 VEZES.                                     | 70 |
| FIGURA 48 – COMPARAÇÃO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À TAXAS DE DEFORMAÇÃO PADRÃO E AUMENTA 60 VEZES.                                         | 71 |
| FIGURA 49 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO A DIFERENTES TAXAS DE DEFORMAÇÃO.                                                                             | 72 |
| FIGURA 50 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA PARA O AÇO AISI 4340 A TAXAS DE DEFORMAÇÃO DE $10^{-3}$ ATÉ $1,7 \times 10^3 \text{ S}^{-1}$ . | 72 |
| FIGURA 51 – CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO DA ESTRUTURA CB DE PAREDES FINAS.                                                                            | 74 |
| FIGURA 52 – AMOSTRAS DA ESTRUTURA EM ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.                                                                                  | 75 |
| FIGURA 53 - FALHA DE MATERIAL OBSERVADA NA AMOSTRA “CB42 6”                                                                                       | 75 |
| FIGURA 54 – ENERGIA TOTAL ABSORVIDA (ETA) DURANTE ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL.                                                                    | 76 |
| FIGURA 55 - ENERGIA ESPECÍFICA ABSORVIDA (EEA) DURANTE ENSAIOS DE COMPRESSÃO                                                                      | 77 |
| FIGURA 56 – EFICIÊNCIA DA FORÇA DE COMPACTAÇÃO (EFC) DURANTE ENSAIO DE COMPRESSÃO                                                                 | 78 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 - PROPRIEDADES DOS METAIS UTILIZADOS EM CARROCERIAS AUTOMOTIVAS.....           | 29 |
| TABELA 2 – COMPRIMENTO DAS CAIXAS DE IMPACTO ANTES DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....       | 59 |
| TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS EM % PESO. ....                             | 60 |
| TABELA 4 – DUREZA VICKERS PARA AS AMOSTRAS DE AÇO DOS LOTES 1 E 2.....                  | 64 |
| TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS LOTE 1 E LOTE 2. ....                        | 65 |
| TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS DP600 COM TAXA DE DEFORMAÇÃO AUMENTADA. .... | 68 |
| TABELA 7 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL QUASE ESTÁTICA.....               | 74 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| EQUAÇÃO 1 – CÁLCULO DA TENSÃO NA ZONA ELÁSTICA.....    | 39 |
| EQUAÇÃO 2 – TAXA DE DEFORMAÇÃO.....                    | 40 |
| EQUAÇÃO 3 – ENERGIA TOTAL ABSORVIDA.....               | 45 |
| EQUAÇÃO 4 – FORÇA MÉDIA DE COMPACTAÇÃO.....            | 46 |
| EQUAÇÃO 5 – EFICIÊNCIA DA FORÇA DE COMPACTAÇÃO.....    | 46 |
| EQUAÇÃO 6 – CÁLCULO DA FORÇA MÉDIA DE COMPRESSÃO ..... | 47 |
| EQUAÇÃO 7 – MOMENTO PLÁSTICO TOTAL.....                | 47 |
| EQUAÇÃO 8 – TENSÃO DE ESCOAMENTO MÉDIA.....            | 47 |
| EQUAÇÃO 9 – CÁLCULO DA DUREZA VICKERS .....            | 53 |
| EQUAÇÃO 10 – TENSÃO NORMAL DE ENGENHARIA.....          | 56 |
| EQUAÇÃO 11 – DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA (%).....         | 56 |
| EQUAÇÃO 12 – DEFORMAÇÃO VERDADEIRA.....                | 56 |
| EQUAÇÃO 13 – TENSÃO NORMAL VERDADEIRA .....            | 56 |
| EQUAÇÃO 14 – EQUAÇÃO DE HOLLONON .....                 | 56 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - American Iron and Steel Institute  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
CFRP - Carbon fiber reinforced plastic  
CP - Complex phase  
DNIT - Departamento nacional de infraestrutura e transportes  
DP - Dual phase  
DQ - Drawing quality  
EEA - Energia absorvida pela unidade de massa  
EEA - Energia específica absorvida  
EFC - Eficiência da força de compactação  
ETA - Energia total absorvida  
FCA - FIAT Chrysler Automobiles  
 $F_{\max}$  - Força máxima  
 $F_{\text{med}}$  - Força média  
GFRP - glass fiber reinforced plastic  
GNO - Grãos não orientados  
HIC - Head injury criterion  
MA - Martensita Austenita  
Max – Máximo  
Min.- Minuto  
NCAP - New car assessment program  
OMS - Organização mundial de saúde  
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento  
TRIP – Transformation induced plasticity  
ULSAB-AVC - UltraLight Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts

## LISTA DE SIMBOLOS

$A_i$  - Área da seção inicial  
Al - Alumínio  
 $b$  - largura da estrutura  
 $C$  - Média dos lados da coluna retangular  
 $d$  - diagonal média da impressão no corpo de prova  
 $dt$  - Variação do tempo  
 $d\varepsilon$  - Variação da deformação  
 $e$  - Deformação de engenharia  
 $E$  - Módulo de elasticidade  
 $E$  - Módulo de Young  
 $e_u$  - Deformação na máxima tensão de engenharia  
 $F(\delta)$  - Força de compressão instantânea em função da distância  
GPa - Giga Pascal  
 $K$  - Coeficiente de resistência  
kg - Kilograms  
kgf - Kilogram-force  
kN - Kilonewton  
 $l_i$  - Comprimento inicial  
m/s- Metro por segundo  
 $M_0$  - Momento plástico total  
Mg - Magnésio  
mm - Milímetro  
Mn - Manganês  
MPa - Mega Pascal.  
 $n$  - Expoente do encruamento  
 $P$  - Força  
 $P_m$  - Força média de compressão  
Psi - Pound square inch.  
 $R_m$  - Resistência a tração  
 $s$  - segundo  
 $S_0$  - Escoamento  
 $S_i$  - Silício  
 $t$  - espessura da estrutura  
 $v_i$  - velocidade de impacto  
 $\Delta l$  - Variação do comprimento útil  
 $E$  - Taxa de deformação  
 $\varepsilon$  - Deformação verdadeira  
 $\mu m$  - micrometro  
 $\rho$  - Densidade [kg/dm<sup>3</sup>]  
 $\sigma$  - Tensão de engenharia  
 $\sigma_0$  - Tensão de escoamento média  
 $\sigma_u$  - Limite de resistência a tração  
 $\sigma_v$  - Tensão verdadeira

## SUMÁRIO

|          |                                                                |    |
|----------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.       | INTRODUÇÃO.....                                                | 14 |
| 1.1.     | Objetivo geral .....                                           | 16 |
| 1.2.     | Objetivos específicos .....                                    | 16 |
| 1.3.     | Justificativa.....                                             | 17 |
| 2.       | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                    | 18 |
| 2.1.     | Estruturas de paredes finas como absorvedores de energia. .... | 18 |
| 2.2.     | Proteção ao impacto ( <i>crashworthiness</i> ). ....           | 22 |
| 2.3.     | Estrutura veicular .....                                       | 24 |
| 2.3.1.   | Caixa de impacto ( <i>crash box</i> ) .....                    | 27 |
| 2.4.     | Materiais.....                                                 | 29 |
| 2.4.1.   | Aços avançados de alta resistência .....                       | 30 |
| 2.4.1.1. | Aços bifásicos ( <i>dual phase</i> ) .....                     | 31 |
| 2.4.1.2. | Propriedades mecânicas dos aços bifásicos. ....                | 33 |
| 2.4.2.   | Ensaio mecânicos .....                                         | 38 |
| 2.4.2.1. | Ensaio de tração .....                                         | 38 |
| 2.4.2.2. | Ensaio sobre estruturas de paredes finas.....                  | 42 |
| 3.       | MATERIAIS E MÉTODOS.....                                       | 48 |
| 3.1.     | Estrutura e corpos de prova .....                              | 48 |
| 3.2.     | Análise da composição química .....                            | 51 |
| 3.3.     | Análise metalográfica.....                                     | 51 |
| 3.4.     | Ensaio de dureza .....                                         | 53 |
| 3.5.     | Ensaio de tração .....                                         | 54 |
| 3.6.     | Ensaio de compressão quase estática.....                       | 57 |
| 4.       | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                    | 60 |
| 4.1.     | Composição química.....                                        | 60 |
| 4.2.     | Análise metalográfica .....                                    | 61 |
| 4.3.     | Ensaio de dureza .....                                         | 64 |
| 4.4.     | Ensaio de tração .....                                         | 65 |
| 4.5.     | Ensaio de compressão quase estática.....                       | 73 |
| 4.6.     | Análise dos resultados .....                                   | 79 |
| 5.       | CONCLUSÕES.....                                                | 82 |
|          | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                               | 84 |

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Abramowicz (2003), os principais componentes estruturais da maioria dos meios de transporte são projetados como estruturas de paredes finas. Durante um acidente estas estruturas devem sustentar as solicitações mecânicas de maneira que a integridade da estrutura do veículo seja mantida. A integridade da estrutura deve ser mantida com a finalidade de minimizar as lesões que sofrem os passageiros durante o acidente.

A capacidade da estrutura de um veículo proteger seus ocupantes, dissipando a energia resultante do impacto durante uma colisão, é conhecida pelo termo *crashworthiness* (MÉNDEZ; IZQUIERDO e RAMÍREZ, 2010). O uso de estruturas de paredes finas como absorvedores de energia e dispositivos de proteção ao impacto é diversificado. Bisagni (2002) analisou a capacidade de absorção de energia de uma estrutura de paredes finas aplicadas ao pavimento de um helicóptero. Ahmad e Thambirathan (2009) avaliaram a viabilidade de incluir um dispositivo suplementar, cônico e preenchido com espuma, para aumentar a proteção da cabine de veículos em acidentes de capotamento. Peng et al. (2015), propôs uma estrutura composta para absorção de energia a ser usada em um veículo de transporte subterrâneo.

Apesar das estruturas de paredes finas serem utilizadas em diversos meios de transporte com o objetivo de manter a integridade da estrutura, este tipo de componente se destaca na utilização em estruturas automotivas. Este fato pode estar ligado à quantidade de fatalidades que ocorrem aos ocupantes dos automóveis no mundo e no Brasil, e a consequente busca dos fabricantes em minimizar estas fatalidades.

Segundo a WHO, organização mundial de saúde, no Brasil, no ano de 2013, foi reportada 42291 mortes no trânsito. Destas mortes, 22% dos passageiros estavam em veículos leves de 4 rodas. Segundo os dados exibidos na Figura 1, a tendência de mortes no trânsito vem crescendo de 2003 a 2012 e, segundo o DNIT, no ano de 2011 foram registrados 7008 mortes por acidentes de trânsito. Na Figura 2 são exibidos os tipos de acidentes registrados.

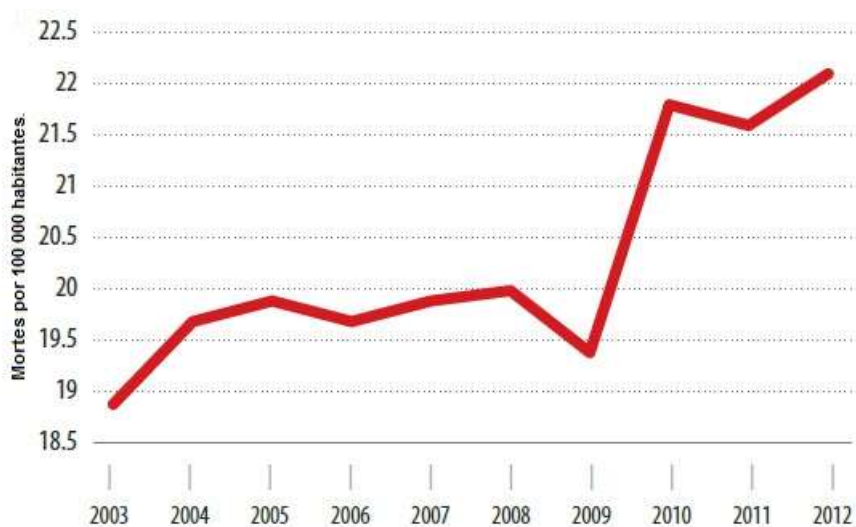
Grande parte destes acidentes pode ser vinculada a um tipo de solicitação da estrutura de um automóvel. Os choques e/ou colisões contra objeto fixo, contra veículo estacionado, colisão traseira e colisão frontal solicitam a máxima eficiência das



estruturas para converter a energia cinética do veículo em energia absorvida por meio de deformação controlada.

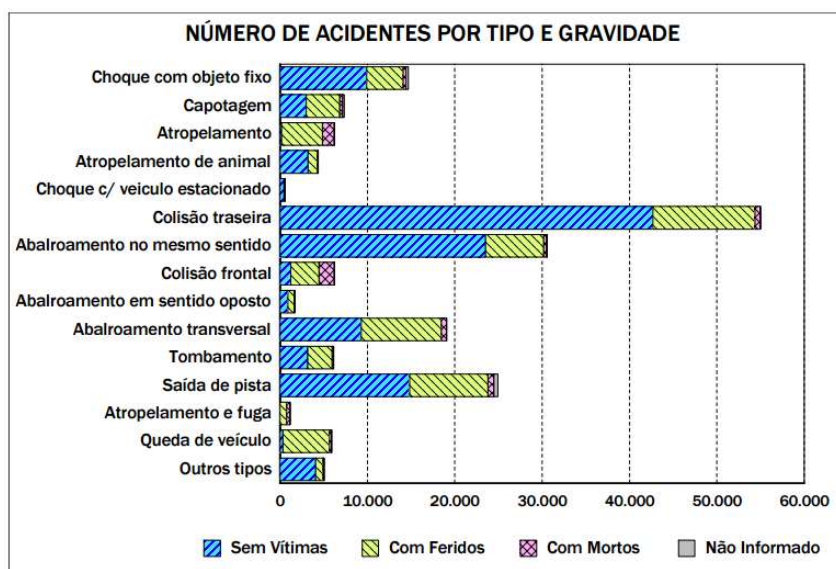
Segundo Oliver, Jones e Fournalis (2007), o desenvolvimento dos veículos atuais e dos futuros veículos é baseado na necessidade de simultaneamente reduzir peso e aumentar a segurança dos passageiros e dos pedestres. Estas são algumas das razões que geram para a indústria do aço a necessidade de desenvolvimento de aços laminados com propriedades adequadas às demandas da indústria automotiva.

Figura 1 – Tendência em mortes relatadas no trânsito.



Fonte: Adaptado de WHO, *Global status report on road safety* 2015, 2015.

Figura 2 – Número de acidentes por tipo e gravidade.



Fonte: DNIT, 2011.

Dentro do contexto de proteção ao ocupante, foi escolhida a caixa de impactos como objeto de estudos para o desenvolvimento desta dissertação. A caixa de impactos é o primeiro subsistema a ser solicitado em um impacto frontal. É responsável pela proteção da longarina principal e demais subsistemas em impactos a baixa velocidade. Além de influenciar o comportamento do restante da estrutura em impacto em altas velocidades.

A contribuição deste estudo está ligada ao desenvolvimento de uma metodologia simplificada para avaliação do desempenho de estruturas automotivas e, por consequência, sua capacidade de proteção ao ocupante. O desenvolvimento deste tipo de metodologia é importante para que a caracterização básica de estruturas de paredes finas seja realizada localmente, obtendo-se validações mais rápidas e baratas. A etapa inicial deste desenvolvimento, apresentada nesta dissertação, é importante para compreender a influência da taxa de deformação no comportamento dos materiais e praticar o uso de ensaio de compressão quase estática como ferramenta de validação.

### **1.1. Objetivo geral**

Os principais objetivos deste trabalho são avaliar a influência da taxa de deformação no desempenho de uma estrutura de paredes finas, a qual é solicitada a esforços mecânicos quase estáticos e avaliar a influência do material utilizado para fabricação da estrutura em seu desempenho global.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Avaliar as características mecânicas e microestruturais dos materiais utilizados para fabricação da estrutura de paredes finas;
- Comparar as características dos materiais de estruturas de paredes finas, obtidas de lotes de fabricação distintos;
- Determinar a classificação/designação dos materiais utilizados;
- Analisar a influência da taxa de deformação em ensaios de tração quase estáticos;
- Analisar o desempenho da estrutura de paredes finas em ensaios de compressão quase estática.

- Analisar a influência da taxa de deformação em ensaios de compressão quase estáticos.
- Analisar a compatibilidade de resultados entre os ensaios de tração axial sobre corpos de prova padrão e os ensaios de compressão axial sobre estruturas de paredes finas.

### **1.3. Justificativa**

Os veículos automotores são meios de transporte muito utilizados atualmente, em consequência disto um grande número de acidentes têm ocorrido (WHO, 2015; DNIT, 2011). Aumentar a segurança dos passageiros é uma tendência mundial, seja por fatores legais ou fatores comerciais. Portanto, muitas pesquisas e estudos estão voltados para segurança dos ocupantes e dos pedestres seja no desenvolvimento de sistemas de segurança, ou, no aperfeiçoamento das estruturas do automóvel e de seu desempenho. Neste contexto foi escolhida a caixa de impactos como objeto de estudos. Pois a caixa de impactos é o primeiro subsistema a ser solicitado em um impacto frontal. Além destes motivos, é um componente relativamente pequeno, neste caso fabricado com aço de alta resistência e de produção seriada.

Determinar o comportamento de uma estrutura à diferentes taxas de deformação, avaliar a influência dos materiais em seu desempenho global são importantes para se determinar a confiabilidade e desempenho do componente, contribuindo para a proteção do ocupantes do automóvel.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados os conceitos sobre as estruturas de paredes finas, proteção ao impacto, o papel da estrutura automotiva, os materiais de alta resistência e ensaios mecânicos para avaliação de desempenho seja do material ou do componente.

### **2.1. Estruturas de paredes finas como absorvedores de energia.**

A maioria dos componentes estruturais de veículos marítimos, terrestres e aéreos é projetada como estruturas de paredes finas. A evolução das regulamentações estabeleceu a demanda de um novo campo para as análises de engenharia na indústria de transportes. Em geral, um meio de transporte projetado para receber impactos deve manter sua estrutura íntegra e/ou absorver a energia do impacto sem excessiva deformação, para não comprometer a segurança dos passageiros (ABRAMOWICZ, 2003).

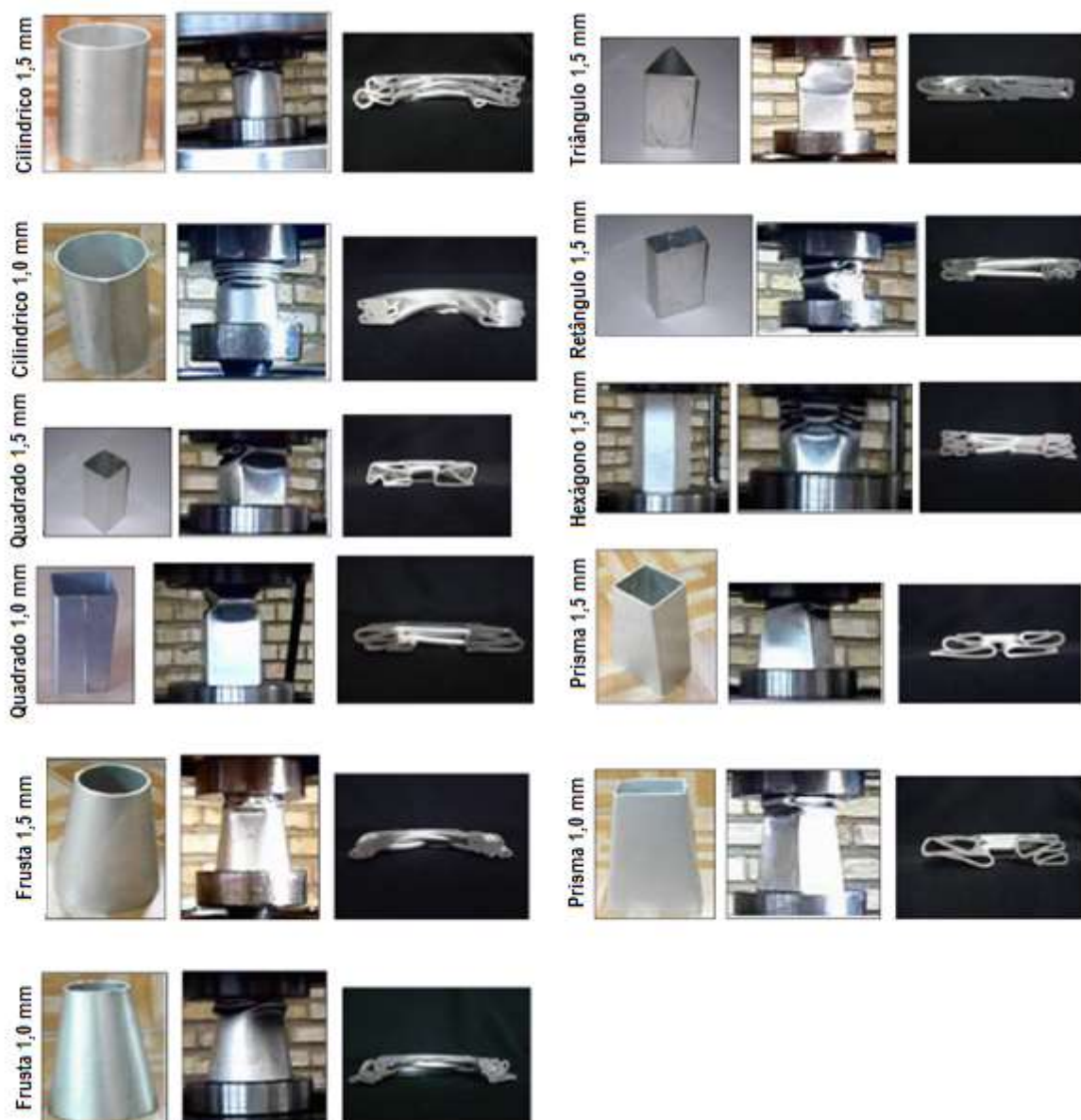
Absorvedores de energia são sistemas que convertem, totalmente ou parcialmente, a energia cinética em outras formas de energia. A energia convertida pode ser reversível, como pressão, fluidos comprimidos e deformação elástica em sólidos, ou irreversível como energia de deformação plástica (ALGHAMDI, 2001).

Segundo Johnson e Reid citado por Alghamdi (2001) um dos objetivos de uma estrutura absorvedora de energia é absorver a energia cinética do impacto de maneira irreversível, garantindo que as lesões humanas e os danos aos componentes sejam mínimos.

Diversos estudos foram realizados quanto às formas de estruturas de paredes finas como absorvedores de energia. Nia e Hamedani (2010) realizaram uma análise comparativa da absorção de energia e da deformação de tubos de paredes finas com várias geometrias de seção contínua, onde avaliaram estruturas em forma de cilindro, hexágono, quadrado, retângulo, triângulo, tronco de cone e pirâmide conforme exibe a Figura 3. A avaliação foi realizada por meio de ensaio de compressão axial quase estática em uma máquina de tração universal e os resultados indicaram que a forma circular foi a que absorveu mais energia, seguida das formas tronco de cone, pirâmide, retângulo e triângulo. Esta última foi a que absorveu menos energia. Constatou-se que

quanto maior o número de dobras, formadas durante a compressão, maior a capacidade de absorção de energia.

Figura 3 – Amostras de diferentes geometrias submetidas a ensaio de compressão.



Antes (esquerda), durante (centro), e depois do carregamento (direita).

Fonte: Nia e Hamedani, 2010.

Vinayagar e Kumar (2017) analisaram a capacidade de estruturas de paredes finas de dupla seção bi-tubular quanto à proteção ao impacto. Os bi-tubos de dupla seção consistem em cilindros circulares com um tubo interno inscrito, com qualquer outra seção poligonal como triângulo, quadrado ou hexágono, exibidos na Figura 4. Sob as mesmas condições de carregamento, os resultados experimentais indicaram

que os bi-tubos tem maior capacidade de absorção e energia, quando comparada a um cilindro único, devido à quantidade de dobras plásticas que ocorrem durante a compressão. A eficiência na absorção de energia aumentou em uma faixa de 132-213% quando comparado a um cilindro único.

Figura 4 – Amostras de bi-tubos utilizados para ensaios de compressão.

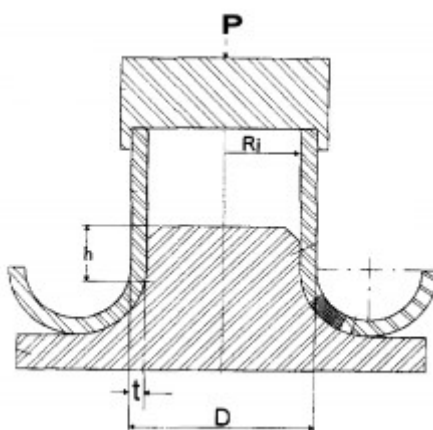


Fonte: Vinayagar e Kumar, 2017.

Os tubos são considerados a forma mais comum e provavelmente a mais antiga forma utilizada para absorção de energia. A energia pode ser dissipada em tubos metálicos finos de diversas formas, destacando-se a inversão de tubos, separação de tubos e o esmagamento axial. (ALGHAMDI, 2001).

O processo de inversão de tubos de paredes finas, exibido na Figura 5, é caracterizado pelo deslizamento da estrutura sobre o raio de uma ferramenta de conformação, enquanto é comprimido (MISCOW F. e AL-QURESHI, 1997; YU, QIU e YU, 2015).

Figura 5 – Corte esquemático de um aparato de testes de um processo de inversão de tubos.

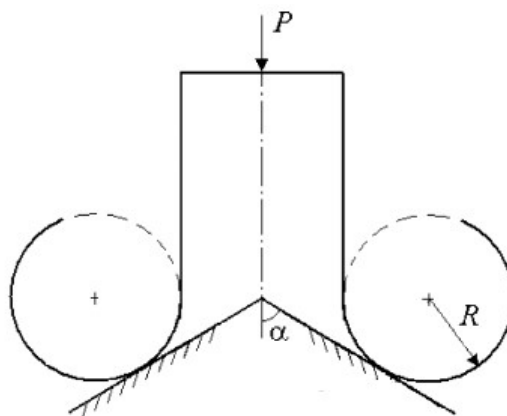


P – força;  $R_i$  – raio interno; h – altura; t – espessura; D – diâmetro externo.

Fonte: Miscow F. e Al-qureshi, 1997.

O método de absorção de energia por separação de tubos, exibido na Figura 6, consiste na compressão do tubo contra uma matriz piramidal, de forma que as quinas da estrutura tubular quadrada se rompam e haja separação entre seus lados (HUANG; LU e YU, 2002).

Figura 6 – Método de separação de tubos



P – Força; R – Raio;  $\alpha$  – ângulo.

Fonte: HUANG; LU e YU, 2002.

Segundo Baroutaji, Sajjia e Olabi (2017), os métodos de inversão e separação de tubos não são usados comumente como absorvedores de energia. O modo de esmagamento/compactação axial de estruturas de paredes finas é o modo utilizado comumente para avaliar o desempenho destas estruturas. Tarlochan et al. (2013), em seu projeto de estruturas de paredes finas para melhoria da resistência ao choque devido a forças de impacto axiais e oblíquas, descreveu o processo computacional para projetar este tipo de estrutura sujeita à compressão dinâmica. Foi constatado que a energia absorvida pelos tubos devido à carga oblíqua é muito menor que devido à carga axial. A carga oblíqua provoca dois vetores de carga mecânica no tubo, chamadas de compressão axial e flambagem. Os tubos solicitados obliquamente flambam ao mesmo tempo em que estão sendo comprimidos progressivamente. Nia e Hamedani (2010) constaram em suas análises que em alguns casos existem diferenças entre modos de deformação simulados virtualmente e os ensaios experimentais. Estas diferenças foram atribuídas a não conformidades causada pela solda. Portanto, o método de união/fabricação das estruturas de paredes finas pode influenciar o desempenho das estruturas tanto em uma validação física, quanto em uma validação virtual.

## **2.2. Proteção ao impacto (*crashworthiness*).**

Segundo Bois et al. (2004), acidentes podem ocorrer de maneira aleatória e um veículo pode ser impactado em posições diferentes e também a diferentes velocidades. Além das colisões entre os próprios automóveis, eles podem também colidir contra pedestres e objetos fixos. Por isso as estruturas automobilísticas têm evoluído constantemente ao longo dos anos, para satisfazer as necessidades dos consumidores e demais restrições de projeto. Entre essas restrições estão os materiais, regulamentos governamentais, aspectos econômicos, concorrência, tecnologia disponível e capacidades produtivas.

Para Méndez, Izquierdo e Ramírez (2010) *crashworthiness* é definido como a capacidade de um veículo proteger seus ocupantes em uma colisão.

Segundo Galganski citado por Ibrahim (2009) os problemas de proteção ao impacto (*crashworthiness*) podem ser caracterizados por:



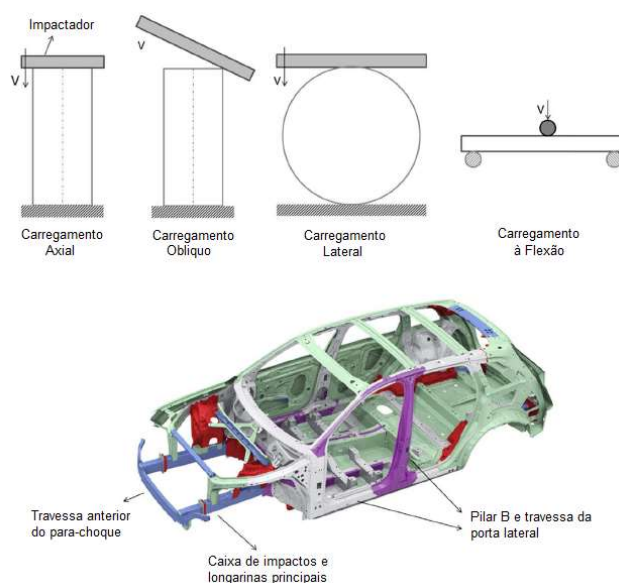
- a) deslocamento e energia: O comprimento da estrutura frontal está sendo reduzido por projetos de *design* modernos e ao mesmo tempo, é requerida uma maior capacidade de absorção e energia para minimizar a intrusão no compartimento.
- b) pulso de impacto: O pulso de impacto é a desaceleração induzida por um impacto ao corpo humano. O critério de lesão na cabeça (HIC) é usado para medir o dano do pulso de impacto ao cérebro, este deve ser menor que certos limites estipulados pelas normativas.
- c) posição de impacto: A estrutura deve ser capaz de mitigar lesões em diferentes posições de impacto tal como impacto frontal, impacto frontal deslocado, impacto lateral, impacto posterior e capotamento.
- d) compatibilidade automotiva: Com diferentes modelos de automóveis, a estrutura deve ser capaz de mitigar lesões resultantes de um acidente envolvendo dois automóveis diferentes, os quais podem diferir em tamanho e/ou peso.

O conceito de proteção ao impacto é aplicado a diversos meios de transporte, seja aéreo, marítimo ou terrestre. Porém, os veículos de transporte terrestre são presença constante no cotidiano das pessoas, seja pedestre, seja passageiro. Portanto, é grande a disponibilidade de estudos relacionados à proteção ao impacto de estruturas automotivas.

Segundo Baroutaji, Sajjia e Olabi (2017), a forma geométrica da estrutura de paredes finas e a maneira como é solicitada e deformada, são fatores cruciais na proteção ao impacto. Basicamente, as situações de carregamento mais comuns usadas nos sistemas de proteção de um automóvel são axial, oblíquo, lateral e flexão. Na Figura 7 são exemplificados os tipos de carregamento que sofrem as estruturas de paredes finas e alguns locais onde elas são aplicadas na estrutura do veículo, para protegerem os ocupantes quanto aos impactos.

Segundo Bois et al. (2004) as estruturas são normalmente projetadas, usando as características elásticas dos materiais, para suportar as solicitações mecânicas sem escoar ou entrar colapso. As estruturas automotivas, no entanto, devem atender estas características e ainda devem deformar plasticamente em um curto período de tempo (milissegundos) para absorver a energia do impacto de maneira controlada. A estrutura ainda deve ser leve e capaz de ser produzida em massa. O dimensionamento de estruturas para proteção ao impacto é uma tarefa única, quando comparada com estruturas estáticas tradicionais.

Figura 7 – Modos de carregamento/deformação para proteção ao impacto



Fonte: Adaptado de Baroutaji, Sajjia e Olabi, 2017.

A travessa anterior do para-choque é solicitada por carregamento lateral e/ou flexão durante o impacto frontal. A caixa de impactos e as longarinas principais são solicitadas por carregamento axial ou obliquo em uma colisão frontal. O pilar B e as travessas das portas laterais são solicitados à flexão em uma colisão lateral.

### 2.3. Estrutura veicular

As estruturas veiculares são projetadas e desenvolvidas para satisfazer diversas condições de carregamentos estáticas e dinâmicas. Fatores como aerodinâmica, espaço interno e vibrações são de grande relevância no desenvolvimento de estruturas veiculares. Além disso, a estrutura de um veículo deve ser capaz de se manter íntegra e prover adequada proteção aos ocupantes em caso de acidente (BOIS et al., 2004).

Segundo Ibrahim (2009), a estrutura do automóvel deve absorver o quanto for possível a energia do impacto, transformando-a em deformação plástica controlada. A estrutura devem também manter o mínimo de espaço de sobrevivência para manter os níveis de lesões e fatalidades o mais baixo possível.

O projeto de estruturas veiculares para impacto é baseado atualmente em uma série de subsistemas rígidos que constituem uma célula de sobrevivência quase

indeformável para os passageiros e subsistemas deformáveis capazes de dissipar a energia cinética eficientemente (PERONI, AVALLE e BELINGARDI, 2009).

A rigidez de uma estrutura é um dado muito importante a ser considerado no seu desenvolvimento. Tomando uma colisão frontal como exemplo, pode-se dizer que veículos com baixa rigidez frontal deformarão mais rapidamente diminuindo o tempo total que os ocupantes possuem para chegar ao repouso. Por outro lado, caso o veículo apresente uma estrutura frontal muito rígida a desaceleração do veículo será bem maior (BERTOCCHI, 2005).

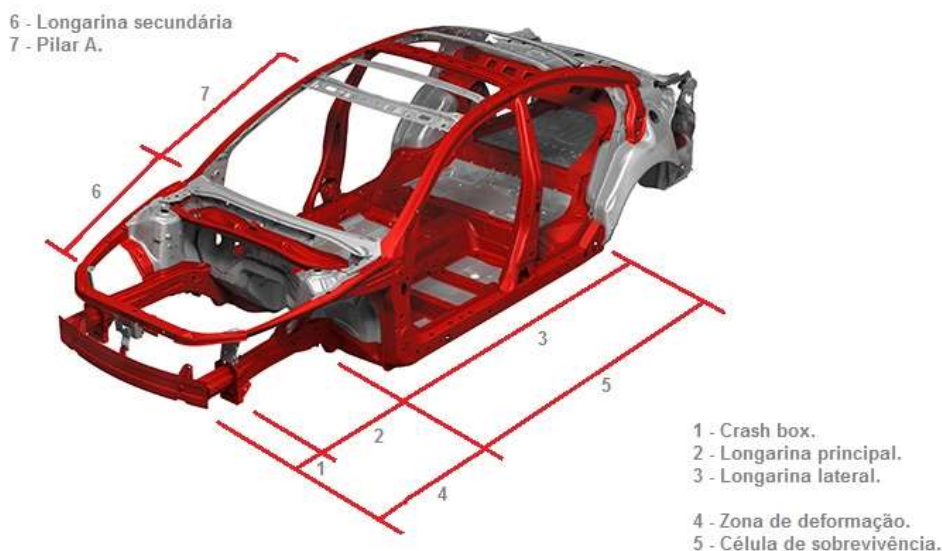
As estruturas frontais, responsáveis primárias por absorver energia em impactos frontais, são fundamentais para que seja transmitido aos ocupantes dos veículos o mínimo possível de lesões. Dentre estes componentes, uma estrutura de paredes finas conhecida como caixa de impacto (*crash box*) será o primeiro componente solicitado. Na Figura 8 são apresentados os principais componentes afetados em impactos frontais, os componentes 1, 2, 3 e 6, devem deformar ao serem impactados e absorver a energia suficiente para que não haja deformação nas áreas 5 e 7 durante o impacto frontal.

As estruturas automotivas possuem diversos subsistemas com funções diferentes para situações de impactos diferentes. Em um impacto a baixa velocidade, 15 – 16 km/h, a caixa de impacto tem a função de proteger as demais estruturas do automóvel, minimizando os danos a longarina principal e também aos passageiros dentro do veículo (HUSSAIN, REGALLA e RAO, 2017).

Segundo Griskevicius e Ziluikas (2003), a longarina principal absorve a maior quantidade de energia dentre todos os elementos de construção do frontal dos veículos em uma condição de impacto a altas velocidades. A distribuição de energia, entre os componentes frontais, durante um evento de impacto frontal, à alta velocidade, é apresentada na Figura 9. A caixa de impactos absorve um montante menor de energia durante o impacto a alta velocidade, pois ela é comumente projetada para absorver a energia de impacto até 16 km/h. As cargas correspondentes a impactos a velocidades superiores devem ser controladas pela longarina principal.

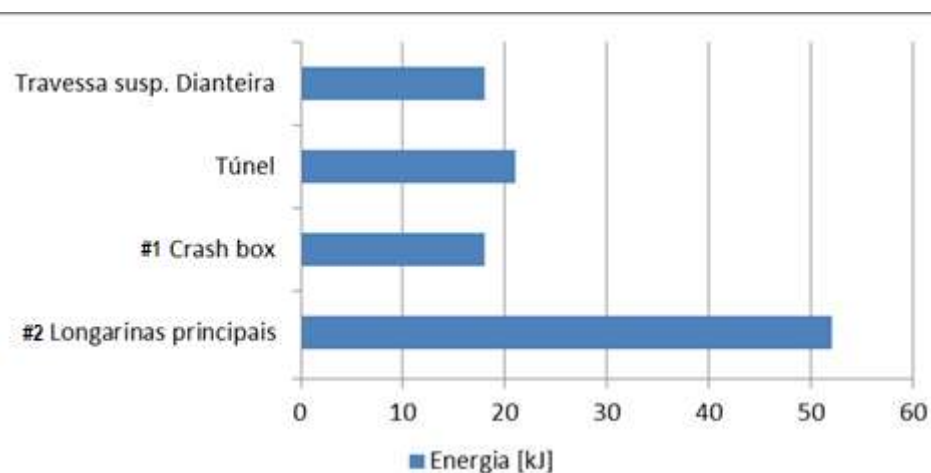
Ambas as estruturas, caixa de impacto e longarina principal, são estruturas de paredes finas e cada qual exerce seu papel em diferentes condições de impacto.

Figura 8 – Estruturas afetadas durante o impacto frontal.



Fonte: Adaptado de Mazda.

Figura 9 – Distribuição de energia em estruturas de frontais.

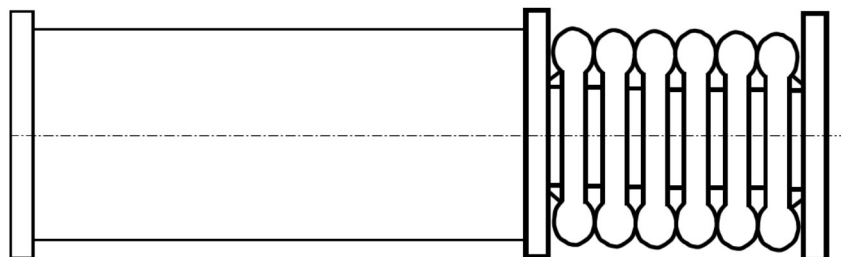


Fonte: Adaptado de Griskevicius e Ziluikas, 2003.

Segundo Bois et al. (2004), dois modos básicos de deformação ou mecanismos são encontrados comumente nas estruturas automotivas de paredes finas: colapso axial e flambagem. A Figura 10 apresenta colapso puramente axial que só acontece em estruturas impactadas diretamente ao seu eixo longitudinal ou em posições levemente inclinadas ( $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ). Este modo de colapso é considerado o mais eficaz de absorção de energia, porém é o mais difícil de atingir em condições de impacto não controlado. No entanto, a maioria das estruturas estará sujeita a um modo misto de deformação entre a compressão axial e a flambagem. O tipo de colapso por

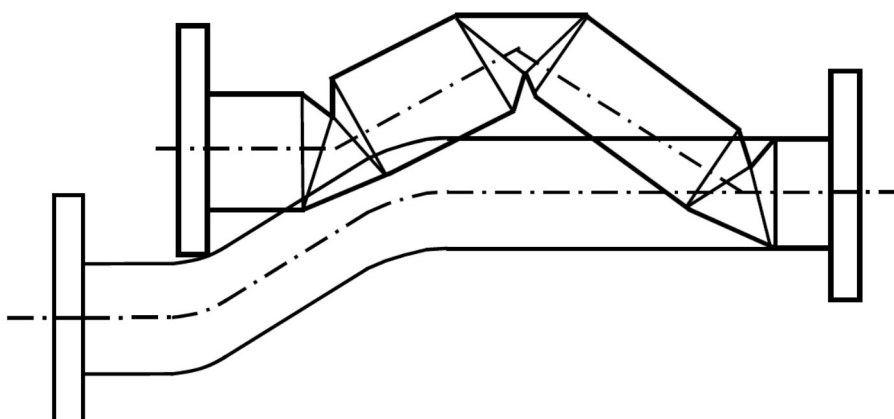
flambagem, apresentado na Figura 11, é um modo de baixa absorção de energia, porém as estruturas frontais dos veículos tem uma tendência natural a se deformarem deste modo.

Figura 10 – Modo de colapso axial



Fonte: BOIS et al., 2004.

Figura 11 – Modo de colapso por flambagem



Fonte: BOIS et al., 2004.

### 2.3.1. Caixa de impacto (*crash box*)

Segundo KIM et al. (2014), a caixa de impacto, localizada entre o para-choques e as longarinas principais, protegem os passageiros e componentes veiculares absorvendo a energia cinética inicial em um evento de impacto frontal garantindo que um baixo nível de tensão seja transmitido ao restante da carroceria.

A caixa de impactos pode ser classificada como um tipo de estrutura de paredes finas que trabalha sob compressão axial. A compressão de tais tipos de estruturas durante o impacto é um modo de colapso muito eficiente. As características de absorção de energia de uma caixa de impacto de seções quadradas e retangulares

são controladas por diversos parâmetros: (1) tamanho e geometria; (2) propriedades dos materiais e processos de fabricação; (3) técnicas de montagem e (4) velocidade de carregamento e condições de contorno (PERONI, AVALLE e BELINGARDI, 2009).

A caixa de impactos, em sua grande maioria, é conformada em duas partes a serem unidas posteriormente tomando forma de uma seção retangular ou quadrada. O processo de junção, intrinsicamente ligado ao processo de fabricação, é uma variável expressiva nas características de absorção de energia durante a compressão das caixas de impacto. Peroni, Avalle e Belingardi (2009) fizeram uma avaliação dos processos de união destas vigas. Eles estudaram três tipos de união: a solda a ponto, que historicamente obtém um progressivo colapso axial estável; a solda a *laser*, usada em chapas de pequena espessura e os adesivos de alta resistência, que são uma solução viável para locais de difícil soldagem.

Ainda existem outros processos de fabricação destas estruturas, Abedrabbo et al. (2009), analisou estes elementos obtidos do processo de hidroconformação de tubos de aço. Ainda segundo Abedrabbo et al. (2009), um dos fatores importantes que afetam a absorção de energia durante o impacto é a redução de espessura causada pela expansão circunferencial dos tubos durante o processo de hidroconformação.

Atualmente têm-se estudado diversos materiais utilizados para a fabricação da caixa de impacto. O material que Peroni, Avalle e Belingardi (2009) optaram por utilizar foi o aço baixo carbono de estampagem profunda DC02 ECE10130, devido à alta disponibilidade de dados sobre as propriedades do material. Abedrabbo et al. (2009) utilizou-se, além do aço de estampagem profunda, aços de alta resistência e baixa liga e também aços avançados de alta resistência. Os aços avançados de alta resistência oferecem alta resistência para absorção de energia aliados a baixo peso obtido de pequenas espessuras.

Alguns outros autores utilizaram outros materiais menos comuns na indústria automotiva, de produção em larga escala. Kim et al. (2014) pesquisou o comportamento de estruturas de alumínio com reforços de fibra de carbono. Esta estrutura híbrida é capaz de melhorar simultaneamente a rigidez, a capacidade de absorção de energia e ainda diminuir o peso do componente. Existem pesquisas voltadas para a utilização de termoplásticos para substituir alguns componentes estruturais. Zarei, Kröger e Albertsen (2008) utilizaram fibra de vidro revestida com placas de poliamida. A utilização deste material permitiu a absorção de 17% mais

energia quando comparada com uma peça fabricada em alumínio e ainda era 26% mais leve.

## 2.4. Materiais

Segundo Gusinde e Hoogen citado por Kleiner et al. (2003) o projeto de um veículo automotor envolve o uso de diversos tipos de materiais e tecnologias. Como os materiais representam cerca de 50% do custo total de um automóvel, torna-se viável o uso do aço devido a sua versatilidade. Ainda segundo Kleiner et al. (2003), a necessidade de redução de peso das carrocerias levou a utilização de outros materiais em sua construção, tais como alumínio e magnésio. Além destes metais são utilizados tecidos, polímeros complexos e outros metais de diversas categorias e classificações. A Tabela 1 apresenta o comparativo das propriedades do alumínio, magnésio, aço e titânio todos passíveis de utilização na fabricação de carrocerias de automóveis. Entre estes materiais, o aço destaca-se por sua alta resistência à tração, maior inclusive que o titânio. Ao se observar a resistência específica, os materiais possuem valores máximos equilibrados, exceto o aço que possui menor valor entre todos.

Tabela 1 - Propriedades dos metais utilizados em carrocerias automotivas.

|                          | Al      | Mg      | Steel    | Ti       |
|--------------------------|---------|---------|----------|----------|
| $\rho$                   | 2.8     | 1.74    | 7.83     | 4.5      |
| $E$                      | 70      | 45      | 210      | 110      |
| $R_m$                    | 150-680 | 100-380 | 300-1200 | 910-1190 |
| $R_m/\rho^{(1)}$         | 54-243  | 57-218  | 38-153   | 202-264  |
| $E/\rho^{(2)}$           | 25.0    | 25.9    | 26.8     | 24.4     |
| $\sqrt{R_m}/\rho^{(3)}$  | 9.3     | 11.2    | 4.4      | 7.7      |
| $\sqrt[3]{E}/\rho^{(4)}$ | 14.7    | 20.4    | 7.6      | 10.6     |

Fonte: Kleiner et al, 2003.

$\rho$  – Densidade [kg/dm<sup>3</sup>]

$E$  – Módulo de Elasticidade [GPa]

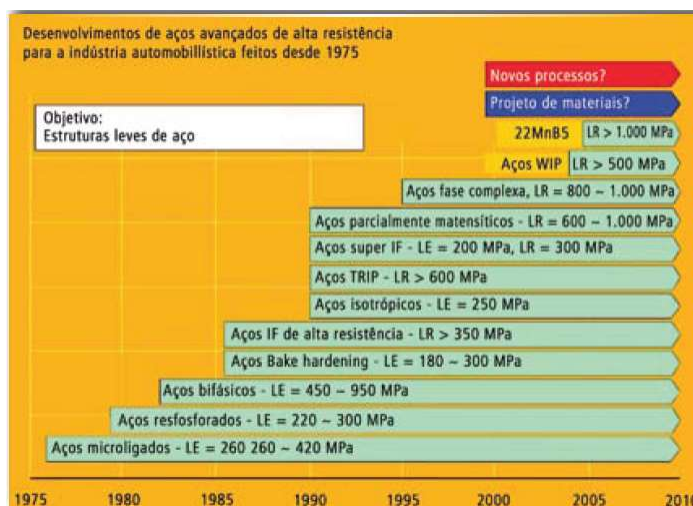
$R_m$  – Resistência a tração [N/mm<sup>2</sup>]

(1) - Resistência específica [10<sup>6</sup> N.mm/kg]

- (2) – Rigidez específica [ $10^9 \text{ N.mm/kg}$ ]
- (3) – Resistência a indentação [ $10^6 \sqrt{N}.\text{mm}^2/\text{kg}$ ]
- (4) – Rigidez da carroceria [ $10^7 \sqrt[3]{N}.\sqrt[3]{\text{mm}^7}/\text{kg}$ ]

Segundo Gorni (2008), a necessidade da indústria automobilística por redução de peso, preço dos materiais e melhoria do *design* levou as usinas siderúrgicas a produzir aços mais resistentes, com menor quantidade de material. Este foi um dos motivadores do desenvolvimento dos aços de alta resistência e baixa liga (aços microligados) e outros como os aços avançados de alta resistência. Na Figura 12 é exibida a evolução dos aços ao longo das décadas.

Figura 12 – Evolução dos aços avançados ao longo das últimas três décadas.



Fonte: Gorni, 2008.

#### 2.4.1. Aços avançados de alta resistência

O aço, material primário na carroceria e no chassi de um automóvel, exerce diversos papéis nos veículos automotores. Deve proteger os ocupantes, promover boa dirigibilidade, suportar as cargas das estradas, promover conforto e suportar todos os componentes fixados a ele.

Devido à grande ênfase dada à diminuição dos gases poluentes e melhoria no consumo de combustível a indústria automobilística tem investido fortemente em materiais mais leves. A redução de peso é ainda o meio mais efetivo de reduzir o consumo de combustível e de gases poluentes. Neste contexto, existe uma grande



demanda dos fabricantes de automóveis por materiais de alta resistência mecânica e boa capacidade de absorção de energia. Estes aços devem ser capazes de atender os requisitos para materiais automotivos, tais como: durabilidade; resistência; rigidez; boa capacidade de absorção de energia em impactos e propriedades acústicas (GALÁN et al., 2012).

Aços avançados de alta resistência fazem parte de uma complexa e sofisticada classe de materiais, com composição química cuidadosamente selecionada e microestruturas multifásicas resultantes de um processo de aquecimento e resfriamento precisamente controlados. Os aços de alta resistência convencionais possuem, geralmente, estrutura ferrítica enquanto os aços avançados de alta resistência são multifásicos e contêm ferrita, martensita, bainita e/ou austenita retida (WORLDAUTOSTEEL, 2017). Os aços avançados de alta resistência são ainda mais vantajosos que outros materiais mais leves, em termos de custos e disponibilidade de produção. Esta classe de aços se destaca com principal responsável pelas melhorias de peso de carroceria aliado a um incremento de resistência. (YOSHIDA et al., 2013).

Segundo Galán et al. (2012), dois principais tipos de aços de alta resistência são intensivamente usados:

- a. aços de alta resistência com alto potencial de absorção de energia, tipicamente aços bifásicos (DP) ou caracterizados pela ocorrência de transformação martensítica induzida por deformação plástica (TRIP), com resistência à tração menor que 1000 MPa, para carga dinâmicas ocorridas durante acidentes e colisões.
- b. aços de alta resistência com resistência a tração maior que 1200 MPa, tipicamente aços martensíticos, os quais promovem alta rigidez e barreira anti-intrusão para a proteção dos ocupantes.

#### **2.4.1.1. Aços bifásicos (*dual phase*)**

Os aços bifásicos (*dual phase*), introduzidos na década de 70 é um dos tipos de aços mais difundidos atualmente, foram produzidos devido à emergente demanda da indústria automobilística por materiais com elevados padrões de propriedades mecânicas e custos reduzidos (SAEIDI, KARIMI, TOROGHINEJAD, 2017).

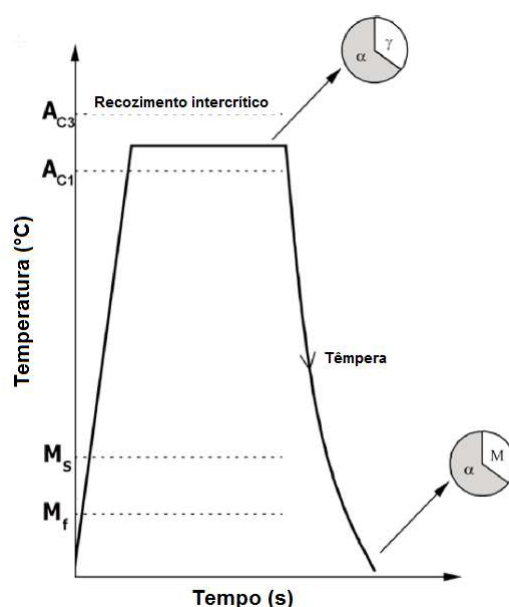
Estes aços são produzidos geralmente por laminação a frio e recozimento intercrítico contínuo de forma que o laminado é mantido na temperatura de

recozimento e rapidamente resfriado por meio de têmpera. A temperatura de recozimento intercrítico escolhida deve refletir o nível de resistência do produto final (OLIVER; JONES; FOURLARIS, 2007).

Segundo Miura et al. Citado por Oliver, Jones e Fourlaris (2007), elementos químicos como manganês, cromo e molibdênio são adicionados aos aços bifásicos para garantir a temperabilidade durante o processo de transformação da austenita em martensita no resfriamento.

Dois estágios de um ciclo térmico são usados para a produção dos aços bifásicos que consistem em aquecer o material até a zona intercrítica seguido de um resfriamento rápido para promover a transformação da austenita intercrítica em martensita, processo exibido na Figura 13 (GALÁN et al., 2012).

Figura 13 – Esquema tratamento de recozimento intercrítico usado no processo de laminação a frio.



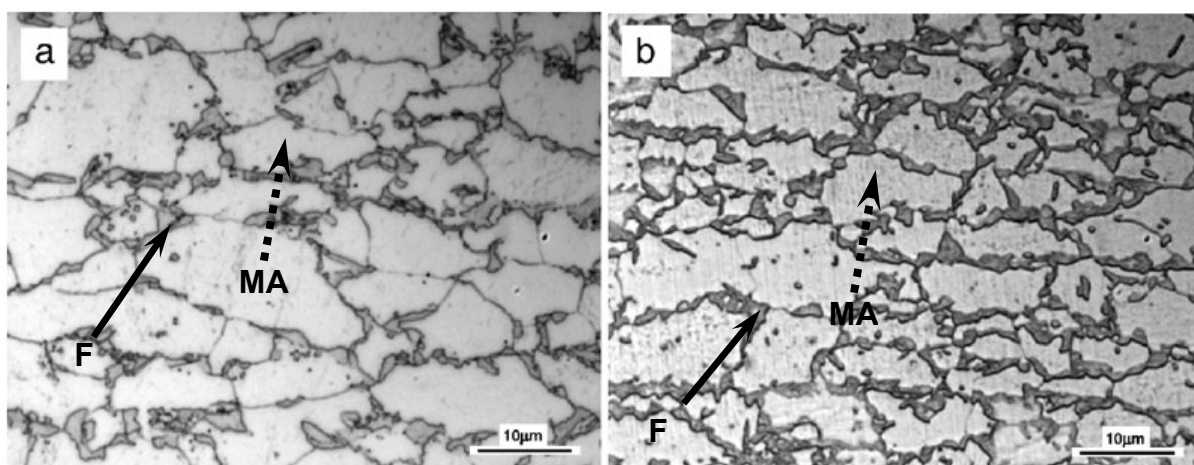
Fonte: Adaptado de Gálán et. al., 2012.

Para Kuziak, Kawalla e Waengler (2008), a microestrutura dos aços bifásicos é composta por uma matriz ferrítica e 10 - 40% de martensita ou ilhas de martensita mais austenita (constituente MA). Este tipo de microestrutura permite alcançar resistências na faixa de 500 - 1200 MPa. Quando a fração de volume da martensita excede 20% os aços bifásicos, são frequentemente chamados de parcialmente martensíticos.

Segundo ULSAB-AVC (2001), a ferrita entrega a este tipo de aço excelente ductilidade. Quando esses aços deformam, a tensão é concentrada na baixa resistência da fase ferrítica, criando um alto coeficiente encruamento exibido por estes aços.

Ao se analisar a microestrutura de um aço bifásico, exibida na Figura 14, nota-se que as ilhas de martensita estão situadas no contorno de grão da ferrita. A quantidade de martensita verificada neste aço DP600 foi de 13,4% enquanto que neste aço DP800 a quantidade aumentou para 26%. O aumento de resistência do aço DP800 quando comparado ao DP600 pode ser atribuído primariamente a maior quantidade de martensita e também aos grãos refinados de ferrita (OLIVER, JONES e FOURLARIS, 2007).

Figura 14 – Micrografia óptica de microestruturas atacadas com nital 2%.



(a) DP600 e (b) DP800

Fonte: Oliver; Jones e Fourlaris, 2007.

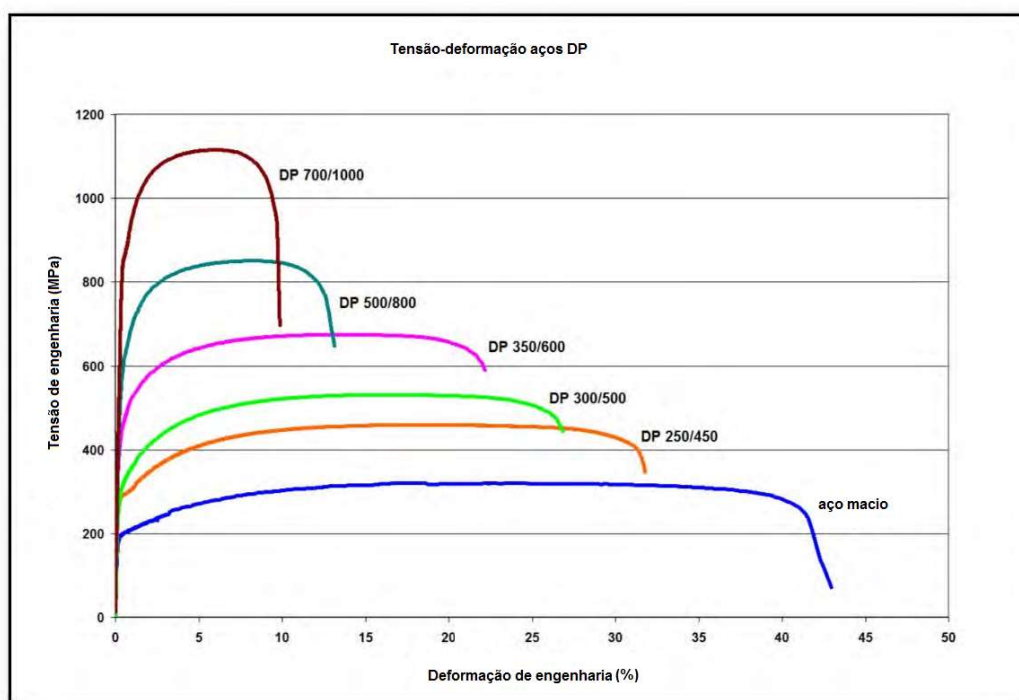
#### **2.4.1.2. Propriedades mecânicas dos aços bifásicos.**

A resistência mecânica, umas das primeiras propriedades mecânicas a ser considerada em um projeto de engenharia, está associada à habilidade do material resistir a forças mecânicas. Quando aplicada uma força por unidade de área é produzida uma tensão e como efeito têm-se a deformação, que é comumente definida como o comprimento deformado em porcentagem do comprimento original (VAN VLACK, 1970).

Segundo Sami, Tahar e Mohamed (2014) a energia absorvida pelos materiais depende também de fatores microestruturais como: fração volumétrica das fases, morfologia das fases secundárias, tamanho de grão e matriz microestrutural.

É possível verificar na Figura 15, a comparação entre as resistências mecânicas de um aço convencional e algumas faixas de aços bifásicos. O aço macio (aço “doce”) possui notável capacidade de deformação, tornando-se um material ideal para estampagem e composição de partes do automóvel que não exija de alta resistência mecânica de seus componentes. Ao se comparar a utilização destes aços com os bifásicos, perde-se um pouco da capacidade de deformação e à medida que a resistência mecânica aumenta, devido ao aumento da fração de martensita, a capacidade de deformação diminui. No entanto a energia absorvida, área sob a curva, também cresce com aumento de resistência do material, sendo estes materiais boas opções para serem usados em componentes que exijam alta capacidade de absorção de energia, por exemplo, as estruturas de paredes finas.

Figura 15 – Tensão-deformação para diferentes grades de aços DP

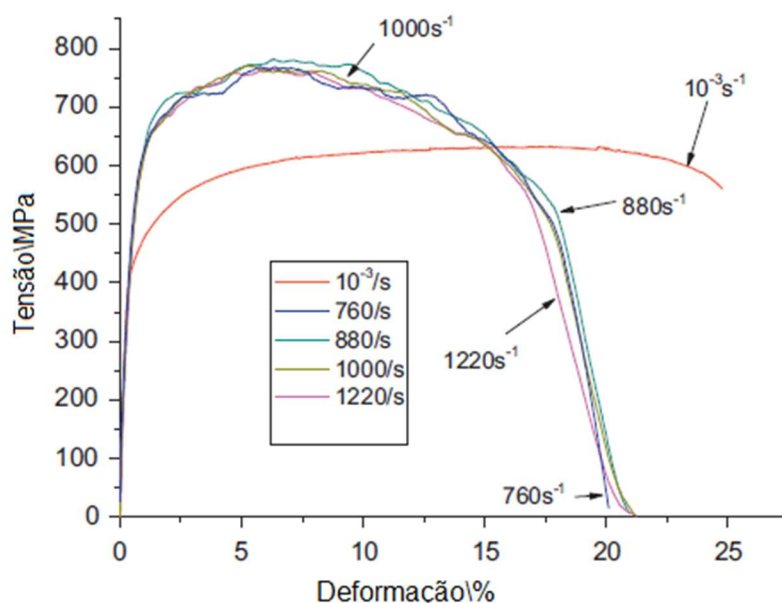


Fonte: Adaptado de Worldautosteel, 2017.

Segundo Wang et al (2013) a ferrita, que faz parte da composição dos aços bifásicos, tem boa plasticidade e é mais sensível à taxa de deformação que a fase martensítica. Quando o material é deformado plasticamente a densidade de

discordâncias aumenta rapidamente, tendo sua movimentação dificultada pela interação de umas com as outras e com outras barreiras, caracterizando o encruamento. Na Figura 16 é exibido o aumento de resistência devido à variação da taxa de deformação para o aço DP600.

Figura 16 – Comparativo tensão-deformação aços DP600



Fonte: Adaptado de Wang et al., 2013.

Kadkhodapour, Butz e Rad (2011) verificaram que os aços bifásicos possuem alto limite de resistência com um baixo escoamento, fatos estes que contribuem uma resistência mecânica alta com uma boa capacidade para conformação. Tipicamente a tensão de escoamento dos aços bifásicos é muito menor que a sua tensão máxima.

A baixa tensão de escoamento para uma dada tensão máxima pode ser traduzida como maiores valores de alongamento e melhor conformabilidade. Além disso, a resposta ao encruamento é diferente quando comparado aos aços alta resistência baixa liga, por exemplo, estes perdem conformabilidade assim que a deformação se inicia. Devido à matriz ferrítica macia, os aços bifásicos podem manter sua conformabilidade dentro da prensa e distribuir melhor as tensões ao longo da peça (SCHAEFFLER, 2004).

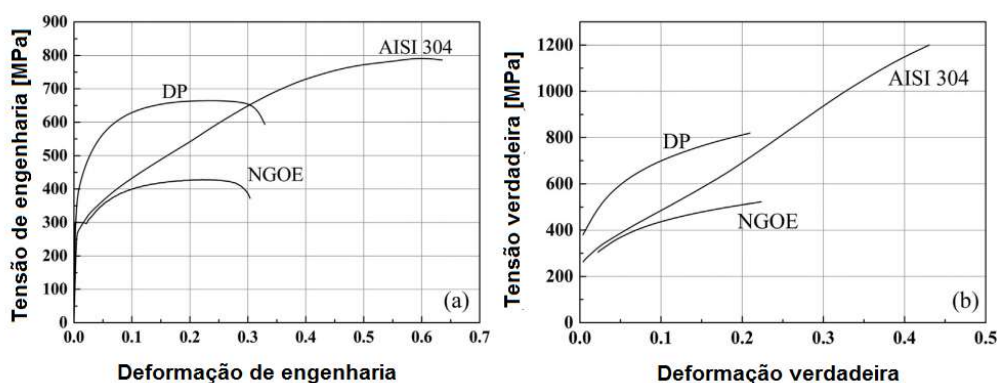
Pierman et al. (2014) verificaram, ao analisar a influência da microestrutura e composição no comportamento plástico do aços bifásicos, que o aumento da fração volumétrica de martensita resulta em maiores limites de escoamento e de tração, e

que o aumento de carbono aumenta a capacidade encruamento e resistência à tração, mas não afeta a tensão de escoamento inicial. O limite de resistência, em geral, aumenta com a fração volumétrica de martensita e também aumenta com o aumento do teor carbono da martensita.

Segundo Lai et al. (2016), a tensão de escoamento e resistência a tração aumentam com elevação da fração volumétrica de martensita, enquanto o alongamento uniforme diminui. Foi verificado também que a dureza da martensita tem pouco impacto sobre o escoamento inicial do material, mas o afeta significativamente para uma grande quantidade de martensita. Ao se elevar a dureza da martensita, aumenta-se à resistência a tração com pequeno impacto no alongamento uniforme.

Soares et al. (2017) constaram em um estudo sobre o encruamento e a evolução da microestrutura de aços bifásicos, aços elétricos de grãos não orientados (GNO) e o aço AISI 304, que o aço bifásico e o aço AISI 304 possuem escoamento contínuo diferentemente do aço GNO. Este último possui patamar de escoamento típico de aços ferríticos. Na Figura 17 são exibidos os resultados comparativos dos três aços. A combinação de escoamento contínuo e alta taxa de encruamento inicial é a base para a boa conformabilidade dos aços bifásicos.

Figura 17 – Curvas tensão-deformação dos aços bifásicos, GNO e AISI 304.



(a) Tensão-deformação de engenharia / (b) Tensão-deformação verdadeira.

Fonte: Soares et al., 2017.

Segundo Wang et al. (2013) a resistência dos materiais é determinada pelo encruamento, variação no tamanho das amostras e a taxa de deformação. A resistência de um material pode ser incrementada quando submetida a deformações a altas velocidades, ou seja, ao se elevar a taxa de deformação a resistência mecânica de material também se elevará. Nos aços bifásicos, compostos principalmente de martensita e ferrita, a ferrita é mais sensível à taxa de deformação que a martensita.

Segundo Meyers (1994), a taxa de deformação, e não a velocidade de deformação é um parâmetro crítico. A taxa de deformação é dada pela taxa de variação da deformação com o tempo. Na Figura 18 é exibida uma classificação dos testes e taxas de deformação segundo Dieter (1981).

Figura 18 – Classificação de testes relativos a taxa de deformação segundo Dieter

| <i>Intervalo das taxas de deformação</i> | <i>Condições ou tipo de teste</i>                                                                        |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $10^{-8}$ a $10^{-5} \text{ s}^{-1}$     | Testes de fluência com carga ou tensão constantes                                                        |
| $10^{-5}$ a $10^{-1} \text{ s}^{-1}$     | Testes de tração estática com máquinas hidráulicas ou de transmissão mecânica                            |
| $10^{-1}$ a $10^2 \text{ s}^{-1}$        | Testes dinâmicos de tração ou compressão                                                                 |
| $10^2$ a $10^4 \text{ s}^{-1}$           | Testes de alta velocidade usando barras de impacto (devem-se considerar efeitos de propagação de ondas)  |
| $10^4$ a $10^8 \text{ s}^{-1}$           | Hipervelocidade de impacto usando canhões de gás ou projéteis explosivos (propagação de ondas de choque) |

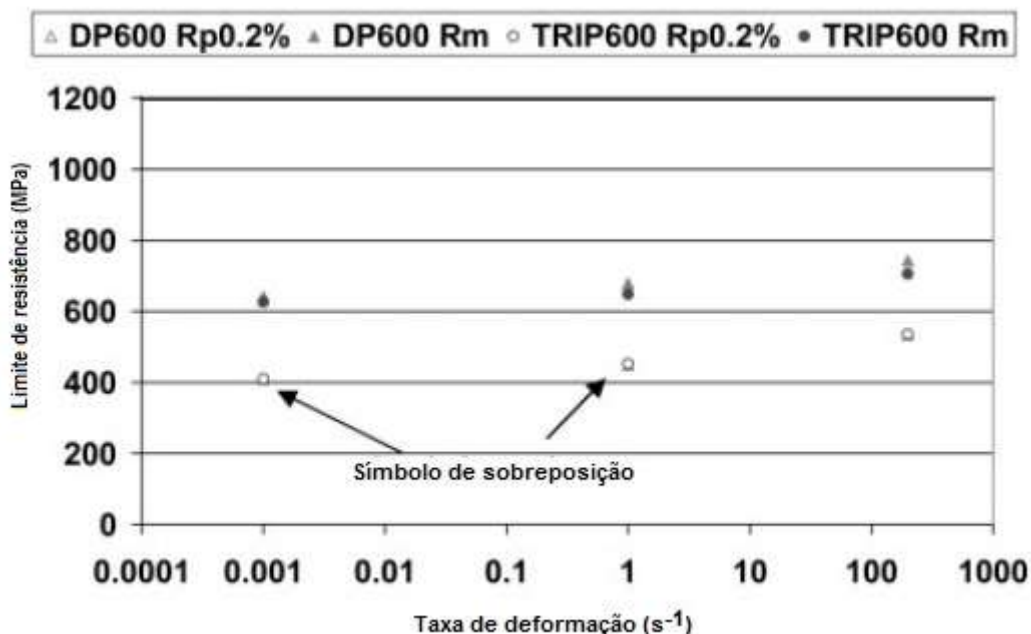
Fonte: Dieter, 1981.

Oliver, Jones e Fourlaris (2007), Huh et al. (2008) e Wang et al. (2013), observaram que ao se aumentar a taxa de deformação do aço DP, avaliados por eles em seus estudos, há um incremento na resistência mecânica e na absorção de energia. Na Figura 21 pode ser verificado este comportamento para os aços DP600 e TRIP600.

Oliver, Jones e Fourlaris (2007) observaram também que o alongamento tende a decrescer à medida que se aumenta a taxa de deformação. Em relação ao encruamento, ele também tende a diminuir com o aumento da taxa de deformação, porém para o aço DP600 o aumento da taxa de encruamento nos estágios iniciais de alongamento (cerca de 10%) permite a este aço absorver mais energia.

Uma das formas de avaliar os efeitos da taxa de deformação nos aços bifásicos se dá pela análise da sensibilidade à taxa de deformação, que segundo a norma ASTM E8/E8M é a dependência do escoamento e resistência à tração à taxa sobre o qual o material é deformado. A resistência ao escoamento de alguns materiais pode variar mais de 10% quando testados com as menores e maiores taxas de deformação indicadas pela ASTM E8/E8M.

Figura 19 – Efeito da taxa de deformação na resistência do DP600 e TRIP600.



Fonte: Adaptado de Oliver, Jones e Fourlaris. 2007

#### 2.4.2. Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são realizados geralmente sobre estruturas já produzidos e/ou sobre amostras destas estruturas ou ainda de sua própria matéria prima para simular os esforços que sofrerão em condições de uso.

Segundo Callister (2008), uma amostra deformada até a fratura pode ser usada para investigar as propriedades mecânicas dos materiais, é possível durante o ensaio de tração obter-se a energia absorvida pelos materiais até a sua fratura.

##### 2.4.2.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração são usados para quantitativamente medir a resistência e a ductilidade dos materiais, prover dados de projeto de engenharia e determinar as propriedades mecânicas dos materiais submetidas a cargas axiais e deformação. O ensaio de tração a baixas taxas de deformação é considerado um ensaio quase estático.

Segundo a norma ASTM E8/E8M os ensaios de tração fornecem informações sobre a resistência e ductilidade dos materiais sob tensões de tração uniaxial. Estas



informações são úteis para a comparação de materiais, desenvolvimento de ligas, controle de qualidade, e projetos de engenharia.

Quando existe uma deformação e a tensão aplicada é proporcional à deformação produzida é chamado de deformação elástica (CALLISTER, 2008).

A medida que uma estrutura se deforma é dependente da tensão que é imposta aos metais submetidos a uma tensão de tração. Sendo assim a tensão e a deformação são proporcionais entre si, como demonstra a Equação 1.

Equação 1 – Cálculo da tensão na zona elástica.

$$\sigma = E\varepsilon$$

$\sigma$  = Tensão de Tração

$E$  = Módulo de Young

$\varepsilon$  = Deformação

Tal relação é conhecida como a lei de Hooke e a constante de proporcionalidade  $E$  (GPa ou psi) é o módulo de elasticidade, ou *módulo de Young*.

Segundo Van Vlack (1970), a deformação elástica é reversível; desaparece quando a tensão é removida e o módulo de elasticidade por ser também definido como o quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante, ele está relacionado com a rigidez do material.

Para Callister (2008), na maioria dos materiais metálicos a deformação elástica existe apenas até deformações de aproximadamente 0,005. Quando o material é deformado além desse ponto, a tensão deixa de ser proporcional e passa a ocorrer uma deformação permanente e não recuperável chamada deformação plástica.

Tensões que ultrapassam o limite de elástico provocam deformações permanentes, chamada também de deformação plástica. A deformação plástica é o resultado de um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material (VAN VLACK, 1970).

Segundo Dieter (1981), a velocidade de deformação que é aplicada a um corpo de prova pode ter uma influência importante na tensão de escoamento do material. A taxa de deformação é definida pela Equação 2. Na Figura 20 é exibido o aumento da

resistência à tração em função da taxa de deformação, além da influência da temperatura.

#### Equação 2 – Taxa de deformação

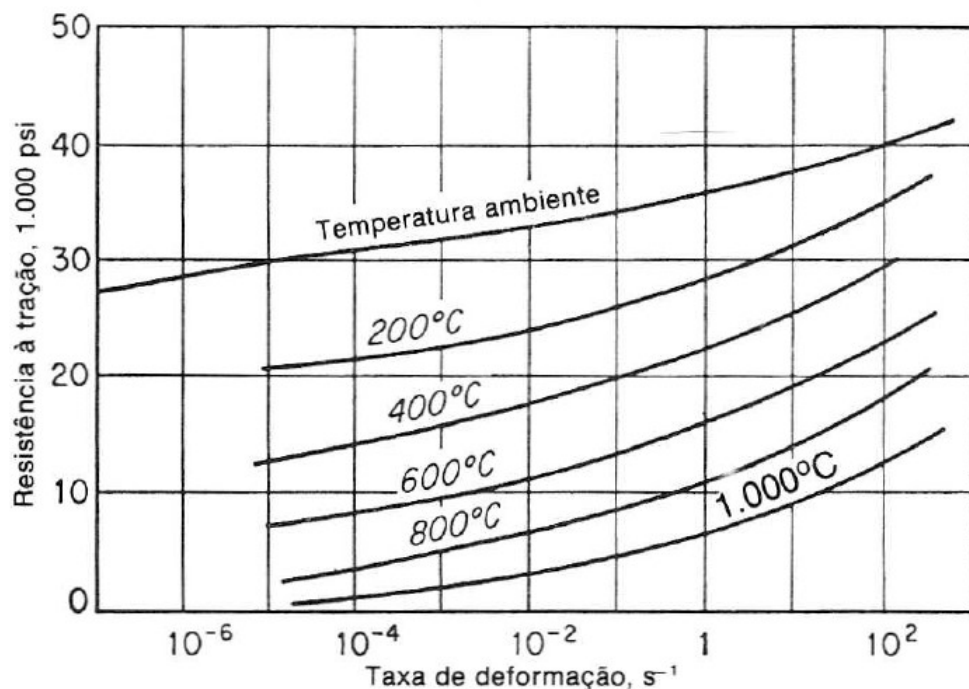
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$\dot{\varepsilon}$  = Taxa de deformação

$d\varepsilon$  = Variação da deformação

$dt$  = Variação do tempo

Figura 20 – Efeito da taxa de deformação na resistência a tração do cobre.



Fonte: Dieter, 1981.

Diversos autores utilizam o ensaio de tração uniaxial para avaliarem as propriedades dos materiais utilizados em suas pesquisas e em seus estudos.

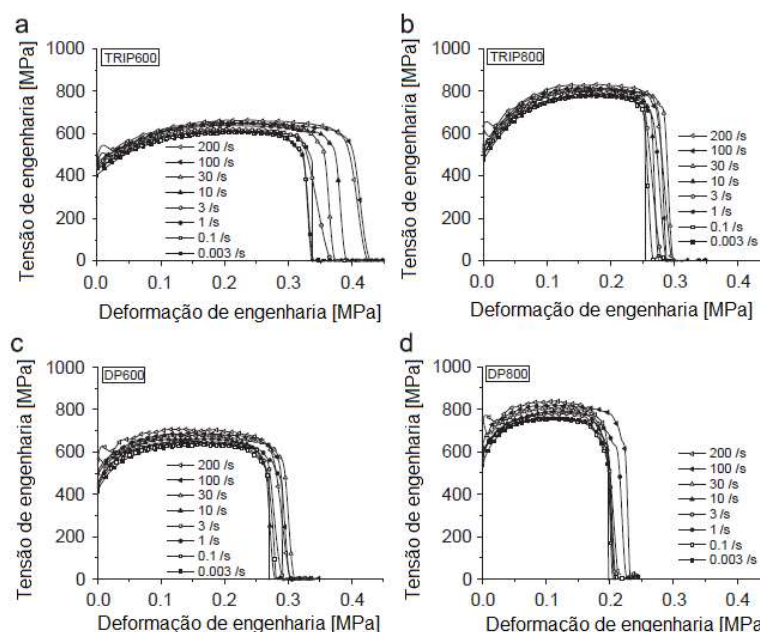
Khan et al. (2012) realizaram experimentos quase estáticos e dinâmicos para verificar o comportamento dos aços avançados de alta resistência, incluindo aços de transformação martensítica induzida por deformação plástica (TRIP), bifásicos (DP) aços de estampagem profunda (DQ). Os ensaios quase estáticos foram realizados a uma taxa de deformação de 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> e um *strain gage* de alto alongamento foi usado

para medir a deformação. Foi observado que a taxa de encruamento dos aços TRIP aumenta com o aumento da deformação devido a presença de austenita retida nesta tipologia de aços, e ainda a deformação verdadeira dos aços TRIP foi maior que nos aços DP. Ambos os aços possuem positiva sensibilidade à taxa de deformação.

Mocko, Brodecki e Kruska (2016) avaliaram a resposta mecânica de aços bifásicos em ensaios quase estáticos e dinâmicos por meio da análise da curva tensão-deformação de aço bifásico DP500, após a exposição prévia a ciclos de fadiga com amplitude de tensão constante. Foi concluído que independente dos parâmetros de pré-fadiga, o ciclo inicial de cargas induz ao um aumento na tensão de escoamento do material.

Huh et al. (2008) investigaram as características dinâmicas a tração de aços TRIP e bifásicos (DP) através que ensaios de tração que tiveram as taxas de deformação variando de  $0,003 \text{ s}^{-1}$  a  $200 \text{ s}^{-1}$ , exibidas na Figura 21.

Figura 21 – Curvas tensão-deformação aços TRIP e DP a diferentes taxas de deformação.



Fonte: Adaptado de Huh et al., 2008.

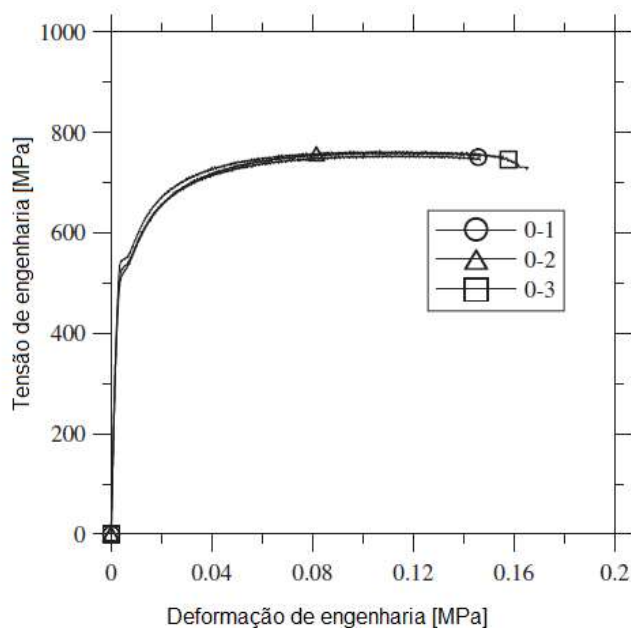
Foi constatado que o escoamento de cada material aumenta em função da taxa de deformação e que os aços bifásicos são mais sensíveis à taxa de deformação que os aços TRIP em termos de limite resistência a tração. Este resultado implica que os aços bifásicos possuem uma vantagem em relação aos aços TRIP uma vez que taxa de deformação em acidentes automotivos é de  $500 \text{ s}^{-1}$ .

#### 2.4.2.2. Ensaios sobre estruturas de paredes finas.

Além da caracterização do material utilizado para a construção das estruturas de paredes finas por meio de ensaio de tração é importante também avaliar o comportamento destas estruturas enquanto componente.

Tarigopula et al. (2006) realizaram ensaios quase estáticos e dinâmicos em estruturas de paredes finas quadradas fabricadas em material DP800. Foi observada uma significativa diferença entre os ensaios quase estáticos e dinâmicos, em termos da força de deformação e absorção de energia, atribuída a taxa de deformação e efeitos da inércia. Os ensaios quase estáticos foram conduzidos em uma máquina de tração hidráulica convencional a taxa de deformação de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Na Figura 24 são exibidos os resultados destes ensaios realizados sobre amostras do material DP800.

Figura 22 - Curva tensão-deformação quase estática

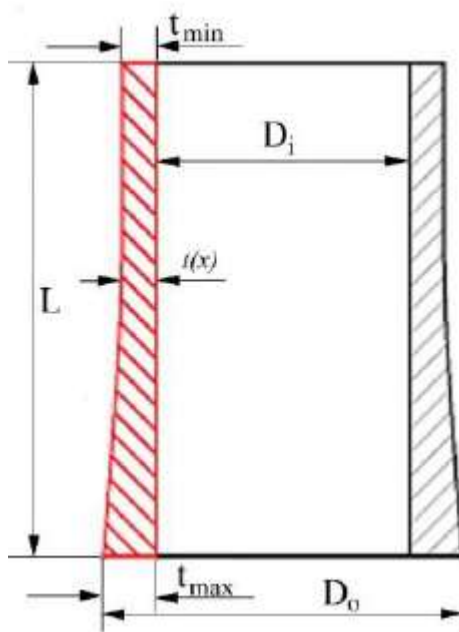


Fonte: Adaptado de Tarigopula et al., 2006.

Erdin, Baykasoglu e Cetin (2016) também utilizaram uma máquina universal de tração para realizar ensaios de compressão axial em estruturas de alumínio. Seu objetivo era avaliar o comportamento de uma estrutura de espessura funcionalmente graduada, conforme seção exibida na Figura 23. Foi estabelecida uma comparação com uma estrutura de espessura uniforme por meio dos ensaios de compressão

quase estáticos e constatou que a estrutura de espessura funcionalmente graduada absorve mais energia devido a sua variação de espessura.

Figura 23 – Seção de uma estrutura de espessura funcionalmente graduada.



$L$  – altura;  $t_{min}$  – espessura mínima;  $t_{max}$  – espessura máxima;  $t(x)$  – função de graduação da espessura;  $D_i$  – Diâmetro interno;  $D_o$  - Diâmetro externo.

Fonte: Erdin, Baykasoglu e Cetin, 2016.

Os ensaios dinâmicos de compressão de estruturas de paredes finas são mais complexos de serem realizados em máquinas convencionais de tração/compressão, pois envolvem um complexo sistema para execução dos ensaios.

Wang et al (2013) cita que o processo de colisão de um veículo, que envolve deformação dos materiais à altas taxas de deformação, é complexo e possui o processo de deformação não linear. As colisões automotivas a velocidade de 60 - 80 km/h levam a uma significativa mudança no comportamento e nas características de absorção de energia da estrutura do veículo.

Por isso as estruturas de paredes finas, que são usadas como absorvedores de energia, são testadas em dispositivos capazes de simular o impacto de um veículo, como plataformas de queda livre e trenós de aceleração.

Zarei, Kröger e Albertsen (2008) conduziram seus ensaios experimentais em plataforma de queda livre. A massa de impacto poderia variar de 20 até 300 kg e a altura máxima que poderia ser alcançada são 8 metros. A força provocada pela colisão

foi medida utilizando um *strain gage* e sensores laser de deslocamento que forneceram a deformação axial dos tubos.

Peroni; Avalle e Belingardi (2009) também utilizaram uma plataforma de queda livre para determinar a capacidade de absorção de energia de suas amostras a fim de relacionar seus resultados com as colisões que os veículos sofrem no mundo real. O dispositivo está instalado na Faculdade de Engenharia do Politécnico de Torino, possui 12 metros de altura útil e poderia atingir a velocidade de até 13 m/s aproximadamente. A massa poderia ser ajustada para até 200 kg e a força pode ser medida através de células de carga instaladas na base do dispositivo. Na Figura 24 é exibida a plataforma de queda livre.

Figura 24 – Plataforma de queda livre.

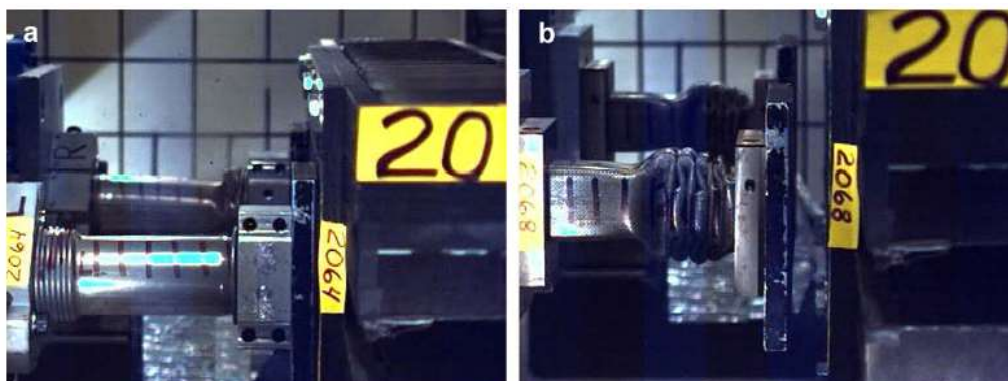


Fonte: Peroni; Avalle e Belingardi, 2009

Abedrabbo et al. (2009) utilizaram um dispositivo para provocar uma desaceleração sobre os dispositivos usando um ensaio sobre trenó. Eles citam que este sistema de trenó possui diversas vantagens sobre o sistema de teste utilizando a plataforma de queda livre. A primeira delas é que a massa a ser usada poder ser muito maior que a massa utilizada na torre de queda livre. Outra vantagem é que o

trenó é limitado ao curso sobre trilhos, o que previne contra sua própria rotação. Na Figura 25 é demonstrado o ensaio de impacto utilizando o trenó.

Figura 25 – Ensaio de impacto sobre trenó.



Fonte: Abedrabbo et. al, 2009.

Diversos parâmetros são utilizados para avaliar o desempenho de estruturas de paredes finas tanto em ensaios de compressão em máquinas convencionais de tração, quanto em ensaio de impacto em plataforma de queda livre ou sobre trenó. Basta obter a curva força-deslocamento das amostras ensaiadas e a partir destes dados, calcular os parâmetros que indicam o desempenho da estrutura.

Tarigopula et al. (2006); Yuen e Nurick (2008); Yin et al. (2011); Vinayagar e Kumar (2017) descreveram alguns parâmetros que são frequentemente utilizados como importantes fatores que indicam a proteção ao impacto pelas estruturas de paredes finas a partir das curvas de força-deslocamento. A Equação 3 descreve a capacidade total de absorção de energia das amostras, determinada pela integração da força axial de compactação pelo deslocamento.

Equação 3 – Energia total absorvida

$$ETA(E_a) = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta$$

Onde  $F(\delta)$  é a força de compressão instantânea em função da distância  $\delta$ . A energia específica absorvida (EEA) é a energia absorvida pela unidade de massa da estrutura de paredes finas. A força média é o parâmetro de resposta para a capacidade de absorção e energia da estrutura e é calculada pela Equação 4.



## Equação 4 – Força média de compactação

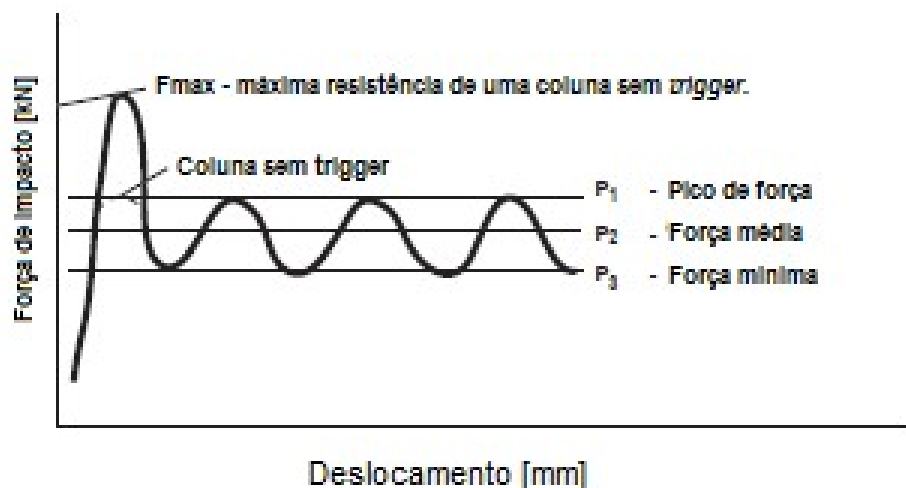
$$F_{med} = ETA/\delta$$

O pico de força  $F_{max}$  indica a formação da primeira dobra durante a compressão da estrutura.  $F_{max}$  é máxima carga da curva força-deslocamento e deve ser minimizada e estar próxima o quanto possível da força média para aumentar as taxas de proteção à colisão. A eficiência da força de compactação (EFC) é dada pela relação entre a força média e força máxima, na Equação 5. Para uma estrutura absorvedora de energia ideal a EFC é igual a 100%. Na Figura 26 é exibido o comportamento típico de uma estrutura de paredes finas ao ser comprimida axialmente.

## Equação 5 – Eficiência da força de compactação.

$$EFC = \frac{F_{med}}{F_{max}} \times 100$$

Figura 26 – Curva força-deslocamento típica de uma estrutura de paredes finas.



Fonte: Adaptado de Bois et al., 2004

Antes mesmo das avaliações experimentais, que são conduzidas para avaliação das estruturas de paredes finas, por meio de ensaios de compressão e/ou impacto, alguns modelos analíticos são utilizados para prever a força média obtida nas estruturas.

Wierzbick e Abramowicz, citado por Bois et al. (2004), desenvolveram uma teoria para o comportamento a compressão de estruturas de paredes finas. A Equação



6 utilizada em conjunto com as Equações 7 e 8 são usadas para calcular a força média derivada do balanço de energia ao igualar ao trabalho externo produzido pela força de compressão a medida que ocorrem os dobramentos.

Equação 6 – Cálculo da força média de compressão

$$P_m = 38,27 M_0 C^{\frac{1}{3}} t^{-\frac{1}{3}}$$

Equação 7 – Momento plástico total

$$M_0 = \sigma_0 \frac{t^2}{4}$$

Equação 8 – Tensão de escoamento média

$$\sigma_0 = (0,9 - 0,95)\sigma_u$$

Onde:

$P_m$  = Força média de compressão

$M_0$  = Momento plástico total

$C$  = Média dos lados da coluna rectangular

$t$  = Espessura de parede da coluna

$\sigma_0$  = Tensão de escoamento média

$\sigma_u$  = Limite de resistência à tração

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

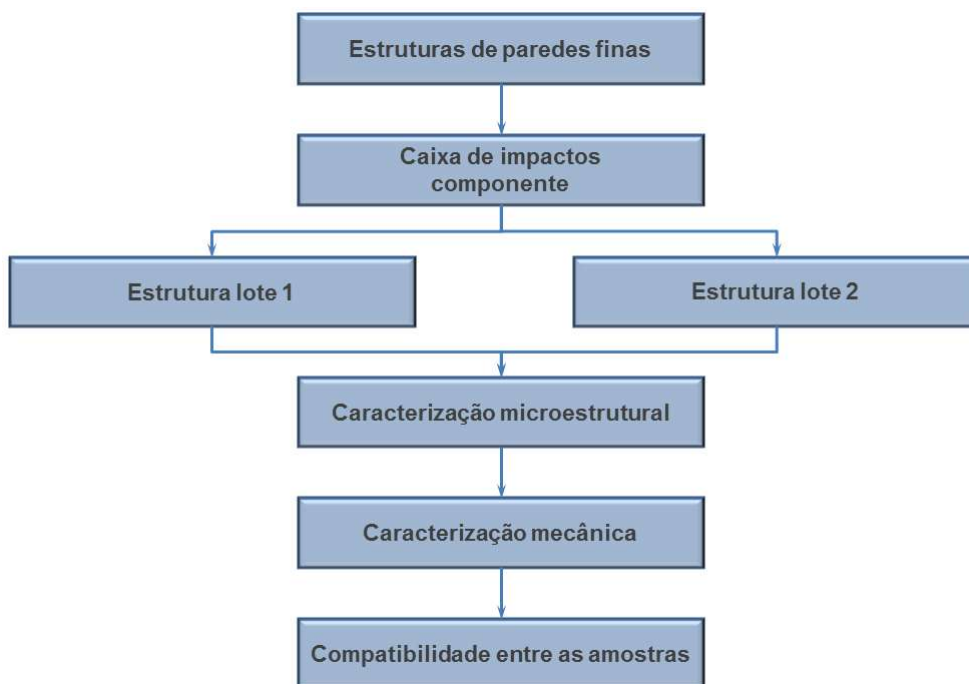
A estrutura de paredes finas foi caracterizada por meio de ensaios composição química, dureza e tração e avaliação da microestrutura. Sobre o componente seriado foram realizados ensaios de compressão axial e ensaios de tração quase estática a diferentes taxas de deformação.

#### 3.1. Estrutura e corpos de prova

As estruturas, de fabricação seriada, foram obtidas em dois períodos distintos, parte das amostras foi obtida no ano de 2016 e o restante no ano de 2017. Por isto, as análises conduzidas neste estudo foram divididas em duas etapas.

A primeira etapa, exibida Figura 27, corresponde a análise dos materiais utilizados para fabricação das caixas de impacto por meio da verificação da composição química, análise microestrutural e análise mecânica, que tinha por objetivo verificar a compatibilidade entre os materiais do lote 1 de 2016 e do lote 2 de 2017.

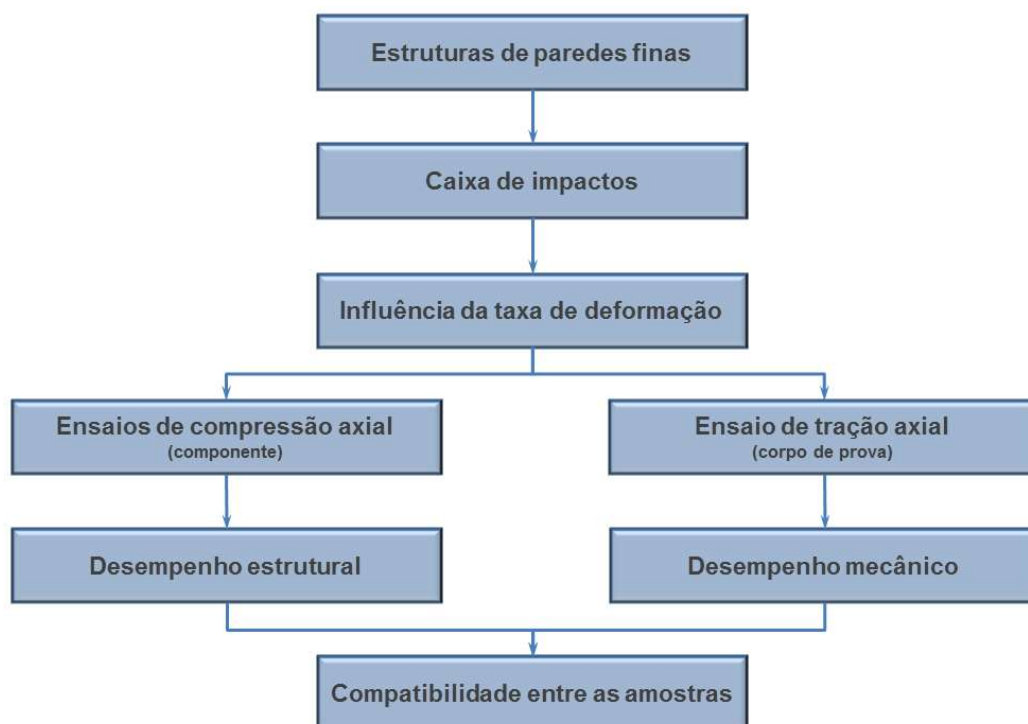
Figura 27 - Diagrama da etapa 1 para avaliação da compatibilidade entre as amostras



Fonte: Autor, 2017.

A segunda etapa, exibida na Figura 28, corresponde à avaliação do desempenho do componente por meio do ensaio de compressão axial quase estática e do ensaio de tração a diferentes taxas de deformação.

Figura 28 - Diagrama da etapa 2 para avaliação do desempenho da caixa de impactos



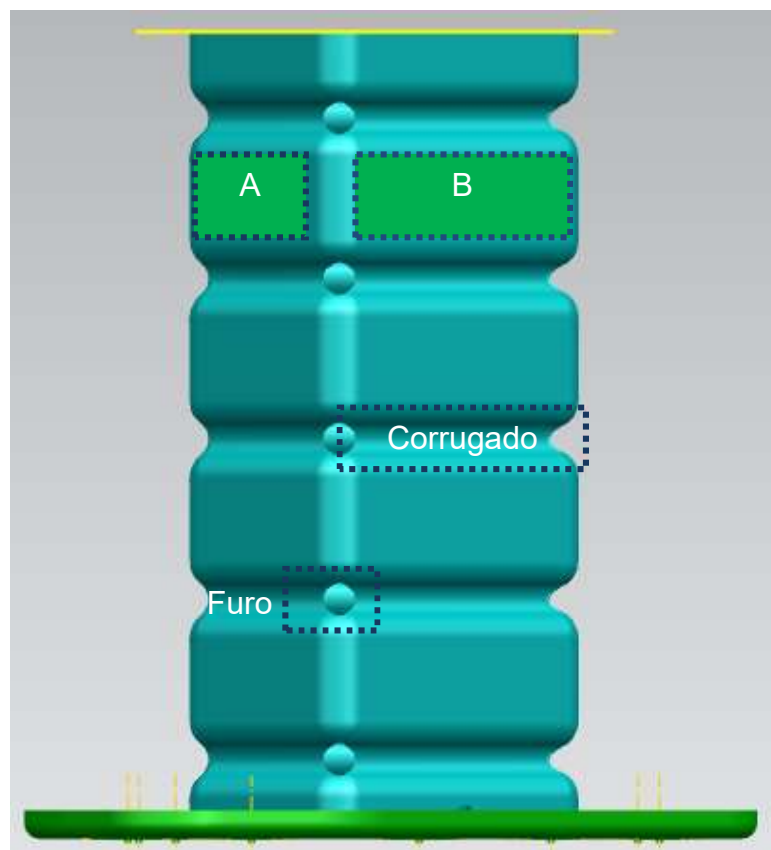
Fonte: Autor, 2017.

A caixa de impactos, exibida esquematicamente na Figura 29, foi utilizada para os ensaios de compressão quase estáticos. A partir desta estrutura, também foram retirados os corpos de prova para análise química, dureza, microscopia ótica na região A e, na região B foram retirados os corpos de prova para ensaios de tração. Com o auxílio de um micro retífica, a estrutura foi seccionada entre seus corrugados para a retirada dos corpos de prova, exibidos na Figura 30.

A caixa de impactos, utilizada nesta avaliação, possui geometria retangular e é formada por diversos corrugados e furos. Sua seção retangular (112 x 77,5 mm) é obtida por meio do dobramento das chapas e fechamento das partes por solda a ponto. Possui espessura nominal de 1,6 mm e comprimento total médio de 240 mm. Os corrugados, assim como os furos em suas quinas, tem a função de diminuir os

picos de força ( $F_{\max}$ ) e as força médias ( $F_{\text{med}}$ ) provenientes dos picos e vales alcançados durante a compressão da estrutura.

Figura 29 – Estrutura de paredes finas utilizada para os ensaios.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 30 – Amostras para caracterização laboratoriais.



Fonte: Autor, 2017.

Todos os ensaios apresentados neste trabalho foram conduzidos nos laboratórios de materiais e laboratórios de ensaios experimentais da FCA LATAM – centro de P&D Giovanni Agnelli.

### **3.2. Análise da composição química**

Para a análise da composição química, o material foi cortado novamente para redução das amostras retiradas da região A, após este corte as amostras ficaram com dimensão final de 15x15 mm. O corte destas amostras foi realizado utilizando a máquina de cortes da marca Struers modelo SECOTM-15/-50 e a seguir 2 amostras, uma de cada lote, foram encaminhadas para a análise química. O instrumento utilizado na análise foi um espectrômetro de emissão ótica da marca SPECTRO/AMETEK modelo spectromaxx que utiliza o método de excitação do arco de centelha para determinação da composição química da amostra metálica. Em cada amostra foi realizado um total de 3 verificações dos elementos químicos.

### **3.3. Análise metalográfica.**

Para a análise da microestrutura, foi realizado um corte das amostras, lote 1 e lote 2, retiradas da área A deixando-as com uma dimensão de 10 x 15 mm. O corte das amostras foi realizado com disco abrasivo na máquina de corte Struers Discotom-2, cujo disco era refrigerado com líquido refrigerante simultaneamente ao corte das amostras. Obteve-se 4 corpos de provas.

Foi realizado embutimento a quente das amostras em uma máquina Struers Prontopress-20. Para o processo de embutimento utilizou-se resina acrílica em pó da marca Arotec. O embutimento foi realizado com pressão nominal de 150 Kgf/mm<sup>2</sup>, tempo de aquecimento de 8 minutos e resfriamento de 4 minutos.

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento das amostras, realizou-se o lixamento das amostras com o equipamento Struers Abramim. As amostras foram posicionadas simetricamente na lixadeira automática. A etapa de lixamento foi realizada utilizando sequencialmente as lixas de granulometrias #180, #220, #320, #400, #600, #1200 e #2000 mesh. As amostras foram lixadas por 1,5 minutos e uma pressão nominal de 300 Kgf/mm<sup>2</sup> em cada lixa, seguindo a ordem das granulometrias citadas acima e refrigeradas com água corrente. Terminado o processo de lixamento

lavou-se as amostras em água corrente. Após o lixamento deu-se início ao processo de polimento das amostras.

O polimento foi executado na máquina Struers Abramim, na qual foi substituído o prato de lixamento pelo prato de polimento de pano de naplan. Para abrasão das amostras foi utilizado Alumina em suspensão com granulometria  $1,0\ \mu\text{m}$  e água destilada para lubrificação. O tempo de polimento foi de 10 minutos com pressão de  $100\ \text{Kgf/mm}^2$ . Após o polimento, as amostras foram limpas com algodão em água corrente.

Foi utilizado álcool etílico para finalizar a limpeza das amostras que foram secas utilizando ar quente. Na Figura 31 são exibidas as amostras embutidas após a preparação metalográfica. Após as etapas de embutimento e polimento dos corpos de prova, foi realizado ataque químico com reagente Nital 3% por imersão.

Figura 31 – Embutimento dos corpos de prova para análise metalográfica.

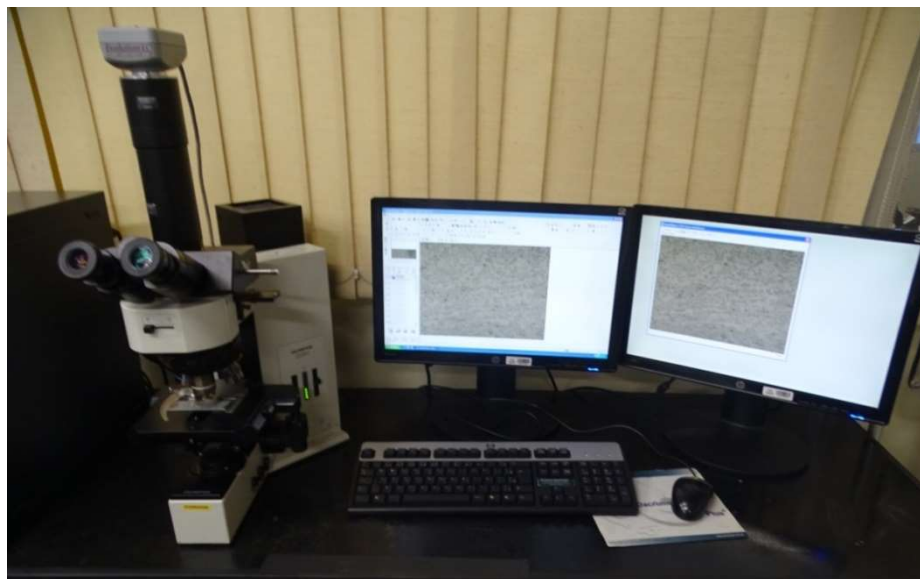


Fonte: Autor, 2017.

O reagente Nital é responsável pela corrosão do constituinte martensita mais outros, aparecendo em coloração escura. A ferrita aparece na microestrutura com uma coloração clara.

Em seguida, as amostras foram observadas no microscópio óptico da marca Olympus, conforme exibido na Figura 32.

Figura 32 – Microscópio ótico utiliza na avaliação metalográfica



Fonte: Autor, 2017.

### 3.4. Ensaio de dureza

O ensaio de dureza Vickers, utilizado nesta avaliação, consiste em medir por meio de um microscópio o tamanho da indentação deixada pelo penetrador de diamante no formato de uma pirâmide. Esta pirâmide possui ângulo de 136° entre as faces e é pressionada contra a amostra com uma carga de teste definida entre 10 kgf e 100 kgf. Para os ensaios de microdureza foram utilizadas as amostras embutidas em resina acrílica. A carga adotada foi de 10 kgf e o tempo de ensaio foi de 15 segundos. Após a aplicação da carga mediu-se as diagonais deixadas pelo penetrador. Com média das duas diagonais medidas aplica-se a Equação 9 para se determinar o valor da dureza. Foram realizadas 3 medições da dureza em cada amostra.

Equação 9 – Cálculo da dureza vickers

$$HV = 1,854 \times \frac{P}{d^2}$$

Onde:

P = Força, unidade em kgf

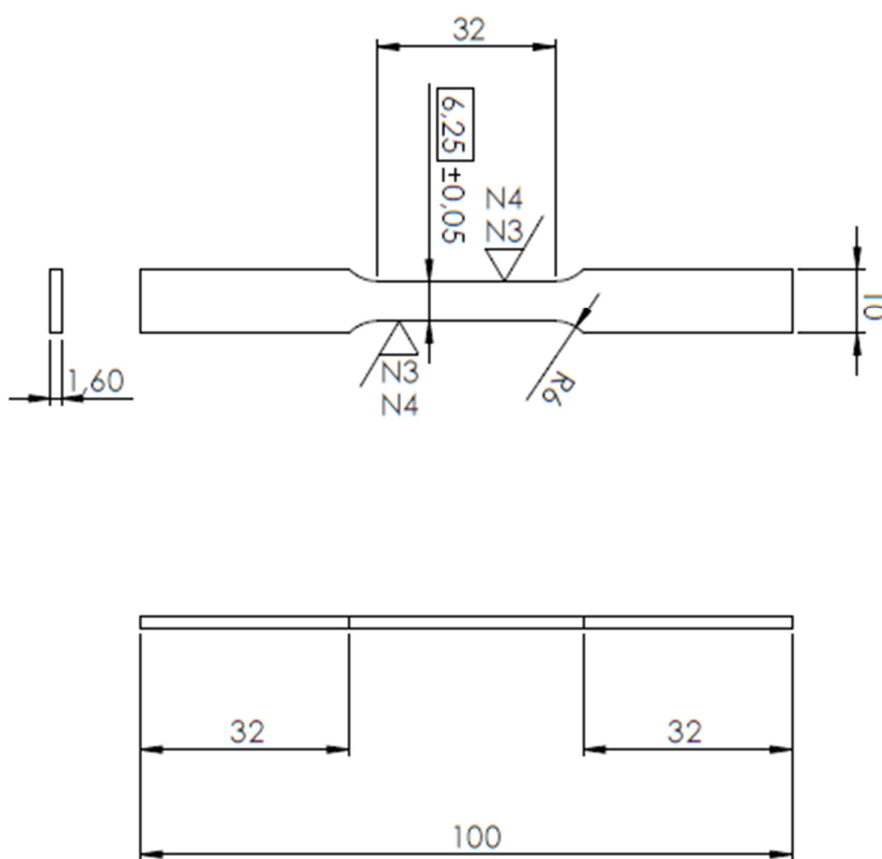
d = diagonal média da impressão no corpo de prova, unidade em metros.

### 3.5. Ensaio de tração

Para os ensaios de tração, as amostras do lote 1 e do lote 2, foram retiradas da área B da caixa de impactos.

Os ensaios de tração seguiram os requisitos da norma ASTM E8/E8M. Os corpos de prova reduzidos, classificados na norma de referência como “subsize”, foram usinados a partir das amostras retiradas da região B. Na Figura 33 são exibidas as dimensões da amostra. Foi necessário realizar os ensaios com os corpos de prova reduzidos devido ao tamanho da amostra inicial.

Figura 33 – Corpo de prova reduzido conforme ASTM E8/E8M



Fonte: Autor, 2017.

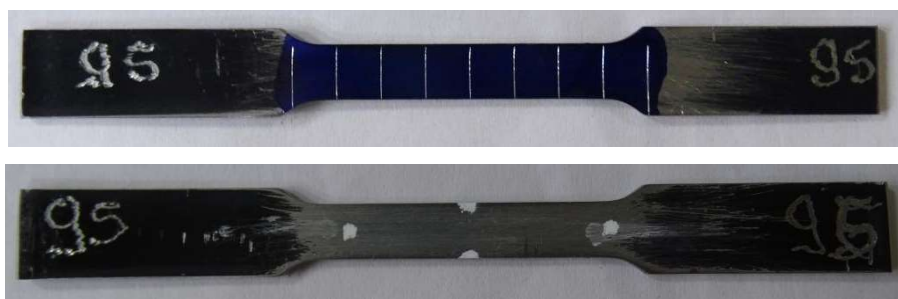
Os ensaios foram conduzidos em uma máquina de tração universal da marca Instron modelo 4467 com capacidade de carga de 30,0 kN e extensômetro óptico, com sistema de aquisição de dados Blue Hill 2. A velocidade ensaio para caracterização inicial dos lotes 1 e 2 foi de 0,45 mm/min - taxa de deformação equivalente a 0,00025



$s^{-1}$  - durante a tração no regime elástico e 5,625 mm/min - taxa de deformação equivalente a  $0,003125 s^{-1}$  - após o escoamento do material. Na Figura 34 são apresentados os corpos de prova de tração e na Figura 35 é exibida a máquina de tração utilizada nos ensaios.

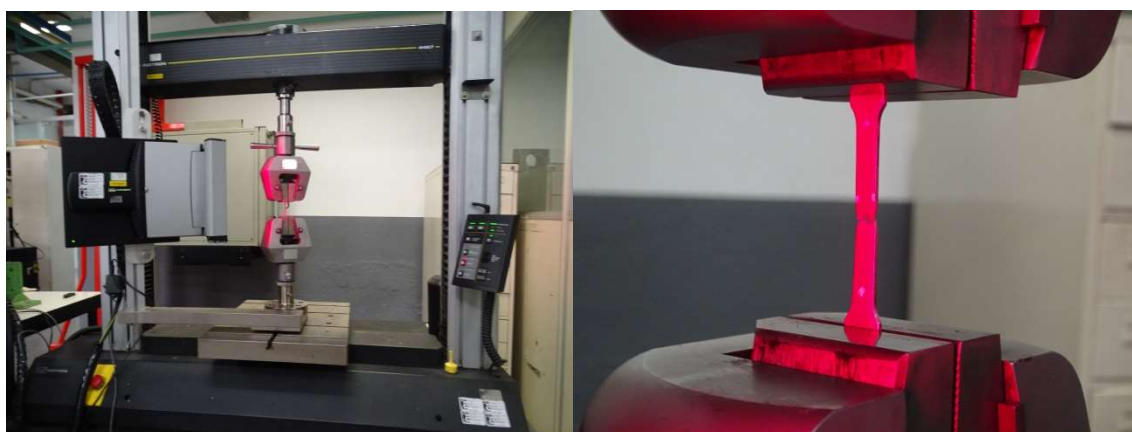
Além do ensaio para caracterização dos lotes foram realizados ensaio a velocidades superiores para a avaliação da taxa de deformação sobre as características do material. As velocidades usadas nestes ensaios foram de 27 mm/min - taxa de deformação equivalente a  $0,015 s^{-1}$  - no regime elástico e 337,5 mm/min - taxa de deformação equivalente a  $0,1875 s^{-1}$  - no regime plástico.

Figura 34 – Corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Autor, 2017.

Figura 35 – Máquina de tração Instron 4467.



Fonte: Autor, 2017.

A partir dos dados de força e deslocamento coletados durante o ensaio, elaboraram-se as curvas tensão *versus* deformação de engenharia e também as curvas de tensão *versus* deformação verdadeira, por meio das Equações 10 a 13.

Equação 10 – Tensão normal de engenharia

$$\sigma = \frac{P}{A_i}$$

Equação 11 – Deformação de engenharia (%)

$$e = \frac{\Delta l}{l_i}$$

Equação 12 – Deformação verdadeira

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

Equação 13 – Tensão normal verdadeira

$$\sigma_v = \sigma(1 + e)$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão de engenharia [MPa]

$P$  = Força [N]

$A_i$  = Área da seção inicial [m<sup>2</sup>]

$e$  = Deformação de engenharia [m]

$\Delta l$  = Variação do comprimento útil [m]

$l_i$  = Comprimento inicial

$\varepsilon$  = Deformação verdadeira

$\sigma_v$  = Tensão verdadeira [MPa]

A partir das curvas de tensão *versus* deformação verdadeiras, é possível a determinação do expoente do encruamento ( $n$ ), parâmetro que compõem a equação de Hollomon descrita na Equação 14.

Equação 14 – Equação de Hollomon

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão de engenharia [MPa]

$K$  = Coeficiente de resistência [MPa]

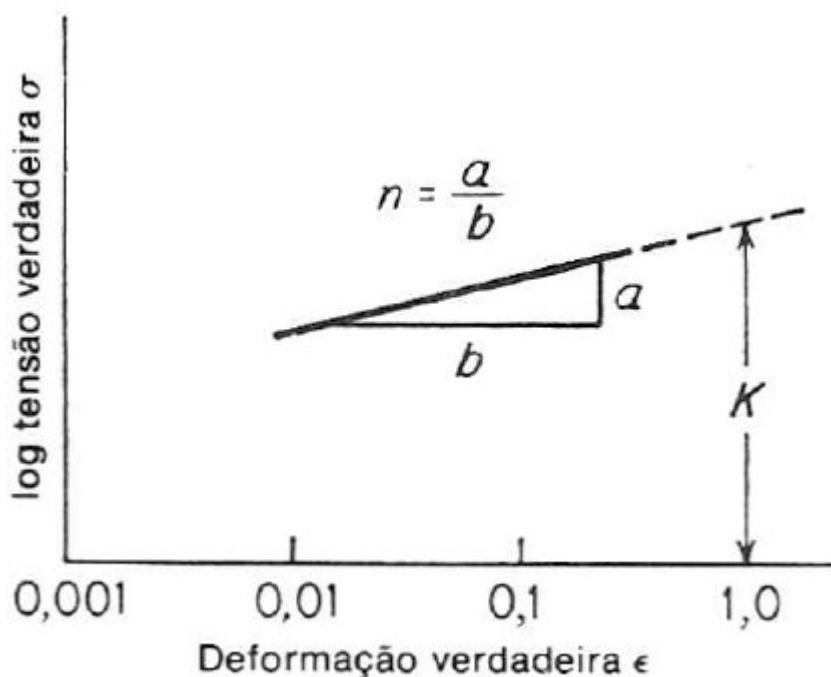
$\varepsilon$  = Deformação verdadeira

$n$  = Expoente do encruamento

Segundo Dieter (1981) a inclinação linear da reta, obtida do gráfico logarítmico da tensão verdadeira-deformação verdadeira até a carga máxima, resulta no expoente do encruamento ( $n$ ). Na Figura 36 é exibida uma representação do gráfico logarítmico da curva tensão-deformação verdadeira. O coeficiente  $K$  é dado pela tensão verdadeira quando  $\varepsilon = 1$  ( $\ln \varepsilon = 0$ ).

Segundo Akbarpour e Ekrami (2008), um material com alto valor de  $n$  se mostra melhor para processo de fabricação que envolva deformações plásticas, uma vez que quanto maior o valor de  $n$ , maior a taxa de encruamento. Materiais com valores elevados de  $n$  indicam que o material é capaz de suportar mais deformação antes da estrição.

Figura 36 - Gráfico logarítmico da curva tensão-deformação verdadeira



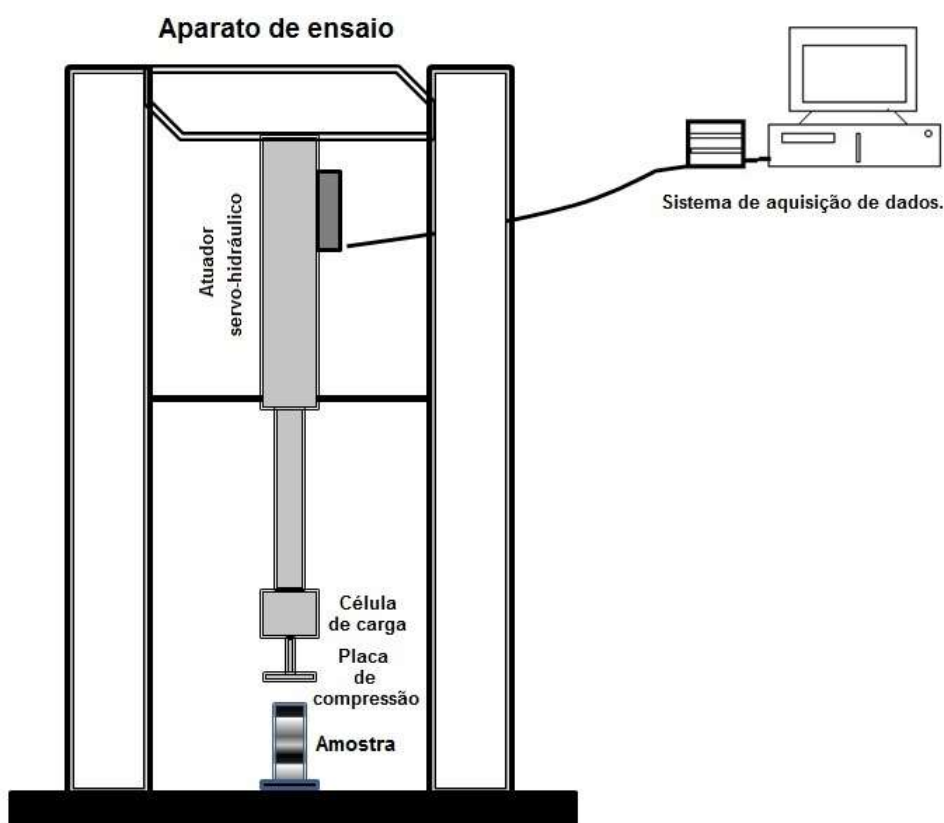
Fonte: Dieter, 1981.

### 3.6. Ensaio de compressão quase estática

Os ensaios de compressão axial quase estático foram realizados utilizando um atuador servo-hidráulico modelo 243.20 do fabricante MTS com transdutor de

deslocamento da haste do pistão do tipo magnetoestrutivo Temposonics e capacidade nominal de  $\pm 375$  mm. A célula de carga instalada neste atuador, do fabricante MTS modelo 661.20F-03, possui capacidade nominal de  $\pm 100$  kN. Este conjunto foi fixado a um sistema de colunas para realizar a compressão axial das estruturas conforme o esquema da Figura 37. O sistema de aquisição de dados é da marca MTS e a taxa de aquisição utilizada nos ensaios de compressão foi de 1000 Hertz. O ensaio foi realizado impondo a estrutura um deslocamento de 75 mm e a força correspondente à reação da estrutura foi obtida simultaneamente ao deslocamento imposto, produzindo uma curva de força *versus* deslocamento.

Figura 37 – Configuração do ensaio de compressão axial quase estática.



Fonte: Autor, 2017.

As estruturas avaliadas neste ensaio tiveram seu comprimento medido antes da realização dos ensaios. Estas medições são apresentadas na Tabela 2. Antes de cada ensaio de compressão as estruturas eram fixadas através de mordentes a mesa ranhurada para que não houvesse giro ou movimentação da peça durante os ensaios,

conforme apresentado na Figura 38. A haste pistão possui uma placa de aço a qual foi deslocada contra a estrutura enquanto a célula de carga registrava os valores de forças compressivas.

As estruturas foram comprimidas às velocidades de 840 mm/min - taxa de deformação equivalente a  $0,058 \text{ s}^{-1}$  e a 2520 mm/min - taxa de deformação equivalente a  $0,18 \text{ s}^{-1}$ .

Tabela 2 – Comprimento das caixas de impacto antes dos ensaios de compressão.

| Estrutura  | Medição # | Medida [mm] | Estrutura  | Medição # | Medida [mm] |
|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|
| 1 – Lote 1 | 1         | 240         | 5 – Lote 2 | 1         | 240         |
|            | 2         | 240         |            | 2         | 240         |
|            | 3         | 240         |            | 3         | 240         |
| 2 – Lote 1 | 1         | 236         | 6 – Lote 2 | 1         | 236         |
|            | 2         | 236         |            | 2         | 236         |
|            | 3         | 236         |            | 3         | 237         |
| 3 – Lote 1 | 1         | 240         | 7 – Lote 2 | 1         | 243         |
|            | 2         | 240         |            | 2         | 243         |
|            | 3         | 240         |            | 3         | 245         |
| 4 – Lote 1 | 1         | 237         | 8 – Lote 2 | 1         | 239         |
|            | 2         | 236         |            | 2         | 238         |
|            | 3         | 237         |            | 3         | 238         |

Fonte: Autor, 2017.

Figura 38 – Caixa de impactos sujeita a compressão axial quase estática.



Fonte: Autor, 2017.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Composição química.

Para a realização deste estudo foram utilizados duas estruturas de lotes de fabricação distintos. Diante disto é necessária uma avaliação individual de cada lote. A composição média dos elementos químicos do aço objeto deste estudo é apresentada na Tabela 3.

Pode-se verificar que há diferença entre os elementos da amostra 1 e amostra 2. Os aços bifásicos, chamados comumente de DP (*dual phase*) acompanhado do valor nominal de limite de resistência à tração, podem ser classificados tecnicamente pela norma ASTM A1088. Na Figura 39 são exibidos os limites de elementos químicos para os aços complexos (CP), bifásicos (DP) e transformação plástica induzida (TRIP). Ao se relacionar a composição química das duas amostras com o que é indicado na norma ASTM A1088 fica evidente que os aços deste estudo poderiam ser enquadrados em qualquer uma das designações/grade da norma. Neste caso somente a análise química não é suficiente para a classificação dos aços objetos deste estudo.

Tabela 3 – Composição química dos materiais em % peso.

| Composição química (% em peso) do aço DP600 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |         |        |
|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|
| Elemento                                    | C     | Mn    | Al    | Si    | P     | S     | Cu    | Ni    | Cr+Mo | V+Nb+Ti | N      |
| Amostra 1 - lote 1<br>[% em peso]           | 0,097 | 1,620 | 0,250 | 0,300 | 0,022 | 0,005 | 0,012 | 0,003 | 0,196 | 0,018   | <0,001 |
| Amostra 2 - lote 2<br>[% em peso]           | 0,076 | 1,689 | 0,280 | 0,250 | 0,020 | 0,004 | 0,017 | 0,007 | 0,163 | 0,012   | <0,001 |

Fonte: Autor, 2017

Figura 39 – Composição química requerida segundo ASTM A1088

| TABELA 1 Requisitos Químicos para Designação de Chapas de Aço, CP, DP, e TRIP                |      |          |       |       |      |      |       |         |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-------|-------|------|------|-------|---------|-----|
| Composição, % - Elemento de análise de calor, max (a menos que seja mostrado de outra forma) |      |          |       |       |      |      |       |         |     |
| Designação/Grade                                                                             | C    | Mn+Al+Si | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr+Mo | V+Nb+Ti | N   |
| <b>CP</b>                                                                                    |      |          |       |       |      |      |       |         |     |
| 600T/350Y                                                                                    | 0.18 | 5.30     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.00  | 0.35    | ... |
| 780T/500Y                                                                                    | 0.18 | 5.50     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.00  | 0.35    | ... |
| 980T/700Y                                                                                    | 0.25 | 5.20     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.00  | 0.35    | ... |
| <b>DP</b>                                                                                    |      |          |       |       |      |      |       |         |     |
| 450T/250Y                                                                                    | 0.15 | 3.00     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.00  | 0.35    | ... |
| 490T/290Y                                                                                    | 0.15 | 3.40     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.00  | 0.35    | ... |
| 590T/340Y                                                                                    | 0.17 | 4.75     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.40  | 0.35    | ... |
| 780T/420Y                                                                                    | 0.18 | 5.40     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.40  | 0.35    | ... |
| 980T/550Y                                                                                    | 0.23 | 6.00     | 0.080 | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 1.40  | 0.35    | ... |
| <b>TRIP</b>                                                                                  |      |          |       |       |      |      |       |         |     |
| 690T/410Y                                                                                    | 0.32 | 6.20     | 0.12  | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 0.60  | 0.40    | ... |
| 780T/440Y                                                                                    | 0.32 | 6.70     | 0.12  | 0.015 | 0.20 | 0.50 | 0.60  | 0.40    | ... |

Fonte: Adaptado de ASTM A1088, 2013.

Com relação à análise da composição química das duas amostras avaliadas, destacam-se as diferenças entre os elementos químicos carbono e o somatório de manganês, alumínio e silício.

Segundo Chiaverini (1987) o carbono é o elemento essencial na liga ferro-carbono e a influência seu teor na liga está diretamente ligado às propriedades mecânicas dos aços, quanto maior o teor de carbono, maiores propriedades mecânicas. O manganês pode-se dissolver na ferrita e aumentar a sua dureza e resistência, além de se associar e formar outros compostos que aumenta mais ainda a dureza e a resistência do aço. O alumínio age como um regulador do crescimento dos grãos dos aços e o silício aumenta ligeiramente a dureza da ferrita.

Li et al. (2016) concluíram que o maior teor de manganês resulta em uma maior temperabilidade causada pela transformação da austenita para ferrita a uma temperatura menor, além de uma microestrutura mais refinada.

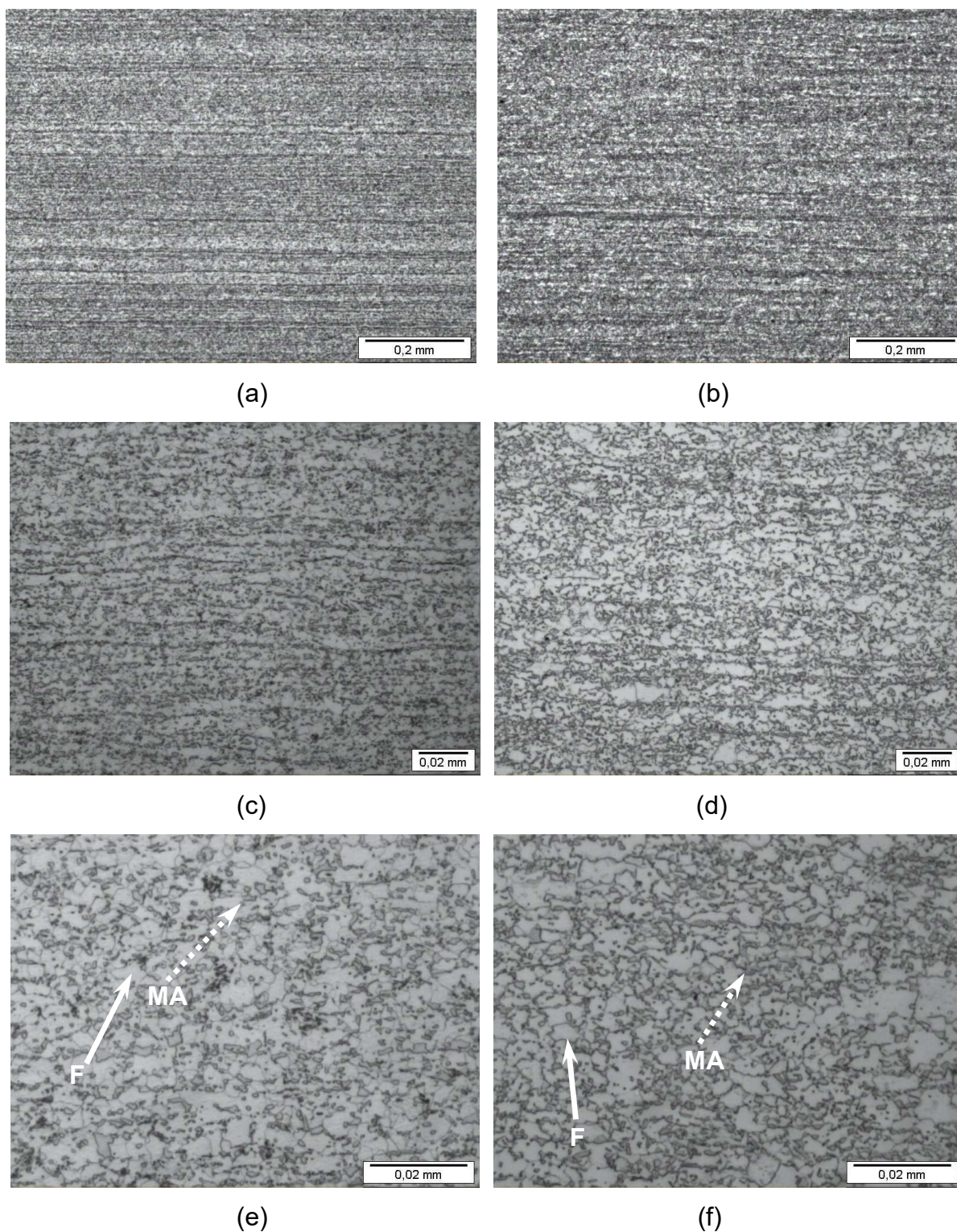
Melero-Jimenez et al. (2009) concluíram que um aumento no teor de alumínio resulta em uma maior estabilidade da fase austenítica imediatamente após o período de recozimento, mantendo temperável até a temperatura ambiente.

#### **4.2. Análise metalográfica**

A microscopia óptica das amostras de aços retiradas do lote 1 e do lote 2 nas condições iniciais (estrutura proveniente de fábrica) são exibidas na Figura 40. De forma geral, os lotes 1 e 2 apresentam microestruturas compostas pelos constituintes ferrita – indicado pela seta contínua - e constituinte MA (martensita + austenita retida) - indicado pelas setas tracejadas - ambas indicadas na micrografias das Figuras 38(e) e 38(f). Ambos os lotes apresentaram matriz ferrítica e o constituinte MA disposto em torno do contorno de grão em formas de ilhas. A diferença qualitativa, observada entre os dois lotes avaliados, está no formato e tamanho dos grãos de ferrita e na quantidade de constituinte MA. A microestrutura do lote 1 apresenta grãos de ferrita de forma e tamanhos irregulares, sua forma varia entre grãos elípticos e circulares, o constituinte MA está disperso e desordenado na matriz de ferrita. Já a microestrutura do lote 2, apresenta-se mais homogênea e qualitativamente há uma quantidade superior do constituinte MA.



Figura 40 – Micrografia ótica dos aços do lote 1 e lote 2



(a) lote 1 ampliação 100 vezes; (b) lote 2 ampliação 100 vezes; (c) lote 1 ampliação 500 vezes; (d) lote 2 ampliação 500 vezes; (e) lote 1 ampliação 1000 vezes; (f) lote 2 ampliação 1000 vezes – ataque Nital 3%.

Fonte: Autor, 2017.

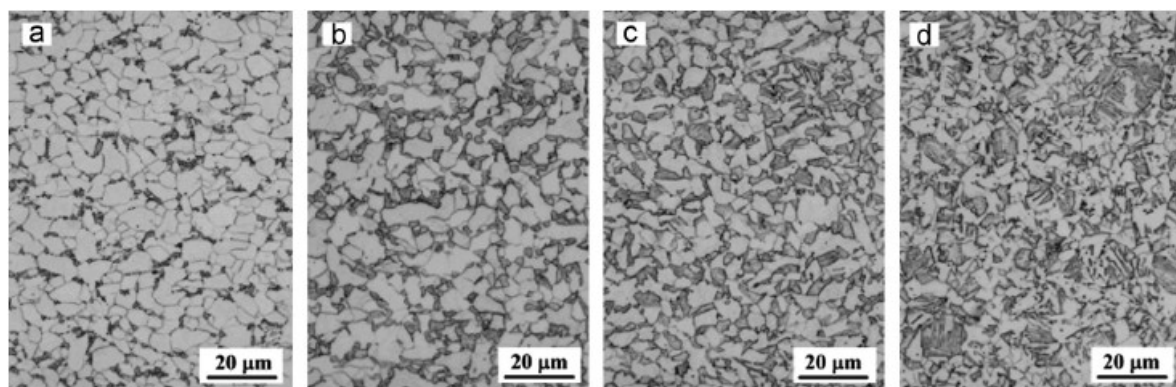


Foi observado por Rosenberg et al. (2013), em um aço bifásico (0,062%C - 1,15%Mn - 0,020%Si - 0,028%Al), uma microestrutura mais homogênea, atribuída a uma superior temperatura inicial de têmpera. Foi ainda constatado que uma diminuição do tamanho de grão em contrapartida a um maior volume de martensita.

A micro estrutura do lote 1 exibida na Figura 40(e) possui boa semelhança com a micro estrutura da Figura 41(a). Da mesma forma que a microestrutura do lote 2 exibida na Figura 40(f) possui boa semelhança que a microestrutura da Figura 41(b). Indicando que além da diferença de constituintes químico, pode ter sido adotada uma maior temperatura de recozimento intercrítico para lote 2.

Krajewski e Nowacki (2014) constataram que os grãos refinados de ferrita haviam sido obtidos retardando a res cristalização da austenita devido à presença dos microligantes alumínio, vanádio, titânio e nióbio. Da mesma forma que o maior percentual de alumínio presente na composição química do lote 2 pode ter contribuído para a formação de mais constituintes MA que no lote 1.

Figura 41 – Microestrutura de um aço temperado a partir de diferentes temperaturas intercríticas.



Temperatura intercrítica pré-têmpera (a) 740°C; (b) 780°C; (c) 820°C; (d) 8600°C

Fonte: Rosenberg et al., 2013.

Uma vez que os materiais avaliados neste estudo foram obtidos de um componente seriado, as condições de processamento prévio não são conhecidas detalhadamente. No entanto, é possível atribuir as diferenças microestruturais ao tratamento de recozimento e a presença em maior proporções de elementos microligantes no aço pertencente ao lote 2.

### 4.3. Ensaio de dureza

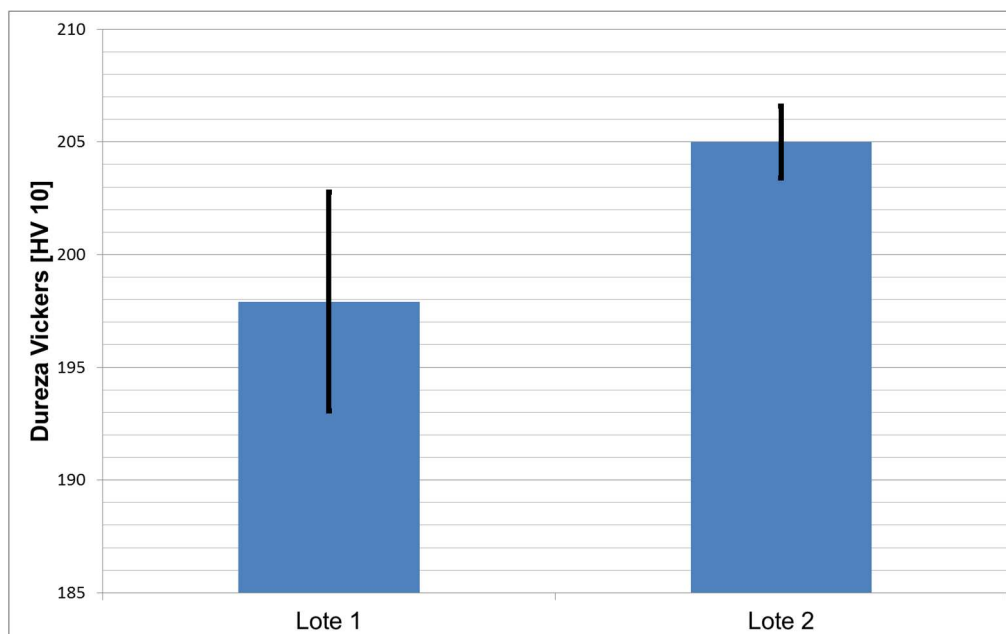
Os resultados dos ensaios de dureza Vickers média, realizados para amostras dos lotes 1 e 2 são mostrados na Tabela 4, juntamente com o desvio padrão obtido destes ensaios. Na Figura 42 é possível verificar graficamente que a média da dureza medida no lote 1 é ligeiramente inferior a dureza média medida no lote 2.

Tabela 4 – Dureza Vickers para as amostras de aço dos lotes 1 e 2.

| Dureza Vicker [HV10] | Amostra 1 - lote 1 | Amostra 2 - lote 2 |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Média                | 197,9              | 205,0              |
| Desvio padrão        | 4,9                | 1,6                |

Fonte: Autor, 2017.

Figura 42 – Gráfico representativo das durezas médias obtidas nos lotes 1 e 2



Fonte: Autor, 2017.

Ao se estabelecer uma relação entre análise química, microscopia óptica e as durezas obtidas, destaca-se que a dureza ligeiramente superior observada no lote 2 está de acordo com a maior proporção de martensita verificada qualitativamente no aço deste lote. Outro dado importante a se ressaltar é que as medições de dureza realizada na amostra de aço do lote 1 foram mais dispersas quando comparadas as as medições de dureza do lote 2, fato a ser observado pelo cálculo do desvio padrão

das amostras. Este fato pode estar ligado a distribuição dispersa do constituinte MA na microestrutura do lote 1.

Por outro lado o constituinte martensita, podem exercer um efeito contrário nas medições de dureza. Segundo Mazaheri et al. (2014), o aumento da dureza pode ocorrer devido a presença de um constituinte de maior dureza, neste caso, a martensita. No entanto, devido ao processamento do material, considerando uma maior temperatura intercrítica inicial, implicando em uma maior quantidade de austenita antes do resfriamento brusco, resultaria em uma quantidade menor de carbono presente na martensita, cuja dureza depende intrinsecamente do seu teor de carbono. Ou seja, a martensita, presente em maior quantidade na microestrutura do lote 2, poderia ser mais macia que a martensita da micro estrutura do lote 1.

Lai et al. (2016) constatou em seu estudo que a dureza da martensita exerce grande influência sobre a resistência quando o volume de martensita é maior. Ainda, o alongamento do material não é substancialmente afetado pela dureza da martensita de forma que uma boa relação entre resistência-ductibilidade pode ser alcançada ainda com a dureza elevada da martensita.

#### 4.4. Ensaio de tração

As propriedades mecânicas dos materiais pertencentes aos lotes 1 e 2, retirados das caixas de impacto, e obtidas no ensaio de tração axial realizados conforme ASTM E8/E8M são exibidos na Tabela 5. Estes ensaios foram realizados com as taxas de deformação de  $0,00025 \text{ s}^{-1}$  no regime elástico e  $0,003125 \text{ s}^{-1}$  no regime plástico, conforme indicado pela norma. A Figura 43 mostra as curvas tensão-deformação para os ensaios de tração, as curvas foram elaboradas até os valores máximos de tensão.

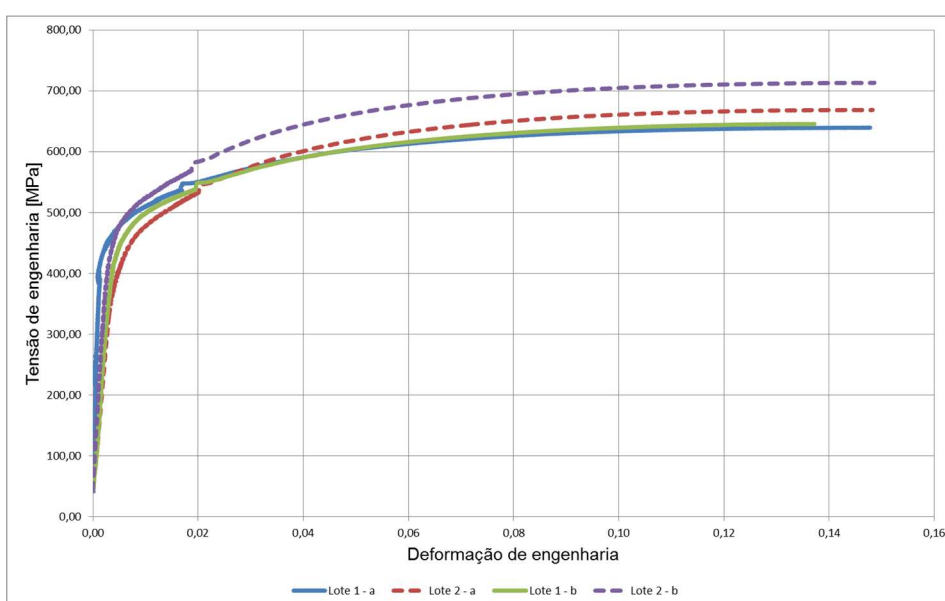
Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos aços lote 1 e lote 2.

| Corpo de Prova | Tensão de escoamento [MPa] | Resistência a tração [MPa] | Alongamento [%] | Coefficiente de encruamento (n) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Lote 1 - a     | 456,26                     | 639,52                     | 25              | 0,14                            |
| Lote 1 - b     | 457,89                     | 645,49                     | 21              | 0,15                            |
| Lote 2 - a     | 429,31                     | 668,58                     | 24              | 0,18                            |
| Lote 2 - b     | 476,98                     | 713,30                     | 23              | 0,17                            |

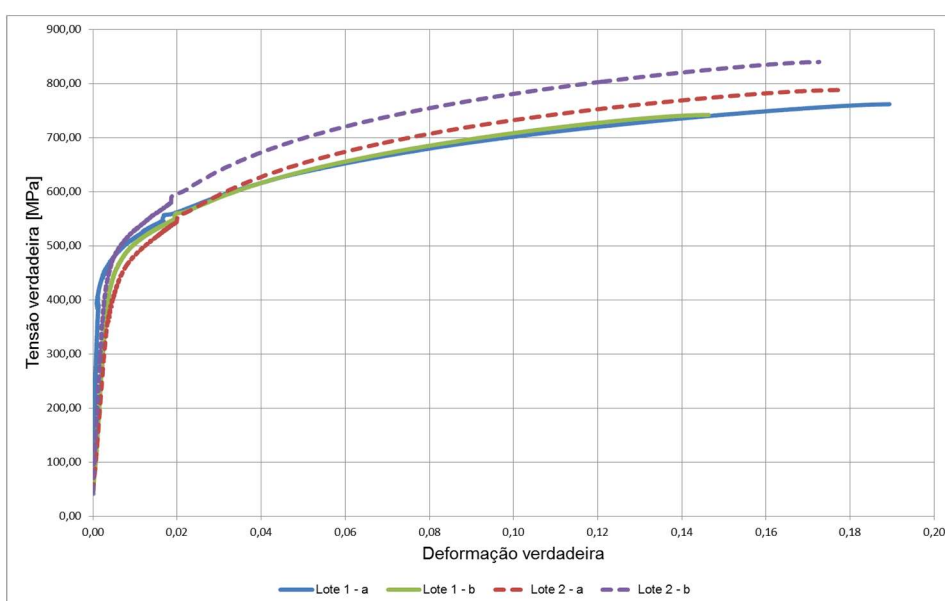
Fonte: Autor, 2017.

Verificou-se que os corpos de prova do lote 2 apresentaram valores de resistência a tração superiores quando comparados ao lote 1. Além da resistência a tração, destaca-se que os valores de coeficiente de encruamento, obtidos a partir dos corpos de prova do lote 2, são superiores. A comparação entre as propriedades mecânicas do lote 1 e 2 são exibidas na Figura 44. Os dados apresentados foram elaborados a partir da média dos resultados de tensão de escoamento e limite resistência à tração de engenharia.

Figura 43 – Curvas tensão-deformação à taxas de deformação padrão.



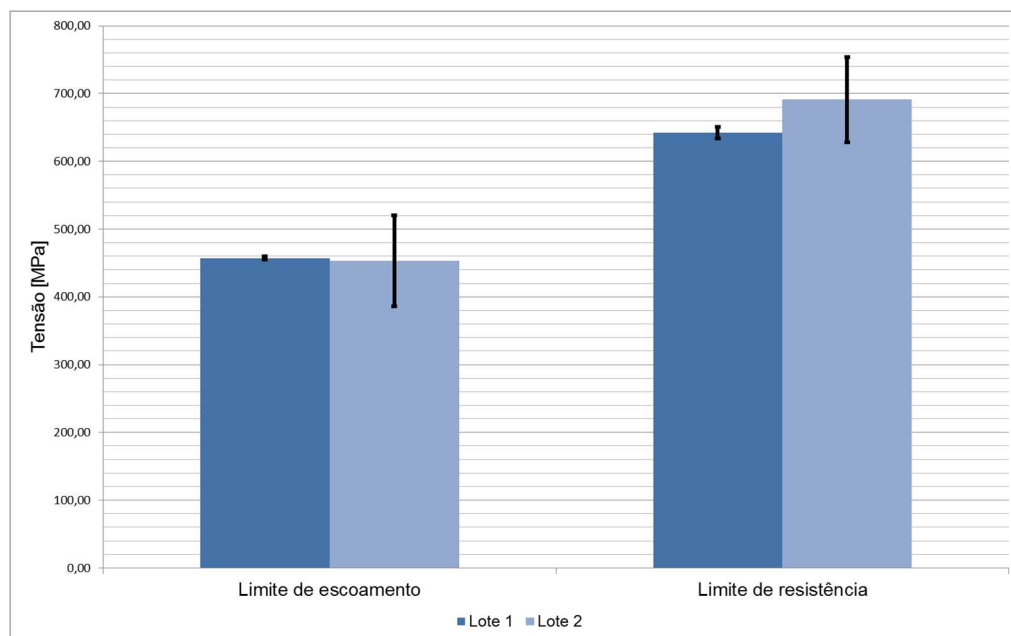
(a) – Tensão-deformação de engenharia



(b) – Tensão-deformação verdadeira

Fonte: Autor, 2017.

Figura 44 – Comparação das propriedades mecânicas do lote 1 e lote 2.



Fonte: Autor, 2017.

Conforme foi observado por Oliver, Jones e Fournalis (2007), o limite resistência à tração aumenta quando se aumenta os níveis de uma segunda fase “dura” como a martensita e bainita. Conforme foi verificado na análise metalográfica as amostras do lote 2 possuíam, qualitativamente, mais martensita que as amostras do lote 1.

Ainda que os valores relativos às propriedades mecânicas dos corpos de prova do lote 1 e do lote 2 não estejam em um mesmo nível de tensão, ambos materiais estão conforme os requisitos de propriedades mecânica indicados pela norma ASTM A1088 e exibidos na Figura 45. Ao se levar em conta a composição química, análise metalográfica e as propriedades mecânicas dos aços pertencentes, ambos os lotes são possíveis de serem classificados como aços bifásicos DP600.

Com o intuito de verificar a influência da taxa de deformação sobre as propriedades mecânicas do aço DP600, foram realizados novos ensaios de tração sobre os corpos de prova dos lotes 1 e 2 por meio do aumento das taxas de deformação em 60 vezes.

Na Tabela 6 são mostradas as propriedades mecânicas dos aços ensaiados a taxas de deformação de  $0,015 \text{ s}^{-1}$  no regime plástico e  $0,1875 \text{ s}^{-1}$  no regime plástico. A Figura 46 mostra as curvas de tensão-deformação dos ensaios de tração axial realizados sobre os lotes 1 e 2 com a taxa de deformação aumentada 60 vezes.

Figura 45 – Propriedades mecânicas requeridas segundo ASTM A1088

**TABELA 2 Requisitos de propriedades mecânicas (longitudinal), Designações de chapas de aço laminadas a frio CP, DP, e TRIP**

| Designação | Grade     | Resistência ao escoamento, min, MPa | Resistência a tração, min, MPa | Alongamento em 50 mm, min, % | <i>n</i> | Índice BH, min, MPa |
|------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|---------------------|
| CP         | 600T/350Y | 350                                 | 600                            | 16                           | ...      | 30                  |
|            | 780T/500Y | 500                                 | 780                            | 10                           | ...      | 30                  |
|            | 980T/700Y | 700                                 | 980                            | 7                            | ...      | 30                  |
| DP         | 450T/250Y | 250                                 | 450                            | 27                           | ≥0.16    | 30                  |
|            | 490T/290Y | 290                                 | 490                            | 25                           | ≥0.15    | 30                  |
|            | 590T/340Y | 340                                 | 590                            | 21                           | ≥0.14    | 30                  |
|            | 780T/420Y | 420                                 | 780                            | 14                           | ≥0.10    | 30                  |
|            | 980T/550Y | 550                                 | 980                            | 8                            | ...      | 30                  |
| TRIP       | 690T/410Y | 410                                 | 690                            | 21                           | ≥0.19    | 30                  |
|            | 780T/440Y | 440                                 | 780                            | 19                           | ≥0.16    | 30                  |

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos aços DP600 com taxa de deformação aumentada.

| Corpo de Prova | Tensão de Escoamento [MPa] | Resistência a tração [MPa] | Alongamento [%] | Expoente de encruamento (n) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Lote 1 - a     | 429,31                     | 668,58                     | 23,57           | 0,18                        |
| Lote 1 - b     | 476,98                     | 713,30                     | 23,36           | 0,17                        |
| Lote 2 - c     | 509,44                     | 734,28                     | 17,22           | 0,13                        |
| Lote 2 - d     | 492,93                     | 723,20                     | 20,48           | 0,15                        |

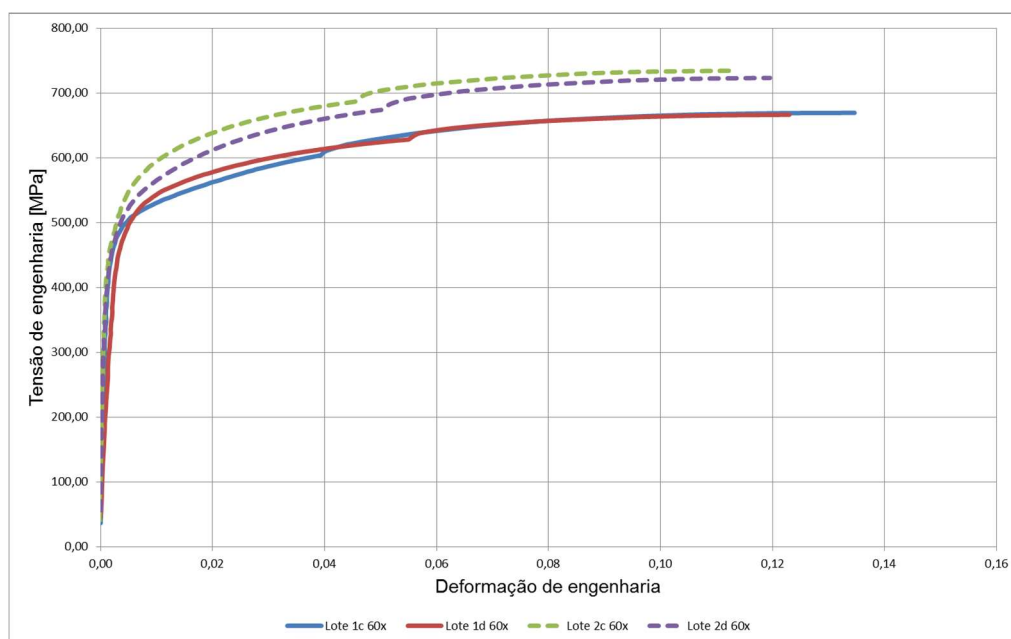
Fonte: Autor, 2017.

Verificou-se que, independente do aumento na taxa de deformação durante o ensaio de tração axial, os corpos de prova do lote 2 apresentaram valores de resistência a tração superiores quando comparados ao lote 1. Foi verificado que o lote 1 apresentou coeficiente de encruamento superior ao lote 2.

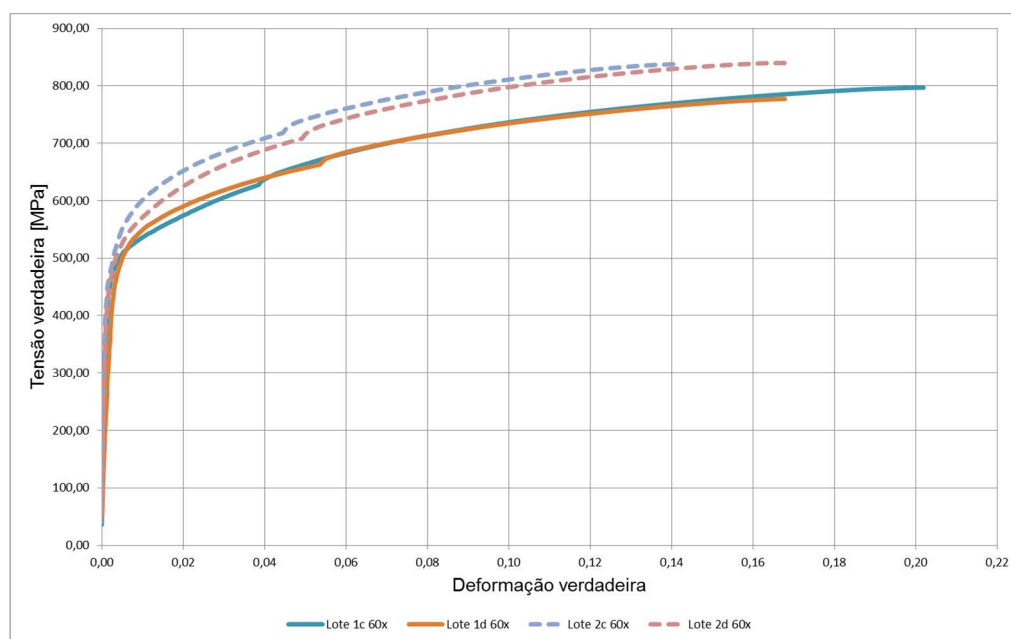
Segundo Pierman et al. (2014), em geral o coeficiente de encruamento aumenta com a quantidade de carbono contida na martensita a um volume fixo. Porém durante seus experimentos foi constatado que algumas amostras tiveram um decaimento do coeficiente de encruamento devido a um amaciamento induzido por danos, o que provoca uma diminuição da ductilidade geral.

Da mesma forma que foi observada por Pierman et al. (2014), os corpos de prova do lote 2 exibiram uma redução da ductilidade, que pode ser constatado através da redução do alongamento.

Figura 46 - Curvas tensão-deformação dos corpos de prova à taxas de deformação aumentada 60 vezes.



(a) – Tensão-deformação de engenharia



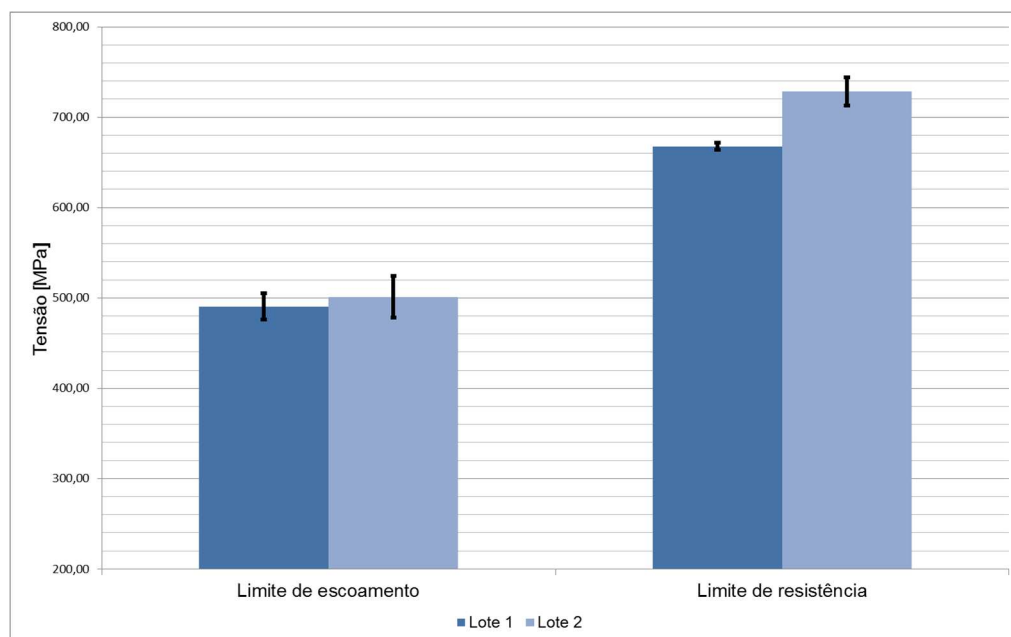
(b) – Tensão-deformação verdadeira

Fonte: Autor, 2017.

A comparação entre as propriedades mecânicas do lote 1 e 2, à taxas de deformação aumenta em 60 vezes, são exibidas na Figura 47. Os dados apresentados foram elaborados a partir da média dos resultados de tensão de escoamento e limite de resistência a tração de engenharia. Ambos os lotes exibiram propriedades

compatíveis com o aço DP600, no entanto, apesar da proximidade de resultados eles não podem ser considerados idênticos.

Figura 47 – Comparação das propriedades mecânicas do lote 1 e lote 2 à taxa de deformação aumentada 60 vezes.



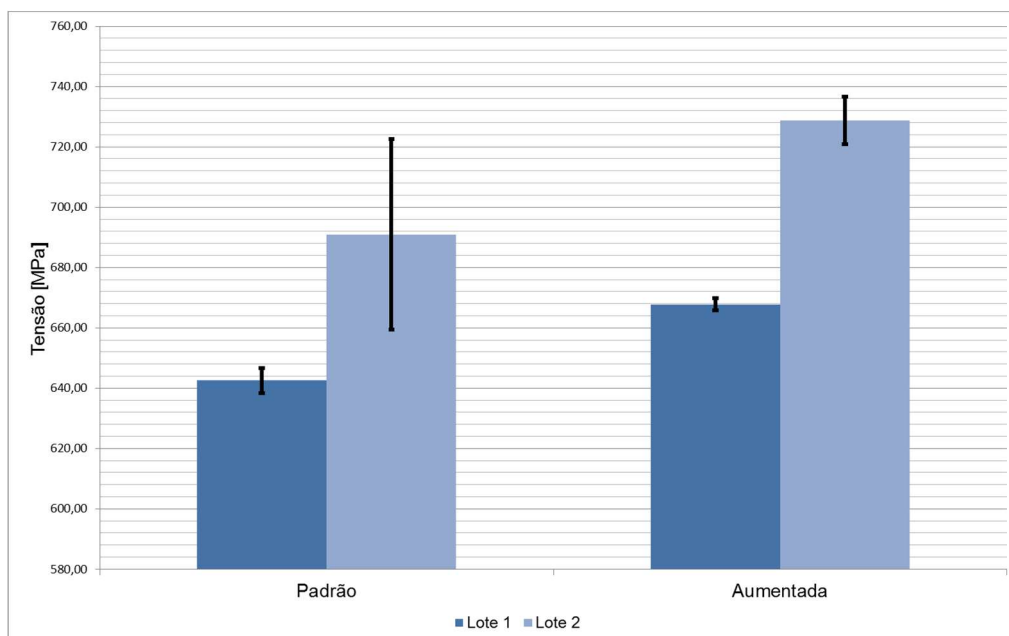
Fonte: Autor, 2017.

Esta diferença pode ser atribuída tanto à matéria-prima utilizada para fabricação do aço, quanto ao processamento que o laminado sofreu antes de ser utilizado na fabricação do componente final. Do ponto de vista da matéria-prima vários autores como Chiaverini (1987); Li et al. (2016); Melero-Jimenez et al. (2009) observaram que pequenas diferenças entre os compostos químicos do aço podem levar a uma considerável diferença nas propriedades mecânicas do material. Do ponto de vista do processamento outros autores como Zhao et al. (2014) e Mazaheri et al. (2014) verificaram que com o aumento da temperatura do tratamento térmico intercrítico a resistência mecânica dos aços bifásicos tende a aumentar.

Do ponto de vista da influência da taxa de deformação dos materiais ensaiados, constatou-se que os materiais tiveram um aumento da resistência a tração quando foi elevada a taxa de deformação. Na Figura 48 é exibida uma comparação entre as tensões de tração para os lotes 1 e 2 à taxas de deformação padrão e aumentada 60 vezes. A diferença entre o limite de resistência mecânica a taxas padrão e aumentada 60 vezes é de 4% a 5% em um mesmo lote.



Figura 48 – Comparação do limite de resistência mecânica à taxas de deformação padrão e aumenta 60 vezes.



Fonte: Autor, 2017.

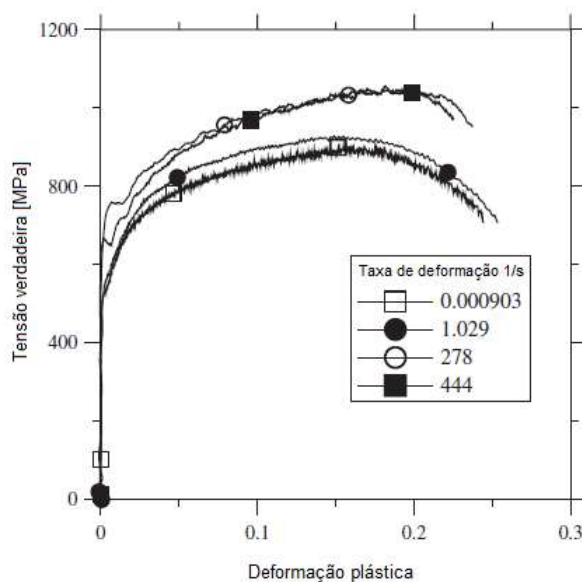
Tarigopula et al. (2006) realizou ensaios de tração quase estáticos a diferentes taxas de deformação em um material bifásico – DP800 e também constatou, que o nível de tensão aumenta com o aumento da taxa de deformação conforme é exibido na Figura 49. Destaca-se que Tarigopula et al. (2006) constatou um aumento de aproximadamente 5% ao elevar a taxa de deformação do ensaio de  $0,000903 \text{ s}^{-1}$  para  $1,029 \text{ s}^{-1}$ , um aumento maior que 1000 vezes.

Na Figura 50 são exibidas as curvas tensão-deformação de um aço AISI 4340 testado por Piao et al. (2016) à diferentes taxas de deformação. Observa-se que variações da taxa de deformação da ordem de 100 vezes não resultaram em aumento significativo da resistência mecânica.

Ao fato de que houve uma variação de 5% da resistência mecânica dos aços avaliados neste estudo, resultantes de um incremento de 60 vezes na taxa de deformação, atribui-se à sensibilidade destes materiais a taxa de deformação. Segundo Wang et al. (2013), sensibilidade positiva a taxa de deformação é quando há o aumento da resistência mecânica devido a um incremento da taxa de deformação. Wang et al (2013) fez avaliações de 4 diferentes grades de aços avançados de alta resistência DP600, DP800, DP1000 e M1200, dos quais ele

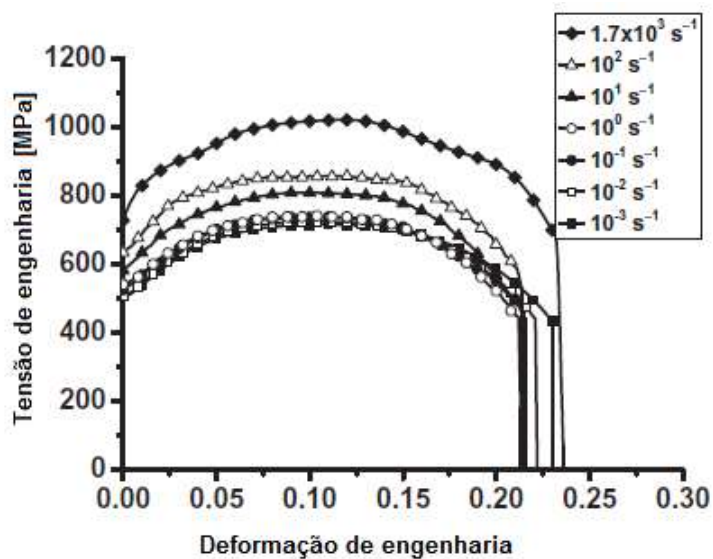
observou que o aço DP1000 possuía pouca sensibilidade a taxa de deformação enquanto que o M1200 possuía sensibilidade negativa. Destaca-se ainda que o aço DP600 foi o aço que exibiu a maior sensibilidade a taxa de deformação, ou seja, teve o maior incremento de resistência ao seu aumentar a taxa de deformação.

Figura 49 – Curva tensão-deformação a diferentes taxas de deformação.



Fonte: Adaptado de Tarigopula, 2006.

Figura 50 – Curvas tensão-deformação de engenharia para o aço AISI 4340 a taxas de deformação de  $10^{-3}$  até  $1,7 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Adaptado de Piao et al., 2016.

#### 4.5. Ensaio de compressão quase estática

O desempenho estrutural de uma caixa de impactos a diferentes taxas de deformação foi comparado por meio da avaliação de sua resistência mecânica e de sua capacidade de absorção de energia obtidos de um ensaio de compressão axial, no qual foram levantados os dados de força-deslocamento. Na Figura 51 são exibidas as curvas de força-deslocamento obtidas durante o ensaio de compressão da estrutura. A Figura 52 mostra as amostras compactadas durante e depois do ensaio de compressão. Para cada taxa de deformação foram realizados 4 ensaios de compressão.

Os parâmetros mais importantes com a força máxima ( $F_{max}$ ); força média ( $F_{med}$ ); energia total absorvida (ETA); energia específica absorvida (EEA) e a eficiência da força de compactação (EFC) foram calculadas a partir dos dados da curva de força-deslocamento e apresentados na Tabela 7.

Além dos cálculos realizados a partir dos dados da curva força-deslocamento, a força média ( $F_{med}$ ) foi calculada analiticamente por meio das Equações 6, 7 e 8. O limite de resistência à tração ( $\sigma_u$ ) foi obtido por meio da média dos resultados experimentais dos ensaios de tração. A espessura e os lados do retângulo da caixa de impacto correspondem aos valores nominais do projeto. O desenvolvimento das equações é demonstrando abaixo:

Dados iniciais

$$t = 1,6 \text{ mm}$$

$$\sigma_u = 679,37 \text{ MPa}$$

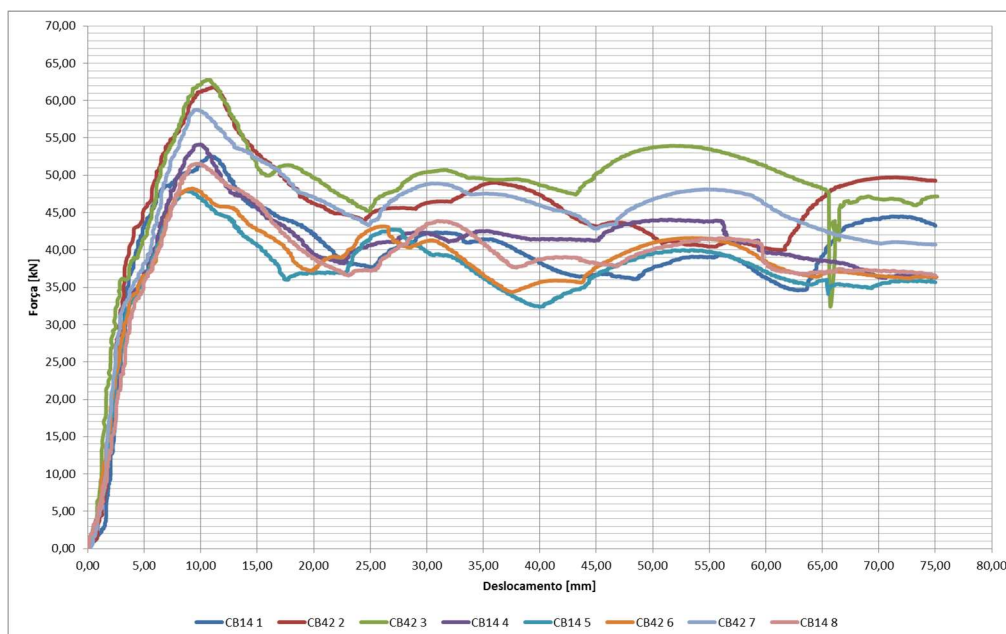
$$C = \frac{112,40 + 77,48}{2} = 94,94 \text{ mm}$$

$$\sigma_o = 0,925 \times 679,37 = 628,42 \text{ MPa}$$

$$M_o = 628,42 \times \frac{(1,6 \times 10^{-3})^2}{4} = 402,19 \text{ N}$$

$$P_m = 38,27 \times 402,19 \times 94,94 \times 10^{-3^{1/3}} \times 1,6 \times 10^{-3^{-1/3}} = 60,03 \text{ kN}$$

Figura 51 – Curva força-deslocamento da estrutura CB de paredes finas.



Fonte: Autor, 2017

Por meio da análise dos resultados obtidos da curva força-deslocamento e dos dados da Tabela 6, verifica-se que as amostras comprimidas a taxa de deformação de  $0,058 \text{ s}^{-1}$  tiveram o seus picos de força entre 47,9 a 52,5 kN, variação máxima de 8%. As amostras comprimidas a taxa de deformação de  $0,175 \text{ s}^{-1}$  tiveram seus picos de força entre 48,2 a 62,8 kN, variação máxima de 23%. Este aumento de variação é devido a um baixo pico de força apresentada pela amostra “CB42 6”, que teve seu pico de força equivalente a amostras ensaiadas a taxa de deformação de  $0,058 \text{ s}^{-1}$ .

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de compressão axial quase estática.

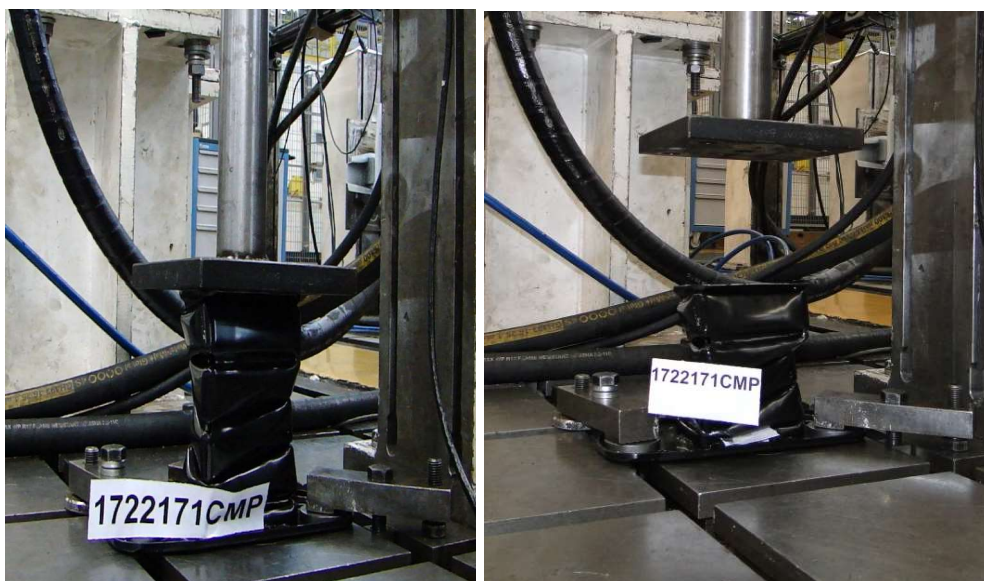
| Amostra | Taxa de deformação [ $\text{s}^{-1}$ ] | Massa | Fmax [kN] | Fmed [kN] | ETA [J] | EEA [J/kg] | EFC |
|---------|----------------------------------------|-------|-----------|-----------|---------|------------|-----|
| CB14 1  | 0,058                                  | 1,62  | 52,5      | 41,0      | 2983,9  | 1841,9     | 78% |
| CB42 2  | 0,175                                  | 1,67  | 61,8      | 46,8      | 3411,4  | 2044,0     | 76% |
| CB42 3  | 0,175                                  | 1,71  | 62,8      | 49,4      | 3669,4  | 2140,9     | 79% |
| CB14 4  | 0,058                                  | 1,66  | 54,1      | 41,3      | 3035,9  | 1830,0     | 76% |
| CB14 5  | 0,058                                  | 1,67  | 47,9      | 37,9      | 2778,9  | 1668,0     | 79% |
| CB42 6  | 0,175                                  | 1,67  | 48,2      | 38,9      | 2872,4  | 1717,9     | 81% |
| CB42 7  | 0,175                                  | 1,74  | 58,8      | 45,9      | 3378,6  | 1944,0     | 78% |
| CB14 8  | 0,058                                  | 1,69  | 51,6      | 39,6      | 2923,6  | 1731,0     | 77% |

Fonte: Autor, 2017

Tal diminuição no pico de força é atribuída a uma falha localizada no interno da estrutura, exibida na Figura 53. Assim como foi observado por Lee et al. (1999) a

presença imperfeições na estruturas de paredes finas têm a função de diminuir o pico de força máxima e aproximá-lo da força média. Este fato pode ser comprovado ao se observar a eficiência da força de compactação, que na amostra “CB42” 6 foi o maior entre todas as amostras.

Figura 52 – Amostras da estrutura em ensaio de compressão axial



Esquerda – durante ensaio / Direita - após ensaio

Fonte: Autor, 2017

Figura 53 - Falha de material observada na amostra “CB42 6”



(a)

(b)

(a) – visão geral / (b) – detalhe da falha.

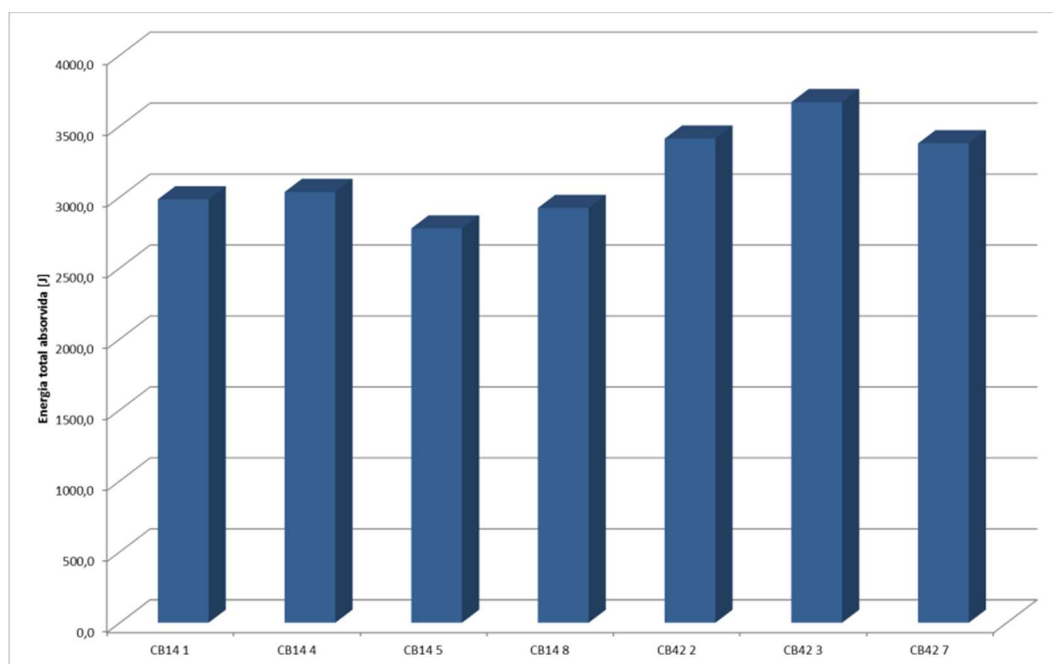
Fonte: Autor, 2017.

Devido a falha verificada na amostra “CB42 6” seus resultados foram excluídos propositalmente das análises, de modo que este resultado não impedisse a correta interpretação dos demais dados.

Segundo Nia e Hamedami (2010) a força máxima ( $F_{\max}$ ) é um parâmetro crítico durante o impacto de estruturas automotivas. Não foi verificada uma discrepância muito grande entre os valores de  $F_{\max}$  obtida nos ensaios de compressão. Isto demonstra que a estrutura possui uma boa repetitividade de resultados independente da taxa de deformação que está sendo imposta a ela.

Uma vez que as amostras foram testadas a diferentes taxas de deformação e possuem massas similares, a energia total absorvida (ETA) e a energia específica absorvida (EEA) são modos efetivos de se determinar a capacidade de absorção da estrutura influenciada pela taxa de deformação. Nas Figuras 54 e 55 são apresentadas respectivamente a ETA e EEA.

Figura 54 – Energia total absorvida (ETA) durante ensaios de compressão axial.

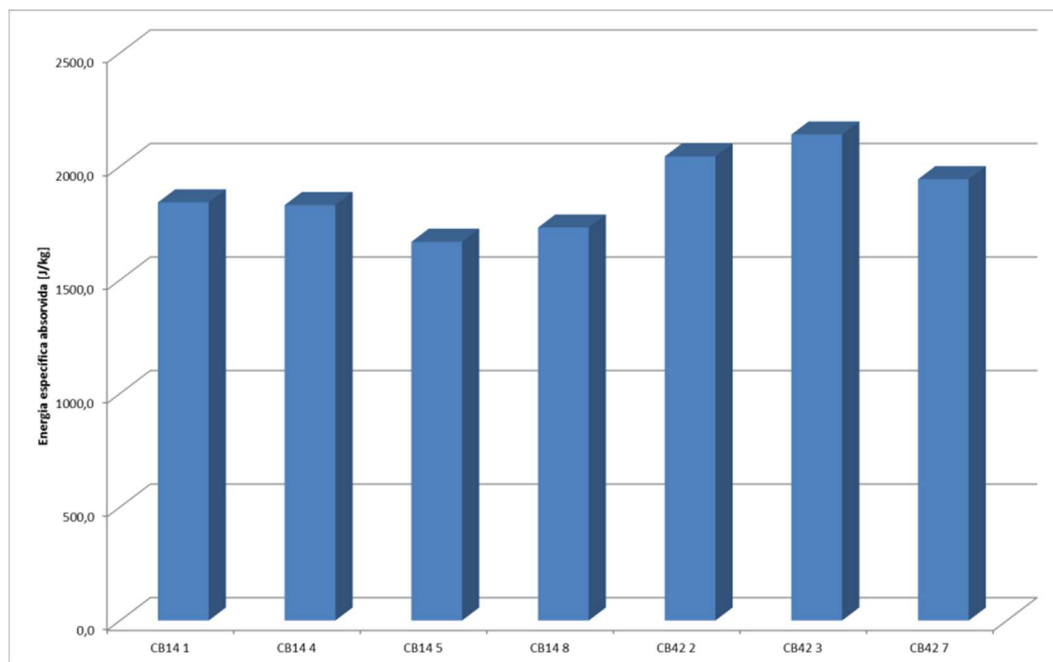


Fonte: Autor, 2017

A energia total absorvida pela estrutura pode ser obtida através do cálculo da área sobre a curva força-deslocamento. Neste sentido verificou-se que para mesma taxa de deformação as amostras ensaiadas apresentaram variação da energia absorvida de no máximo 9%. É ainda possível verificar claramente que os componentes ensaiados com a taxa de deformação aumentada tiveram um aumento

em sua capacidade de absorção de energia. Este aumento foi da ordem de 16% para um aumento da taxa de deformação de 3 vezes. Quanto a energia específica absorvida pela estrutura os padrões de absorção de energia foram mantidos uma vez que as estruturas apresentaram variação máxima de 7% de seu peso.

Figura 55 - Energia específica absorvida (EEA) durante ensaios de compressão

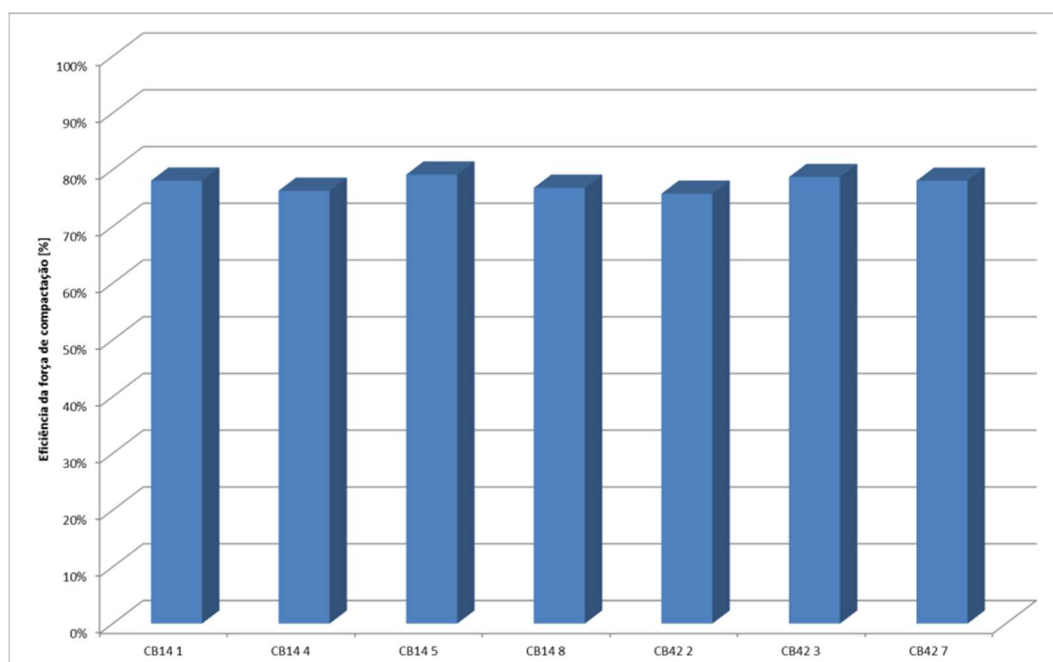


Fonte: Autor, 2017

Segundo Thornton and Magee, citado por Yuen e Nurick (2008), os iniciadores de colapso, que no caso desta estrutura são os corrugados, podem ser usados para iniciar um modo de colapso específico, estabilizar o processo de colapso e para compressão axial, reduzir a magnitude entre os picos de força máxima ( $F_{\max}$ ) e força média ( $F_{\text{med}}$ ). No caso das estruturas analisadas neste trabalho o cálculo da eficiência da força de compactação, exibido na Figura 56, indica que houve uma variação mínima entre os ensaios realizados com uma média de 78% e desvio padrão de 1%. Vinayagar e Kumar (2017) obtiveram uma variação média de 53% da eficiência da força de compactação.



Figura 56 – Eficiência da força de compactação (EFC) durante ensaio de compressão



Fonte: Autor, 2017

Além da avaliação dos resultados experimentais, foi realizada uma comparação com resultado da força média, obtida por meio do cálculo analítico. Os valores de  $F_{med}$ , obtido analiticamente e experimentalmente, apresentaram uma diferença de 30%. Esta diferença pode estar relacionada à presença dos corrugados, uma vez que o cálculo analítico leva em conta uma estrutura lisa e constante. Os corrugados tendem a abaixar os picos de Força,  $F_{max}$ , e consequente a força média dada pelas estruturas.

Eyvazian et al. (2014), experimentaram uma redução de 25% da força média, quando realizaram a compressão quase estática de tubos lisos *versus* tubos corrugados. Eles constaram que ao se corrugar os tubos radialmente, há uma redução da força de pico inicial e também há uma redução da amplitude dos picos e vales no gráfico de força-deslocamento das estruturas de paredes finas.

Quanto ao modo de colapso da estrutura, foi verificado que as estruturas comprimidas axialmente possuem uma tendência ao modo de deformação mista entre compactação axial e flambagem. Este modo de deformação pode estar associado a quantidade de corrugados que a estrutura possui, que em excesso podem fragilizar a estrutura.



#### 4.6. Análise dos resultados

Neste trabalho, o comportamento quanto à proteção ao impacto de estruturas de paredes foi avaliada sob duas abordagens, a primeira é relativa ao material e suas características e a segunda é relativa ao desempenho estrutural do componente.

Relativo ao material, as amostras foram obtidas como sendo aços bifásicos de 600 MPa de limite resistência, comumente conhecidos como DP600. Porém, as estruturas foram obtidas em dois períodos diferentes, configurando dois possíveis lotes de amostras. Por estes motivos se fez necessária uma avaliação criteriosa dos materiais constituintes das estruturas.

A primeira análise realizada foi a verificação da composição química dos materiais. Os limites para os elementos químicos indicados pela ASTM A1088 são bastante amplos, uma vez que são indicados apenas valores máximos. Portanto, somente com a verificação da composição química não foi possível determinar a qual grade/designação os aços pertenciam. Ambos os lotes possuem composição química compatível com a dos aços designados na norma ASTM A1088.

A próxima verificação realizada foi a análise metalográfica das amostras do lote 1 e do lote 2. Por meio da análise da microestrutura dos materiais foi possível verificar a presença de dois constituintes, ferrita e constituinte MA. Apesar de ambos os lotes apresentarem microestrutura bifásica, a forma dos grãos e a distribuição de constituinte MA se mostraram distintas. Os grãos de ferrita das amostras do lote 2 têm uma maior uniformidade em relação as do lote 1, além de uma orientação ordenada do constituinte MA. Estas diferenças podem estar ligadas a dois fatores. Primeiro, uma temperatura mais alta de tratamento intercrítico caracteriza uma elevação da fração de martensita. Segundo, a presença de alguns microligantes como o alumínio e manganês, contribuiu para retardar a recristalização da austenita e aumentar a temperabilidade do material.

Foi verificada por meio do ensaio de dureza uma diferença de resistência mecânica entre os dois aços, que pode ser atribuída a proporção e distribuição da martensita entre os lotes 1 e 2.

Os ensaios de tração foram determinantes para a classificação dos aços analisados. Em um primeiro momento foram realizados ensaios de tração à taxas de deformação padrão indicadas pela norma ASTM E8/E8M. Com este primeiro ciclo de ensaios foi possível confirmar que os lotes ensaiados possuíam diferentes

propriedades mecânicas. As curvas tensão-deformação do lote 1 tiveram um nível de tensão muito similar enquanto que as curvas do lote 2 tiveram uma maior dispersão entre os resultados. O lote 2 apresentou propriedades mecânicas mais elevadas, atribuída a uma maior fração de martensita presente na microestrutura.

Apesar dos materiais dos lotes não serem idênticos, ambos estão conforme os requerimentos da ASTM A1088 e podem ser classificados como aços bifásicos DP600.

Em um segundo momento foram realizados mais ensaios de tração à taxas de deformação aumentada em 60 vezes, em relação a indicação da norma ASTM E8/E8M. Assim como no primeiro ciclo de ensaios de tração foi verificada uma diferença entre as propriedades mecânicas entre os lotes 1 e 2. As curvas tensão-deformação tanto do lote 1 quanto do lote 2 tiveram boa similaridade entre elas, isto reforça que a dispersão de resultados entre as curvas do lote 2 do primeiro ciclo de ensaios foi pontual. Outra constatação importante é a de que o aumento na taxa de deformação provoca um incremento proporcional nas propriedades mecânicas, independente da composição química ou da microestrutura do material. Portanto, do ponto de vista do material, lote 1 e o lote 2 não são materiais idênticos. Porém ambos são aços bifásicos de 600 MPa de resistência a tração.

Relativo ao desempenho estrutural do componente, a influência da taxa de deformação sobre o desempenho da estrutura foi analisada em ensaios de tração axial sobre corpos de prova padronizados e em ensaios de compressão sobre estruturas de produção seriada.

Nos ensaios de tração foi constatado que ambos os lotes apresentaram aumento do limite de resistência a tração, quando a taxa de deformação foi aumentada em 60 vezes. O aumento da resistência à tração é atribuído a sensibilidade a taxa de deformação, que no caso dos materiais bifásicos está ligada principalmente a matriz ferrítica. Foi verificado que o expoente do encruamento das amostras do lote 2 diminuiu com o aumento da taxa de deformação, resultante da diminuição da ductilidade à taxa de deformação aumentada.

Ambos os lotes apresentaram sensibilidade positiva a taxa de deformação, independente de suas diferenças microestruturais. Uma vez que a sensibilidade à taxa de deformação foi positiva em ambos os lotes e eles foram classificados como pertencentes a mesma grade e classe de material, as estruturas foram consideradas idênticas para análise dos ensaios de compressão quase estáticos. Esta premissa foi

verificada ao se comparar o resultado de estruturas de lotes diferentes, à mesma taxa de deformação, e apresentarem o mesmo nível de força de compressão resultante.

Assim como os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de tração axial, as estruturas de paredes finas submetidas ao ensaio de compressão quase estática apresentaram sensibilidade positiva à taxa de deformação, ou seja, houve um incremento da resistência da estrutura devido ao aumento na taxa de deformação. Todas as amostras ensaiadas apresentaram um modo de deformação misto entre compactação axial e flambagem. Este modo de deformação pode estar ligado à quantidade de corrugados aplicados à estrutura, pois os corrugados estimulam a deformação assimétrica da estrutura.

Foi constatado um aumento da energia absorvida, da força máxima e da força média ao elevar a taxa de deformação. A diferença entre a força média e força máxima obtida para estrutura foi baixa, característica positiva no projeto de uma estrutura de paredes finas.

Ao se estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos no ensaio de tração axial com corpos de prova padrão e os ensaios de compressão axial sobre estruturas de paredes finas pode-se afirmar que ambos são sensíveis à mesma influência provocada pela taxa de deformação. Pode-se afirmar que o ensaio de tração é capaz de avaliar a resposta do material de forma microscópica, uma vez que o corpo de prova é padrão e os resultados dependem quase que somente da microestrutura resultante do processo de fabricação do material.

Já o ensaio de compressão axial é capaz de avaliar a resposta do material de forma macroscópica e depende de fatores complexos além da microestrutura do material. Por exemplo, o processo de fabricação do componente como a conformação do material, sua própria geometria, tipologia de união.

## 5. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi avaliada a influência da taxa de deformação nas estruturas de paredes finas como absorvedores de energia para proteção ao impacto. Baseados nos resultados obtidos podem ser considerados as seguintes conclusões:

- Os materiais avaliados apresentaram microestruturas formada pelos constituintes ferrita e martensita em ambos os lotes avaliados. Os constituintes ferrita e martensita são típicos dos aços bifásicos.
- Relativo à microestrutura dos aços do lote 1 e do lote 2 foi observado que as amostras do lote 2 apresentaram, qualitativamente, mais martensita que o lote 1. Este fato pode estar ligado a presença de manganês, um dos elementos responsáveis por aumentar a temperabilidade do material, e ao alumínio responsável por retardar a recristalização da austenita. Uma superior temperatura de tratamento térmico intercrítico pode também ser responsável pelo aumento da fração de martensita.
- A dureza do material do lote 2 foi ligeiramente superior ao lote 1, que está de acordo com uma fração maior de martensita, observada no lote 2.
- A resistência mecânica dos corpos de prova avaliados em ensaios de tração foi superior nas amostras do lote 2, em acordo com as demais verificações realizadas anteriormente.
- Os materiais dos lotes 1 e 2 são materiais similares, porém não idênticos. Podem ter sido fabricados ou processados de maneira diferente e por isso não apresentam características iguais.
- Ambos os lotes são aços bifásicos DP600 conforme classificação da ASTM A1088.
- Em ensaio de tração axial, os materiais de lotes tiveram aumento da resistência mecânica em função da elevação da taxa de deformação. Ou seja, os materiais sofreram influência da taxa de deformação e são positivamente sensíveis a taxa de deformação.
- Em ensaio de compressão axial quase estática, as estruturas de paredes finas não foram influenciadas significativamente pela diferença de resistência entre os lotes 1 e 2. Esta característica é atribuída ao fato de que, macroscopicamente,

dentre outras características da estrutura (geometria, pontos de solda entre outros) esta diferença de limite resistência mecânica é insignificante.

- As estruturas de paredes finas sofreram influência da taxa de deformação e são positivamente sensíveis a ela. As estruturas avaliadas tiveram a resistência e capacidade de absorção de energia aumentada em função do aumento da taxa de deformação.

- Os resultados do ensaio de tração axial e compressão axial quase estática são compatíveis e seguem os mesmos princípios e regras sobre a influência da taxa de deformação seja sobre os corpos de provas ou estruturas. Porém estes resultados devem ser complementares uns aos outros e não podem ser avaliados de forma isolada. Ou seja, um mesmo tipo de material proveniente de processos de fabricação diferentes, de fornecedores diferentes e de características diferentes, pode apresentar desempenho similar ou ate mesmo igual quando aplicados no mesmo componente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDRABBO, Nader et al. Crash response of advanced high-strength steel tubes: Experiment and model. **International Journal of Impact Engineering**. Waterloo, v. 36, 2009, p. 1044-1057.

ABRAMOWICZ, W. Thin-walled structures as impact energy absorbers. **Thin-walled Structures**. Varsóvia, v. 41, 2003, p. 91-107.

AHMAD, Z.; THAMBIRATNAM, D. P. Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures. **International Journal of Crashworthiness**. v. 14, 2009, 349 – 363.

AKBARPOUR, Mohammed Reza; EKRAMI, A. Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels. **Materials Science and Engineering A**. v. 477, 2008, 306 – 310.

ALGHAMDI, A.A.A. Collapsible impact energy absorbers: an overview. **Thin-walled Structures**. Jeddah, v. 39, 2001, p. 189-213.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E8/E8M: standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A1088: standard specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Complex Phase (CP), Dual Phase (DP) and Transformation Induced Plasticity (TRIP), ASTM, 2013.

BAROUTAJI, Ahmad; SAJJIA, Mustafa; OLABI, Abdul-Ghani. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. **Thin-walled Structures**. Telford, v. 118, 2017, p. 137-163.

BISAGNI, Chiara. Crashworthiness of helicopter subfloor structures. **International Journal of Impact Engineering**. Milão, v. 27, 2002, p. 1067 – 1082.

BERTOCCHI, Marcelo. **Segurança Veicular**. Skill, 2005.

BOIS, Paul du et al. **Vehicle crashworthiness and occupant protection**. Michigan: American Iron and Steel Institute, 2004.

CALLISTER, Jr., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 5ª ed. ampl. rev. São Paulo: ABM, 1987.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. 3 ed. Columbus: McGraw-Hill, 1981. 800p.

DNIT. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes/quadro-0102-numero-de-acidentes-por-tipo-e-gravidade-ano-de-2011.pdf>> Acesso em: Julho de 2016.

ERDIN, Muhammed; BAYKASOGLU, Cengiz; CETIN, Merve Tunay. Quasi-static Axial Crushing Behavior of Thin-walled Circular Aluminum Tubes with Functionally Graded Thickness. **Procedia Engineering**. Corum, v. 149, 2016, p. 559 -6 65.

EYVAZIAN, Arameh et al. Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes. **Materials and Design**. Doha, v. 54, 2014, p. 1028 – 1038.

GALÁN, J. et al. Aceros avanzados de alta resistencia en la industria automovilística. **Revista de Metalurgia**. v. 48, 2012, p. 118-131

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte e Conformação de Metais**. 2008, p. 26 -57.

GRISKEVICIUS, Paulius; ZILIUKAS, Antanas. The crash energy absorption of the vehicles front structures. **Transport**. Kaunas, v. 18, 2003, p. 97-101.

HUH, Hoon, et al. Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body. **International Journal of Mechanical Sciences**. Daejeon, v. 50, 2008, p. 918 – 931.

HUANG, X.; LU, G. e YU, T.X., Energy absorption in splitting square metal tubes. **Thin-Walled Structures**. Hawthorn, v. 40, 2002, p. 153 – 165.

HUSSAIN, N Nasir; REGALLA, Srinivasa Prakash e RAO, Yendluri V Daseswara. Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading. **Procedia Engineering**. v. 173, 2017, p. 1390 – 1398.

IBRAHIM, Hamsem Kamel. **Design Optimization of Vehicle Structures for Crashworthiness Improvement**. 2009. 200 p. Tese (Doutorado) – Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University. Montreal.

KADKHODAPOUR, J.; BUTZ, A.; RAD, S. Ziaei. Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual phase steel. **Acta Materialia**. Isfahan, v. 59, 2011, p. 2575 – 2588.

KHAN, Akhtar S. et al. Quasi-static and dynamic responses of advanced high strength steels: Experiments and modeling. **International Journal of Plasticity**. Baltimore, v. 30-31, 2012, p. 1 – 17.

KIM, Hee Chul et al. Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application. **Composite Structures**. Daejeon, v. 112, 2014, p 1-10.

KLEINER, M. et al. Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. Dortmund, v. 52, 2003, p. 531-542.

KRAJEWSKI, S.; NOWACKI, J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. Szczecin, v. 14, 2014, p. 278 – 286.

KUZIAK, R., KAWALLA, R., WAENGLER S. Advanced high strength steels for automotive industry. **Arquives of civil and mechanical engineering**. 2008. p 105-117.

LAI, Qingquan et al. Influence of martensite volume fraction and hardness on the plastic behavior of dual-phase steels: Experiments and micromechanical modeling. **International Journal of Plasticity**. St Martin d'Heres Cedex, v. 80, 2016, p. 187 – 203.

LEE, Sunghak; HAHN, Changsu; RHEE, Meungho; OH, Jae-Eung. Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes. **Materials and Design**. Pohang, v. 20, 1999, p. 31-40.

LI, Xiaolin et al. The effect of manganese content on mechanical properties of high titanium microalloyed steels. **Materials Science & Engineering A**. Beijing, v. 677, 2016, p. 340 – 348.

MAZAHERI, Yousef et al. Effects of initial microstructure and thermomechanical processing parameters on microstructures and mechanical properties of ultrafine grained dual phase steels. **Materials Science & Engineering A**. Isfahan, v. 612, 2014, p.54-62.

MAZDA. **Skayactiv-Body**. Disponível em: <http://www.mazda.com/en/innovation/technology/skayactiv/skayactiv-body/>>. Acesso em: Agosto de 2016.

MELERO-JIMENEZ, E. et al. The effect of aluminium and phosphorus on the stability of individual austenite grains in TRIP steels. **Acta Materialia**. JB Delft, v. 57, 2009, p.533 – 543.

MÉNDEZ, Álvaro Gómez; IZQUIERDO, Francisco Aparicio; RAMÍREZ, Blanca Arena. Evolution of the crashworthiness and aggressivity of the Spanish car flee. **Accident Analysis and Prevention**. Madrid, v.42, 2010, p. 1621-1631.

MEYERS, Marc André. **Dynamic Behavior of Materials**. San Diego: John Wiley & Sons, INC, 1994.

MISCOW F., P. C.; AL-QURESHI, H. A. Mechanics of Static And Dynamic Inversion Processes. **International Journal of Mechanical Sciences**. São José dos Campos, v. 39, 1997, p. 147 – 161.

MOCKO, Wojciech; Brodecki, Adam; Kruszka, Leopold. Mechanical response of dual phase steel at quasi-static and dynamic tensile loadings after initial fatigue loading. **Mechanics of Materials**. Varsóvia, v. 92, 2016, p. 18 – 27.



NIA, Ali Alavi; HAMEDANI, Jamal Haddad. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. **Thin-walled Structures**. Hamedan, v. 48, 2010, p. 946-954.

OLIVER, S.; JONES, T. B.; FOURLARIS, G. Dual phase versus TRIP strip steels: comparison of dynamic properties for automotive crash performance. **Materials Science and Technology**. Port Talbot, v. 23, 2007, p. 423 – 431.

PENG, Yong et al. Study on the collision performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles. **Thin-walled Structures**. Changsha, v. 94, 2015, p. 663 – 672.

PERONI, Lorenzo; AVALLE, Massimiliano; BELINGARDI, Giovanni. Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. **International Journal of Impact Engineering**, Torino, v. 36, 2009, p. 498-511.

PIAO, M. et al. Characterization of flow stress at ultra-high strain rates by proper extrapolation with Taylor impact tests. **International Journal of Impact Engineering**. Daejeon, v.91, 2016, p. 142 – 157.

PIERMAN, A. –P. et al. The influence of microstructure and composition on the plastic behaviour of dual-phase steels. **Acta Materialia**. v.73, 2014, p. 298 – 311.

ROSENBERG, G.; SINAIÓVÁ, I.; JUHAR, L'. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators. **Materials Science & Engineering A**. Kosice, v. 582, 2013, p. 347 – 358.

SAEIDI, N.; KARIMI, M.; TOROGHINEJAD, M.R. Development of a new dual phase steel with laminated microstructural morphology. **Materials Chemistry and Physics**. Isfahan, v. 192, 2017, p. 1-7.

SAMI, Zidelmel; TAHAR, Sahraoui; HADJI, Mohamed. Microstructure and Charpy impact properties of ferrite–martensite dual phase API X70 linepipe steel. **Materials Science & Engineering A**. Laghouat, v. 598, 2014, p. 338 – 342.

SCHAEFFLER, Daniel J. Introduction to advanced high-strength steels – part I. **Stamping Journal**. 2004.

SOARES, Guilherme Corrêa et al. Strain hardening behavior and microstructural evolution during plastic deformation of dual phase, non-grain oriented electrical and AISI 304 steels. **Materials Science & Engineering A**. Belo Horizonte. v 684, 2017, p. 577 – 585.

TARIGOPULA, V. et al. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections. **International Journal of Impact Engineering**. Trondheim, v. 32, 2006, p. 847 – 882.

TARLOCHAN, F.; et al. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due axial and oblique impact forces. **Thin-Walled Structures**, Kajang, v. 71, 2013, p. 7 – 17.

ULSAB-AVC. **Technical Transfer Dispatch #6: ULSAB-AVC Body Structure Materials**. ULSAB-AVC Consortium. 2001. p 9.

VAN VLACK, Laurence H. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

VINAYAGAR, K.; KUMAR, A. Senthil. Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures. **Thin-Walled Structures**. Tamil Nadu, v. 112, 2017, p. 184 – 193.

WANG, Wurong; et al. Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600–1000 MPa dual phase steels and 1200 MPa fully martensitic steels. **Materials & Design**. Shanghai, v. 47, 2013, p. 510 – 521.

WHO. **Global status report on road safety 2015**. Disponível em: <[http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/status\\_report\\_2015/en/](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/status_report_2015/en/)>. Acesso em: Abril de 2015.

WORLDAUTOSTEEL. **Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines Version 6.0**. 2017. Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>.

YIN, Hanfeng et al. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. **Materials & Design**. v. 32, 2011, p. 4449 – 4460.

YOSHIDA, Tohru et al. Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures. **Nippon Steel Technical Report**. No. 103, 2013, p. 4 -10.

YU, XiaoHuan; QIU, XinMing e YU, T.X.. Analysis of the free external inversion of circular tubes based on deformation theory. **International Journal of Mechanical Sciences**. Beijing, v. 100, 2015, p. 262 - 268.

YUEN, S. Chung Kim; NURICK, G. N. The Energy-absorbing Characteristics of Tubular Structures With Geometric and Material Modifications: An Overview. **Applied Mechanics Reviews**. v. 61, 2008, p. 1 – 14.

ZHAO, Zhengzhi et al. Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of ultra-high strength dual-phase steel. **Materials Science & Engineering**. Beijing, v. 618, 2014, p. 182-188.

ZAREI, Hamidreza; KRÖGER, Matthias; ALBERTSEN, Henrik. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. **Composite Structures**. Hannover, v. 84, 2008, p. 245 – 257.