

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Marcello de Oliveira Gomes

**ESTUDO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA EM DIFERENTES GEOMETRIAS DE  
ESTRUTURAS DE PAREDES FINAS EM AÇO DP600 SUBMETIDAS A  
COMPRESSÃO PROGRESSIVA DINÂMICA PARA USO NA INDÚSTRIA  
AUTOMOBILÍSTICA**

Belo Horizonte

2021

Marcello de Oliveira Gomes

**ESTUDO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA EM DIFERENTES GEOMETRIAS DE  
ESTRUTURAS DE PAREDES FINAS EM AÇO DP600 SUBMETIDAS A  
COMPRESSÃO PROGRESSIVA DINÂMICA PARA USO NA INDÚSTRIA  
AUTOMOBILÍSTICA**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Matos Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Frederico de Castro Magalhães

Belo Horizonte

2021

M385e

Gomes, Marcello de Oliveira.

Estudo da absorção de energia em diferentes geometrias de estruturas de paredes finais em aço DP600 submetidas a compressão progressiva dinâmica para uso na indústria automobilística [recurso eletrônico] / Marcello de Oliveira Gomes. - 2021.  
1 recurso online (134 f.: il.,color.) : pdf.

Orientador: Paulo César de Matos Rodrigues.  
Coorientador: Frederico de Castro Magalhães.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 22-72.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metais - Deformação – Teses.  
3. Paredes finas - Estruturas – Teses. I. Rodrigues, Paulo César de Matos. II. Magalhães, Frederico de Castro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **ESTUDO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA EM DIFERENTES GEOMETRIAS DE ESTRUTURAS DE PAREDES FINAS EM AÇO DP600, SUBMETIDAS A COMPRESSÃO PROGRESSIVA DINÂMICA PARA USO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

**MARCELLO DE OLIVEIRA GOMES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Paulo Cesar de Matos Rodrigues (Orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Frederico de Castro Magalhães (Coorientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Wellington Lopes (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, BH/CEFET-MG) e o M.Sc. Henrique da Cruz Amaral (Grupo STELLANTIS LATAM), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 21 de maio de 2021.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Cesar de Matos Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 02/07/2021, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wellington Lopes, Usuário Externo**, em 03/07/2021, às 08:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 05/07/2021, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Henrique da Cruz Amaral, Usuário Externo**, em 20/07/2021, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



[https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0811015** e o código CRC **035CAA45**.

---

Aos meus pais e irmãos pelos mais de trinta anos de dedicação constante. À minha noiva por tornar a vida mais leve.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo incentivo e dedicação constantes em todas as etapas da minha vida. Sua incansável luta tornou possível não só esta, mas todas as futuras conquistas.

À minha noiva pela motivação, carinho e por sempre estar disposta a ouvir.

Aos colegas da STELLANTIS pelas discussões técnicas, sugestões, questionamentos, interesse no tema, compartilhamento de experiência, empenho e principalmente pela grande oportunidade e confiança dados para que este trabalho pudesse ser realizado. Em especial à Nilson Dias, Henrique Amaral e a todo o time de Segurança Veicular Passiva e Centro de Segurança Latam.

À Kampmann do Brasil e à Dra. Maria Cristina Moreira pelo auxílio e disposição na confecção de itens importantes para a realização deste trabalho.

À UFMG e professores, em especial ao professor Prof. Dr. Paulo César de Matos Rodrigues, por difundirem para a sociedade o conhecimento acumulado, fruto de anos de esforço.

“O impedimento à ação avança a ação. O que existe no caminho se torna o caminho.”  
(Marco Aurélio)



## RESUMO

As estruturas de paredes finas são largamente utilizadas na indústria automobilística para construção de carrocerias. Durante uma colisão, são responsáveis por absorver a energia mecânica do impacto pela sua deformação, minimizando a carga transferida aos ocupantes, conceito conhecido como *crashworthiness*.

A geometria das estruturas, tipos de materiais empregados e métodos construtivos possuem influência na maneira como ela se comporta. Para avaliar a influência da geometria das peças este estudo foi dividido em três etapas. A primeira delas visa a correta caracterização do material e suas propriedades mecânicas, químicas e microestruturais. A segunda, fornece uma base teórica indicando a diferença de resistência da estrutura devido à geometria, calculadas analiticamente com conceitos de flambagem de colunas e flambagem de placas. Finalmente, na terceira, são obtidas as taxas de deformação e mensuradas as características de deformação progressiva dinâmica utilizando uma barreira rígida móvel, acelerômetros e câmeras de alta velocidade.

As estruturas de paredes finas foram todas baseadas no mesmo conceito inicial e mesmo método construtivo. A peça base possui corrugados, iniciadores de deformação ao longo do seu comprimento, para auxílio no controle do carregamento excêntrico. O segundo tipo de peça exibe iniciadores de deformação adicionais e carregamento também excêntrico. O terceiro tipo de peça tem um aumento de espessura, menor comprimento e mudança na sua extremidade a fim de se obter um carregamento axial.

As peças testadas foram fabricadas em aço DP600, e as estruturas com carregamento axial não apresentaram tendência à flambagem global, resultando em maior força de reação e sendo capaz de absorver toda a energia do impacto proposto em menor tempo. Concluiu-se também que é possível reduzir a influência do carregamento excêntrico pelo correto posicionamento de iniciadores de deformação. Estes resultados indicam pontos importantes para o projeto de tais estruturas, possibilitando ganhos em massa, custos e aumento da proteção aos consumidores finais.

Palavras-chave: Deformação progressiva dinâmica, estruturas de paredes finas, absorção de energia, flambagem de colunas, flambagem de placas

## ABSTRACT

Thin-walled structures are widely used in the automobile industry for body construction. During a collision, they are responsible for absorbing the impact mechanical energy by its deformation, minimizing the load transferred to the occupants, a concept known as crashworthiness.

The geometry of the structures, materials used and construction methods have an influence on the way it behaves. To assess the influence of the pieces' geometry, this study was divided into three different stages. The first one aims at the correct characterization of the material and its mechanical, chemical and microstructural properties. The second, provides a theoretical basis indicating the difference in strength of the structure due to geometry, calculated analytically with concepts of column and plate buckling. Finally, in the third, strain rates are obtained and the characteristics of dynamic progressive buckling are measured using a rigid mobile barrier, accelerometers and high-speed cameras.

The thin-walled structures were all based on the same initial concept and the same construction method. The base part has corrugations, deformation initiators along its length and eccentric loading. The second part brings additional deformation initiators and also eccentric loading. The third part has an increase in thickness, shorter in length and a change in its end in order to obtain an axial loading.

The tested parts were manufactured in DP600, and the structures that were axially loaded did not show a tendency to global buckling, resulting in greater reaction force and being able to absorb all the energy of the proposed impact in less time. It was also concluded that it is possible to reduce the influence of eccentric loading by the correct positioning of deformation initiators. These results indicate important points for the design of such structures, enabling mass and costs reductions and increased protection for final consumers.

Keywords: dynamic progressive buckling, thin-walled structures, energy absorption, column buckling, plate buckling

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Impacto frontal - NBR 15300-2.....	24
Figura 2.2 – Impacto frontal - NBR 15300-3 .....	24
Figura 2.3 – Impacto traseiro - NBR 15240.....	25
Figura 2.4 - Impacto lateral - NBR 16204-3 .....	26
Figura 2.5 - Impacto lateral - NBR 16204-3 .....	26
Figura 2.6 - Impacto frontal - RCAR.....	28
Figura 2.7 – Impacto traseiro - RCAR.....	28
Figura 2.8 – Pontuação nos testes da Latin NCAP do FIAT 500X .....	30
Figura 2.9 - Uso de Aços de Alta Resistência (HSS) e AHSS em automóveis.....	31
Figura 2.10 - Utilização do aço DP na construção de carrocerias.....	31
Figura 2.11 - Micrografia de aço DP 800 obtida por microscópio eletrônico de varredura ....	32
Figura 2.12- Recozimento intercrítico usado para aços laminados a frio .....	33
Figura 2.13 – Micrografia DP600 temperado a partir de diferentes temperaturas intercríticas de recozimento : a) 740°C; b) 780°C; c)820°C e d) 860°C .....	35
Figura 2.14 - Tensão por deformação de engenharia para diferentes tipos de aço DP .....	35
Figura 2.15 - Máquina de ensaios de tração .....	36
Figura 2.16 - Gráfico tensão por deformação obtido em ensaio de tração .....	37
Figura 2.17 - Princípio de Saint-Venant .....	38
Figura 2.18 – Geometria do corpo de prova padrão .....	38
Figura 2.19 – Determinação da tensão de escoamento de um material .....	40
Figura 2.20 - Limite de resistência à tração .....	41
Figura 2.21 - Gráfico tensão vs deformação de engenharia e verdadeira .....	42
Figura 2.22 - Esquema de adaptador de folga para ensaios de tração a altas de deformação ..	45
Figura 2.23 - Corpos de prova com 15 e 30 mm de comprimento útil .....	46
Figura 2.24 - Propriedades em função da $\epsilon$ para aços baixo carbono a) testes de tração e b) variação da $\sigma_e$ e LRT.....	48
Figura 2.25 - Sensibilidade à variação da taxa de deformação para diversos aços .....	49
Figura 2.26 - Taxa de encruamento para o aço DP 600 em diferentes taxas de deformação...	49
Figura 2.27 – Fatores de comprimento para diferentes tipos de fixação de coluna.....	51
Figura 2.28 – Tensão crítica em função do índice de esbeltez efetivo .....	52
Figura 2.29 – Flambagem plástica localizada .....	54

Figura 2.30- Modos de carregamento para proteção ao impacto .....	55
Figura 2.31 – Modos de colapso a) deformação axial e b) deformação de Euler .....	55
Figura 2.32 – a) placa sob compressão axial uniforme e b) condição de contorno: apoio simples .....	56
Figura 2.33 - Coeficiente de flambagem para placa com apoio simples em todas as arestas ..	57
Figura 2.34 – Padrões de dobras de a) seção não compacta e b) seção compacta .....	58
Figura 2.35 - Força x deslocamento em compactação de estrutura de paredes finas .....	59
Figura 2.36 – Forma básica de deformação .....	60
Figura 2.37 – a) Células deformáveis e b) coluna deformada axialmente .....	60
Figura 2.38 – Formulação básica de um SE.....	61
Figura 2.39 - Modos fundamentais de dobra de um SE.....	61
Figura 2.40 - Modos de deformação indicados por ABRAMOWICZ e JONES (1984) .....	62
Figura 2.41 – Compactação com 4 SE do tipo I a) Modelo de papel e b) coluna real .....	63
Figura 2.42- a) Coeficiente $k_p$ em função da razão de proporção e b) $\beta$ em função de $tb$ .....	64
Figura 2.43- Placas de retenção e de flambagem .....	64
Figura 2.44- Coeficiente $k_2$ em função da razão de proporção .....	65
Figura 2.45- Dobra sendo formada durante compressão axial.....	67
Figura 2.46- Força em função do deslocamento para tubo liso e corrugado .....	68
Figura 2.47 - a) Coluna retangular e b) coluna cilíndrica com corrugados.....	68
Figura 2.48 – Simulação de compactação de perfis: a) seção uniforme e b) com alívios de massa padronizados.....	69
Figura 2.49 - Dimensões da placa em coluna com alívio de material .....	69
Figura 2.50 - Equipamento <i>drop hammer</i> para ensaios de compactação de estruturas .....	72
Figura 2.51 - Compactação de estruturas de paredes finas utilizando <i>sled</i> .....	73
Figura 3.1 - Peças utilizadas para ensaios de caracterização do material .....	74
Figura 3.2 – Direções de retirada das amostras para ensaio metalográfico .....	75
Figura 3.3 - Amostras dos dois lotes embutidas no sentido transversal e longitudinal .....	76
Figura 3.4 - Máquina de ensaio de tração Instron 4467.....	77
Figura 3.5 - Corpos de prova utilizados para obtenção de propriedade mecânicas.....	77
Figura 3.6 – Corpo de prova após ruptura.....	78
Figura 3.7 - Pista de impacto do Centro de Segurança LATAM .....	79
Figura 3.8 – Peça N°1 .....	80
Figura 3.9 – Modificações da peça N°2; a) lado direito e b) lado esquerdo .....	80
Figura 3.10 - Nomenclatura para a peça N°2 .....	81

Figura 3.11 - Peça com nivelamento de altura das faces (N°3). Demais dimensões são iguais à da Figura 3.8.....	81
Figura 3.12 - Nomenclatura de referência para a peça N°3; a) segmentos e b) corrugados ....	82
Figura 3.13 – Carregamentos considerados em uma situação quase-estática; a) peças N°1 e N°2 e b) peça N°3 .....	83
Figura 3.14 - Fluxograma para flambagem de colunas.....	84
Figura 3.15 - Fluxograma para flambagem de placas.....	84
Figura 3.16 – Componentes necessários para confecção dos corpos de prova .....	85
Figura 3.17 - Aumento de desaceleração de um veículo devido à ação de estrutura rígida ....	86
Figura 3.18 – Configuração do experimento antes do impacto.....	87
Figura 3.19 - Objeto de prova N°1 e marcadores para rastreamento por análise de vídeo .....	88
Figura 4.1 – Micrografia do aço DP600, lote 1 .....	91
Figura 4.2 - Micrografia do aço DP600, lote 2.....	91
Figura 4.3 - Gráficos tensão por deformação: a) engenharia e b) verdadeira, até o LRT.....	93
Figura 4.4 - Seção transversal dividida em 5 SE.....	98
Figura 4.5 - Gráfico logarítmico da taxa de deformação pela tensão de escoamento .....	99
Figura 4.6 – Comparação dos dados dos 3 acelerômetros (X) - peça N°1.....	101
Figura 4.7 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°1 .....	101
Figura 4.8 – Surgimento de dobra plástica no corrugado próximo à base - Peça N°1 .....	102
Figura 4.9 – Colapso global: a) lado direito e b) lado esquerdo - Peça N°1, 46 ms.....	103
Figura 4.10 - Compactação da lateral: a) Lado direito e b) lado esquerdo - Peça N°1, 63ms	103
Figura 4.11 - Objeto de prova após o ensaio - Peça N°1 .....	104
Figura 4.12 - Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos - Peça N°1 .....	104
Figura 4.13 – Aceleração e energia específica dissipada da barreira em função do tempo - Peça N°1 .....	105
Figura 4.14 – Comparação das características principais de cada região - Peça N°1.....	106
Figura 4.15 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°2 .....	107
Figura 4.16 - Aceleração e deslocamento em função do tempo (X) - Peça N°2.....	107
Figura 4.17 - Início de compactação do objeto de prova - Peça N°2 .....	108
Figura 4.18 - Detalhe da aceleração e deslocamento em função do tempo - Peça N°2.....	109
Figura 4.19 - Deformação dos furos F1 e F2, corrugado "a" e segmento 2 - Peça N°2 .....	110
Figura 4.20 – Compactação do crash-box aos 20 ms. a) lado direito e b) lado esquerdo.....	110
Figura 4.21 - Toque entre todos os segmentos da peça .....	111
Figura 4.22 - Escorregamento do crash-box lado direito e esquerdo- Peça N°2.....	112

Figura 4.23 - Carregamento excêntrico e deformação da longarina - Peça N°2 .....	112
Figura 4.24 – Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos – Peça N°2.....	113
Figura 4.25 - Aceleração e energia específica da barreira em função do tempo - Peça N°2 .	114
Figura 4.26 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°3 .....	114
Figura 4.27 - Aceleração e deslocamento em função do tempo (X) - Peça N°3.....	115
Figura 4.28- Início de compactação do objeto de prova - Peça N°3 .....	115
Figura 4.29 – a) Deslocamento lateral; b) avanço do segmento 2 sobre o segmento 3 – Peça N°3 .....	116
Figura 4.30 - Escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o corrugado "c" .....	116
Figura 4.31 - Escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o corrugado "c" .....	117
Figura 4.32 – Pós teste: a) vista do lado esquerdo e b) vista do lado direito - Peça N°3.....	117
Figura 4.33 – Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos– Peça N°3.....	118
Figura 4.34 - Aceleração e energia específica da barreira em função do tempo - Peça N°3 .	118
Figura 4.35 - Comparação das características principais das peças testadas .....	119
Figura 4.36 –Sumarização da deformação das três peças .....	120
Figura 4.37 – Peças compactadas .....	121
Figura 4.38 - Curvas de aceleração em função do tempo para os três objetos de prova .....	122
Figura 4.39 - Curvas de velocidade em função do tempo para os três objetos de prova .....	123
Figura 4.40 - Curvas de deslocamento em função do tempo para os três objetos de prova ..	124

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 - Composição química do aço DP600 em % da massa.....	33
Tabela 2.2 – Dimensões mínimas dos corpos de prova reduzido.....	39
Tabela 2.3 – Valores comprimento útil e razão obtidas HUH et al. (2007).....	47
Tabela 2.4 - Taxas de deformação estimadas para diferentes modos de deformação .....	66
Tabela 3.1 - Composição química do aço DP600: valores da literatura .....	75
Tabela 3.2 - Dimensões médias dos corpos de prova em milímetros.....	77
Tabela 3.3– Resumo das características das peças testadas .....	82
Tabela 4.1 - Composição química do aço DP600: resultados e valores da literatura.....	90
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas médias e desvio padrão dos lotes 1 e 2.....	94
Tabela 4.3 - Coeficientes da equação de Hollomon .....	95
Tabela 4.4 - Propriedades das colunas .....	96
Tabela 4.5 – Propriedades geométricas das placas de flambagem .....	96
Tabela 4.6 - Tensões e cargas de flambagem global e localizada .....	97
Tabela 4.7 - Taxas de deformação esperadas para diferentes modos de deformação .....	98
Tabela 4.8 - Forças médias esperadas para diferentes modos de deformação .....	100
Tabela 4.9 - Velocidades e energia cinética dos testes de compressão dinâmica .....	100
Tabela 4.10- Características de compactação - Peça N°1 .....	105
Tabela 4.11 -Características de compactação - Peça N°2 .....	114
Tabela 4.12 - Características de compactação - Peça N°3 .....	118
Tabela 4.13 – Características de compactação dos 3 objetos de prova .....	119
Quadro 2.1- Impactos em alta velocidade testados pela Latin NCAP .....	29
Quadro 2.2– Elementos de liga e sua influência nos aços DP.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AHSS – Advanced High Strength Steel (Aço Avançado de Alta Resistência)
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CESVI – Centro de Experimentação e Segurança Viária
- CFC – Channel Frequency Class
- C.G – Centro de gravidade
- CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito
- C.P – Corpo de prova
- DP – Dual Phase
- ECE – Economic Commission for Europe
- EEVC – European Enhanced Vehicle-Safety Committee
- ES-2 – Manequim EuroSid 2 (European Side Impact Dummy)
- FCA – Fiat Chrysler Automobiles
- FMVSS – Federal Motor Vehicle Safety Standard
- H III – Manequim Hybrid III
- HSS – High Strength Steel
- LRT – Limite de resistência à tração
- Latin NCAP – New Car Assessment Programme for Latin America and Caribbean
- MDB – Barreira móvel deformável (*Mobile Deformable Barrier*)
- MS – Aços martensíticos
- ODB – Barreira deformável com sobreposição (*Offset Deformable Barrier*)
- Q 3 – Manequim infantil representando uma criança de 3 anos de idade
- Q 1,5 - Manequim infantil representando uma criança de 1,5 ano de idade
- RCAR - Research Council for Automobile Repair
- SE – Super folding element
- UDRI – University of Dayton Research Institute
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- UFPR – Universidade Federal do Paraná



## NOMENCLATURA

A – Área da seção transversal

$A_0$  – Área inicial

AL – Alongamento percentual de um corpo de prova

$AL_u$  – Alongamento percentual uniforme de um corpo de prova

$\beta$  – Coeficiente para cálculo da força máxima de uma coluna retangular sob compressão

b – Maior lado da seção transversal de uma estrutura de paredes finas retangular

c – Aresta da seção transversal de uma coluna quadrada

C – Comprimento de um *Super Folding Element*

$\delta$  – Distância de deformação

d - Menor largura da seção transversal de uma estrutura de paredes finas retangular

D – Coeficiente na relação tensão - taxa de deformação

$\Delta l$  – Variação de comprimento

$\Delta t$  – Variação de tempo

$\Delta V$  – Variação de velocidade

E – Módulo de elasticidade

$E_t$  – Módulo de elasticidade tangente

$E_c$  – Energia cinética

$E_{absv}$  – Energia absorvida pela estrutura de paredes finas

$\epsilon$  – Deformação

$\dot{\epsilon}$  – Taxa de deformação

$\epsilon_v$  – Deformação verdadeira

$\Phi$  – Ângulo central de um SE

G – Comprimento útil do corpo de prova

I – Momento de inércia

$k^{pl}$  – Coeficiente de flambagem de uma placa

$k_2$  – Coeficiente para cálculo de força média de compactação de uma coluna quadrada

$k_p$  – *cripling plate coefficient*

$K^*$  – Coeficiente de resistência, equação de Hollomon

K – Fator que representa o tipo de engastamento em cálculo de flambagem de colunas

L – Comprimento total de uma determinada estrutura

$L_f$  – Comprimento final de uma estrutura compactada

$L_a$  – Lado de um SE – aresta a  
 $L_b$  – Lado de um SE - aresta b  
 $L_e$  – Comprimento efetivo de uma coluna  
 $l_i$  – Comprimento final de um corpo de prova para ensaio de tração  
 $l_o$  – Comprimento inicial de um corpo de prova para ensaio de tração  
 $l_p$  – Comprimento inicial da seção paralela de um corpo de prova para ensaio de tração  
 $m$  – Sensibilidade à taxa de deformação  
 $M_{cb}$  – Massa do crash-box  
 $M_f$  – Momento fletor  
 $M_1$  – Massa de impacto  
 $M_2$  – Massa impactante  
 $n$  – Expoente de encruamento de um determinado material, equação de Hollomon  
 $P$  – Carga aplicada  
 $P_e$  – Carga do limite de escoamento de uma estrutura  
 $P_{cr}^{col}$  – Carga crítica de flambagem de uma coluna  
 $P_{cr}^{pl}$  – Carga crítica de flambagem de uma placa  
 $P_m$  – Carga média de compactação de uma coluna  
 $P_m^D$  – Carga média de compactação em determinada taxa de deformação  
 $P_{max}$  – Carga máxima de compactação de uma coluna  
 $q$  – Expoente na relação tensão - taxa de deformação de Cowper-Symonds  
 $r$  – raio de giração de uma coluna  
 $S_e$  – Energia específica de uma estrutura de paredes finas  
 $S_{eb}$  – Energia específica dissipada da barreira  
 $S_{te}$  – Eficiência de compactação de uma estrutura de paredes finas  
 $\sigma_E$  – Tensão de escoamento  
 $\sigma$  – Tensão  
 $\sigma_o$  – Tensão de fluxo  
 $\sigma_o^D$  – Tensão de fluxo dinâmica  
 $\sigma_{cr}^{col}$  – Tensão crítica de flambagem de uma coluna  
 $\sigma_{cr}^{pl}$  – Tensão crítica de flambagem de uma placa  
 $\sigma_{lp}$  – Tensão limite de proporcionalidade  
 $\sigma_v$  – Tensão verdadeira  
 $t$  – Espessura

$t_a$  – Espessura do lado  $L_a$  de um *Super Folding Element*

$t_b$  – Espessura do lado  $L_b$  de um *Super Folding Element*

V – Velocidade

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

W – Largura da seção reduzida do corpo de prova

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1. Objetivo geral.....	22
1.2. Objetivo específico .....	22
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1. Ensaio de impacto com veículo completo - Brasil</b> .....	<b>23</b>
2.1.1. Homologação.....	23
2.1.2. Centro de Experimentação e Segurança Viária .....	26
2.1.3. Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe .....	28
<b>2.2. Aços Avançados de Alta Resistência</b> .....	<b>30</b>
2.2.1. Aços bifásicos.....	31
<b>2.3. Avaliação de propriedades mecânicas</b> .....	<b>36</b>
2.3.1. Ensaio de tração .....	36
2.3.2. Princípio de Saint-Venant .....	37
2.3.3. Corpo de prova padrão .....	38
2.3.4. Módulo de elasticidade .....	39
2.3.5. Limite de escoamento .....	40
2.3.6. Limite de resistência à tração .....	41
2.3.7. Tensões e deformações de engenharia e verdadeiras.....	41
2.3.8. Equação de Hollomon.....	42
<b>2.4. Influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas do material</b> .....	<b>43</b>
2.4.1. Taxas de deformação envolvidas em ensaios de impacto.....	43
2.4.2. Cálculo da taxa de deformação.....	44
2.4.3. Definição das propriedades mecânicas a taxas intermediárias de deformação .....	44
2.4.4. Corpos de prova para ensaios a taxas intermediárias de deformação .....	46
2.4.5. Sensibilidade à taxa de deformação .....	47
<b>2.5. Flambagem de colunas</b> .....	<b>50</b>
2.5.1. Flambagem elástica de colunas – Análise estática .....	50
2.5.2. Flambagem inelástica de colunas – Análise estática .....	53
<b>2.6. Estruturas de paredes finas</b> .....	<b>54</b>
2.6.1. Modos de colapso .....	55
2.6.2. Flambagem de placas – Análise estática.....	55

2.6.3. Deformação dinâmica progressiva .....	58
2.6.4. Considerações de projeto .....	66
2.6.5. Crash-box .....	70
2.6.6. Ensaio dinâmico de estruturas de paredes finas .....	71
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>74</b>
<b>3.1. Análise da composição química .....</b>	<b>74</b>
<b>3.2. Análise metalográfica .....</b>	<b>75</b>
<b>3.3. Ensaio de tração quase-estático .....</b>	<b>76</b>
<b>3.4. Ensaio de compressão dinâmica .....</b>	<b>79</b>
3.4.1. Geometria das peças e taxa de deformação .....	79
3.4.2. Preparação de pista .....	85
3.4.3. Análise .....	88
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
<b>4.1. Análise da composição química .....</b>	<b>90</b>
<b>4.2. Análise da microestrutura .....</b>	<b>90</b>
<b>4.3. Ensaio de tração .....</b>	<b>92</b>
<b>4.4. Ensaio de compressão dinâmica .....</b>	<b>95</b>
4.4.1. Considerações sobre a geometria .....	95
4.4.2. Taxas de deformação envolvidas .....	97
4.4.3. Coerência dos dados .....	100
4.4.4. Teste N°1 .....	101
4.4.5. Teste N° 2 .....	107
4.4.6. Teste N°3 .....	114
4.4.7. Comparação dos objetos testados .....	118
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>125</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>127</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>128</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial de Saúde, houve um total de 1,25 milhão de mortes no mundo em 2013 devido a acidentes de trânsito. No Brasil, o número oficializado em 2018 foi de 38651 fatalidades, correspondendo a 4,6 mortes por 100 mil habitantes (WHO, 2020). Segundo o Ministério da Saúde do Brasil, o número de óbitos devido aos acidentes de trânsito tem sofrido quedas desde 2010, mostrando que as ações envolvendo segurança veicular, segurança viária, criação de leis e de conscientização da população tem surtido efeito. Apesar disso as lesões de trânsito são consideradas a principal causa de morte entre crianças e jovens de 5 a 29 anos (OPAS, 2019).

Por esse motivo, a melhoria da segurança presente nos veículos tem sido objeto de estudo e interesse por parte de pesquisadores e governos. A ROTA 2030 (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2021), programa que define regras para a fabricação de automóveis do Brasil nos próximos 10 anos, possui metas ambiciosas de aumento da segurança oferecida nos automóveis brasileiros. Em 2030, veículos comercializados no Brasil terão que atender a diversos requisitos de impactos em alta velocidade, exigindo maior quantidade de testes e itens de segurança.

A melhoria da segurança no veículo tem-se dado através de elementos que trabalham de forma ativa e passiva. Na segurança ativa os componentes do veículo oferecem auxílio adicional ao motorista afim de se evitar uma colisão (BERTOCCHI, 2005). Já na segurança passiva, diversos componentes como cintos, bancos, *airbags* e a própria carroceria trabalham para oferecer o máximo de proteção durante uma colisão. Esta proteção pode ir além do ocupante do veículo, sendo muitas vezes também projetada para segurança de pedestres e até mesmo para ocupantes de outros veículos. Uma das maneiras de se atingir esse objetivo é através da melhoria da capacidade de absorção de energia dos veículos e redução de intrusão no espaço de sobrevivência, conceito conhecido como *crashworthiness*.

O projeto de um veículo para proteção ao ocupante em impactos pode ser resumido na gestão das energias envolvidas (BERTOCCHI, 2005). A energia cinética do veículo deve ser dissipada pela estrutura de forma controlada. Em uma colisão frontal, por exemplo, essa dissipação não pode ser rápida demais, porque isso diminui drasticamente o tempo disponível para os componentes internos reduzirem a velocidade dos ocupantes. Da mesma forma, a estrutura não pode deformar em excesso com baixos níveis de desaceleração, o que aumentaria

a probabilidade de maiores intrusões na célula de sobrevivência, causando danos adicionais aos ocupantes.

Os principais componentes estruturais dos veículos são formados por estruturas de paredes finas (ABRAMOWICZ, 2003). O correto projeto destas estruturas implica em maior energia absorvida pela carroceria do automóvel, maiores índices de proteção ao ocupante e redução de peso da estrutura, que por sua vez auxilia na redução de emissões de gases poluentes. Por fim, um dos grandes benefícios de um bom projeto está relacionado à maiores chances de redução do número de fatalidades devido aos acidentes de trânsito.

### **1.1. Objetivo geral**

Avaliar as alterações nas características de compactação e absorção de energia de diferentes estruturas de paredes finas com variações de geometria quando impactadas por uma barreira rígida e móvel. O presente trabalho propõe viabilizar a redução de custos/tempo durante o desenvolvimento de novos componentes estruturais para absorção de energia para projetos automobilísticos atuais e futuros.

### **1.2. Objetivo específico**

- Avaliar as características de compactação e absorção de energia de diferentes estruturas de paredes finas, modificadas a partir de uma geometria inicial, em ensaios de compressão dinâmica;
- Calcular a carga máxima de flambagem para estruturas sem iniciadores de deformação plástica;
- Propor melhorias às estruturas testadas para aumentar sua capacidade de absorção de energia.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ensaio de impacto com veículo completo - Brasil

#### 2.1.1. Homologação

O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), é o órgão máximo consultivo e normativo e coordenador do Sistema Nacional de Trânsito (BRASIL, 1997). É de responsabilidade do CONTRAN estabelecer as normas regulamentadoras para as leis de trânsito. As Normas Brasileiras (NBR) referentes aos ensaios de veículo completo em impacto frontal e traseiro foram especificadas como requisitos obrigatórios para a comercialização em território nacional na Resolução CONTRAN N°221 de 11/01/2007. A NBR referente à impacto lateral com barreira móvel é especificada na Resolução N°721 de 10/01/2018.

Em geral, para a realização dos testes, o veículo deve estar em key-on (chave ligada no primeiro estágio), permitindo a deflagração dos sistemas de retenção dos ocupantes. A integridade do tanque de combustível e da linha de alimentação é avaliada, sendo que uma vazão máxima de 30 g/min é permitida. Nenhuma porta deve abrir durante o impacto, o que indicaria um possível risco de ejeção dos passageiros de dentro do veículo. Porém, deve ser possível a abertura de pelo menos uma porta por fileira de bancos sem o uso de ferramentas, afim de possibilitar o resgate dos passageiros. O resgate deve ser possível sem a movimentação dos bancos e com força máxima de liberação dos cintos de 60 N.

##### 2.1.1.1. NBR 15300-2 (FMVSS 208) – impacto frontal

A NBR 15300-2 (2005) é utilizada pelo governo brasileiro como uma das possíveis opções de homologação do veículo em impacto frontal. Tem como base a *Federal Motors Vehicle Safety Standard 208* (FMVSS 208), regulamento originário dos Estados Unidos. Esta NBR deve ser utilizada em conjunto com a NBR 15300-1 (2013). O ensaio de acordo com a norma brasileira consiste em um impacto frontal contra uma parede rígida perpendicular a 48,3 km/h, Figura 2.1. Uma fina folha de madeira compensada pode ser usada ( $20 \pm 2$  mm) para proteger a parede da instalação durante o impacto e evitar fenômenos de ressonância (ABEDRABBO, MAYER, *et al.*, 2009).



Dois manequins *Hybrid III 50th* (H III 50%) são usados, representando 50% da população masculina nos Estados Unidos, pesando cerca de 81 kg. Aceleração da cabeça, forças e momento do pescoço, aceleração do tórax e forças de compressão do fêmur são usadas para avaliar a gravidade da lesão durante um impacto.

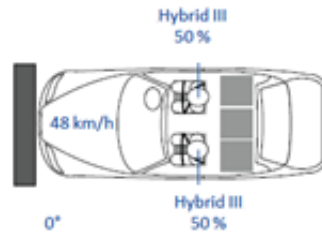


Figura 2.1 - Impacto frontal - NBR 15300-2

Fonte: Adaptado de CARHS, 2019, p.20

#### 2.1.1.2. NBR 15300-3 (ECE R94) – Impacto frontal

A NBR 15300-3 (2005) tem como base o Regulamento 94 da *Economic Commission for Europe*, revisão 01 (ECE R94 de 2007) e deve ser utilizada em conjunto com a NBR 15300-1 (2013). Este ensaio também utiliza dois manequins modelo H III 50%, sendo que o veículo impacta a 56 km/h uma barreira de colmeia de alumínio fixa, com 40% de sobreposição, Figura 2.2.

Os critérios biomecânicos utilizados são os níveis de aceleração da cabeça, momento fletor no pescoço, compressão do tórax, movimentação das juntas do joelho e força na tíbia, tanto do motorista quanto do passageiro.

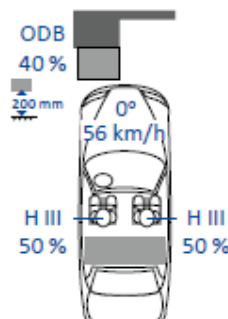


Figura 2.2 – Impacto frontal - NBR 15300-3

Fonte: adaptado de CARHS, 2019, p.20

### 2.1.1.3. NBR 15240 (ECE R32) – Impacto traseiro

Esta NBR possui como referência a ECE R32 (1993). Neste ensaio, o veículo é impactado por uma barreira móvel e rígida com velocidade entre 35 e 38 km/h. A barreira atinge o veículo, que se encontra parado, na sua parte posterior, com 100% de sobreposição, Figura 2.3.

Não há manequins presentes no veículo, portanto não são avaliados critérios biomecânicos. Os pontos de referência de todos os assentos traseiros são projetados no pavimento, pontos R posteriores, e devem ter um deslocamento máximo de 75 mm.

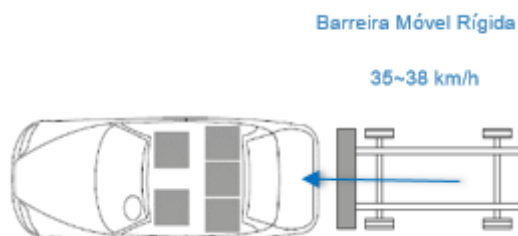


Figura 2.3 – Impacto traseiro - NBR 15240

Fonte: adaptado de CARHS, 2019, p.21

### 2.1.1.4. NBR 16204-2 (FMVSS 214) – Impacto lateral

Neste ensaio, uma barreira móvel deformável atinge o veículo estacionário em um ângulo de 63° com relação à linha longitudinal e velocidade de 53,6 km/h, Figura 2.4. Dois manequins são posicionados no lado impactado, um no banco anterior e outro no posterior. Na parte anterior, é utilizado um manequim modelo EuroSid-2re 50th (ES-2re 50th). No banco posterior, é utilizado o manequim modelo Sid-IIs 5th, que representa 5% da população feminina. Os critérios biomecânicos levam em consideração a aceleração nas costelas, na vértebra T12 e na pélvis.

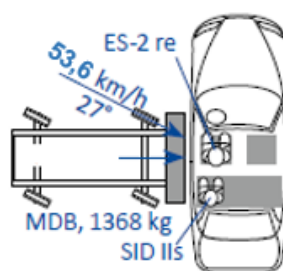


Figura 2.4 - Impacto lateral - NBR 16204-3

Fonte: adaptado de CARHS, 2019, p.21

#### 2.1.1.5. NBR 16204-3 (ECE R95) – Impacto lateral

Para a realização deste ensaio, uma barreira móvel cuja parte anterior é deformável, impacta um veículo estacionário, na sua lateral, a 50 km/h, Figura 2.5. O ponto de referência para o impacto é o alinhamento entre o centro da barreira móvel e o ponto de referência do assento dianteiro, especificado pela montadora (ponto R). Dentro do veículo é posicionado um manequim modelo EuroSid 2 50th (ES-2 50th) no banco frontal do lado onde o impacto ocorre.

Os limites biomecânicos avaliados neste teste são a aceleração da cabeça, compressão das costelas avaliada em três posições distintas, força no abdômen e na pélvis. Esta norma possui como referência a ECE R95 revisão 01 (2011) e deve ser utilizada em conjunto com a NBR 16204-1 (2013).

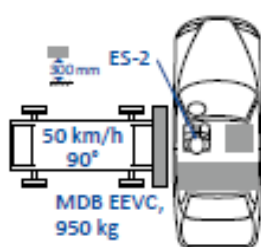


Figura 2.5 - Impacto lateral - NBR 16204-3

Fonte: adaptado de CARHS, 2019, p.21

#### 2.1.2. Centro de Experimentação e Segurança Viária

O Centro de Experimentação e Segurança Viária (CESVI) atua no campo da segurança viária através de estudos, campanhas e suporte à órgãos do governo com seu *know-how* técnico. Este é o único centro de pesquisa no Brasil dedicado ao estudo da reparação automotiva,

presente no país desde 1994 (CESVI BRASIL, 2019). É um dos três membros da RCAR (*Research Council for Automobile Repair*) na América do Sul, uma organização internacional de centros de pesquisa automotiva cujo propósito é a redução de custos humanos e econômicos em perdas de veículos automotores.

As pesquisas desenvolvidas pela CESVI auxiliam o setor automotivo e o consumidor em geral pela classificação de diferentes automóveis em índices específicos. Em 2021, os índices fornecidos pela CESVI ao público são: segurança, visibilidade, danos de enchente, furto, manutenção veicular e *Car Group*.

#### 2.1.2.1. Índice Car Group

O índice *Car Group* classifica os veículos quanto à sua facilidade de reparação, custo de mão de obra e necessidade de peças trocadas após ensaios de veículo completo em colisões frontal e traseira. A CESVI realiza esses ensaios, repara o veículo e avalia todos os custos envolvidos. O custo de reparação é calculado com base no tempo e custo de mão de obra, custo das peças de reposição e custos de funilaria e pintura. Os carros testados são então classificados em uma escala de 10 a 60, sendo 10 a nota máxima e 60 a nota mínima.

Os ensaios de veículo completo utilizados para classificação no índice *Car Group* são baseados no protocolo proposto pela RCAR (2017). Neste protocolo são indicados os procedimentos de preparação do veículo, velocidade de impacto, barreiras a serem utilizadas e métodos de análise.

Os impactos devem ser realizados em uma pista larga o suficiente para acomodar o veículo e cujos cinco últimos metros antes da colisão sejam planos. Para o impacto frontal o veículo é colidido contra uma barreira rígida e vertical com uma velocidade de 15 a 16 km/h, sendo que este pode ser impulsionado por uma fonte externa ou pela ação do próprio motor. A barreira possui uma angulação de 10° e deve estar posicionada de forma que atinja apenas 40% da largura do veículo, conforme Figura 2.6.

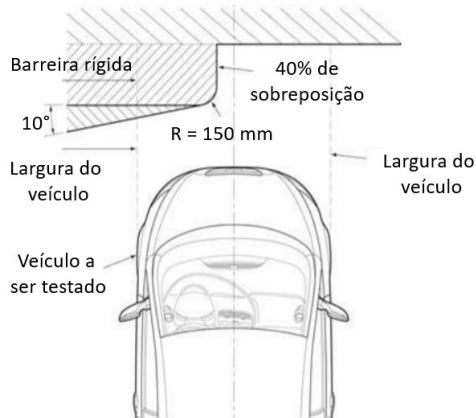


Figura 2.6 - Impacto frontal - RCAR

Fonte: adaptado de RCAR, 2017, p.12

Para o impacto traseiro, a marca de 40% de sobreposição deve ser realizada na parte posterior e o automóvel deve ser posicionado com uma angulação de  $10^\circ$  em relação à linha central da pista, como mostrado na Figura 2.7. A barreira para este tipo de impacto é um veículo com estrutura treliçada rígida e massa de  $1400 \pm 5\text{kg}$ .

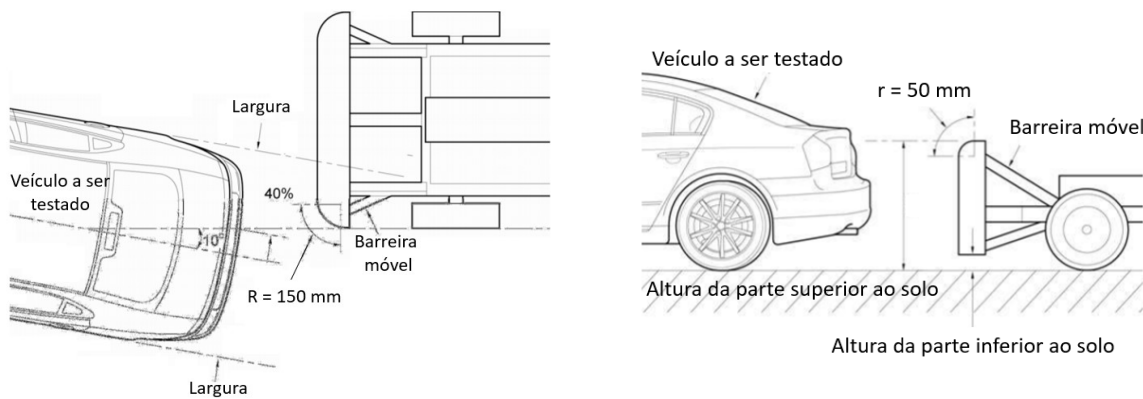


Figura 2.7 – Impacto traseiro - RCAR

Fonte: adaptado de RCAR, 2017, p.13

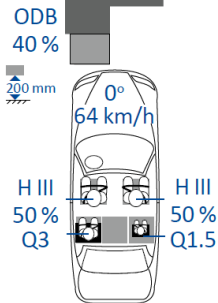
### 2.1.3. Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe

O Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e Caribe (Latin NCAP) começou seus trabalhos em 2010 como uma iniciativa, tornando-se uma associação em 2014 (LATIN NCAP, 2020). Esta associação testa veículos das montadoras presentes na América Latina e Caribe em testes próprios, baseados em normas utilizadas pela Global NCAP. Estes programas têm como objetivo fomentar pesquisas independentes sobre a segurança dos

veículos, informar os consumidores sobre os níveis de proteção dos seus carros e subir o nível de exigências de segurança além dos limites impostos pelos governos.

A avaliação é dada através da proteção específica de cada região do corpo dos ocupantes, gerando uma pontuação que classifica o desempenho total do veículo de 0 a 5 estrelas. A pontuação final na versão atual do protocolo também depende de itens de segurança ativa, como controle de estabilidade eletrônico e freio de emergência automático, além de proteção oferecida a pedestres (LATIN NCAP, 2020). É possível verificar em seu website a nota obtida por todos os veículos testados, vídeos dos testes, níveis de proteção atingidos em cada um dos testes separadamente e comentários adicionais sobre o comportamento estrutural e adicionais do veículo. Os protocolos de teste apresentaram alterações ao longo do tempo, de forma que veículos testados em anos anteriores foram submetidos a menor quantidade de ensaios e requisitos adicionais para atingirem uma pontuação mais alta. Atualmente os ensaios de impacto em alta velocidade da NCAP são os indicados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Impactos em alta velocidade testados pela Latin NCAP

FRONTAL ODB40%	LATERAL MDB	POSTE RÍGIDO LATERAL
 <p>ODB 40 % 200 mm 0° 64 km/h H III 50 % Q3 H III 50 % Q1.5</p>	 <p>300 mm ES-2 MDB EEVC 50 km/h 90° 950 kg Q1.5 Q3</p>	 <p>ES-2 29 km/h 90° ∅ 254 mm Poste</p>
		

Fonte: adaptado de CARHS, 2019, p.28 e LATIN NCAP, 2020

A Figura 2.8 mostra os níveis de proteção atingidos pelo FIAT 500X nos testes de impacto frontal com sobreposição de 40%, impacto lateral contra barreira móvel e impacto lateral contra poste rígido.

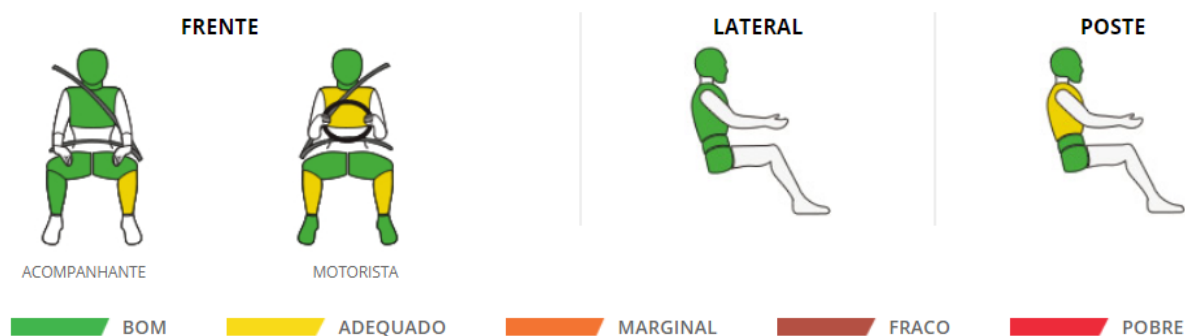


Figura 2.8 – Pontuação nos testes da Latin NCAP do FIAT 500X

Fonte: adaptado de LATIN NCAP, 2020

## 2.2. Aços Avançados de Alta Resistência

Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) são materiais complexos e sofisticados com composição química cuidadosamente selecionada e microestruturas multifásicas resultantes de processos precisamente controlados de aquecimento e resfriamento (KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017). A utilização destes materiais foi alavancada pelo *Ultralight Steel Auto Body*, um programa realizado pelo consórcio de 35 fabricantes de chapas metálicas em 1994, com o objetivo de projetar uma carroceria de automóvel com baixa massa e capaz de atingir uma alta variedade de requisitos de segurança e desempenho.

De acordo com BALUCH, UDIN e ABDULLAH (2014), os aços AHSS são muito vantajosos quando utilizados em estruturas da carroceria para melhorar a segurança em impactos e ainda reduzir a espessura das peças. Devido a essas características, têm sido comumente utilizados para confecção das colunas A e B, longarinas, soleira e travessas do automóvel. A utilização deste tipo de aço permite redução de espessura em partes da carroceria sem perda de desempenho, trazendo consigo diversas vantagens em diferentes áreas de interesse, como melhor segurança do ocupante em impactos e menores índices de emissão devido à redução de massa do veículo. Além destas características, o processo de estampagem e soldagem destas peças utilizam técnicas comuns na indústria automotiva, diminuindo o custo de sua aplicação. A Figura 2.9 mostra o rápido crescimento da utilização destes aços no período entre 2007 e 2015.

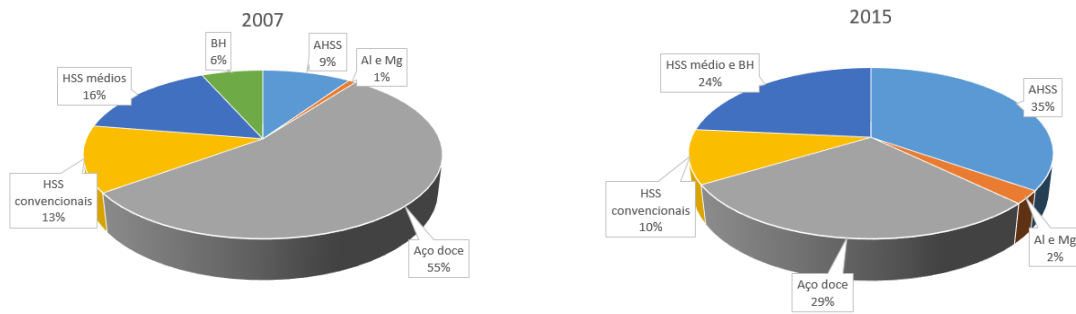


Figura 2.9 - Uso de Aços de Alta Resistência (HSS) e AHSS em automóveis

Fonte: adaptado de KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017, p.6

Estes aços apresentam quantidade significativa de elementos de liga e duas ou mais fases, o que os dá características superiores de rigidez e ductilidade (KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017). Os aços que podem ser classificados como AHSS incluem os Bifásicos (DP), martensíticos (MS), transformação de fase induzida por deformação plástica (TRIP) dentre outros.

### 2.2.1. Aços bifásicos

Aços bifásicos (do inglês *Dual Phase*, DP) são comumente utilizados na indústria automobilística devido às suas propriedades mecânicas. Podem ser encontrados na estrutura da coluna B, pavimento, corpo externo da carroceria, longarinas traseiras, travessas do teto, dentre outros (KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017). Na Figura 2.10 são identificadas em amarelo possíveis posições de aplicação do aço DP nas carrocerias dos automóveis.

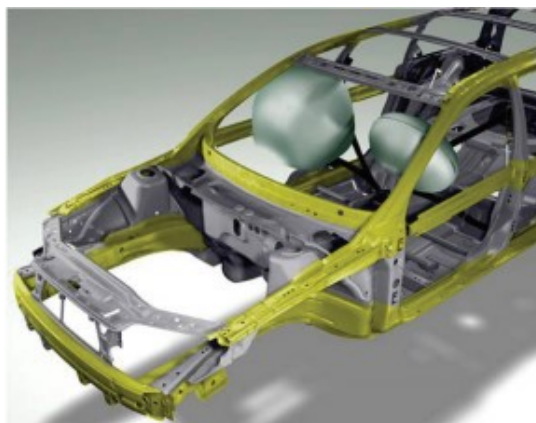


Figura 2.10 - Utilização do aço DP na construção de carrocerias

Fonte: GRANBOM, 2010, p.2



Tais aços possuem uma microestrutura com matriz ferrítica poligonal com pequenos constituintes de martensita – austenita retida, podendo também serem encontradas austenita retida, perlita e bainita. A matriz de ferrita representa a maior parte da sua microestrutura, variando de 80 a 85% da fração em volume, enquanto a martensita possui entre 15 e 20%. Estes valores são comumente encontrados na literatura por diversos autores, de acordo com ZANLUCHI (2014). A Figura 2.11 ilustra a microestrutura de um aço DP-800, avaliada por microscopia eletrônica de varredura.

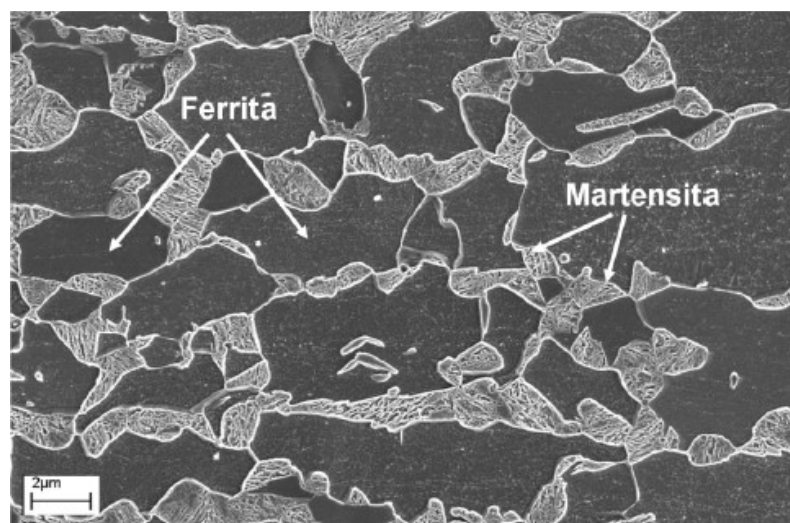


Figura 2.11 - Micrografia de aço DP 800 obtida por microscópio eletrônico de varredura

Fonte: Adaptado de GRANBOM, 2010, p.3

Existem duas maneiras pelas quais podem ser obtidos os aços DP. A primeira delas, é através do resfriamento controlado da fase austenita, em aços submetidos a laminação a quente. A outra maneira dá-se pelo recozimento contínuo de aços com estrutura ferrita + austenita que foram laminados a frio, transformando parte da austenita em ferrita e o restante em martensita após um rápido resfriamento (KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017), processo indicado na Figura 2.12. Quanto maior for a quantidade de carbono presente no aço, maior será a quantidade de austenita formada em uma determinada temperatura no campo bi-fásico ferrita-austenita, da mesma forma que maiores temperaturas intercríticas de recozimento também levam à maior formação de austenita (KRAUSS, 2005).

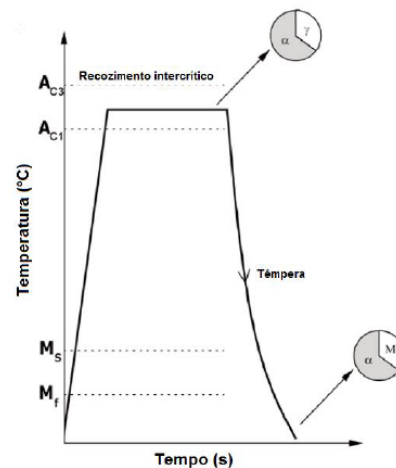


Figura 2.12- Recozimento intercrítico usado para aços laminados a frio

Fonte: adaptado de GALÁN et al., 2012 apud AMARAL, 2017, p.124

A *American Society for Testing and Materials* (2013), ASTM, indica valores máximos de 0,17% de carbono e 4,75% de manganês, alumínio e silício somados na composição total para aços do tipo DP600. O manganês é um elemento de liga estabilizador da fase austenita, enquanto a ferrita é estabilizada pelo silício. Apesar de não indicar uma porcentagem específica para esses elementos, a composição dos mesmos deve ser indicada separadamente pelo fabricante. A Tabela 2.1 mostra a composição química encontrada e fornecida por: [1] OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007), [2] TIGRINHO (2011) e [3] fabricante do aço utilizado por TIGRINHO (2011). Já o Quadro 2.2 traz um compilado dos efeitos e influências dos principais elementos de liga presentes nos aços DP.

Tabela 2.1 - Composição química do aço DP600 em % da massa

REFERÊNCIA	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Nb	Ti	V
[1]	0,09	0,263	1,723	0,014	ND	0,042	ND	ND	0,002	0,002	ND
[2]	0,086	0,053	1,739	0,027	0,007	0,031	0,048	0,226	0,028	0,004	ND
[3]	0,07	0,01	1,66	0,019	0,005	0,043	0,03	0,16	0,015	<0,005	<0,005

Fonte: Autor, 2020

Quadro 2.2– Elementos de liga e sua influência nos aços DP

Elementos de liga (% peso)	Razão / Influência da Adição
C (0,06 a 0,15%)	1. Estabilizador da Austenita 2. Endurecedor da martensita 3. Determina a distribuição das fases
Mn (1,5 a 2,5%)	1. Estabilizador da Austenita 2. Endurecedor da ferrita 3. Retarda a formação da ferrita
Cr e Mo (até 0,4%)	1. Estabilizador da ferrita 2. Retarda a formação da perlita e da bainita
V (até 0,06%)	1. Estabilizador da ferrita 2. Endurecedor por precipitação 3. Refina a microestrutura
Nb (até 0,04%)	1. Estabilizador da ferrita 2. Reduz a temperatura Ms 3. Refina a microestrutura
Si (até 1,0%)	1. Abaixa a solubilidade do carbono na ferrita 2. Estabilizador da ferrita

Fonte: Adaptado de USIMINAS, 2008, p.19

De acordo com OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007), os aços DP possuem baixa razão de limite de escoamento por limite de resistência, que pode ser explicado devido à mudança de volume da fase austenita para martensita durante o resfriamento. Esta mudança introduz discordâncias e tensões residuais na matriz de ferrita e na interface ferrita/martensita, facilitando o escoamento do material. Após o escoamento, a densidade de discordâncias aumenta rapidamente, o que dá ao material boas propriedades de endurecimento por trabalho a frio. As “ilhas” de martensita são as responsáveis por controlar a relação resistência – ductilidade do material (TIMOKHINA, HODGSON, *et al.*, 2008). O aumento da fração volumétrica de martensita geralmente também leva à um aumento de resistência, de acordo com KEELER, KIMCHI e MOONEY (2017), o que pode levar a limites variando entre 350 e 1000 MPa (HUH, KIM, *et al.*, 2007).

Dentre as características de aços DP estão a elevada taxa de encruamento e altos níveis de alongamento, devido ao aumento da fração volumétrica de “ilhas” de martensita na matriz ferrítica. Essas duas características em conjunto permitem que estes materiais absorvam

grandes quantidades de deformação antes da ruptura (FONSECA, COSTA, *et al.*, 2005), tornando-os bons materiais para aplicações de conformação e absorção de energia. O aumento da temperatura intercrítica de recozimento ocasiona o aumento da quantidade de martensita para o aço DP600, como mostrado por ROSENBERG, SINAIÓVÁ e JUHAR (2013), conforme indicado na Figura 2.13.

A Figura 2.14 mostra a variação das propriedades mecânicas obtidas por ensaio de tração para diferentes tipos de aços DP. Na classificação indicada na figura, os aços são primeiramente classificados pela tensão de escoamento ( $\sigma_E$ ) e depois pelo limite de resistência à tração (LRT) em MPa.

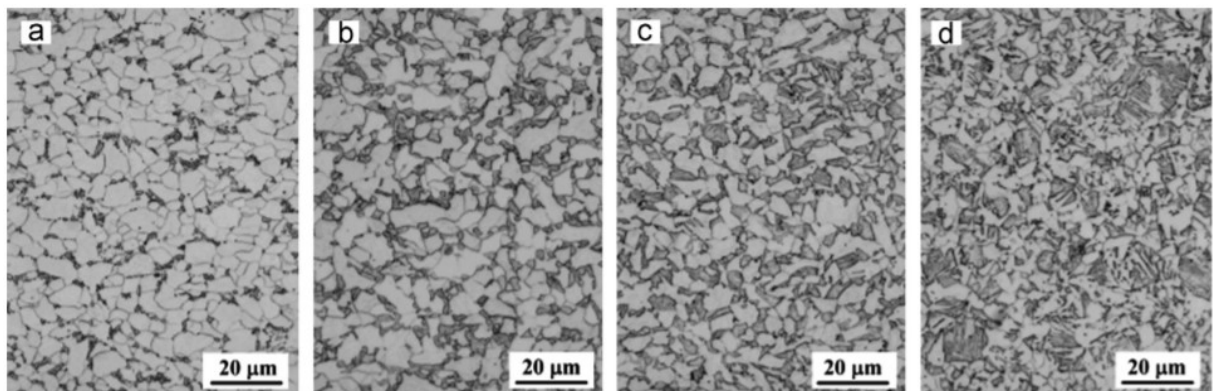


Figura 2.13 – Micrografia DP600 temperado a partir de diferentes temperaturas intercríticas de recozimento : a) 740°C; b) 780°C; c) 820°C e d) 860°C

Fonte: ROSENBERG, SINAIÓVÁ e JUHAR, 2013, p. 350

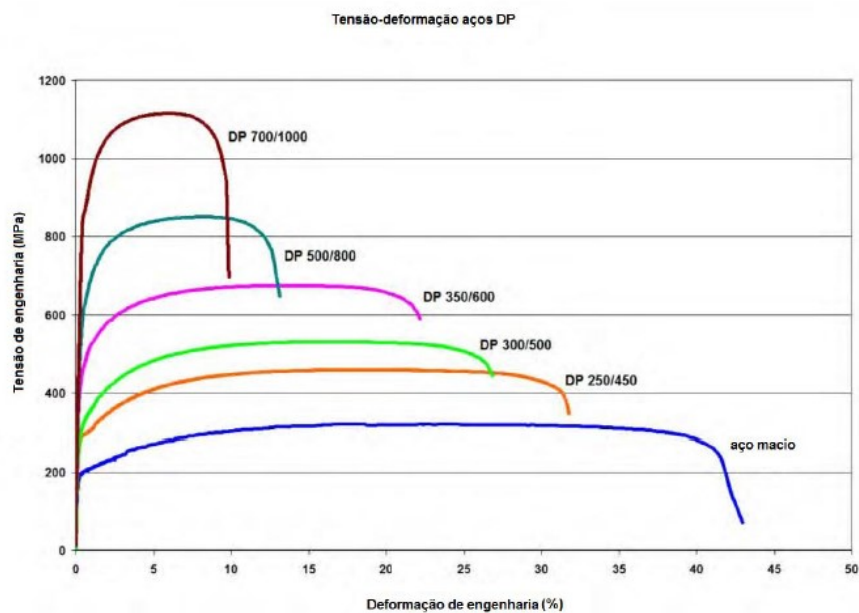


Figura 2.14 - Tensão por deformação de engenharia para diferentes tipos de aço DP

Fonte: KEELER, KIMCHI e MOONEY, 2017, apud AMARAL, 2017, p.34

## 2.3. Avaliação de propriedades mecânicas

### 2.3.1. Ensaios de tração

O ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos mais comuns que podem representar o comportamento tensão-deformação (CALLISTER, 2000). Diversas propriedades dos materiais são obtidas através deste ensaio, que consiste em tracionar gradativamente um corpo de prova (C.P) padronizado até a sua ruptura, e as respostas fornecidas são utilizadas para seleção de materiais em aplicações de engenharia (ASTM INTERNATIONAL, 2004).

As normas padronizadas são coordenadas frequentemente por sociedades profissionais especializadas, como a ASTM. Esta sociedade indica dimensões para corpos de provas cilíndricos e retangulares (chapas), assim como opções para corpos de provas de tamanho reduzido ou normal.

A máquina de ensaios de tração, similar ao esquema da Figura 2.15, é capaz de mensurar a carga exigida pelo corpo de prova ao seu alongamento através de uma célula de carga, e os alongamentos resultantes através de um extensômetro. Estes resultados são plotados em um gráfico de tensão por deformação de engenharia, calculadas através das equações (2.1) e (2.2), de onde podem ser obtidas diversas propriedades mecânicas dos materiais.

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (2.1)$$

$$\epsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (2.2)$$

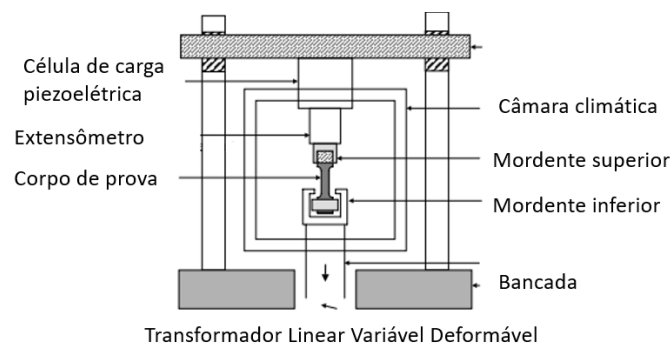


Figura 2.15 - Máquina de ensaios de tração

A tensão ( $\sigma$ ) é calculada a partir da área da seção transversal do corpo de prova ( $A_o$ ) e plotada em detrimento da carga aplicada (P) pela máquina para que se haja uma normalização dos resultados. A deformação ( $\epsilon$ ) é calculada a partir do aumento do comprimento do corpo de prova ( $\Delta l$ ) sobre o comprimento inicial ( $l_o$ ). A Figura 2.16 é um gráfico típico de tensão por deformação obtido em um ensaio de tração, também conhecidos como tensão por deformação de engenharia ou convencional.

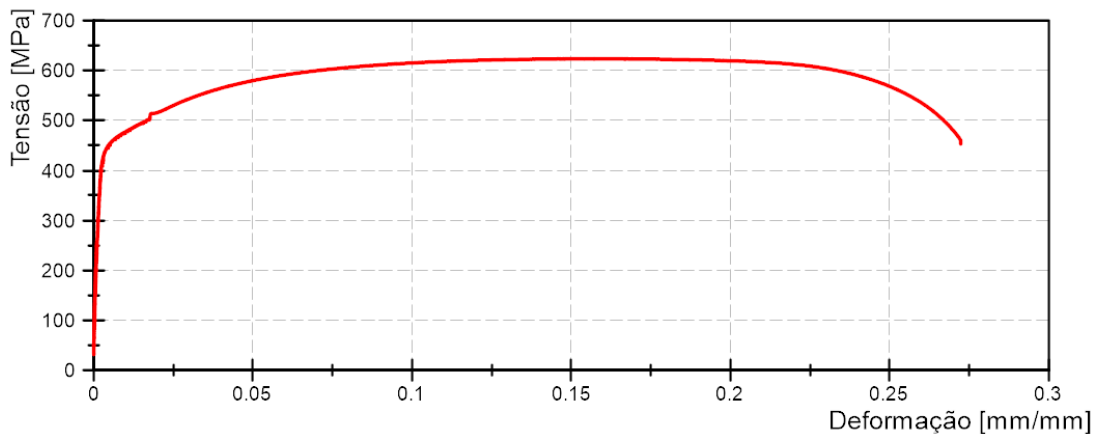


Figura 2.16 - Gráfico tensão por deformação obtido em ensaio de tração

Fonte: Autor, 2020

### 2.3.2. Princípio de Saint-Venant

A distribuição de tensão e deformação são afetadas nas regiões próximas à carregamentos e condições de contorno, gerando estados complexos e não uniformes. Se for colocado, por exemplo, um objeto de seção transversal retangular engastado em suas extremidades entre dois planos e aplicada uma carga P qualquer, conforme ilustrado na Figura 2.17, a distribuição de tensão próxima dos planos terá uma configuração não uniforme. Já se a análise for feita em uma região afastada o suficiente destas extremidades, a tensão resultante será a tensão média, obtida pela EQUAÇÃO (2.1).

O princípio de Saint-Venant é uma regra geral baseada na observação experimental do comportamento de materiais (HIBBELER, 2004). Este princípio indica a partir de qual distância da aplicação de uma carga ou de uma condição de contorno espera-se uma distribuição de tensão uniforme em um determinado corpo, considerada como sendo de no mínimo igual à maior medida da seção transversal do corpo. No caso da Figura 2.17, a barra possui seção retangular de dimensões  $L$  e  $\frac{L}{2}$ . A distância mínima das extremidades na qual é possível

encontrar uma distribuição de tensão dada pela EQUAÇÃO (2.1) é igual a  $L$  a partir de cada uma das extremidades, região indicada de verde na Figura 2.17. A região vermelha é afetada pelas suas extremidades e não possui distribuição de tensão uniforme.

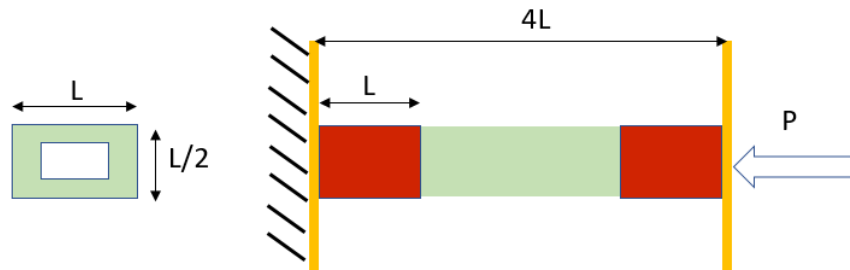


Figura 2.17 - Princípio de Saint-Vernant

Fonte: Autor, 2020

De maneira geral, o princípio de Saint-Vernant diz que o efeito de carregamentos diferentes, mas com mesma resultante e aplicados ao mesmo corpo, surtirão um efeito igual à uma distância suficientemente afastada dos pontos de aplicação. Porém, esse princípio não é aplicado a todos os tipos de carregamento ou condições de contorno. De acordo com HIBBELER (2004), membros feitos de elementos com paredes finas sujeitos a cargas que provocam grandes deflexões podem sofrer efeitos das extremidades em distâncias maiores do que a maior dimensão da seção transversal.

### 2.3.3. Corpo de prova padrão

Os principais elementos geométricos do corpo de prova para chapas são explicitados na Figura 2.18, onde  $l_o$  é o comprimento total,  $l_p$  é o comprimento da seção paralela e  $G$  e  $W$  são o comprimento e a largura da parte útil, respectivamente.

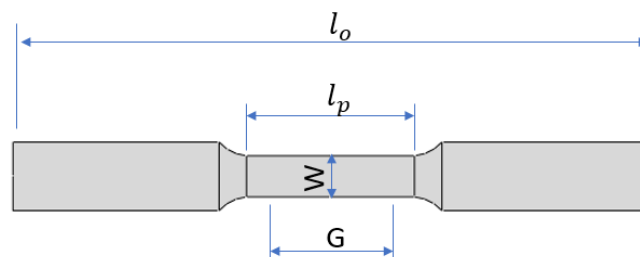


Figura 2.18 – Geometria do corpo de prova padrão

Fonte: Autor, 2020

O padrão atual dos corpos de prova para ensaios quase-estáticos de tração em chapas segue o estabelecido na norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2015). Existem três dimensionamentos possíveis para esses corpos de provas, conhecidos como padrão e reduzido, sendo duas possibilidades para a configuração padrão dependendo da espessura da chapa a ser testada. A Tabela 2.2 indica dimensões do corpo de prova de tamanho reduzido.

Tabela 2.2 – Dimensões mínimas dos corpos de prova reduzido

Dimensão nominal	Corpo de prova reduzido [mm]
G	25
W	6
$l_o$	100
$l_p$	32

FONTE: adaptado de ASTM, 2015, p.4

Quando tracionado, a maior parte da deformação deve concentrar-se no comprimento da parte útil (G), de modo que a leitura do curso total dos mordentes da máquina de ensaio de tração e a deformação medida por um extensômetro posicionado no comprimento útil tenham valores próximos, indicando que a maior parte da deformação ocorre naquela região. O raio de concordância (R) controla a concentração de tensão no final da seção paralela ( $l_p$ ), diminuindo a deformação de áreas estranhas ao comprimento útil, enquanto a largura do comprimento útil (W) tem a função de garantir que aquela região será deformada preferencialmente durante o ensaio.

O comprimento total do corpo de prova ( $l_o$ ) deve ter o mínimo necessário para que não haja influência dos mordentes sobre a deformação do comprimento útil da amostra, de acordo com o princípio de Saint-Venant.

#### 2.3.4. Módulo de elasticidade

Para a maioria dos metais, quando solicitados em regime elástico, é possível relacionar a tensão desenvolvida e a deformação por uma constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, representado comumente por “E”. A equação que indica esse comportamento é conhecida como lei de Hooke (CALLISTER, 2000).



$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3)$$

O módulo de elasticidade dos materiais pode ser considerado como sendo uma rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica, sendo que quanto maior o módulo, mais resistente à deformação é o material (CALLISTER, 2000). Em escalas atômicas, o comportamento da deformação elástica é explicado por alterações do espaçamento interatômico sem causar a ruptura das suas ligações. Em um gráfico típico de tensão deformação, como o da Figura 2.16, o módulo de elasticidade é calculado pelo coeficiente angular da parte elástica. Uma outra propriedade comum utilizada é o módulo da tangente ( $E_t$ ), que descreve a inclinação da curva tensão por deformação em um determinado ponto.

### 2.3.5. Limite de escoamento

O limite ou tensão de escoamento,  $\sigma_E$ , de um determinado material pode ser interpretado como sendo a tensão a partir da qual o material sofre deformações plásticas (CALLISTER, 2000). Existem diferentes métodos para encontrar este limite. Em um deles, deve-se traçar uma reta paralela à região elástica na curva de tensão por deformação de engenharia, iniciando no eixo da abscissa no ponto de 0,2% de deformação. O limite de escoamento será dado pela intercepção desta linha reta com a curva de tensão por deformação. A Figura 2.19 é uma ampliação de uma curva tensão por deformação e indica o processo de obtenção da tensão de escoamento.

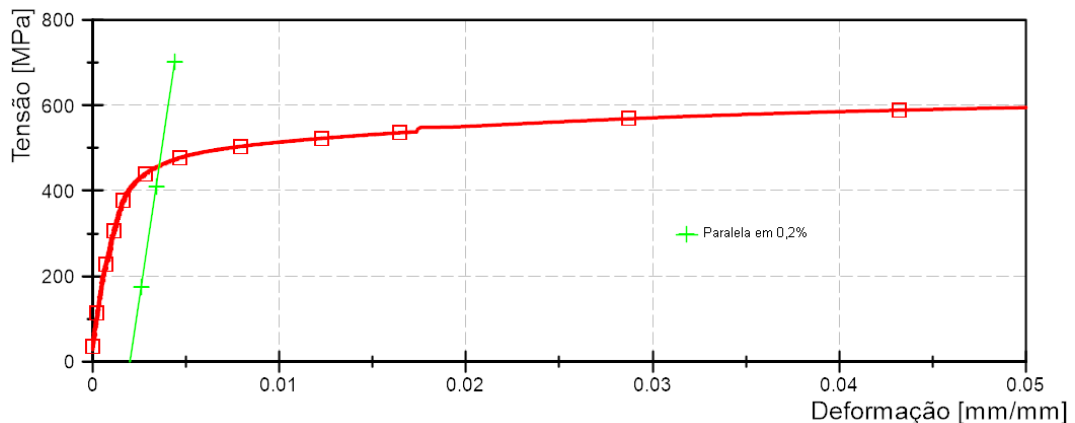


Figura 2.19 – Determinação da tensão de escoamento de um material

Fonte: Autor, 2020

### 2.3.6. Limite de resistência à tração

É dado pelo ponto máximo na curva de tensão por deformação de engenharia, Figura 2.20, indicando a tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura submetida à tração pura (CALLISTER, 2000). Até este ponto, toda a deformação ocorrida no corpo de prova é uniforme e, a partir dele, começa o surgimento da estrição (ou pescoço) e do estado triaxial de tensões.

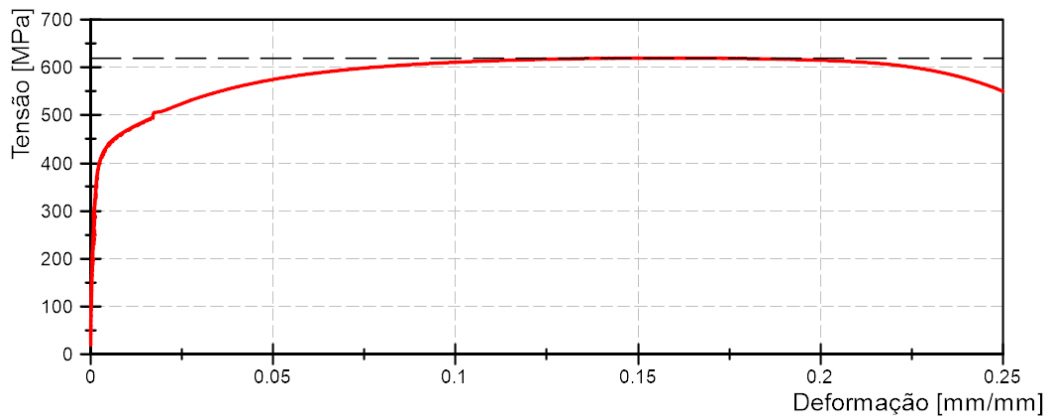


Figura 2.20 - Limite de resistência à tração

Fonte: Autor, 2020

### 2.3.7. Tensões e deformações de engenharia e verdadeiras

Durante a execução do ensaio, quando o corpo de prova começa a deformar, sua seção transversal diminui. Esse decréscimo na seção ocasiona uma tensão maior que a indicada na Figura 2.16, pois neste gráfico está sendo levado em consideração a seção transversal inicial do objeto. As EQUAÇÕES (2.4) e (2.5) são utilizadas para obtenção dos valores verdadeiros de tensão e deformação respectivamente.

$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.4)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon) \quad (2.5)$$

$\sigma_v$  e  $\epsilon_v$  representam a tensão e deformação verdadeiras respectivamente, e as equações acima são válidas enquanto as distorções lineares forem uniformes. Num ensaio de tração o limite de validade destas equações seria o limite de resistência à tração, a partir do qual ocorre

o fenômeno de estricção do corpo de prova (CALLISTER, 2000), indicado pelo encontro das linhas tracejadas com a curva de tensão e deformação de engenharia na Figura 2.20. A partir deste ponto, as tensões e deformações verdadeiras devem ser computadas pela área do corpo de prova, carga aplicada e comprimento útil reais (CALLISTER, 2000). Na Figura 2.21 está também representada a curva de tensão e deformação verdadeira, conhecida como curva de fluxo (DIETER, 1961), plotadas até o limite de resistência à tração (LRT).

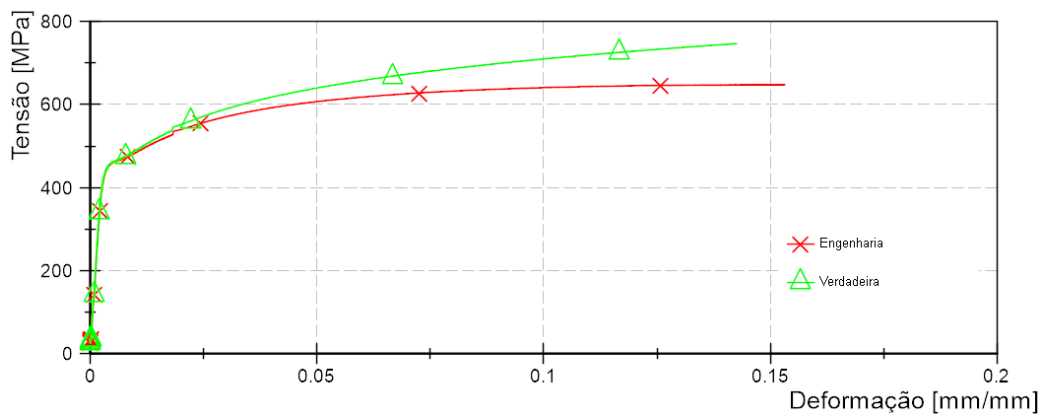


Figura 2.21 - Gráfico tensão vs deformação de engenharia e verdadeira

Fonte: Autor, 2020

### 2.3.8. Equação de Hollomon

A equação de Hollomon é a mais comumente utilizada para modelar o comportamento da curva de tensão por deformação verdadeiras do início da deformação plástica até o limite de resistência à tração (DIETER, 1961). Na EQUAÇÃO (2.6),  $K^*$  quantifica o nível de resistência que o material exerce contra a sua deformação (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012). Já “n” indica o expoente de encruamento do material, dado pela inclinação da curva logarítmica desta mesma equação.

$$\sigma = K^* \epsilon^n \quad (2.6)$$

A ASTM E646 (2016) indica dois possíveis métodos para o cálculo de n, método A e método B. Para o método A, utiliza-se a tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira na porção plástica da curva. Desta forma, deve-se encontrar e subtrair da deformação verdadeira a deformação elástica da curva. A deformação elástica da curva é obtida tomando-se a tensão verdadeira em cada ponto e dividindo pelo valor nominal do módulo de elasticidade do material,

obtido através de ensaios de tração (ASTM E517, 2000). O método B utiliza tensão e deformação verdadeiras, também na porção plástica da curva, não sendo necessário subtrair a deformação elástica. O método B, porém, deve ser considerado como opção apenas se a deformação elástica for menor que 10% da deformação plástica para todos os pontos analisados. A ISO 10275 (2007) indica metodologia semelhante ao método B, além de definir intervalos de deformação em que os coeficientes são calculados.

Após a escolha do método a ser utilizado para o cálculo dos coeficientes da equação de Hollomon, estes podem ser obtidos através de regressão linear do logarítmico da tensão verdadeira pelo logarítmico da deformação verdadeira dos dados experimentais, utilizando softwares como, por exemplo, Microsoft Excel.

## **2.4. Influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas do material**

### 2.4.1. Taxas de deformação envolvidas em ensaios de impacto

Conforme explicitado anteriormente, existem diferentes ensaios de impacto para veículos completos, cada um com uma particularidade com relação às barreiras, velocidades de impacto, manequins utilizados e índices biomecânicos aferidos nos testes.

Não necessariamente as taxas de deformação envolvidas nestes ensaios são similares. Ensaios como por exemplo a FMVSS 208, onde ambas as longarinas do veículo trabalham na absorção de energia, tendem a apresentar curvas de aceleração e variação de velocidade mais severas até mesmo do que a Latin NCAP frontal, que possui velocidade inicial de impacto 16 km/h superior.

A compressão da estrutura do veículo dá-se de maneira distinta para ensaios em barreira rígida e com barreira deformável. Durante uma parte do impacto, a barreira deformável absorve parte da energia cinética do veículo. Já a barreira rígida não se deforma e não absorve energia cinética do veículo, resultando em velocidades de compressão semelhantes à velocidade do veículo para estruturas mais próximas do ponto inicial do impacto.

Deve-se salientar ainda que à medida em que a estrutura é deformada, energia cinética é convertida em energia de deformação, calor e outros. Isso significa que a velocidade do veículo é reduzida e, conseqüentemente, as taxas de deformação dos componentes que ficam mais distantes do local do impacto inicial diminuem.

Devido à estas diferentes condições, vários autores indicam taxas de deformação diferentes como sendo características de impacto de veículos. WANG et al. (2017) estudaram materiais entre as taxas de deformação de  $0,0006$  e  $56 s^{-1}$ . HUH et al. (2009) indicaram que as taxas locais envolvidas variam entre  $200$  e  $500s^{-1}$ , enquanto *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005) taxou como mais relevantes as compreendidas até  $300s^{-1}$ .

#### 2.4.2. Cálculo da taxa de deformação

A taxa de deformação pode ser encontrada de acordo com a EQUAÇÃO (2.7).  $V$  é a velocidade de compressão ou tração e  $L$  é o comprimento do objeto.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{L} \quad (2.7)$$

Em se tratando de um ensaio de tração, quando  $V$  é a velocidade máxima do cabeçote e  $L$  o comprimento da seção reduzida, temos então a maior taxa de deformação que um ensaio pode atingir (*HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP*, 2005). Como a velocidade de cabeçote máxima é uma limitação da máquina, é possível atingir diferentes taxas de deformação alterando o comprimento da seção reduzida de um corpo de prova.

Se o raio de concordância do corpo de prova for muito pequeno, o que de acordo com *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005) é frequentemente o caso, todo o comprimento da seção reduzida do corpo de prova (Figura 2.18), pode ser utilizada para o cálculo da taxa de deformação.

#### 2.4.3. Definição das propriedades mecânicas a taxas intermediárias de deformação

Em princípio, qualquer máquina de tração que seja capaz de aplicar uma carga uniaxial até a falha do corpo de prova em uma determinada taxa de deformação está apta a realizar um ensaio de tração dinâmico (*HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP*, 2005). As máquinas mais utilizadas são do tipo servo-hidráulica, algumas com sistemas capazes de atingir velocidades de deslocamento do cabeçote de até  $30$  m/s.

Toda máquina possui um tempo de aceleração até que seja atingida a velocidade desejada. Para que essa aceleração inicial não deforme o corpo de prova à uma velocidade menor do que a especificada, resultando em um teste realizado parcialmente em taxas de

deformação menores, um adaptador de folga deve ser utilizado, conforme indicado na Figura 2.22. Este adaptador faz com que o atuador desloque por determinado tempo sem contato com o corpo de prova, segurando-o apenas quando a velocidade especificada para o teste é alcançada. Esta solução é especialmente necessária em máquinas de circuito aberto, de acordo com *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005).

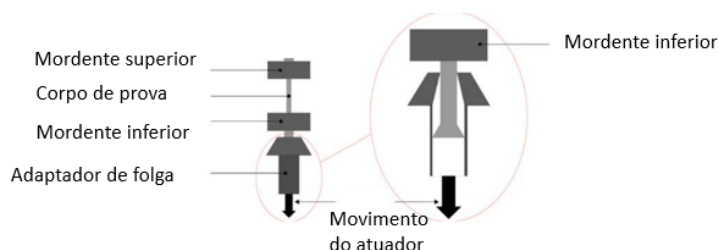


Figura 2.22 - Esquema de adaptador de folga para ensaios de tração a altas de deformação

Fonte: adaptado de HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP, 2005, p. 11

Para se caracterizar corretamente o material avaliado, é necessário medir a força aplicada ao corpo de prova associada com a deformação sofrida pelo mesmo. De acordo com *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005), para ensaios quase-estáticos a célula de carga pode ser considerada como possuindo uma deformação homogênea, de forma que as forças aplicadas podem ser obtidas com um extensômetro posicionado sobre ela. Porém, com o aumento da taxa de deformação, o tempo necessário para atingir deformação homogênea na célula de carga fica bem próximo do próprio tempo de teste, o que faz com que seja necessário levar em consideração efeitos de propagação de onda dentro da própria célula de carga, sendo que este efeito é especialmente aumentado para taxas maiores que  $10 \text{ s}^{-1}$ .

De forma a diminuir o efeito de propagação de ondas, pode-se aumentar ou diminuir o comprimento da célula de carga. Aumentar o comprimento garante que a onda não será refletida até o final do ensaio, enquanto que diminuir faz com que o tempo para que se atinja homogeneidade da deformação elástica também diminua. O segundo método é mais utilizado em barras de pressão de Hopkinson, enquanto que o primeiro é comumente encontrado em máquinas servo-hidráulicas.

#### 2.4.4. Corpos de prova para ensaios a taxas intermediárias de deformação

De acordo com HUH, LIM e PARK (2009), ainda não existe uma convenção sobre corpos de prova padrão para ensaios de tração a taxas intermediárias de deformação. Devido à essa falta de padronização, é possível encontrar na literatura experimentos realizados por diversos autores com diferentes tamanhos de corpos de prova.

HUH, LIM e PARK (2009) escolheram as dimensões do corpo de prova através de simulações numéricas, variando o tamanho do comprimento útil de 10 a 35 mm e fixando a largura e o raio de concordância em 6 mm. O modelo utilizado assumia que o material se comportava de acordo com o proposto por JOHNSON e COOK (1983). O principal parâmetro utilizado para a escolha foi a razão entre o deslocamento de dois pontos situados no comprimento útil e o deslocamento total entre dois pontos nas extremidades do corpo de prova. Os resultados obtidos indicaram que as melhores dimensões teriam 15 e 30 mm de comprimento útil, conforme indicado na Figura 2.23

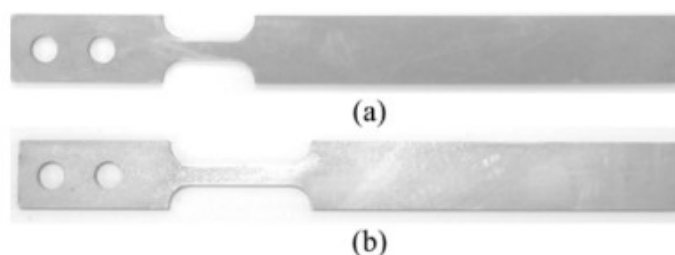


Figura 2.23 - Corpos de prova com 15 e 30 mm de comprimento útil

Fonte: HUH, LIM e PARK, 2009, p. 198

HUH et al. (2007) realizaram simulações numéricas representando ensaios de tração com velocidade de cabeçote de 3 m/s, também variando apenas o comprimento da região paralela, afim de determinar características dos corpos de prova. Além disso, também realizaram testes físicos nas mesmas condições das simulações para validarem seus resultados.

Os testes físicos para confirmar os resultados encontrados nestas simulações foram realizados com corpos de prova de região paralela de 10, 20, 30, 40 e 50 mm respectivamente. Os resultados estão explicitados na Tabela 2.3, onde  $\frac{d_{cou}}{d_{cab}}$  é a razão entre o deslocamento no comprimento útil, região onde se observa deformação uniforme, e o deslocamento aferido pelo cabeçote da máquina.

Tabela 2.3 – Valores comprimento útil e razão obtidas HUH et al. (2007)

Região paralela [mm]	Comprimento útil [mm]	$d_{cou}/d_{cab}$
10,00	1,00	0.772
20,00	8,00	0.884
30,00	16,00	0.941
40,00	26,00	0.95
50,00	38,00	0.952

Fonte: autor, 2020

Apesar do corpo de prova definido possuir região paralela, raio de concordância e espessura semelhante ao corpo de prova de tamanho reduzido, indicado na Tabela 2.2, o tamanho do comprimento útil difere bastante, sendo de 16 mm para a amostra de ensaio dinâmico e 25 mm para o ensaio quase-estático. Essa diferença indica que se um corpo de prova de tamanho reduzido for utilizado para ensaios de tração a taxas de deformação intermediárias, parte da região do comprimento útil será afetada por deformações não uniformes, levando a resultados errôneos sobre a taxa de deformação do experimento e sobre as curvas de tensão por deformação obtidas do material.

Uma tentativa para padronização destes espécimes também foi realizada pela Instituto Internacional de Ferro e Aço (*International Iron and Steel Institute*), levando em consideração a expertise de diferentes especialistas e empresas sobre o assunto, além de uma série de testes em diferentes laboratórios para comparação de resultados (conhecido em inglês como *Round Robin*). Em seu relatório *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005) menciona que os testes práticos foram realizados em taxas de deformação variando entre  $10^{-3}$  e  $10^3 \text{ s}^{-1}$ , sendo que para ensaios quase-estáticos as normas vigentes presentes em ASTM (2015) foram seguidas.

#### 2.4.5. Sensibilidade à taxa de deformação

De acordo com *HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP* (2005), os valores de taxas de deformação de 1, 10, 100, 250, 500 e  $1000 \text{ s}^{-1}$  são suficientes para descrever a sensibilidade de um material ao aumento da taxa de deformação, denotado por  $m$ .

A influência da sensibilidade do material se dá de forma a torná-lo mais rígido com o aumento das taxas de deformação e independe da sua geometria (AMBROSIO, 2001). Esta influência afeta as propriedades da curva de fluxo em alguns materiais. O titânio e o aço com



baixo teor de carbono apresentam sensibilidade a taxas de deformação, enquanto o alumínio é considerado insensível (AMBROSIO, 2001). O aço com baixo teor de carbono tem a tendência de se comportar como um material perfeitamente plástico, isto é, sem encruamento, com o aumento da taxa de deformação. A Figura 2.24 mostra a variação das tensões de escoamento inferior, superior e do LRT para aços com baixo teor de carbono em diferentes taxas de deformação, além das curvas obtidas por CAMPBELL e COOPER (1966) para diferentes taxas de deformação.

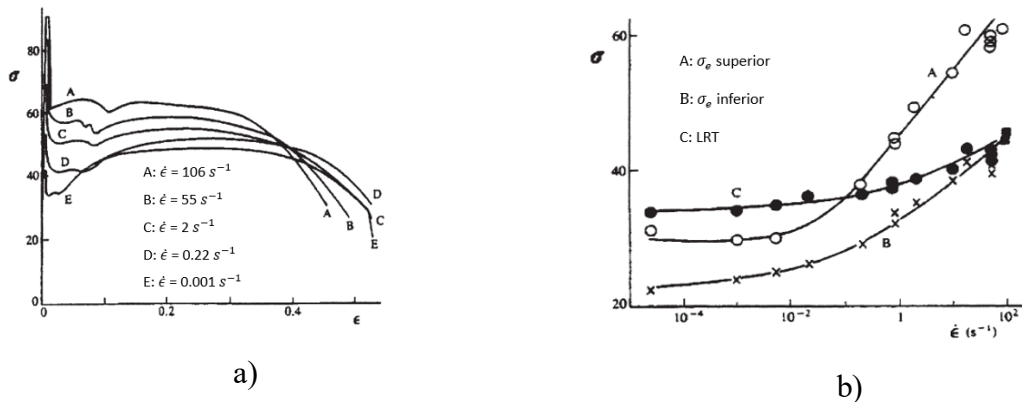


Figura 2.24 - Propriedades em função da  $\dot{\epsilon}$  para aços baixo carbono a) testes de tração e b) variação da  $\sigma_e$  e LRT

Fonte: adaptado de CAMPBELL e COOPER, 1966, apud AMBROSIO, 2001, p.39 e 40

Os aços AHSS DP600, DP800, TRIP600 e TRIP800 foram estudados por HUH et al. (2007) e OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007) em várias taxas de deformação para que fosse identificada a sensibilidade destes aços à esta variação. Esta sensibilidade pode ser calculada como sendo a inclinação da curva logarítmica da tensão de escoamento pela taxa de deformação, conforme explicado por OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007), Figura 2.25. Os valores encontrados por estes autores para o aço DP600 foi de 0,014 para taxas até  $10 \text{ s}^{-1}$  e 0,0333 para taxas entre  $10 \text{ s}^{-1}$  e  $200 \text{ s}^{-1}$ .

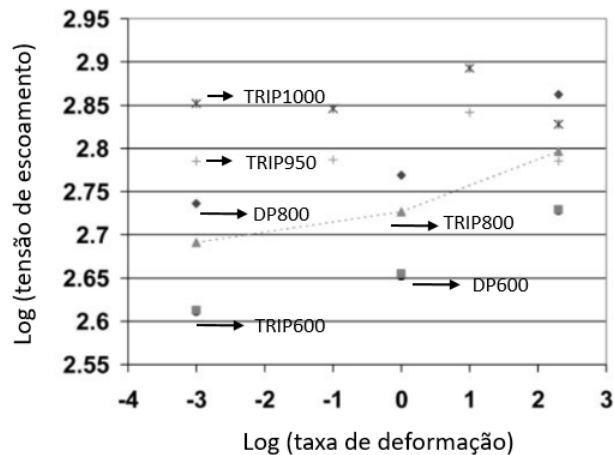


Figura 2.25 - Sensibilidade à variação da taxa de deformação para diversos aços

Fonte: Adaptado de OLIVER, JONES e FOURLARIS, 2007, p.427

O efeito do encruamento nestes materiais foi definido como sendo insensível ao aumento da taxa de deformação com o aumento da deformação verdadeira (Figura 2.26) por HUH et al. (2007). Já OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007) reportaram um leve decréscimo do encruamento com aumento da taxa de deformação.

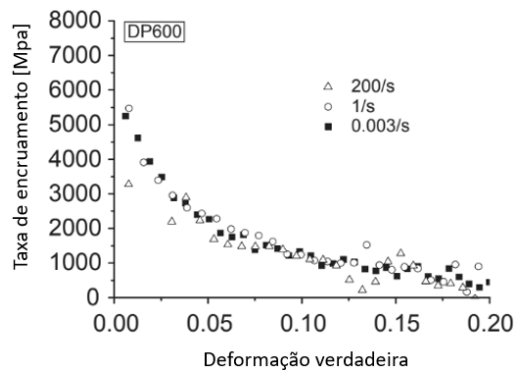


Figura 2.26 - Taxa de encruamento para o aço DP 600 em diferentes taxas de deformação

Fonte: Adaptado de HUH et al., 2007, p.925

Por sua vez, a deformação até a fratura do corpo de prova aumenta gradualmente com o aumento da taxa de deformação para taxas maiores que  $1 \text{ s}^{-1}$  (OLIVER, JONES e FOURLARIS, 2007). Na região da estricção, HUH et al. (2007) identificaram que este fenômeno dá-se de forma mais ampla que nos ensaios quase-estáticos. Esta região possui taxas de deformação levemente elevadas em comparação com as áreas adjacentes. Com isso, passa a ser mais rígida que a região adjacente. Este fato faz com que a região adjacente à estricção inicial tenda a se deformar, formando regiões mais amplas de estricção.

COWPER e SYMONDS (1957) propuseram o uso de uma equação para modelar a curva de fluxo em diferentes taxas de deformação, EQUAÇÃO (2.8). Para o correto uso desta equação é necessário a identificação dos parâmetros  $q$  e  $D$ , que são próprios de cada material, utilizando as curvas obtidas em diferentes taxas de deformação. Nesta equação,  $\sigma_o$  representa a tensão de fluxo estática e  $\sigma_o^D$  a tensão de fluxo dinâmica associada e  $\dot{\epsilon}$  a taxa de deformação.

$$\dot{\epsilon} = D \left( \frac{\sigma_o^D}{\sigma_o} - 1 \right)^q, \sigma_o^D > \sigma_o \quad (2.8)$$

## 2.5. Flambagem de colunas

### 2.5.1. Flambagem elástica de colunas – Análise estática

As longarinas e crash-box do automóvel podem ser analisadas como colunas sob uma carga de compressão durante o impacto. Como tal, o dimensionamento dessas estruturas deve levar em consideração a carga máxima para que não ocorra sua deflexão lateral, levando a uma falha súbita e dramática da estrutura conhecida como flambagem (HIBBELER, 2004). A carga axial máxima que uma coluna pode suportar sem flambar é chamada de carga crítica, e a primeira solução para este problema foi fornecida por Leonhard Euler em 1757, considerando uma coluna perfeitamente reta, feita do mesmo material e com carga aplicada no centroide da seção transversal, EQUAÇÃO (2.9), onde  $P_{cr}^{col}$  é a carga máxima antes da flambagem,  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $I$  o momento de inércia da seção transversal da coluna e  $L$  é o comprimento da mesma. Fica evidenciado nesta equação que a utilização de materiais como aços de ultra alta resistência não aumenta a carga crítica de uma coluna sob compressão, já que o módulo de elasticidade deste tipo de aço e de um aço comum é praticamente o mesmo.

$$P_{cr}^{col} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.9)$$

A EQUAÇÃO (2.9), porém, é uma forma específica de uma outra equação mais genérica que leva em consideração diferentes tipos de fixação de colunas, EQUAÇÃO (2.10). O termo  $K$  é um fator adimensional que depende do tipo de engastamento das extremidades da coluna, e é utilizado para calcular o fator de comprimento efetivo,  $L_e$ . Como a fórmula de Euler foi pensada para uma coluna suportada por pinos em ambas as extremidades, ela deve ser

modificada quando os apoios são diferentes. Neste caso, o fator K compensa o comprimento total da coluna, de forma que as extremidades delimitadas pelo comprimento efetivo sejam pontos onde há momento fletor nulo (HIBBELER, 2004). A Figura 2.27 ilustra valores de K para diferentes tipos de fixação de colunas.

$$P_{cr}^{col} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (2.10)$$

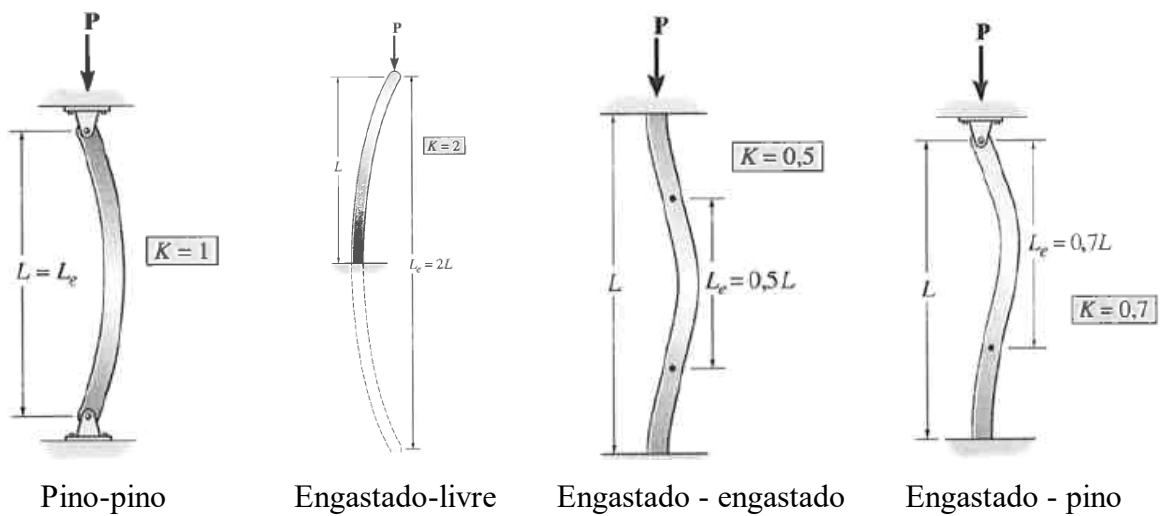


Figura 2.27 – Fatores de comprimento para diferentes tipos de fixação de coluna

Fonte: Adaptado de HIBBELER, 2004, p.518

A EQUAÇÃO (2.10) pode ainda ser manipulada para fornecer a tensão crítica de flambagem.

$$\sigma_{cr}^{col} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.11)$$

Na EQUAÇÃO (2.11), “r” representa o raio de giração da coluna e o termo  $KL/r$  é o índice de esbeltez efetivo de uma determinada coluna. O raio de giração é calculado em torno do eixo neutro ou de flexão (HIBBELER, 2004), dado pela EQUAÇÃO (2.12), onde I representa o momento de inércia e A indica a área da seção transversal.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.12)$$

Algumas colunas, no entanto, sofrem carregamento fora do seu centroide. É possível explicitar o efeito de cargas aplicadas nestas condições através da equação conhecida como fórmula da secante. Para tal caso são consideradas as mesmas condições no desenvolvimento das EQUAÇÕES (2.9) e (2.10), como comportamento linear elástico e pequenas deflexões, além de pequenas excentricidades de aplicação de carga.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left[ 1 + \frac{ec}{r^2} \sec \left( \frac{L_e}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (2.13)$$

Nesta equação,  $\sigma_{max}$  é a tensão elástica máxima que ocorre no lado interno côncavo do ponto médio da coluna, “c” representa a distância entre o eixo neutro da coluna e o ponto onde ocorre a máxima compressão, “e” indica a distância entre a carga aplicada e o eixo neutro da coluna. O termo  $\frac{ec}{r^2}$  é conhecido como razão de excentricidade. A solução desta equação é feita por tentativa e erro, e comumente é utilizado um gráfico com índice de esbeltez efetivo ( $\frac{KL}{r}$ ) na abscissa e carga por área ( $\frac{P}{A}$ ) no eixo das ordenadas, Figura 2.28.

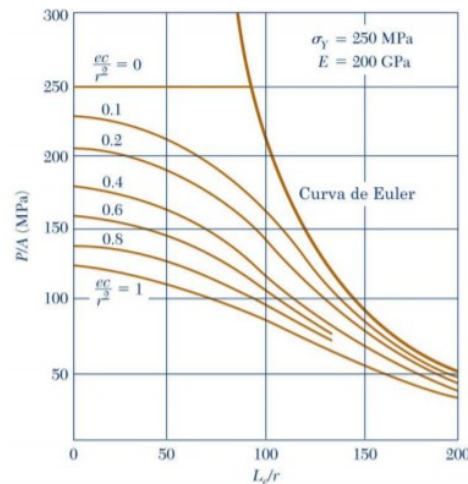


Figura 2.28 – Tensão crítica em função do índice de esbeltez efetivo

Fonte: ARGENTA, 2012, p.102

Porém, segundo HIBBELER (2004), algumas colunas podem sofrer cargas aplicadas às suas bordas ou à algum tipo de suporte nas suas laterais. Nestas condições, a EQUAÇÃO (2.13) não pode ser utilizada. É possível estimar a carga máxima admissível para a coluna

considerando que a força excêntrica é aplicada no centroide, levando a um carregamento uniforme sobre toda a seção, além de um momento fletor ( $M_f$ ), EQUAÇÃO (2.14).

$$\sigma_{cr}^{col} = \frac{P}{A} + \frac{M_f c}{I} \quad (2.14)$$

### 2.5.2. Flambagem inelástica de colunas – Análise estática

A flambagem elástica, segundo HIBBELER (2004), ocorre apenas em colunas consideradas esbeltas e longas. Colunas intermediárias falham devido à instabilidade plástica. Neste cenário o esforço de compressão suportado pela coluna é maior que o limite de proporcionalidade do material. As equações apresentadas anteriormente para flambagem aplicam-se somente às colunas esbeltas longas.

A separação entre coluna longa e coluna intermediária é feita através do índice de esbeltez efetivo. Este índice é calculado pela EQUAÇÃO (2.11) e indica o valor em que a tensão crítica de flambagem será igual à tensão do limite de proporcionalidade do material ( $\sigma_{lp}$ ), que é a tensão máxima em que ocorre a flambagem elástica.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_{lp} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{lp}}} \quad (2.15)$$

Colunas intermediárias e curtas têm índice de esbeltez efetivo menor que o especificado pela EQUAÇÃO (2.15) e falharão por flambagem plástica localizada em vez de flambagem elástica, onde a falha ocorre com a tensão de compressão ultrapassando a tensão de escoamento do material. Para o dimensionamento destas colunas, deve ser feita uma correção na equação de Euler, conhecida como equação de Engesser (ZIEMIAN, 2010). O módulo de elasticidade do material é substituído pelo módulo da tangente, indicando que no momento da falha a coluna se comportará como um material de rigidez menor que a rigidez do limite elástico, EQUAÇÃO (2.16). A Figura 2.29 é um exemplo de coluna com falha devido à flambagem plástica, identificada por uma seta.

$$\sigma_{cr}^{col} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad (2.16)$$

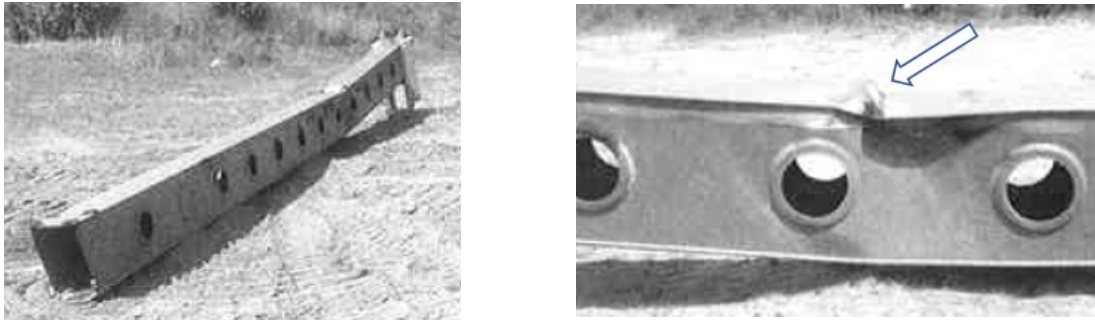


Figura 2.29 – Flambagem plástica localizada

Fonte: adaptado de HIBBELER, 2004, p. 533

## 2.6. Estruturas de paredes finas

Grande parte dos componentes estruturais de veículos projetados para o mar, ar e terra são desenvolvidos com estruturas de paredes finas (ABRAMOWICZ, 2003). No desenvolvimento da parte frontal do automóvel são consideradas três zonas de deformação distintas referentes à absorção de energia (DU BOIS et al., 2004), chamadas de zona macia, zona primária e zona secundária. A primeira delas é uma zona com menor resistência, projetada para a segurança do pedestre em casos de atropelamento e para diminuir a agressividade em colisões veículo - veículo. Nesta zona macia estão o para-choque, absorvedores de energia em frente à travessa do crash-box, barras de proteção ao pedestre e o crash-box.

Na zona primária entram elementos responsáveis pela absorção de energia do impacto na parte anterior do compartimento do motor, como as longarinas. A principal função desta zona é controlar a deformação da estrutura de forma que não haja concentrações que tornem difícil a gestão da deformação do interno do habitáculo. Já a zona secundária abrange parte do interno habitáculo, parede corta fogo e região para apoio dos pés (*footwell*).

Os principais elementos absorvedores de energia na parte anterior dos veículos automotores são as estruturas de paredes finas. Esta absorção de energia durante um impacto dá-se através da transformação da energia cinética em energia de deformação pelo processo de deformação plástica. Existem diferentes maneiras pelas quais essas estruturas podem ser carregadas, como indicado na Figura 2.30. As seções subsequentes tratam do carregamento axial em estruturas de paredes finas.

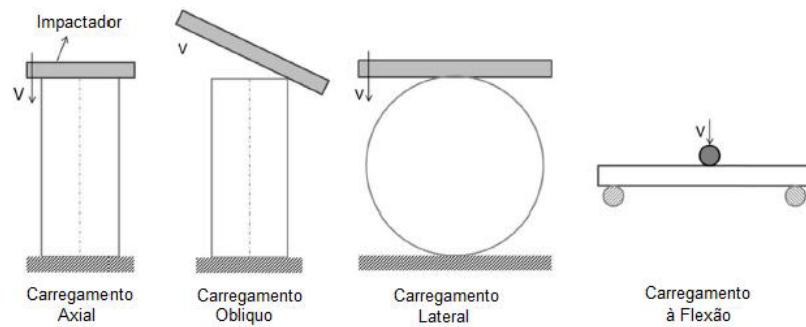


Figura 2.30- Modos de carregamento para proteção ao impacto

Fonte: adaptado de BAROUTAJI, SAJJIB e OLABIC, 2017, apud AMARAL, 2017, p.24

### 2.6.1. Modos de colapso

De acordo com DU BOIS et al. (2004), a compactação de uma estrutura de parede fina dá-se por meio de deformação axial (plástica), flambagem (deformação de Euler, elástica), Figura 2.31, ou um modo misto destes dois. Deformações axiais podem ser somente obtidas em impactos perpendiculares, com angulações entre  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , sendo que na maioria dos casos um modo misto de deformação será atingido (DU BOIS et al., 2004). Esse tipo de deformação dificulta a previsibilidade do sistema, de forma que estruturas bem projetadas devem ser pensadas para evitar este comportamento.

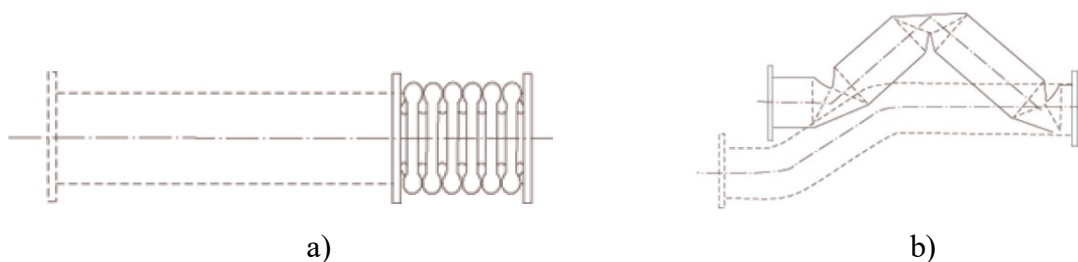


Figura 2.31 – Modos de colapso a) deformação axial e b) deformação de Euler

Fonte: DU BOIS et al., 2004, p.43

### 2.6.2. Flambagem de placas – Análise estática

Segundo ZIEMIAN, (2010), quando uma coluna de placas finas é submetida à compressão, flexão ou cisalhamento, é possível que as placas sofram flambagem local antes da desestabilização global do membro ou antes que a tensão de escoamento do material seja



atingida. Esse comportamento é caracterizado por uma distorção da seção transversal do membro e possui um crescimento gradual.

O comportamento de uma placa retangular com apoio simples em todas as arestas e sob compressão uniforme foi primeiramente resolvido em 1891 por G. H. Bryan (ZIEMIAN, 2010), problema ilustrado na Figura 2.32. A aresta com apoio simples possui deflexão igual a zero, porém não oferece resistência quanto à rotação ao longo do eixo  $x$  (VANI, 2004). A carga elástica máxima que tal placa consegue suportar antes da flambagem é dada pela EQUAÇÃO (2.17).

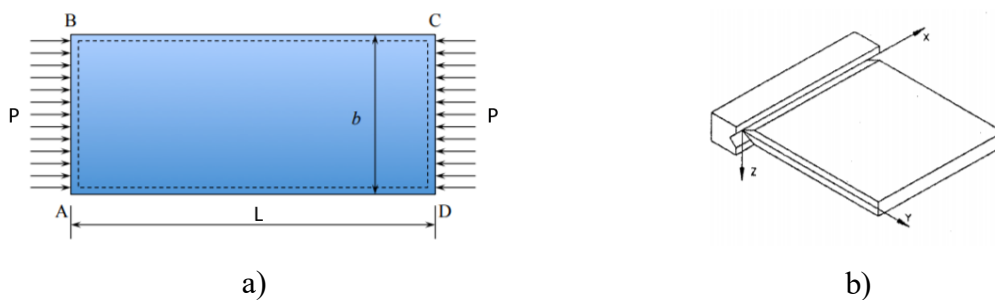


Figura 2.32 – a) placa sob compressão axial uniforme e b) condição de contorno: apoio simples

Fonte: adaptado de WIERZBICKI, 2013, p.1 e VANI, 2004, p.20

$$\sigma_{cr}^{pl} = k^{pl} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2.17)$$

Nesta equação,  $k^{pl}$ , coeficiente de flambagem da placa, é obtido teoricamente e depende dos tipos de apoio nas arestas além da relação entre o comprimento total da placa ( $L$ ) e sua largura ( $b$ ). A tensão crítica de flambagem da placa ( $\sigma_{cr}^{pl}$ ) depende também do módulo de elasticidade ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e espessura da placa ( $t$ ). A Figura 2.33 indica o valor deste coeficiente para diferentes razões em uma placa com apoios simples em todas as arestas. As curvas desta figura indicam a quantidade de dobras que podem ser formadas ao longo do comprimento da placa. Para determinadas razões  $\frac{L}{b}$  existe a possibilidade de formação de quantidades distintas de dobras. Neste caso, o valor correto de dobras a ser adotado é o que possui menor coeficiente de flambagem, pois levará a uma menor tensão crítica, que será atingida primeiro quando a placa for submetida à compressão.

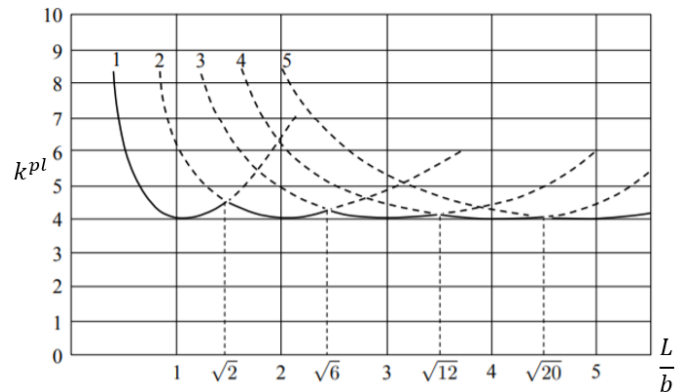


Figura 2.33 - Coeficiente de flambagem para placa com apoio simples em todas as arestas

Fonte: adaptado de WIERZBICKI, 2013, p.4

Uma coluna prismática de seção quadrada pode ser considerada como sendo composta de quatro placas retangulares (WIERZBICKI, 2013). A condição de contorno entre as arestas comuns destas placas pode ser considerada como apoio simples.

É possível determinar para quais razões  $\frac{t}{b}$  a placa falhará devido à flambagem elástica ou à tensão de escoamento do material. Para isto, basta igualar a tensão crítica elástica da placa à  $\sigma_E$  do material, resultando na EQUAÇÃO (2.18). Para valores de  $\frac{t}{b}$  menores do que o valor que resulta em tensão crítica igual ao limite de escoamento, a placa em questão tenderá a sofrer flambagem.

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{cr} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12\sigma_E(1-\nu^2)}{Ek^{pl}}} \quad (2.18)$$

MAHMOOD e PALUSZNY (1981) descrevem as colunas que falham devido à flambagem e ao limite de escoamento como não compactas e compactas respectivamente, representadas na Figura 2.34. A razão limite que separa seções compactas das não compactas sugerida por estes autores é dada pela EQUAÇÃO (2.19).

$$\left(\frac{t}{b}\right) = 0,48 \left[ \frac{\sigma_e(1-\nu^2)}{E} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

Colunas não compactas tem a sua deformação primariamente governada pela geometria da peça, já que a tensão crítica é menor do que o limite de escoamento do material (DU BOIS

et al., 2004). Estas seções possuem dobras largas e irregulares que levam à uma instabilidade de flexão da coluna. Para as seções compactas, a tensão de escoamento do material é menor que a tensão necessária para desestabilizar a coluna, gerando um colapso estável.

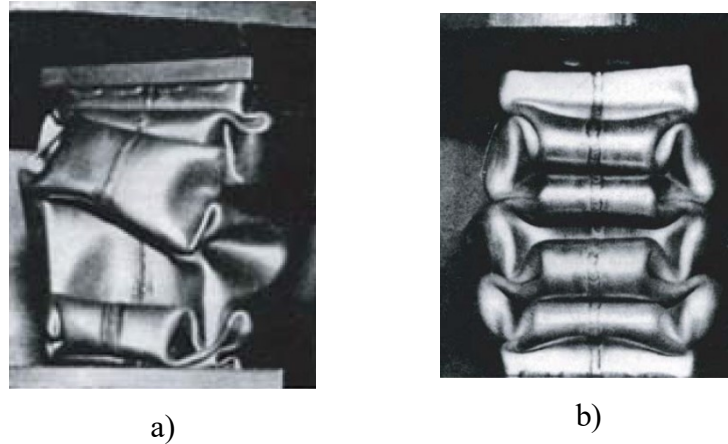


Figura 2.34 – Padrões de dobras de a) seção não compacta e b) seção compacta

Fonte: MAHMOOD e PALUSZNY, 1981, p. 4042

### 2.6.3. Deformação dinâmica progressiva

A análise quase-estática desenvolvida para a deformação de uma estrutura de paredes finas, que leva em consideração a teoria da plasticidade, pode ser utilizada também para analisar a deformação dinâmica. De acordo com AMBROSIO (2001), essa é uma hipótese comum utilizada por diversos autores, que ignora os efeitos de inércia para velocidades de impacto de até 15 m/s, desde que a massa da estrutura analisada seja muito menor que a massa do objeto utilizada para o impacto. Se tomados os efeitos da sensibilidade às diferentes taxas de deformação em consideração, o fenômeno passa a ser conhecido como deformação dinâmica progressiva. Caso os efeitos de inércia não possam ser ignorados, como para velocidades de impactos maiores que 15 m/s, o fenômeno é então chamado de deformação plástica dinâmica.

De acordo com ABRAMOWICZ e JONES (1984), a absorção ótima de energia em situações onde efeitos de inércia são importantes é obtida quando a flambagem de Euler é evitada. Compactações axiais são consideradas os meios de absorção de energia mais eficientes e também um dos mais difíceis de serem obtidos em estruturas reais, devido aos problemas de estabilidade associados com esse tipo de deformação (DU BOIS, CHOU, *et al.*, 2004). As compactações axiais podem ser tanto deformações regulares ideais sanfonadas ou apenas amarrotadas (MAHMOOD e PALUSZNY, 1981).

Em uma compressão axial ideal, a estrutura de paredes finas resistirá a uma carga máxima,  $P_{max}$ , antes de começar a deformação plástica, após a qual a força de compactação oscilará entre um valor máximo e mínimo, como pode ser observado na Figura 2.35. A energia total absorvida por determinada estrutura será a área do gráfico força de compactação pela distância de compactação. Na EQUAÇÃO (2.20),  $P(\delta)$  é a força de compactação instantânea e  $\delta$  a compactação da estrutura.

$$E = \int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta \quad (2.20)$$

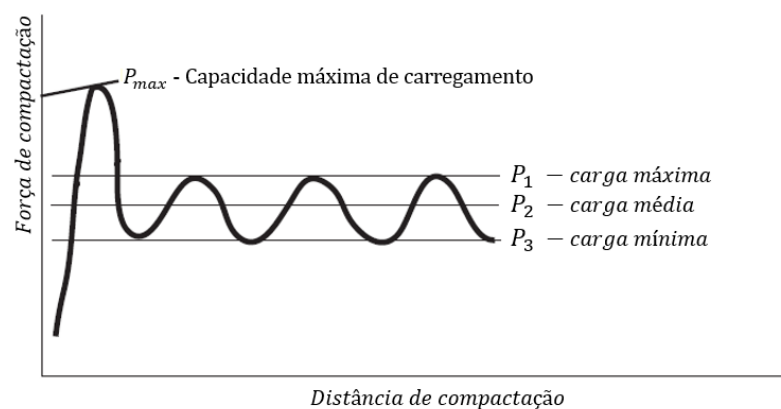


Figura 2.35 - Força x deslocamento em compactação de estrutura de paredes finas

Fonte: adaptado de DU BOIS et al., 2004, p.51

A compactação de estruturas de paredes finas resulta de uma perda local de estabilidade, criando a chamada dobra plástica local ou onda plástica (AMBROSIO, 2001). Essa dobra plástica, o lóbulo, acomoda a maior parte da deformação nos seus limites, até que o contato local impede a continuação desta deformação e induz a criação de uma outra dobra. Este mecanismo é conhecido como processo de dobramento progressivo (AMBROSIO, 2001).

De acordo com ABRAMOWICZ (2003), boa parte do padrão de dobras observadas em colapso de colunas de paredes finas podem ser representadas pela junção de formas que indiquem uma única dobra, demonstrada na Figura 2.36. A criação dos lóbulos pode então ser descrita pelo conceito de um elemento macro chamado de *Super Folding Element* (SE).



Figura 2.36 – Forma básica de deformação

Fonte: adaptado de ABRAMOWICZ, 2003, p.93

A altura de um SE corresponde à onda plástica de deformação da coluna,  $2H$ . Cada uma das células deformáveis da Figura 2.37 a) transforma-se em lóbulos como ilustrado na Figura 2.37 b).

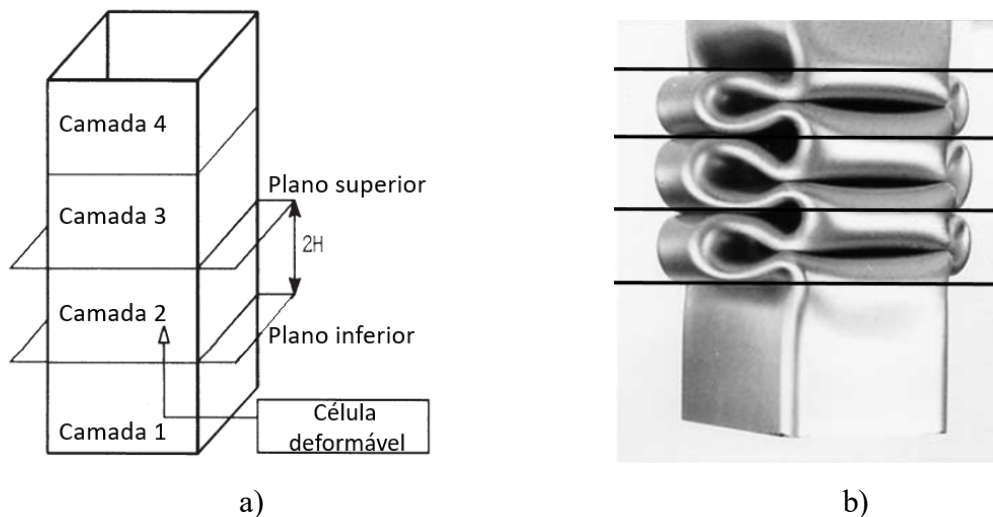


Figura 2.37 – a) Células deformáveis e b) coluna deformada axialmente

Fonte: adaptado de AMBROSIO, 2001, p.107 e ABRAMOWICZ, 2003, p.93

Cada SE representa um vértice da seção transversal da coluna (Figura 2.38) e, portanto, a quantidade de elementos em uma estrutura se iguala à quantidade de vértices da seção. Em sua configuração inicial, este elemento é identificado por quatro parâmetros (ABRAMOWICZ, 2003), ilustrados na Figura 2.38:

- Comprimento total  $C$ , dado pela soma dos lados  $L_a$  e  $L_b$ ;
- Ângulo central  $\Phi$ ;
- Espessura do lado de comprimento  $L_a$ , dado por  $t_a$  e;

- Espessura do lado de comprimento  $L_b$ ,  $t_b$ .

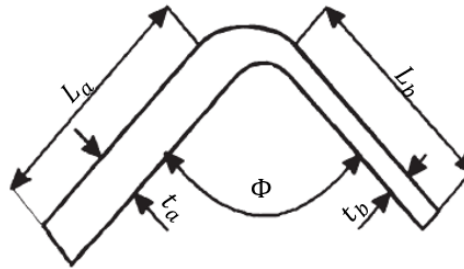


Figura 2.38 – Formulação básica de um SE

Fonte: adaptado de AMBROSIO, 2001, p.106

De uma forma genérica, a deformação de um SE pode ser representada pelos modos de deformação do tipo I e tipo II, exemplificados na Figura 2.39. O progresso da deformação é controlado pela rotação da face lateral com relação ao estado inicial,  $\alpha$  (ABRAMOWICZ, 2003). No estado inicial sem deformação não há rotação das faces laterais e conseqüentemente  $\alpha = 0$ . O processo é finalizado quando  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Já o parâmetro  $\alpha^*$  define qual tipo de deformação estará presente no elemento. Este parâmetro depende das características iniciais do SE  $\{C, t_a, t_b, \Phi\}$  e também das condições de contornos impostas nas faces (AMBROSIO, 2001). No caso de elementos sem restrições, deformações do tipo I são predominantes para  $\Phi \leq 90^\circ$ , enquanto o tipo II controla as deformações para  $\Phi \geq 120^\circ$ . DU BOIS et al. (2004) recomendam que os ângulos das estruturas devem ser projetados nos limites entre  $90^\circ$  e  $120^\circ$  para maior estabilidade de deformação. Para ângulos entre esses dois limites, há um modo de deformação misto e a contribuição de cada modo na energia absorvida vai depender do ângulo  $\Phi$ .

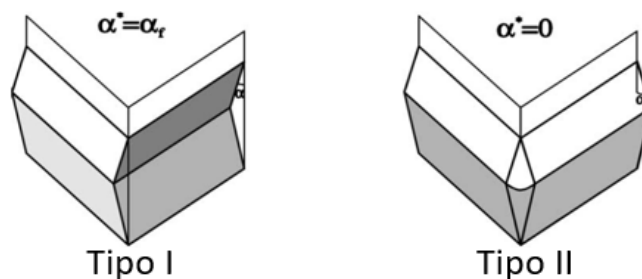


Figura 2.39 - Modos fundamentais de dobra de um SE

Fonte: adaptado de ABRAMOWICZ, 2003, p.94

A previsão da energia absorvida por uma determinada estrutura pode ser considerada como a soma total da energia absorvida por cada SE. A Figura 2.40 indica alguns modos de deformação observados por ABRAMOWICZ e JONES (1984), assim como os tipos de SE presentes em cada um. A linha sólida indica a forma original da seção e a tracejada a deformação ocorrida. Os modos de deformação reportados foram simétricos, assimétricos do tipo A e do tipo B. A verificação do modo assimétrico é realizada em duas células, sendo que a primeira é formada por um modo simétrico e a segunda pelo modo assimétrico.

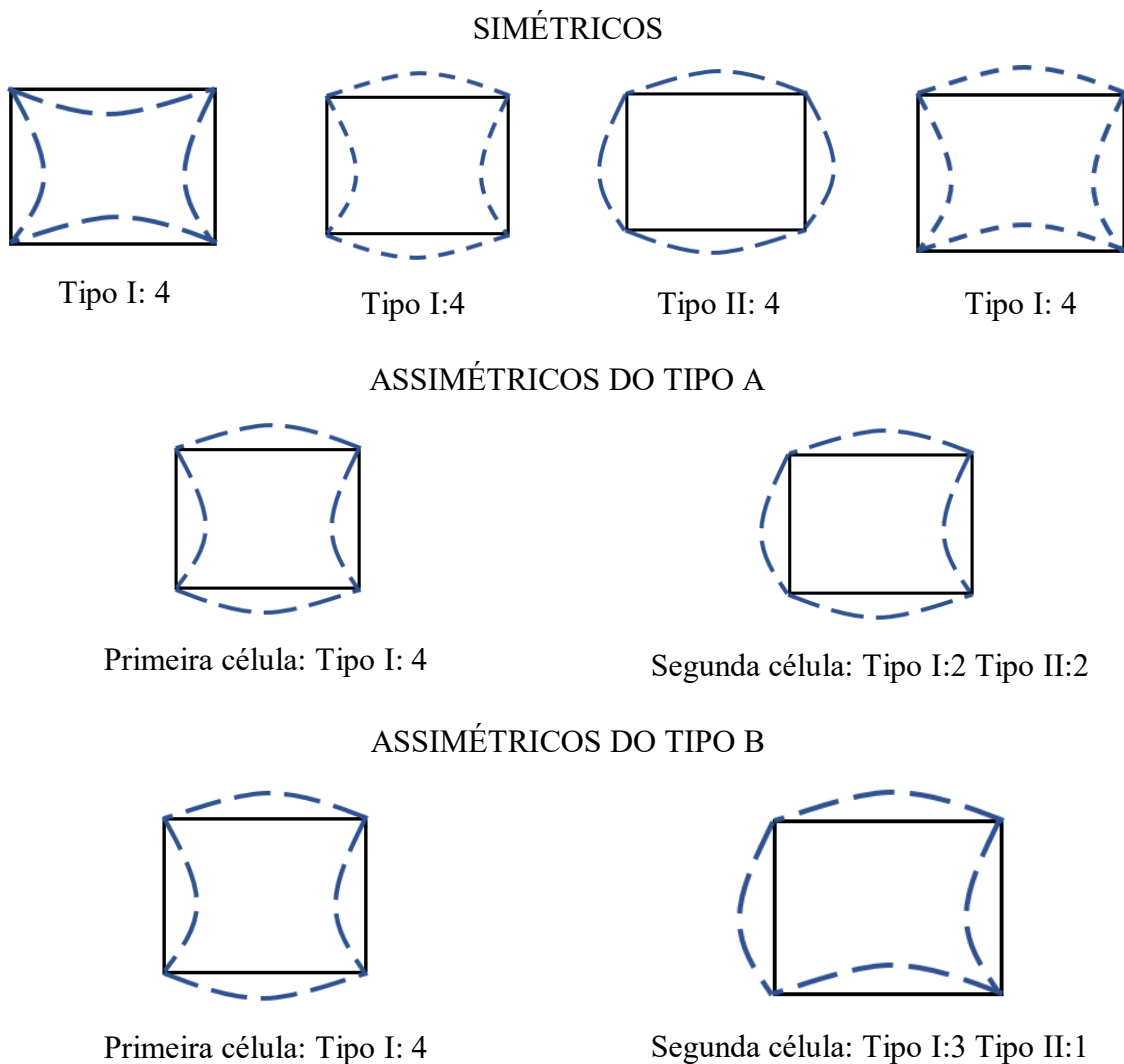


Figura 2.40 - Modos de deformação indicados por ABRAMOWICZ e JONES (1984)

Fonte: Autor, 2020

A Figura 2.41 representa a deformação simétrica de uma coluna retangular composta por 4 SE do tipo I. A formulação da energia absorvida por cada tipo de SE, como proposta por WIERZBICKI e ABRAMOWICZ (1983), pode ser somada para encontrar o trabalho interno

e, igualando-se ao trabalho externo, pode-se chegar à expressão da força média da deformação da estrutura. A força média é definida como a energia total absorvida pela estrutura dividida pela deformação total da mesma. No caso de uma coluna quadrada com paredes de mesma espessura e deformações do tipo I, como a da Figura 2.41 b), a expressão é dada pela EQUAÇÃO (2.21).

$$P_m = 9,56 \sigma_o^D t^{\frac{5}{3}} b^{\frac{1}{3}} \quad (2.21)$$

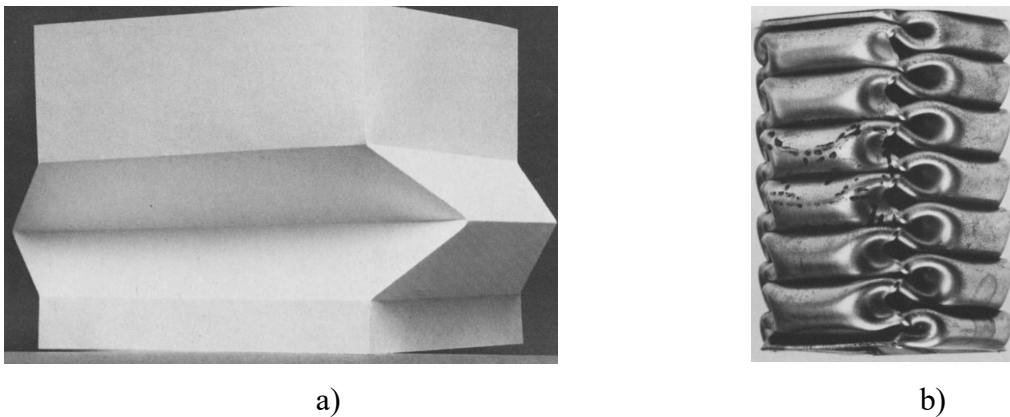


Figura 2.41 – Compactação com 4 SE do tipo I a) Modelo de papel e b) coluna real

Fonte: ABRAMOWICZ e JONES, 1984, p.186

Já MAHMOOD e PALUSZNY (1981) encontraram equações semi-empíricas para forças média e máxima de colunas retangulares. A carga máxima,  $P_{max}$ , que uma coluna de paredes finas retangular com espessura constante e seção uniforme pode suportar é dada pela EQUAÇÃO (2.22). Nesta equação, o coeficiente  $k_p$  depende da razão de proporção da coluna, enquanto  $\beta$  é função da razão  $\frac{t}{b}$  e das propriedades de resistência do material, chegando ao valor máximo de  $\frac{LRT}{\sigma_E}$ . Estes valores podem ser encontrados com auxílio da Figura 2.42. Em uma estrutura retangular, as faces da coluna com maior largura são chamadas de placas de flambagem (do inglês “buckling plate”) e as outras são as placas de retenção (do inglês “restraining plate”), indicadas na Figura 2.43

$$P_{max} = 2 \left[ k_p \frac{E (1 - \nu^2)}{\beta} \right]^{0,43} t^{1,86} b^{0,14} \left( 1 + \frac{d}{b} \right) \sigma_E^{0,57} \quad (2.22)$$



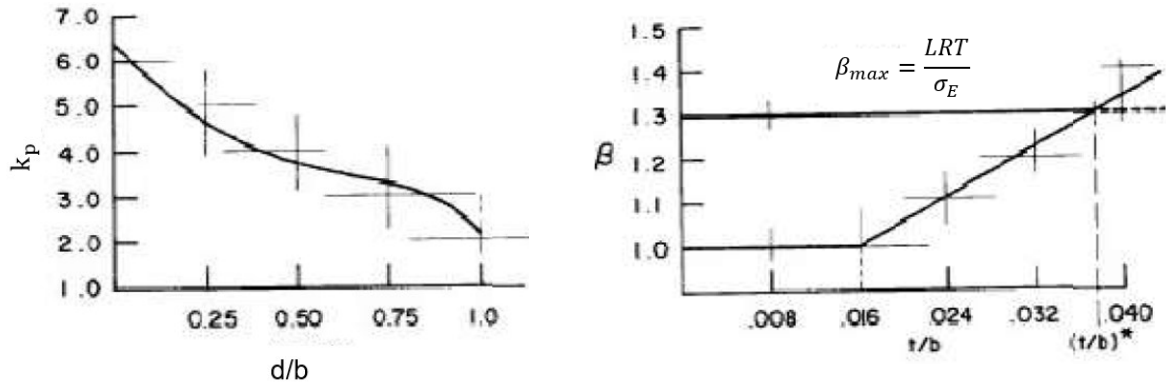


Figura 2.42- a) Coeficiente  $k_p$  em função da razão de proporção e b)  $\beta$  em função de  $\frac{t}{b}$

Fonte: adaptado de MAHMOOD e PALUSZNY, 1981, p.4043

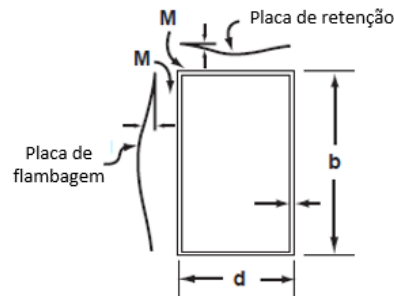


Figura 2.43- Placas de retenção e de flambagem

Fonte: adaptado de DU BOIS et al., 2004, p.48

A  $P_m$  de compactação deste mesmo tipo de coluna é encontrada a partir da EQUAÇÃO (2.23). O coeficiente  $k_2$ , assim como  $k_p$ , depende da razão de proporção da coluna, podendo ser encontrado pela Figura 2.44. Um ponto importante para as EQUAÇÕES (2.22) e (2.23) são as unidades utilizadas: comprimento devem estar em polegadas, pressão em psi e força em lbf.

$$P_m = 3420 \left(1 + \frac{d}{b}\right) t^{1,86} b^{0,14} \left(\frac{k_2}{\beta}\right)^{0,43} \sigma_E^{0,57} \quad (2.23)$$

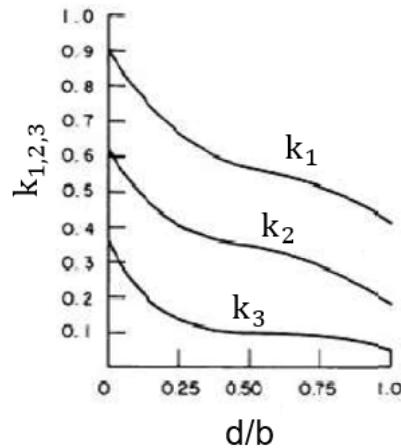


Figura 2.44- Coeficiente  $k_2$  em função da razão de proporção

Fonte: adaptado de MAHMOOD e PALUSZNY, 1981, p.4048

As equações de força máxima e média descritas anteriormente são para uma situação quase-estática. Conforme já discutido, a taxa de deformação à qual um material é submetido tem influência nas suas propriedades mecânicas. É possível corrigir a força média para diferentes taxas de deformação (AMBROSIO, 2001) utilizando da formulação proposta por COWPER e SYMONDS (1957), reordenada de forma a indicar o valor de força média em uma taxa de deformação determinada,  $P_m^D$ .

$$P_m^D = P_m \left\{ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \right\} \quad (2.24)$$

A taxa de deformação na EQUAÇÃO (2.24) é considerada como sendo a taxa de deformação de um SE, portanto, o comprimento utilizado para o cálculo deve ser o parâmetro  $C = L_a + L_b$  da Figura 2.38. Para seções transversais com SE de diferentes comprimentos, deve-se adotar o C médio, sendo este o perímetro da seção transversal dividido pela quantidade de elementos (AMBROSIO, 2001). É importante notar que a taxa de deformação e a velocidade de compressão de uma coluna varia com o tempo e com o mecanismo de colapso obtido (DU BOIS et al., 2004), sendo que esse decaimento pode não ser constante. A formulação a ser utilizada para o cálculo das taxas envolvidas, portanto, não é trivial como a aplicação da EQUAÇÃO (2.7).

De acordo com JONES (2003), a dificuldade do cálculo da taxa de deformação da compactação de uma coluna se dá devido às deformações complexas que levam a formas

permanentes como as da Figura 2.34. A formação de SE do tipo I e tipo II, bem como a quantidade destes elementos durante a compactação, levam a taxas de deformação variadas. Uma estimativa destas taxas para uma coluna quadrada foi definida por ABRAMOWICZ e JONES (1984), tomando como base os padrões de deformação observados na Figura 2.40 e indicados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Taxas de deformação estimadas para diferentes modos de deformação

Modo de deformação	$\dot{\epsilon}$ estimada
Simétrico	$0,33 \frac{V_o}{C}$
Assimétrico tipo A	$0,49 \frac{V_o}{C}$
Assimétrico tipo B	$0,41 \frac{V_o}{C}$

Fonte: adaptado de ABRAMOWICZ e JONES, 1984

#### 2.6.4. Considerações de projeto

Em uma coluna com seção retangular sujeita à compressão uniforme, as faces com menor razão  $\frac{t}{b}$  deformarão simultaneamente com comprimento de onda (tamanho da dobra) iguais. Ainda para seções retangulares, DU BOIS et al. (2004) indicam que tais colunas apenas admitem a formação das ondas de deformação, como mostrado na Figura 2.34 b), se a razão de proporção da seção transversal, fração entre o maior lado da face (b) sobre o menor lado da face (d) atender o limite crítico:

$$\frac{d}{b} > 0,584 \quad (2.25)$$

A Figura 2.45 indica o processo de formação da dobra plástica. Quando a razão entre os lados da seção retangular não atende os limites especificados na EQUAÇÃO (2.25), as duas bordas de uma dobra iniciada se tocam e impendem a finalização da mesma, causando uma instabilidade da coluna (DU BOIS et al., 2004).

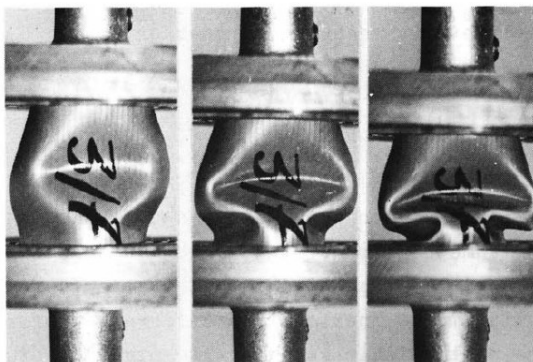


Figura 2.45- Dobra sendo formada durante compressão axial

Fonte: adaptado de DU BOIS et al., 2004, p.56

Como visto na Figura 2.35, a estrutura de parede finas resiste uma força máxima antes da sua deformação plástica. No projeto destas estruturas, é desejável que a razão entre  $P_{max}$  e  $P_m$  de uma coluna seja próxima de 1 (BAROUTAJI, SAJJIB e OLABIC, 2017), requisito conhecido como eficiência de força de compactação. Uma  $P_{max}$  muito grande pode trazer comportamentos indesejados, com o colapso precoce de estruturas subsequentes. De acordo com SINGACE e EL-SOBKY (1997), elementos com alto desempenho de absorção de energia possuem uniformidade de força de colapso e desaceleração do objeto a ser parado sem variações abruptas. Para auxiliar neste objetivo, algumas técnicas são usadas, como a inserção de iniciadores de deformação e corrugados.

A presença de corrugados na coluna faz com que as dobras plásticas surjam para cargas menores em pontos específicos da estrutura (BAROUTAJI, SAJJIB e OLABIC, 2017), aumentando a sua eficiência de força de compactação. A Figura 2.46 mostra a diferença entre cargas máximas obtidas para um mesmo tubo com e sem a presença de corrugados. De acordo com SINGACE e EL-SOBKY (1997), quanto mais superficiais os corrugados maior a semelhança com as características da peça de seção uniforme. GHASEMNEJAD et al. (2008) mostraram que a presença de corrugados diminui a energia absorvida pela massa da estrutura de paredes finas sem apresentarem variações na distância de compactação. Alguns diferentes tipos de colunas com corrugados são indicados na Figura 2.47.

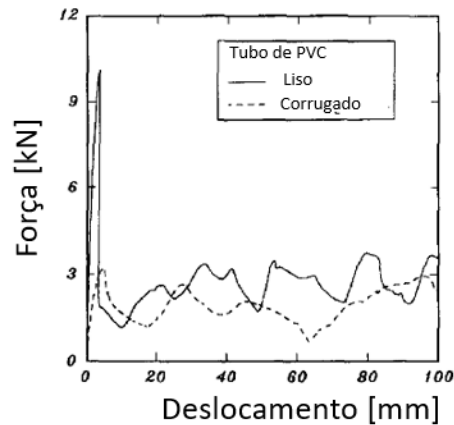


Figura 2.46- Força em função do deslocamento para tubo liso e corrugado

Fonte: adaptado de SINGACE e EL-SOBKY, 1997, p. 260

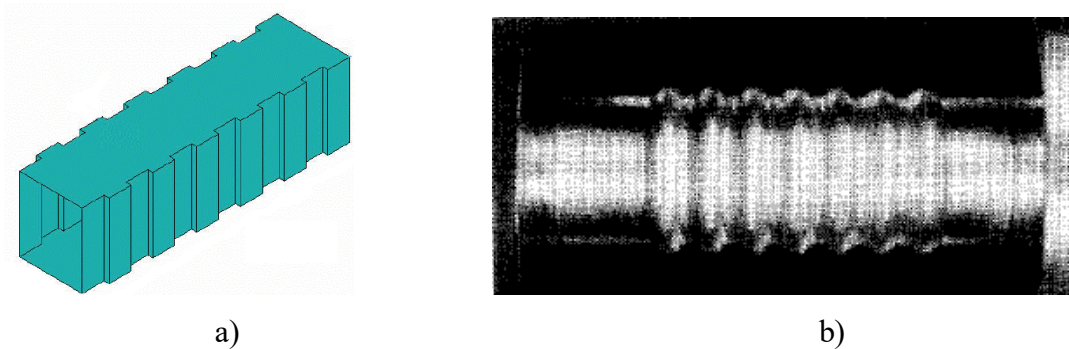


Figura 2.47 - a) Coluna retangular e b) coluna cilíndrica com corrugados

Fonte: adaptado de GHASEMNEJAD, HADAVINIA, et al. 2008, p.39 e SINGACE e EL-SOBKY, 1997, p.256

Outras definições práticas são comumente utilizadas para avaliar as características de uma estrutura absorvedora de energia. A energia específica ( $S_e$ ) é definida como a energia absorvida por unidade de massa da coluna, enquanto a eficiência de compactação ( $S_{te}$ ) indica o comprimento final da estrutura ( $L_f$ ) com relação ao seu comprimento inicial.

$$S_e = \frac{E_{absv}}{M_{cb}} \quad (2.26)$$

$$S_{te} = \frac{L_f}{L} \quad (2.27)$$

SONG et. al, (2013) indicaram que a presença de alívios de massa retangulares nas paredes de colunas (Figura 2.48), dispostos de maneira padronizada, tem o efeito de aumentar a eficiência de força de compactação e energia específica da mesma. Os alívios diminuem a carga inicial de colapso da estrutura e mantêm a energia total absorvida semelhante à da coluna de seção uniforme. O ganho identificado na energia específica deve-se à redução de massa da coluna.

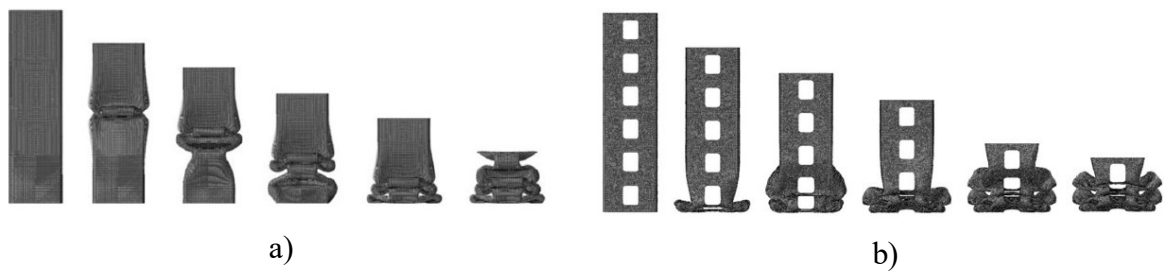


Figura 2.48 – Simulação de compactação de perfis: a) seção uniforme e b) com alívios de massa padronizados

Fonte: adaptado de SONG et. al, 2013, p.242

Uma estimativa da tensão de colapso de estruturas com este tipo de alívio pode ser realizada com a EQUAÇÃO (2.17), conforme descrito em ZIEMIAN (2010). Para isso, deve-se entender as dimensões da placa como apenas a parte adjacente ao alívio, Figura 2.49, de forma que a aresta próxima ao alívio seja considerada livre. Todas as outras arestas são consideradas como suportadas por apoio simples. Esta estimativa não leva em consideração a influência que pode ocorrer devido à largura e ao comprimento do alívio.

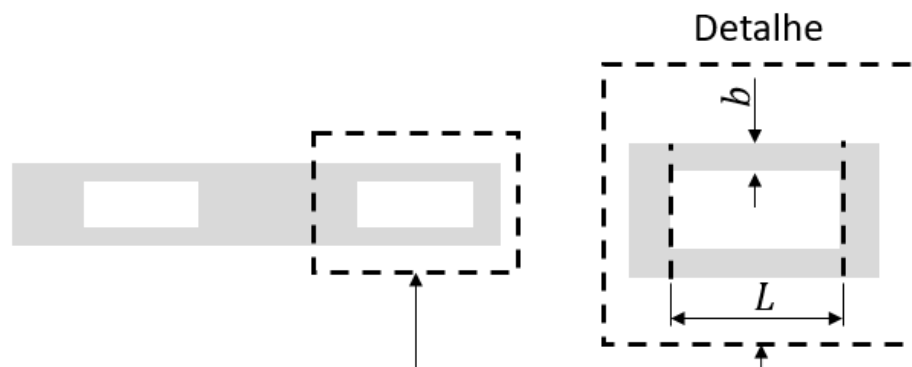


Figura 2.49 - Dimensões da placa em coluna com alívio de material

Fonte: Autor, 2020

### 2.6.5. Crash-box

O crash-box é uma estrutura de paredes finas e um importante elemento de absorção de energia em impactos de alta e baixa velocidade. Pode ser localizada tanto na parte frontal do veículo, à frente da longarina, quanto na parte posterior. Ela possui papel fundamental na absorção de energia em ensaios da RCAR além de grande influência na calibração dos sistemas de retenção do ocupante e estabilização de forças transmitidas à longarina para diversas tipologias de impacto.

Uma característica básica da resposta estrutural de um veículo é conhecida como *crash signature* ou pulso de impacto (HUANG, 2002). Geralmente esse pulso é determinado com um acelerômetro próximo, por exemplo, à soleira do veículo. Segundo HUANG (2002), esse pulso pode variar dependendo da massa do veículo, tipologia de impacto, posição do acelerômetro e rigidez da estrutura.

Para colisões a baixa velocidade, o crash-box tem a função de absorver ao máximo a energia cinética do impacto, de forma a proteger os componentes e estruturas situados na porção frontal do veículo, visando um menor custo de reparação. Em teste realizados por RODRIGUEZ e FELICIANO (2007), um Peugeot 307 Sedan impactado contra barreira rígida a 18 km/h teve apenas 8% do comprimento da sua longarina deformada, sendo todo o restante da deformação no crash-box e travessa de ligação entre o lado esquerdo e direito. Porém, durante o projeto deve ser levado em consideração não somente a absorção de energia, mas também a interação completa da estrutura, como a força de pico do crash-box com relação às forças desenvolvidas na longarina, o que pode levar à deformação precoce desta estrutura.

Para impactos em alta velocidade, o crash-box tem a função de absorção de energia e correta transferência das cargas para a longarina. Em um ensaio de ECE R94, POLITECNICO DI TORINO (2012) constatou que esta estrutura pode absorver até 10% da energia cinética total. Esta porcentagem varia de acordo com o projeto e condições de carregamento do veículo.

Durante um impacto frontal, o crash-box é a primeira estrutura de paredes finas a ser colapsada. Os momentos iniciais do impacto são cruciais para ativação correta dos sistemas de retenção do veículo devido ao curto espaço de tempo disponível para proteção dos ocupantes. Essa ativação é feita através da leitura de desaceleração realizada pelo controlador do sistema de retenção do ocupante (ORC). Essa desaceleração passa por um algoritmo calibrado com diferentes pulsos de impactos característicos obtidos durante o desenvolvimento do veículo (BERTOCCHI, 2005), variando o peso total do veículo para abranger as diferentes versões em diversas tipologias de impacto, como os testes da ECE R94, Latin NCAP frontal, RCAR dentre

outros. Se identificado que a severidade da colisão condiz com a de um impacto em que é necessário a ativação dos sistemas de retenção, o comando é dado em uma janela de tempo específica para cada tipo de severidade, visando a máxima absorção de energia dos passageiros do veículo. Basicamente, o modo como o crash-box colapsa tem influência em parte do pulso de impacto do veículo (RODRIGUEZ e FELICIANO, 2007). Mudanças de material, espessura, iniciadores de colapso e geometria tem a capacidade de alterar os modos de deformação do crash-box, força máxima e média e energia total absorvida, variando o sinal de desaceleração gerado no veículo e possivelmente alterando a resposta do sistema de proteção.

#### 2.6.6. Ensaios dinâmicos de estruturas de paredes finas

Pela conservação do momento, a energia cinética transformada em outras formas de energia em uma colisão inelástica entre dois corpos pode ser dada pela EQUAÇÃO (2.28) (AMBROSIO, 2001), onde  $M_2$  representa a massa de impacto,  $V$  a sua velocidade e  $M_1$  a massa que está sendo impactada e inicialmente em repouso.

$$E_c = \frac{\frac{M_2 V^2}{2}}{1 + \frac{M_2}{M_1}} \quad (2.28)$$

Para os casos em que a massa  $M_1$  é muito maior que a massa de impacto, a EQUAÇÃO (2.28) pode ser simplificada, indicando que a variação da energia mecânica do sistema é igual a energia cinética. Este raciocínio pode ser aplicado para a compressão de uma estrutura de paredes finas por uma massa qualquer, desde que a estrutura a ser estudada esteja rigidamente fixada em uma massa muito superior à massa de impacto.

$$E_c = \frac{M_2 V^2}{2} \quad (2.29)$$

Existem diferentes metodologias para se obter os resultados de absorção de energia, força máxima e força média em uma compressão de estruturas de paredes finas. Uma das maneiras escolhidas por ABRAMOWICZ e JONES (1984) e por ZHOU et al. (2016) dá-se pela utilização de um equipamento conhecido como *drop hammer*, onde uma massa é solta de uma determinada altura e acelerada pela gravidade até impactar a estrutura a ser testada (Figura



2.50). A velocidade é controlada pela altura da massa e as forças envolvidas são mensuradas com células de carga posicionadas abaixo da estrutura a ser testada.

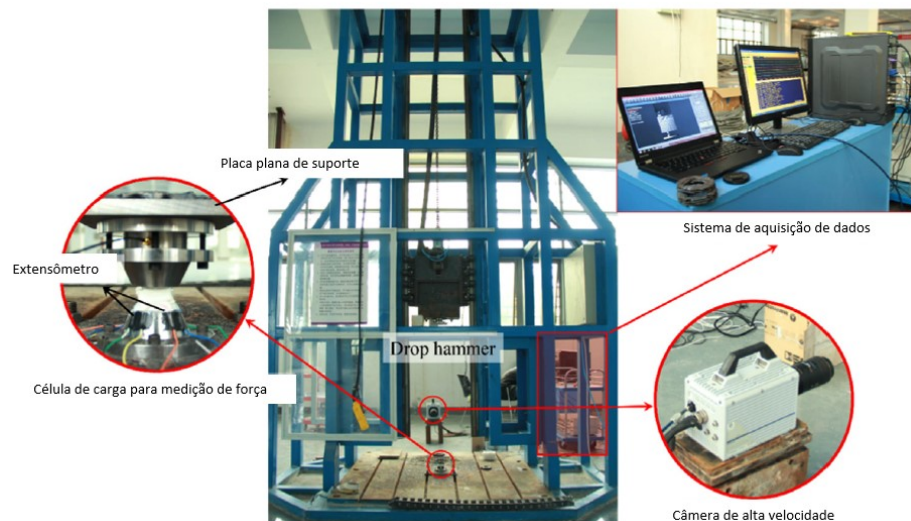


Figura 2.50 - Equipamento *drop hammer* para ensaios de compactação de estruturas

Fonte: adaptado de ZHOU et al., 2016 e, p.3

Já ABEDRABBO et al. (2009) utilizaram um equipamento sobre trilhos conhecido como *sled*, onde fixaram as estruturas a serem testadas. Células de carga são fixadas à barreira para mensurar as forças de compactação. O conjunto é então acelerado até a velocidade desejada e impactado contra uma barreira fixa e rígida. Para evitar o contato direto do *sled* com a barreira rígida ao final da compactação da estrutura, são utilizadas estruturas de colmeias de alumínio para absorção da energia restante através, também, da deformação. Uma explicação do esquema utilizado está descrita na Figura 2.51. O sistema de *sled* possui uma vantagem com relação ao *drop hammer*, pois consegue obter velocidades maiores de impacto. Uma das suas desvantagens é o custo de instalação do equipamento, sendo acessível geralmente para laboratórios comerciais especializados em ensaios de impacto em alta velocidade ou montadoras de automóveis.

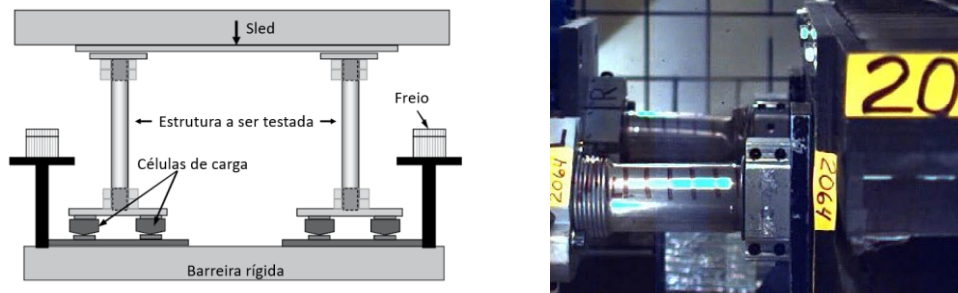


Figura 2.51 - Compactação de estruturas de paredes finas utilizando sled

Fonte: adaptado de ABEDRABBO et al., 2009, p. 1048 e 1049

É possível também obter a força média e energia absorvida através do uso de acelerômetros. De acordo com HUANG (2002), a energia por unidade de massa (energia específica) de um veículo pode ser obtida em cada instante da colisão através da aceleração da massa impactante ( $a$ ), obtida com um acelerômetro. Basta integrar a aceleração pela distância percorrida, EQUAÇÃO (2.30). A energia específica, com unidades de J/kg, pode então ser multiplicada pela massa impactante para obter-se a energia total absorvida durante o impacto pela estrutura de paredes finas. Neste caso, como o acelerômetro captura a aceleração na massa impactante, pode haver diferenças entre a energia calculada por este método e a energia cinética total devido à outras formas de dissipação de energia, como calor, ruído, atrito e etc.

$$\frac{E_{absv}}{M_2} = S_{eb} = \int a d\delta \quad (2.30)$$

O deslocamento pode ser calculado utilizando a EQUAÇÃO (2.31) e condições de contorno apropriadas, onde “ $a$ ” é a aceleração e “ $t$ ” o tempo decorrido. A força média dinâmica é calculada a partir da razão energia absorvida pelo deslocamento total, EQUAÇÃO (2.32), com  $\delta$  representando a deformação em função do tempo. Não foram encontrados na literatura trabalhos científicos que utilizassem acelerômetros para cálculo da força dinâmica máxima.

$$\delta = \iint_0^t a dt dt \quad (2.31)$$

$$P_m^D = \frac{E_{absv}}{\delta} \quad (2.32)$$

### 3. METODOLOGIA

Os experimentos realizados têm como objetivo a correta caracterização do material e das características de absorção de energia de três diferentes crash-box fabricadas em aço DP600, com variação de iniciadores de deformação, comprimento e espessura. As peças N°1 e N°2 pertencem ao mesmo lote de fabricação das chapas, chamado de lote 1, enquanto a peça N°3 foi conformada a partir de um lote distinto, chamado de lote 2.

Para diminuir o impacto de outros parâmetros externos às mudanças propostas, todos os ensaios foram feitos com uma barreira de 1110 kg, a mesma utilizada para os ensaios de impacto posterior em veículo completos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). A velocidade de 16 km/h foi escolhida para todos os ensaios por ser típica de testes de calibração de *airbags*, além de ser a velocidade utilizada em ensaios de reparabilidade do índice *Car Group* da CESVI (RCAR, 2017) em que o comportamento do crash-box exerce influência na classificação dos veículos.

A caracterização do material com relação à composição química, microestrutura, e propriedades mecânicas obtidas em ensaio de tração foram realizadas a partir de peças conformadas pertencentes ao mesmo lote das peças testadas. Todos os ensaios realizados para este trabalho foram realizados no Centro de P&D Giovanni Agnelli localizado na fábrica da FIAT em Betim.



Figura 3.1 - Peças utilizadas para ensaios de caracterização do material

Fonte: Autor, 2020

#### 3.1. Análise da composição química

Uma amostra de 15x15 mm foi recortada dos crash-box de cada lote com a máquina de corte Struers modelo SECOTM-15/-50 com disco abrasivo e analisada com o espectrômetro spectromax da SPECTRO/AMETEK, num total de três verificações dos elementos químicos.

Este espectrômetro utiliza excitação do arco de centelha para determinar a composição química presente na amostra. A Tabela 3.1 indica valores encontrados na literatura para o aço DP600: [1] AMARAL (2017), lote 1; [2] AMARAL (2017), lote 2 e; [3] máximos especificados na ASTM A1088 (2013).

Tabela 3.1 - Composição química do aço DP600: valores da literatura

MATERIAL	C	Mn+Al+Si	P	S	Cu	Ni	Cr+Mo	V+Nb+Ti	N	Si
LOTE 1	0,092	1,834	0,018	0,007	0,022	0,011	0,179	0,017	0,024	0,043
LOTE 2	0,093	1,095	0,005	0,004	0,005	0,033	0,017	0,026	0,022	0,188
[1]	0,097	2,045	0,022	0,005	0,012	0,003	0,196	0,018	$< 10^{-3}$	0,300
[2]	0,076	2,219	0,02	0,004	0,017	0,007	0,163	0,012	$< 10^{-3}$	0,250
[3]	0,17	4,75	0,08	0,015	0,2	0,5	1,4	0,35	-----	-----

Fonte: Autor, 2020

### 3.2. Análise metalográfica

A análise metalográfica foi realizada a partir de duas amostras de cada lote de crash-box, uma no sentido transversal e outra no sentido longitudinal da peça. Não foi possível estabelecer junto ao fornecedor qual direção da peça corresponde à direção de laminação da chapa. Desta forma, a direção longitudinal e transversal utilizada neste trabalho referem-se apenas à peça em si, e não à direção de laminação da chapa.

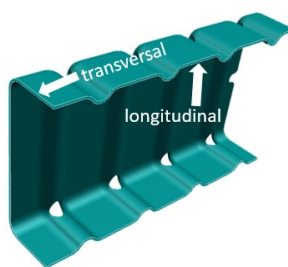


Figura 3.2 – Direções de retirada das amostras para ensaio metalográfico

Fonte: Autor, 2020

O corte foi realizado com a máquina de corte Struers Discotom-2 e disco abrasivo refrigerado com fluido refrigerante durante o processo de corte. Para o embutimento a quente, utilizou-se a resina acrílica em pó Arotec, pressão nominal de  $150 \text{ kgf/mm}^2$  na máquina Struers Prontopress-20, com tempo de aquecimento e resfriamento de 8 e 4 minutos respectivamente.

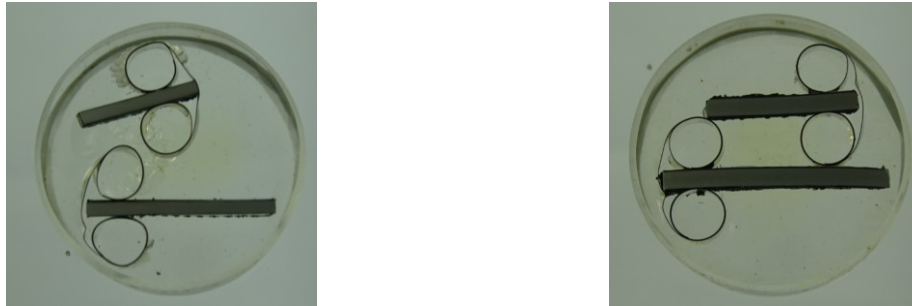


Figura 3.3 - Amostras dos dois lotes embutidas no sentido transversal e longitudinal

Fonte: Autor, 2020

Após o embutimento, as amostras foram posicionadas simetricamente por 1,5 minuto e sob pressão de  $300 \text{ kgf/mm}^2$  para lixamento mecânico com lixas de granulometria #180, #220, #320, #400, #600, #1200 e #2000 mesh. O equipamento utilizado neste processo foi o Struers Abramim e as amostras refrigeradas com água corrente durante o lixamento. Finalizada essa etapa, efetuou-se o polimento das amostras na mesma máquina, substituindo o prato de lixamento pelo de polimento de pano naplan. Cada amostra foi polida por 10 minutos sob pressão de  $100 \text{ kgf/mm}^2$  e refrigerada com água destilada. Para abrasão utilizou-se Alumina em suspensão com granulometria de  $3 \mu\text{m}$  e posteriormente  $1 \mu\text{m}$ .

A limpeza final das amostras foi então efetuada com álcool etílico e secas com ar quente. O reagente Nital 3% foi então utilizado para realizar o ataque químico dos corpos de prova. Quando observado em microscópio, as amostras com áreas escuras possuem constituinte martensita e áreas mais claras têm presença da ferrita. A análise por microscópio foi efetuada com ampliação de 100, 500 e 1000 vezes, utilizando o microscópio Olympus.

### 3.3. Ensaios de tração quase-estático

A máquina de tração universal utilizada foi a Instron 4467 com 30 kN de capacidade máxima e extensômetro óptico. A taxa de deformação utilizada na porção elástica foi de  $0,00025\text{s}^{-1}$ , seguindo o indicado pela ISO (2019). Para a porção plástica, utilizou-se a taxa de  $0,003125\text{s}^{-1}$ , valor entre os limites recomendados pela ASTM (2015). A velocidade do cabeçote foi calculada pela EQUAÇÃO (2.7), em que  $l_p$  é o comprimento da seção útil, resultando em  $0,375 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  e  $4,69 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  respectivamente, valores utilizados para todos os ensaios.

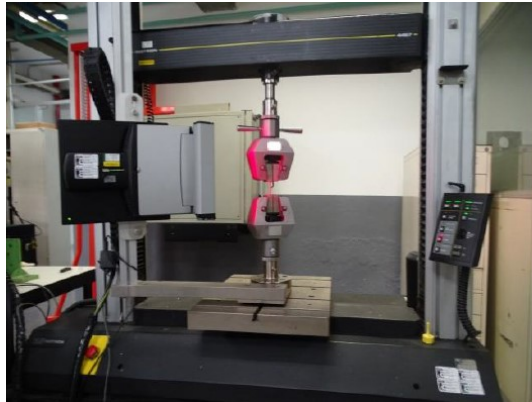


Figura 3.4 - Máquina de ensaio de tração Instron 4467

Fonte: AMARAL, (2017), p.55

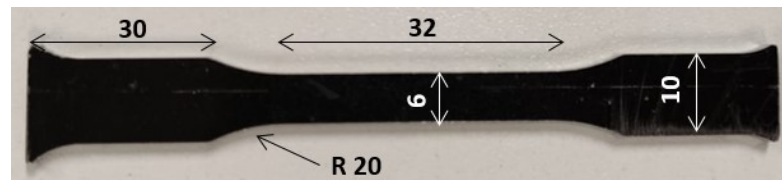


Figura 3.5 - Corpos de prova utilizados para obtenção de propriedade mecânicas

Fonte: Autor, 2020

As dimensões dos corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas seguiram as diretrizes indicadas por ASTM (2015) para corpos de prova reduzidos, que indica dimensões mínimas. As extremidades de alguns corpos de prova possuem largura maior que 10 mm, porém este fato não tem influência no resultado dos testes. Cada C.P teve a espessura e largura da região do comprimento útil aferida antes do teste e as médias dos resultados estão indicadas na Tabela 3.2.

O primeiro algarismo da identificação dos corpos de prova indica o número do lote ao qual o material pertence, e o segundo indica o sequencial de teste. Desta forma, o corpo de prova 12 foi o segundo a ser testado para o material do lote 1.

Tabela 3.2 - Dimensões médias dos corpos de prova em milímetros

Dimensão	11	12	13	21	22	23
t [mm]	1,60	1,60	1,60	1,80	1,80	1,79
W [mm]	5,99	6,02	6,00	6,00	6,05	6,00
G [mm]	32	32	32	32	32	32

Fonte: Autor, 2020

Os dados obtidos de força aplicada ao corpo de prova em conjunto com as dimensões aferidas e indicadas na Tabela 3.2 foram então utilizados para calcular a tensão de engenharia média através da EQUAÇÃO (2.1). Com o deslocamento medido do cabeçote pode-se calcular a deformação de engenharia média pela EQUAÇÃO (2.2). De posse dessas informações, foram plotados os gráficos de tensão e deformação de engenharia. A tensão de escoamento do material foi obtida plotando a curva paralela à reta da parte elástica do ensaio, com início no eixo das abcissas em 0,2%.



Figura 3.6 – Corpo de prova após ruptura

Fonte: Autor, 2020

Com as EQUAÇÕES (2.4) e (2.5) calculou-se a tensão e deformação verdadeiras. De posse das curvas de fluxo é possível determinar os coeficientes  $n$  e  $K^*$  da equação de Hollomon, utilizando os dados presentes entre a tensão de escoamento e de ruptura e com deformação verdadeira no limite de 10% ao LRT, seguindo o indicado pelo método B da ASTM E646 (2016). O valor final considerado é a média aritmética dos testes realizados. O módulo da tangente do material pode ser calculado pela derivada da equação de Hollomon no ponto correspondente ao LRT.

$$E_t = nK^* \epsilon^{n-1} \quad (3.1)$$

As características mecânicas do material foram então comparadas com as especificadas na ASTM A1088 (2013) e também com os resultados obtidos por OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007)



### 3.4. Ensaios de compressão dinâmica

Os ensaios de compressão dinâmica foram realizados no Centro de Segurança LATAM da STELLANTIS, parte integrante do centro de P&D Giovanni Agnelli. Esta pista tem a capacidade de realizar ensaios de veículos completos, com velocidade máxima de impacto de 100 km/h em veículos de até 2,5 toneladas. O ensaio proposto consiste em um impacto de uma barreira móvel sobre um componente fixado no bloco principal.



Figura 3.7 - Pista de impacto do Centro de Segurança LATAM

Fonte: FCA LATAM, 2019

#### 3.4.1. Geometria das peças e taxa de deformação

No total, 3 diferentes tipologias de crash-box foram avaliadas, todas tendo como base a mesma peça. A peça base possui uma seção transversal com as dimensões indicadas na Figura 3.8 e espessura de 1,6 mm. As laterais possuem comprimentos diferentes, sendo a face com menor comprimento a mesma onde se encontram os pontos de solda, indicados por um x na Figura 3.8, que fecham a seção. Desta forma a travessa que realiza o fechamento na parte superior possui uma angulação. Existem na peça corrugados com a finalidade de redução da força máxima (SINGACE e EL-SOBKY, 1997), com profundidade de 6 mm. No corrugado existem também pequenos furos para maior efeito de iniciação de deformação, presentes apenas na face de maior comprimento.



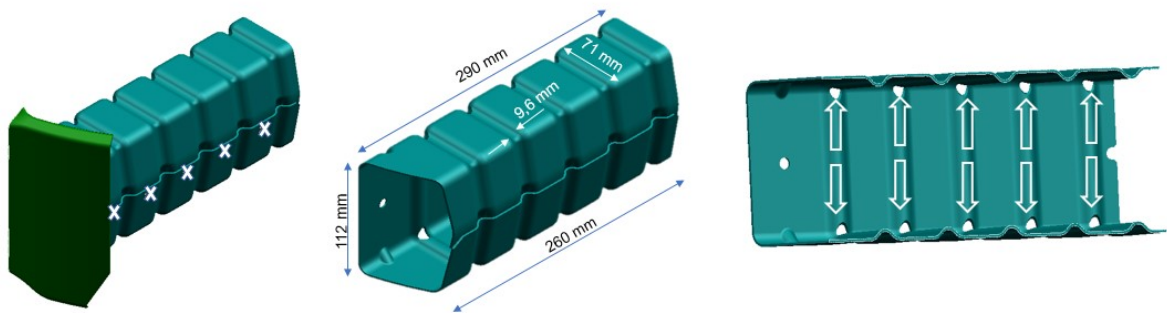
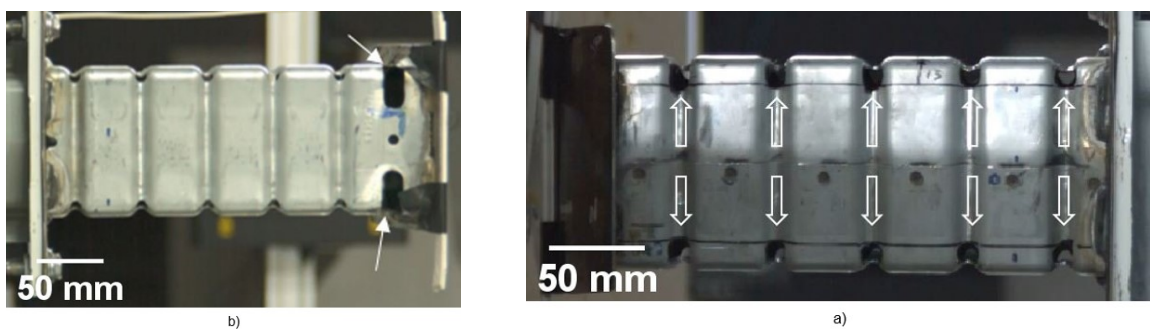


Figura 3.8 – Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

A segunda peça utilizada possui 10 furos quadrados adicionais de 16 mm de aresta ao longo do seu comprimento, indicados na Figura 3.9 b) pelas setas brancas, afim de se obter um efeito adicional de diminuição da força inicial de compactação, além de dois entalhes adicionais, Figura 3.9 a), próximos da união com a travessa. Os furos são distribuídos uniformemente, conforme indicado na Figura 3.9, na face onde há o fechamento com os pontos de solda. As dimensões da peça N°2 são as mesmas indicadas na Figura 3.8 (peça N°1), também, com uma face maior que a outra.



a) Entalhes próximos à travessa

b) Furos quadrados

Figura 3.9 – Modificações da peça N°2; a) lado direito e b) lado esquerdo

Fonte: Autor, 2020

Os segmentos e furos adicionais da peça N°2 foram identificados para facilitar o apontamento durante a análise dos resultados (Figura 3.10), com a seguinte nomenclatura:

- Segmentos: de 1 a 6 a partir da travessa de fechamento do crash-box;
- Corrugados: de “a” até “e” a partir da travessa de fechamento do crash-box;
- Furos: F1 a F10, números ímpares na parte superior e pares na parte inferior, da peça.

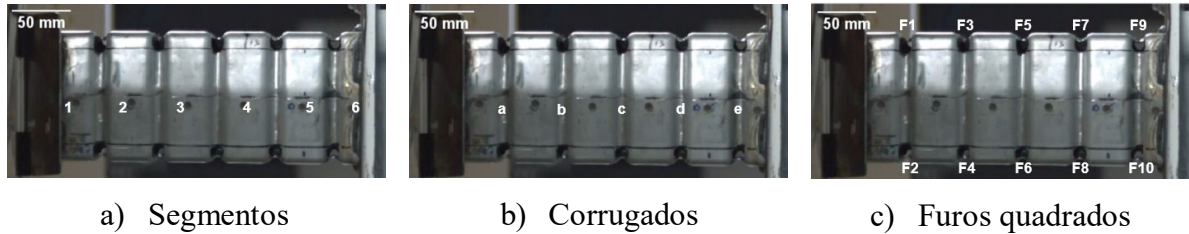


Figura 3.10 - Nomenclatura para a peça N°2

Fonte: Autor, 2020

A peça N°3 é derivada da peça N°1, com modificação de espessura da parede e comprimento, mantendo as dimensões da seção transversal conforme indicado na Figura 3.8. Esta peça elimina a influência do ângulo da travessa na compactação, através do nivelamento da sua parte anterior, deixando-a com o mesmo comprimento em todas as faces. A travessa frontal foi substituída por uma chapa de 3 mm de espessura. Além da redução de comprimento devido ao nivelamento das faces, foi também eliminado um dos segmentos. A espessura da peça é de 1,8 mm e as dimensões finais estão expressas na Figura 3.11.

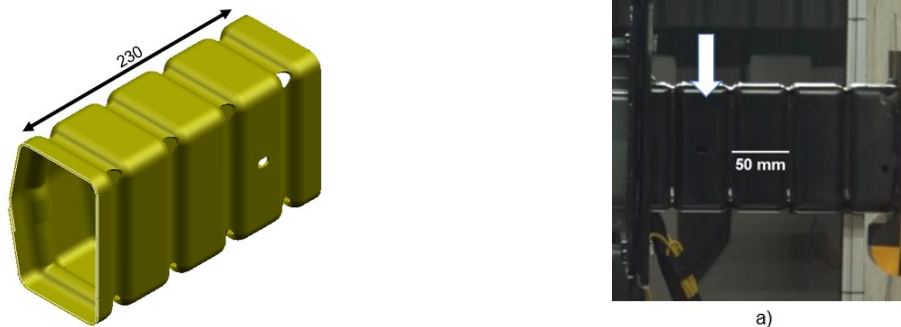


Figura 3.11 - Peça com nivelamento de altura das faces (N°3). Demais dimensões são iguais às da Figura 3.8.

Fonte: Autor, 2020

Os segmentos e corrugados da peça N°3, foram identificados como na Figura 3.12:

- Segmentos: de 1 a 5 a partir da travessa de fechamento do crash-box;
- Corrugados: de “a” até “d” a partir da travessa de fechamento do crash-box.

A Tabela 3.3 apresenta um resumo das geometrias dos três tipos de crash-box estudadas neste trabalho.

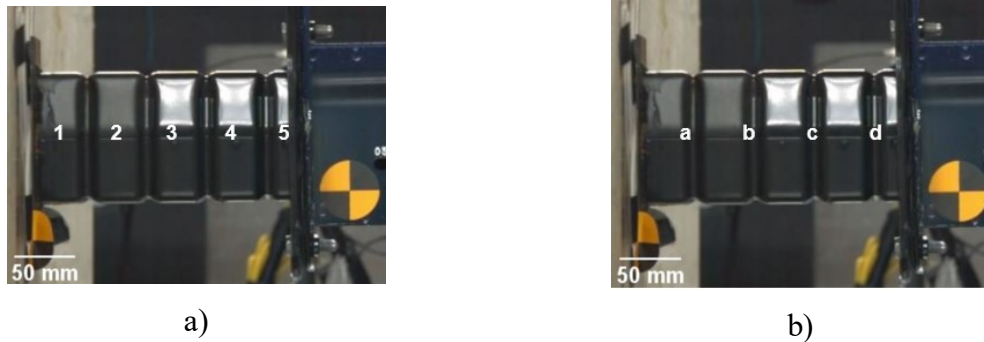


Figura 3.12 - Nomenclatura de referência para a peça N°3; a) segmentos e b) corrugados

Fonte: Autor, 2020

Tabela 3.3– Resumo das características das peças testadas

Peça	Massa [kg]	L face maior [mm]	L face menor [mm]	t [mm]	Modificações de geometria	Aço
N°1	1,29	290	260	1,6	Peça base	DP 600 (lote 1)
N°2	1,12	290	260	1,6	Furos	DP 600 (lote 1)
N°3	1,12	230	230	1,8	Comprimento, espessura e ângulo de fechamento	DP 600 (lote 2)

Fonte: Autor, 2020

Os corrugados presentes nas peças têm como objetivo principal diminuir a força inicial de colapso plástico da estrutura (BAROUTAJI, SAJJIB e OLABIC, 2017). Para melhor explorar a necessidade desta redução de força de pico, estudou-se as cargas críticas de flambagem em uma condição de carregamento estático, considerando todas as peças sem corrugados, sem iniciadores de deformação e de seção transversal constante, exceto na região de fechamento com a travessa das peças N°1 e N°2. Devido à estas considerações, estas duas peças são idênticas e possuem carregamento excêntrico, enquanto a peça N°3 possui carregamento no seu centroide, Figura 3.13. Com relação aos apoios de ambas as colunas, considerou-se que a extremidade do crash-box em contato com a longarina é fixa enquanto a outra é livre. Os momentos de inércia principais das seções transversais assim como a posição do centroide foram obtidos através do software Siemens NX 11.0.

É possível que a peça falhe devido à flambagem global da coluna ou localmente devido à flambagem das placas (ABRAMOWICZ e JONES, 1997). Para determinar o modo dominante de falha, calculou-se as cargas máximas suportadas em ambos os casos. As cargas encontradas foram comparadas entre si e também com a carga de compressão necessária para escoar o

material. Todas as constantes de material utilizadas foram obtidas através dos ensaios de tração. Para isolar unicamente o efeito da diferença de geometria entre as peças, as propriedades mecânicas utilizadas são todas relativas ao lote 1.

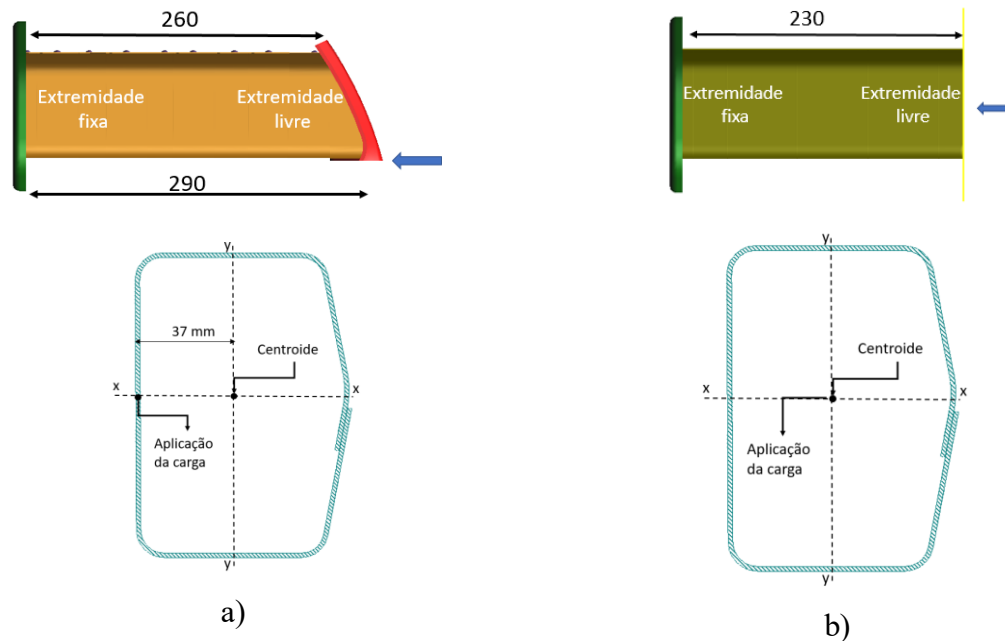


Figura 3.13 – Carregamentos considerados em uma situação quase-estática; a) peças N°1 e N°2 e b) peça N°3

Fonte: Autor, 2020

Para o cálculo da flambagem global, inicialmente classificou-se a coluna como sendo longa ou intermediária/curta pelo limite especificado na EQUAÇÃO (2.15). A peça N°3 possui carregamento em seu centroide, e por isso as EQUAÇÕES (2.11) e (2.16) foram utilizadas para cálculo da tensão crítica de flambagem, dependendo da classificação obtida. No caso da peça N°1/N°2, a EQUAÇÃO (2.14) foi escolhida devido ao carregamento excêntrico na borda da coluna, sendo considerada como tensão máxima admissível a tensão do limite de proporcionalidade do material. Por causa da diferença de comprimento entre as laterais da estrutura, a força de compressão foi modelada como sendo aplicada somente sobre a lateral com 290 mm de comprimento. O fluxograma para escolha das equações utilizadas é representado na Figura 3.14.

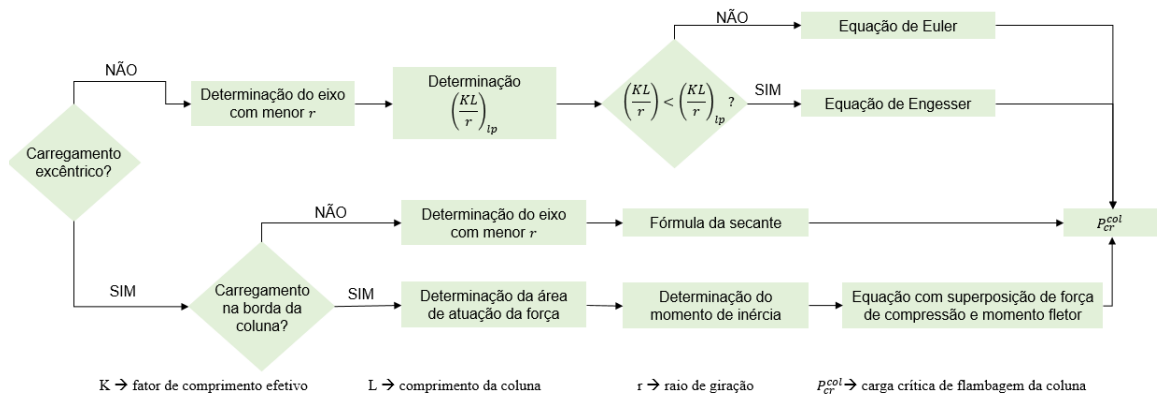


Figura 3.14 - Fluxograma para flambagem de colunas

Fonte: Autor, 2020

Por outro lado, para a flambagem de placa, estabeleceu-se o limite entre coluna compacta ou não compacta pela EQUAÇÃO (2.18) e comparou-se com os valores da peça. A partir daí, foi definido a tensão máxima admissível como sendo a tensão de escoamento do material (seção compacta) ou pela EQUAÇÃO (2.17) (não compacta). As análises foram realizadas apenas para a face com maior comprimento para a peça N°1 e N°2. Para a peça N°3, foi realizada apenas para a placa de flambagem, ou seja, com maior largura. Ambas as placas descritas estão na mesma posição da peça, oposta às faces com fechamento de pontos de solda. A partir dos valores de  $\sigma_{cr}^{pl}$  a carga crítica pode ser obtida pela EQUAÇÃO (2.1). Para as colunas N°1 e N°2, a área de aplicação da carga será apenas a área da seção da placa de 290 mm. No caso da peça N°3, a tensão é distribuída ao longo de toda a área da seção transversal da coluna. As laterais não carregadas da placa podem ser consideradas como suportadas por apoio simples (WIERZBICKI, 2013) e por isso utilizou-se a Figura 2.33 para obter o valor de  $k^{pl}$ .

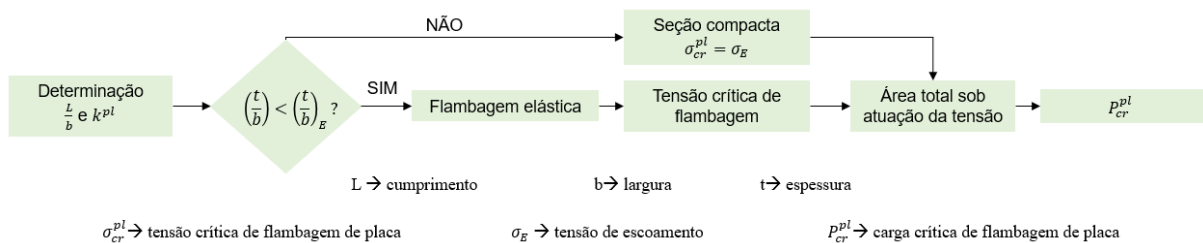


Figura 3.15 - Fluxograma para flambagem de placas

Fonte: Autor, 2020

Com relação às taxas de deformação envolvidas nos ensaios, estas foram calculadas pelas estimativas fornecidas por Abramowicz e Jones (1984), Tabela 2.4. Para identificar a influência dessa estimativa na  $P_m^D$  de uma coluna, utilizou-se os valores encontrados de sensibilidade à taxa de deformação por Oliver, Jones e Fournalis (2007) para o aço DP 600. A partir destes valores, calculou-se os coeficientes de Cowper e Symonds e a variação de  $P_m^D$  com relação à  $P_m$ , EQUAÇÃO (2.24).

### 3.4.2. Preparação de pista

A preparação de cada ensaio é separada em duas partes distintas: manufatura dos corpos de prova a serem testados e preparação dos equipamentos de pista.

Cada corpo de prova consiste em um crash-box manufaturada em aço DP 600, uma chapa de aço 1020 de dimensões 400 x 200 x 16 mm e uma seção de longarina. A escolha da longarina levou em consideração a força máxima suportada por essa estrutura, de modo que não haja riscos de deformação precoce no lugar do crash-box testada. A longarina é soldada na chapa de aço e o crash-box é parafusado na sua parte anterior. Toda essa estrutura é então parafusada no bloco principal e trocada após cada ensaio.

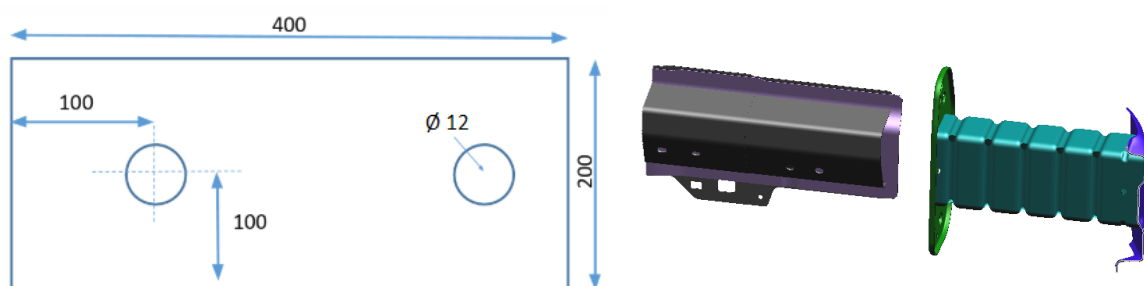


Figura 3.16 – Componentes necessários para confecção dos corpos de prova

Fonte: Autor, 2020

Caso o crash-box não seja capaz de absorver totalmente a energia do impacto, o restante será dissipado pela longarina. A energia total absorvida pelo crash-box e longarina poderá ser identificada devido à um aumento na desaceleração da barreira (DU BOIS et al., 2004), comportamento que pode ser observado no exemplo da Figura 3.17, e pelos vídeos de alta velocidade gravados.

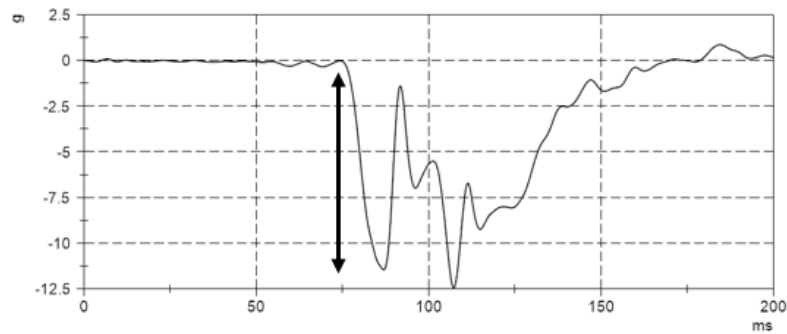


Figura 3.17 - Aumento de desaceleração de um veículo devido à ação de estrutura rígida

Fonte: Autor, 2020

O ensaio em si dura menos de 200 ms, mas a preparação de pista pode levar até algumas horas. O primeiro passo é a limpeza do trilho da pista para evitar que qualquer detrito proveniente de ensaios anteriores possa vir a danificar o sistema. Após a realização da limpeza o corpo de prova é parafusado diretamente no bloco pelos dois furos da chapa. A linha de centro do crash-box é colocada sobre a linha de centro do trilho. Verticalmente, o centro do crash-box coincide com o centro da barreira.

A barreira móvel escolhida é a mesma utilizada para os ensaios de homologação de impacto posterior ECE R32. A massa total desta barreira, com todo o equipamento, é de 1110 kg. O centro de gravidade da barreira está localizado a 476 mm de altura a partir do solo, 746 mm longitudinalmente em direção à roda posterior, medido a partir do centro da roda dianteira e transversalmente na linha central da barreira. Para evitar um eventual impacto da barreira móvel no bloco rígido, foi instalado o sistema de freio próprio da pista de impacto. Com este sistema é possível ajustar o acionamento dos freios com relação ao primeiro toque entre a barreira e o objeto de prova. O freio foi ajustado para acionamento após 150 ms do primeiro contato para todos os testes. Um resumo do processo a ser realizado antes do impacto é indicado na Figura 3.18.

Todo o sistema de aquisição é montado sobre a barreira móvel. Os acelerômetros utilizados são do tipo piezoresistivo da marca TE Connectivity Sensors, modelo 64B. Estes acelerômetros foram fixados na parte frontal esquerda, frontal direita e no centro de gravidade (C.G) da barreira para aferição da aceleração nas direções X, Y e Z, num total de 9 acelerômetros. Redundância de acelerômetros é importante para se ter certeza de que o sinal obtido é válido e livre de qualquer interferência externa. A controladora utilizada foi a M=BUS Pro Ethernet Gateway da Messring com dois módulos M=BUS Pro Analog e capacidade total de 16 canais. A taxa de aquisição utilizada foi de 20.000 aquisições por segundo.



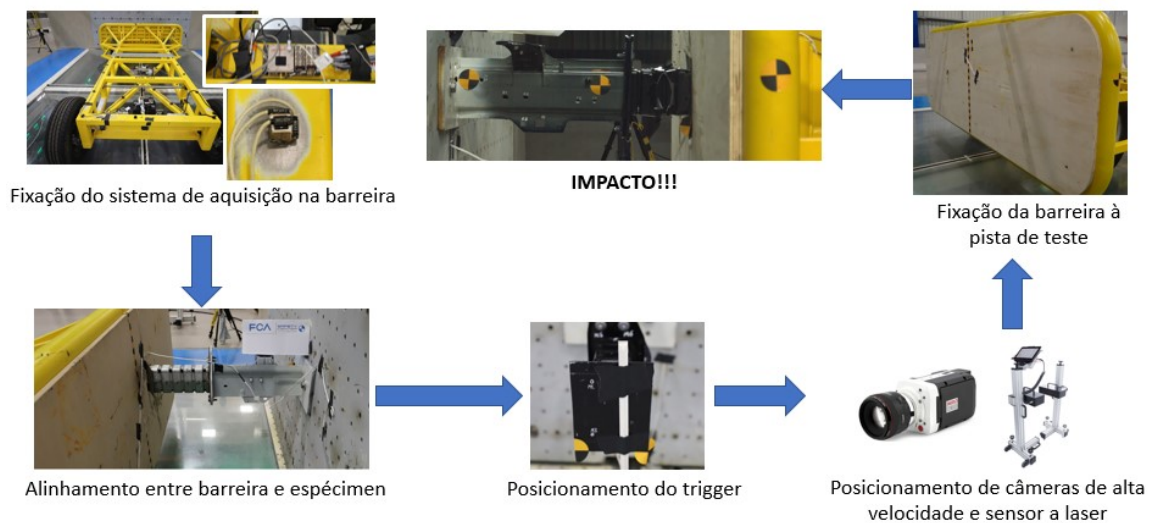


Figura 3.18 – Configuração do experimento antes do impacto

Fonte: Autor, 2020

O centro da barreira móvel é então alinhado com o centro da pista, posicionando-a próxima ao objeto de prova. O primeiro ponto de contato entre a barreira e o corpo de prova é marcado e dois gatilhos (*triggers*) são posicionados neste local, um na barreira e outro no corpo de prova. Os gatilhos (*triggers*) utilizados são da marca Tape Switch e tipo Ribbon Switch, modelo 141-BPM. Ao ser pressionado, o gatilho (*trigger*) gera o sinal inicial para o sistema de aquisição e câmeras. O gatilho da barreira indica o tempo inicial de impacto para o sistema de aquisição, enquanto o do objeto de prova inicia a contagem de tempo para as câmeras.

Após o posicionamento dos gatilhos (*triggers*), a barreira é novamente colocada tocando levemente o objeto de prova para posicionamento das câmeras e ajuste de foco. Os vídeos da compressão dinâmica foram obtidos por duas câmeras de alta velocidade Phantom and Vision, modelo Miro LAB 320, posicionadas nas laterais da barreira em um ângulo de  $90^\circ$  com relação ao trilho da pista. A taxa de aquisição foi de 1000 fotos por segundo, ou seja, 1 foto a cada milissegundo.

A mensuração da velocidade de impacto é obtida pelo sensor de velocidade a laser de feixe duplo da Messring, com precisão de 0,1 km/h, para velocidades de até 50 km/h. Este equipamento possui duas unidades, uma emissora, que emite dois feixes de laser, e outra receptora. Essas unidades são posicionadas com um ângulo de  $90^\circ$  em relação ao trilho da pista e de forma que o segundo feixe a laser esteja o mais próximo possível do objeto de prova, para garantir a precisão da velocidade inicial de impacto.

Após a verificação do funcionamento de todos os equipamentos, a barreira móvel é levada para uma posição inicial pré-determinada, de onde será acelerada pelo sistema de



propulsão da pista. A barreira é presa ao carro de tração por duas correntes e acelerada constantemente até o momento do impacto. Próximo ao local do impacto é posicionado no chão da pista um sistema de desengate. Quando o carro de tração passa por esse sistema de desengate, as duas travas onde as correntes da barreira estavam presas abrem, liberando-a completamente. A partir deste momento, a barreira não sofre mais nenhuma ação do sistema de propulsão da pista.

### 3.4.3. Análise

Para determinar o deslocamento total da barreira, e a compactação da estrutura de paredes finas, foram utilizados dois diferentes métodos. O primeiro consiste na integração dupla do sinal de aceleração obtido no ensaio, sendo que as constantes de integração são: velocidade inicial da barreira igual à mensurada com o velocímetro a laser, para o tempo igual a zero; distância inicial da barreira igual a zero para tempo igual a zero. Para realizar os cálculos do primeiro método foi utilizado o software DIAdem, versão 2012. O segundo método consiste no rastreamento de um marcador circular com diâmetro de 50 mm posicionado na lateral da barreira, Figura 3.19. O rastreamento deste marcador foi feito através do software Phantom Camera Control (PCC) versão 3.4, que utiliza pixels da imagem e uma dimensão conhecida para realizar a operação.



Figura 3.19 - Objeto de prova N°1 e marcadores para rastreamento por análise de vídeo

Fonte: Autor, 2020

Os sinais e vídeos obtidos em cada teste foram, então, estudados e comparados no software DIAdem. Para garantir a integridade dos dados obtidos, foi realizada uma inspeção visual via gráfico entre os sinais dos acelerômetros posicionados no centro de gravidade, no lado esquerdo e no lado direito da barreira. Além disso, calculou-se também a relação cruzada

normalizada entre o sinal do acelerômetro do centro de gravidade e os outros dois para obter-se uma estimativa da similaridade (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018). As curvas dos acelerômetros foram sincronizadas com as imagens do vídeo, possibilitando identificar o motivo físico nas tendências dos gráficos.

De acordo com a ISO (2000), os sinais de aceleração devem ser filtrados com classe de frequência de canal (CFC) 60 para análises estruturais e CFC 180 para integração e obtenção das curvas de velocidade e deslocamento. O acelerômetro utilizado para comparação com vídeo e cálculos subsequentes foi o posicionado no centro de gravidade da barreira móvel com o intuito de evitar perturbações de giro ou ascensão da barreira.

A energia total absorvida pelo sistema é considerada como sendo a energia cinética, de acordo com a EQUAÇÃO (2.29), já que o bloco de fixação tem massa muito maior que a barreira móvel. A energia específica da barreira foi calculada a partir da EQUAÇÃO (2.30) e plotada de forma a demonstrar o total dissipado em cada instante. Multiplicando o valor encontrado pela massa da barreira têm-se a energia total do sistema que foi dissipada, e considerando que toda a energia dissipada é absorvida pela estrutura, calculou-se a energia específica de cada objeto de prova com a EQUAÇÃO (2.26). A eficiência de compactação é dada pela EQUAÇÃO (2.27).

A força média de cada crash-box é obtida pela EQUAÇÃO (2.32). As EQUAÇÕES (2.21), (2.22) e (2.23) para cálculo analítico da força média não podem ser utilizadas neste caso porque as estruturas em estudo não possuem seção transversal uniforme, quadrada ou retangular ao longo de todo o seu comprimento. Apesar de existirem equações para cálculo de forças em estruturas com corrugados, não foi identificado na literatura equações para seção transversal similar a utilizada nestes ensaios. A dedução de uma equação para o cálculo desta estrutura foge do escopo deste trabalho.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise da composição química

A Tabela 4.1 indica os valores obtidos nas análises de composição química, porcentagem em massa, para os lotes 1 e 2 do aço DP600, assim como os valores de: [1] AMARAL (2017), lote 1; [2] AMARAL (2017), lote 2 e; [3] máximos especificados na ASTM A1088 (2013).

Tabela 4.1 - Composição química do aço DP600: resultados e valores da literatura

MATERIAL	C	Mn+Al+Si	P	S	Cu	Ni	Cr+Mo	V+Nb+Ti	N	Si
LOTE 1	0,092	1,834	0,018	0,007	0,022	0,011	0,179	0,017	0,024	0,043
LOTE 2	0,093	1,095	0,005	0,004	0,005	0,033	0,017	0,026	0,022	0,188
[1]	0,097	2,045	0,022	0,005	0,012	0,003	0,196	0,018	$< 10^{-3}$	0,300
[2]	0,076	2,219	0,02	0,004	0,017	0,007	0,163	0,012	$< 10^{-3}$	0,250
[3]	0,17	4,75	0,08	0,015	0,2	0,5	1,4	0,35	-----	-----

Fonte: Autor, 2020

Os resultados de composição química do aço empregado no estudo dos crash-box deste trabalho (lotes 1 e 2) estão dentro dos valores especificados pela norma ASTM A1088 (2013) para aços DP600. Observa-se variações nos equivalentes químicos (Mn-Al-Si), (Cr-Mo) e (V-Nb-Ti), relativo aos lotes 1 e 2 do aço DP600. Entretanto, como demonstrado nas fotomicrografias das Figura 4.1 e Figura 4.2, nas curvas de escoamento dos ensaios de tração, Figura 4.3 e nas propriedades mecânicas especificadas na Tabela 4.2, ambos lotes 1 e 2 são muito semelhantes, apresentando apenas pequenas diferenças nas propriedades mecânicas. A variação do C entre os dois lotes foi de apenas 1,7%. Este trabalho não tem nenhum objetivo de estudar o efeito de diferenças na composição química sobre a eficiência de absorção de energia dos crash-box. Portanto, considera-se ambos lotes 1 e 2 do aço DP600 como semelhantes.

### 4.2. Análise da microestrutura

As fotomicrografias do aço DP600, lotes 1 e 2, estão representadas nas Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente. As imagens indicam uma matriz ferrítica macia (em branco) com granulometria fina e distribuída homogeneamente. As “ilhas” e partículas de martensita (em

preto), estão presentes na forma de finos glóbulos, também, distribuídos de forma homogênea na matriz ferrítica e com pequena variação de tamanhos.

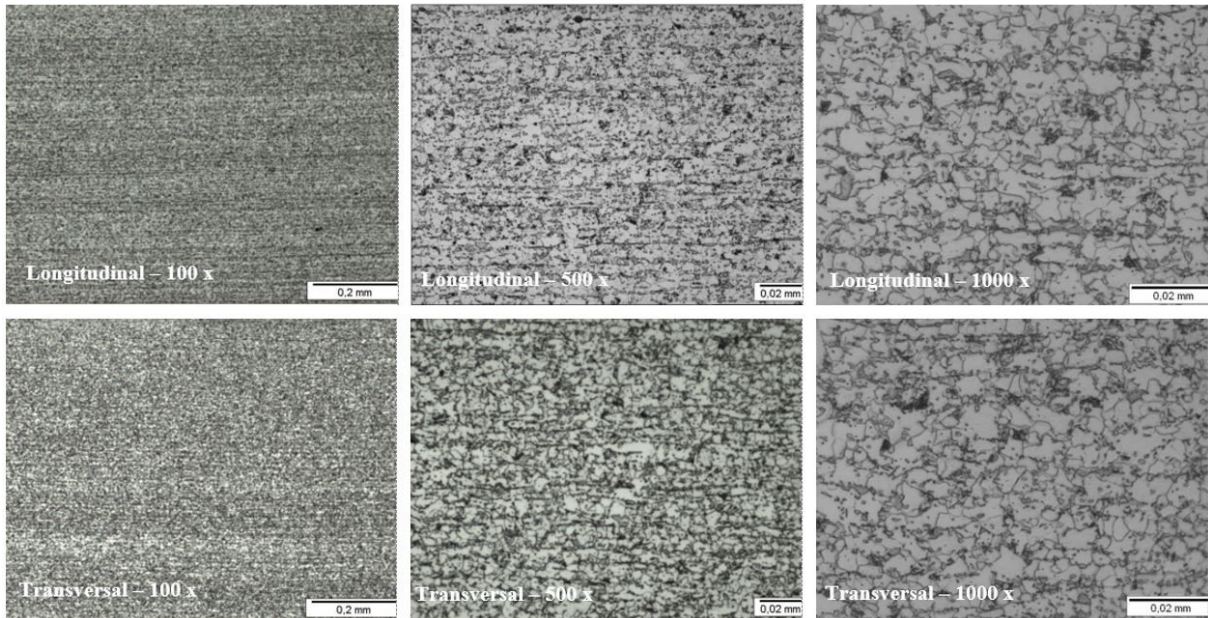


Figura 4.1 – Micrografia do aço DP600, lote 1

Fonte: Autor, 2020

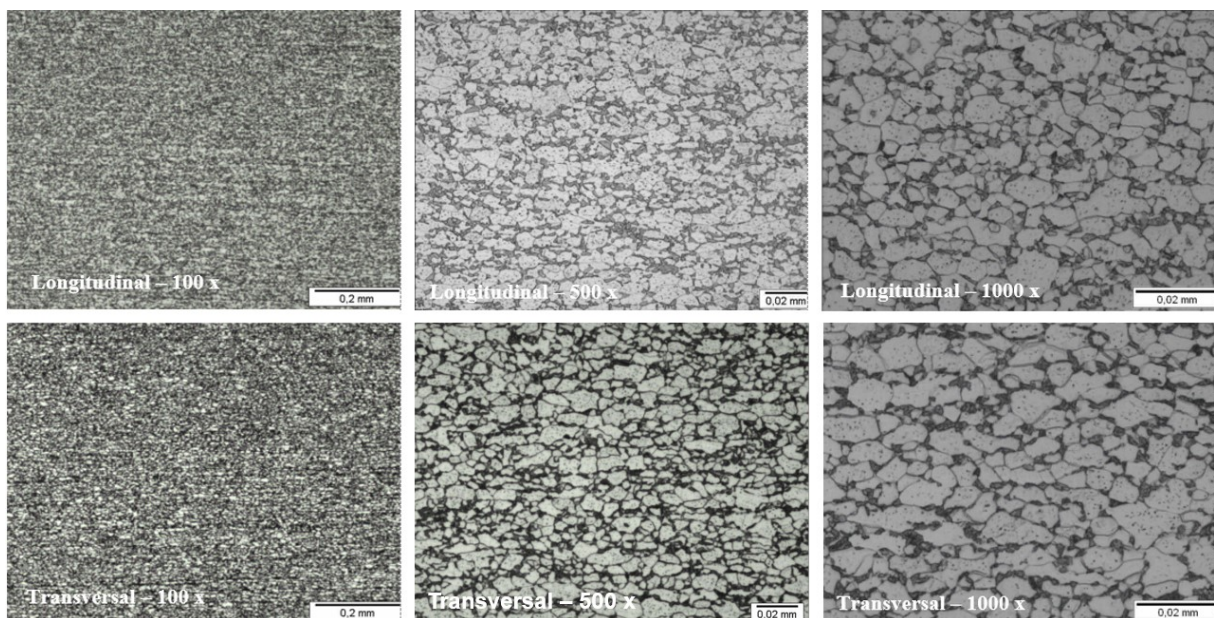


Figura 4.2 - Micrografia do aço DP600, lote 2

Fonte: adaptado de GOMES e RODRIGUES, 2020, p.12

Os grãos da microestrutura ferrítica, melhor resolvidos para ampliação de 1000 vezes, apresentam-se com uma distribuição de tamanhos homogênea, com morfologia quase equiaxial. Por outro lado, as “ilhas” de martensita se apresentam ainda menores, visualizadas nos contornos de grão ferríticos, com morfologia irregular, não apresentando uma forma equiaxial e repetitiva, conforme pode-se observar na Figura 4.1 e Figura 4.2. Há uma grande semelhança entre as microestruturas dos dois lotes, quanto às quantidades de ferrita e martensita por unidade de volume presentes nas micrografias do aço DP600 ilustradas.

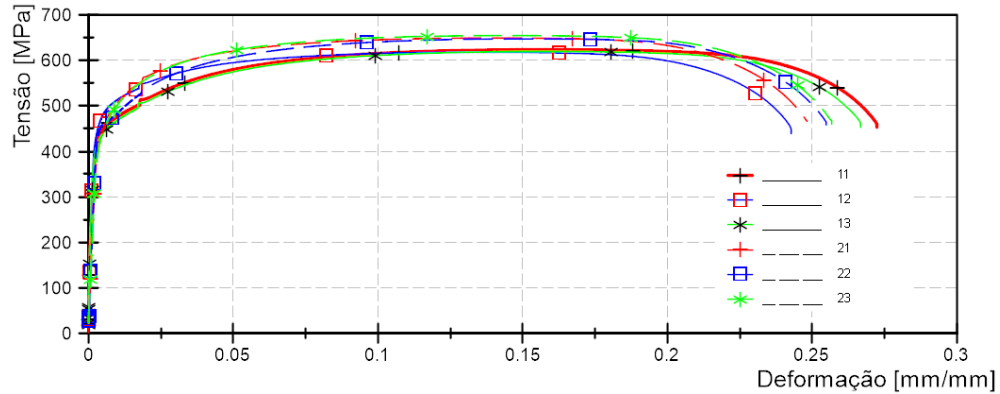
As imagens da microestrutura do aço DP600, lotes 1 e 2, deste trabalho, apresentadas na Figura 4.1 e Figura 4.2,, respectivamente, assemelham-se às imagens da microestrutura reportadas por ROSENBERG, SINAIOVÁ e JUHAR, (2013), Figura 2.13 b), e por AMARAL (2017), sendo que a distribuição uniforme da martensita ao longo da matriz ferrítica confere boa ductilidade ao material (TIGRINHO, 2011).

### **4.3. Ensaios de tração**

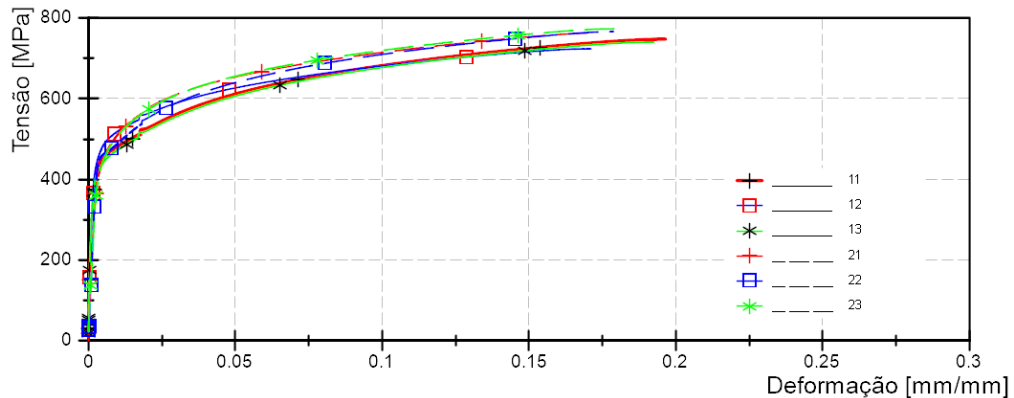
Os dados obtidos nos ensaios de tração foram estudados para obter as propriedades mecânicas de cada corpo de prova. A Figura 4.3, (a) e (b), mostra curvas de tensão por deformação de engenharia e verdadeira, respectivamente. Foram ensaiadas três amostras do lote 1 e três amostras do lote 2, ambos do aço DP600. Após os testes feitos, não foi realizado nenhum tratamento matemático adicional com os dados, para correção das curvas, a partir do ponto de início da estricção dos corpos de prova (CP). Desta forma, os dados obtidos após o LRT trazem pouco significado às análises (DIETER, 1961) e, portanto, não foram plotados.

A Figura 4.3 indica que todos os C.P possuem um elevado grau de deformação plástica, característica típica de materiais dúcteis (CALLISTER, 2000), e elevada resistência mecânica, podendo também serem classificados como materiais tenazes.





a)



b)

Figura 4.3 - Gráficos tensão por deformação: a) engenharia e b) verdadeira, até o LRT

Fonte: Autor, 2020

A Tabela 4.2 indica os valores médios calculados para as três amostras dos lotes 1 e 2 do aço DP600, o valor-p do teste estatístico t de *student* (bicaudal), assim como valores de referência obtidos por OLIVER et. al (2007) e os mínimos indicados pela norma ASTM A1088 (2013). A tensão de escoamento e o limite de resistência à tração possuem pouca variação, o que pode ser explicado pelo teor de carbono em ambos os lotes do aço DP600, conforme mostrado nos ensaios de composição química, e percentual próximo de ferrita e martensita nas respectivas microestruturas, baseado nas escalas da Figura 4.1 e Figura 4.2. Pode-se classificar, portanto, ambos os lotes 1 e 2 como DP600, atendendo os requisitos mínimos previstos pela norma ASTM A1088 (2013) referente a composição química e propriedades mecânicas. O valor encontrado para o módulo de elasticidade e da tangente para o lote 1 foi de 206 GPa e 16,72 GPa respectivamente. Naturalmente, destaca-se que a microestrutura é função da composição

química e estabelece as propriedades mecânicas do aço, podendo apresentar pequenas variações (KRAUSS, 2005).

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas médias e desvio padrão dos lotes 1 e 2

Referência	$\sigma_{lp}$ [MPa]	$\sigma_E$ [MPa]	LRT [MPa]	$\frac{\sigma_E}{LRT}$
Lote 1	389,33 ± 18,48	442,12 ± 19,43	620,35 ± 2,76	0,71 ± 0,03
Lote 2	384,00 ± 29,46	450,04 ± 11,03	650,47 ± 3,76	0,69 ± 0,02
Valor-p	0,81	0,51	5,76.10 <sup>-4</sup>	0,45
OLIVER et al. (2007)	-----	399	635	0,63
ASTM A1088 (2013)	-----	340	590	-----
Referência	$AL_u$ [%]	G [mm]	AL [%]	n
Lote 1	15,01 ± 0,01	25	26,06 ± 0,016	0,14 ± 0,01
Lote 2	14,54 ± 0,01	25	25,34 ± 0,004	0,14 ± 0,01
Valor-p	0,62	-----	0,51	0,44
OLIVER et al. (2007)	15,7	80	25,9	0,15
ASTM A1088 (2013)	-----	50	21	≥0,14

Fonte: Autor, 2020

Os valores p do teste t de *student* explicitados na Tabela 4.2 estão acima de 0,44 para todas as propriedades, exceto para o LRT. Isso significa que há uma probabilidade de 44% de se observar variações tão grandes ou maiores das propriedades mecânicas do que as indicadas na Tabela 4.2 devido ao acaso, e não necessariamente devido ao fato de pertencerem a lotes distintos (FILHO, 1999). Portanto, não há evidência estatística suficiente para afirmar que tais propriedades de ambos os lotes são diferentes entre si. O LRT apresenta um valor p menor que 5%, valor usualmente adotado na literatura, a partir do qual é possível rejeitar a hipótese de que as médias do LRT de ambos os lotes são iguais (ALVES, 2017). Porém, apesar da diferença estatística do LRT entre os lotes, ambos são considerados semelhantes, já que uma diferença máxima de 6% entre os dados extremos do lote 1 e lote 2 não apresenta relevância significativa para os ensaios propostos neste trabalho.

Referente ao alongamento uniforme do aço, a Tabela 4.2 indica valores em torno de 14 a 15%, reforçando as medidas obtidas do expoente de encruamento ( $AL_u \approx n$ ) e demonstrando ser, o aço DP600 empregado neste trabalho, bastante dúctil, contendo uma capacidade de alongamento total da ordem de 25%.

A tensão de escoamento ( $\sigma_E$ ) dos lotes 1 e 2 possuem valores superiores aos reportados por OLIVER et. al (2007). Este comportamento pode estar associado aos efeitos de encruamento da chapa, devido à conformação mecânica para fabricar os crash-box e, também, ao efeito *bake hardening* ocorrido durante a cura da pintura das peças. Os resultados de

OLIVER et. al (2007) e as indicações da ASTM A1088 (2013) são para chapas laminadas a frio sem etapas de fabricação adicional.

Os valores médios de limite de resistência à tração (LRT) apresentam-se maiores que os valores médios de limites de escoamento ( $\sigma_E$ ) em 40% para o lote 1 e 44% para o lote 2. Nesse mesmo raciocínio, as razões  $\sigma_E/LRT$ , indicam valores em torno de 70%, o que significa uma boa capacidade de encruamento dos aços, que pode ser confirmado pelos valores obtidos para o expoente de encruamento “n”. Conforme demonstrado pela Tabela 4.2, os valores encontrados para “n” são semelhantes aos obtidos pelos outros trabalhos referenciados. Por outro lado, a Tabela 4.3 indica os valores médios dos coeficientes de resistência ( $K^*$ ) do aço DP600, encontrados por regressão linear do gráfico log-log das curvas de fluxo dos lotes 1 e 2, considerando deformações entre 10% e o LRT.

Tabela 4.3 - Coeficientes da equação de Hollomon

Referência	n	$K^*$
Lote 1	0,14 ± 0,01	944,52 ± 28,13
Lote 2	0,14 ± 0,01	978,69 ± 11,03

Fonte: Autor, 2020

#### 4.4. Ensaios de compressão dinâmica

##### 4.4.1. Considerações sobre a geometria

A diminuição da força de pico ocasionada pelos corrugados influencia as características de flambagem da peça. A presença dos corrugados também diminui a quantidade de ondas de deformação, observadas na Figura 2.41, devido à baixa razão  $\frac{L}{b}$  de cada segmento, fato confirmado pela Figura 2.33.

Levando em consideração colunas com seção transversal constante, Figura 3.13, calculou-se as cargas críticas de flambagem das peças N°1/N°2 e N°3. Nesta figura também estão indicadas a localização do centroide da seção transversal e a posição da aplicação da carga.

Pela avaliação da seção transversal, percebe-se que as peças N°1 e N°2 possuem carregamento excêntrico com relação ao eixo Y-Y e sem excentricidade com relação ao eixo X-X. Para a peça N°3, o carregamento é considerado como sendo no centroide para ambos os eixos. O momento de inércia em relação ao eixo X-X é maior do que em relação ao eixo Y-Y,



Tabela 4.4, o que indica uma preferência de flambagem em torno do eixo Y-Y. O índice de esbelteza efetivo para ambas as colunas é muito menor que o índice crítico, classificando as colunas como curtas e indicando tendência à flambagem plástica em vez de elástica. É importante notar que devido à diferença de comprimento nas chapas das peças N°1 e N°2, foi considerado que a tensão de compressão atua somente na placa de 290 mm, reduzindo a área disponível e conseqüentemente a carga total suportada, sendo que a tensão admissível para o cálculo da  $P_{cr}^{col}$  neste caso foi tomada como sendo a  $\sigma_{lp}$  do material. A área para a peça N°3 corresponde à área total da seção transversal.

Tabela 4.4 - Propriedades das colunas

Peça	t [mm]	$A_o$ [ $10^{-4}m^2$ ]	L [m]	$I_x$ [ $10^{-7}m^4$ ]	$I_y$ [ $10^{-7}m^4$ ]	$\left(\frac{KL}{r}\right)_y$	$\left(\frac{KL}{r}\right)_{lp}$	$\sigma_{cr}^{col}$ [MPa]	$P_{cr}^{col}$ [kN]
1 e 2	1,6	1,47	0,29	9,59	5,39	18,58	72,28	389,33	47,36
3	1,8	6,21	0,23	10,73	6,02	14,77	72,28	756,15	469,88

Fonte: Autor, 2020

A Tabela 4.5 indica as propriedades geométricas da placa de flambagem, assim como a razão  $\left(\frac{t}{b}\right)_{cr}$ , limite entre uma seção compacta e não compacta. Por possuir valores de espessura por largura menores do que os valores críticos, as placas tanto para as peças de 1,6 mm quanto 1,8 mm de espessura devem ser consideradas como sofrendo flambagem elástica. Novamente aqui, as peças N°1 e N°2 têm tensão de compressão aplicada somente à placa de 290 mm, enquanto a peça N°3 tem tensão de compressão atuando sobre toda a área da seção transversal. Os valores utilizados para o módulo de elasticidade (E), módulo da tangente ( $E_t$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) foram 206,08 GPa, 16,72 GPa (ambos valores médios dos três testes do lote 1) e 0,3 (CALLISTER, 2000) respectivamente.

Tabela 4.5 – Propriedades geométricas das placas de flambagem

Peça	t [mm]	$A_o$ [ $10^{-4}m^2$ ]	L [m]	b [mm]	$\frac{L}{b}$	$k^{pl}$	$\frac{t}{b}$	$\left(\frac{t}{b}\right)_{cr}$	$\sigma_{cr}^{pl}$ [MPa]	$P_{cr}^{pl}$ [kN]
1 e 2	1,6	1,47	0,29	92	3,15	4,05	0,017	0,028	228,16	33,59
3	1,8	6,21	0,23	92	2,50	4,19	0,019	0,022	298,75	185,64

Fonte: Autor, 2020

O aumento na espessura de parede em conjunto com a redução no comprimento da placa resultou em uma tensão crítica 30% maior para a peça N°3 quando comparada com as outras

duas. Além disso, a área total de aplicação da tensão de compressão é 322% maior para a peça N°3, resultando em uma carga suportada 452% maior que as peças N°1 e N°2. Um resumo das tensões e cargas críticas para os casos descritos acima é apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Tensões e cargas de flambagem global e localizada

Peça	t [mm]	$\sigma_{cr}^{col}$ [Mpa]	$\sigma_{cr}^{pl}$ [Mpa]	$P_{cr}^{col}$ [kN]	$P_{cr}^{pl}$ [kN]	$P_e$ [kN]
1 e 2	1,6	389,33	228,16	47,36	33,59	65,08
3	1,8	756,15	298,75	469,88	185,64	274,74

Fonte: Autor, 2020

Pelos resultados expostos na Tabela 4.6, as peças N°1 e N°2 tenderão a falhar localmente devido à flambagem elástica na placa de 290 mm de comprimento. Esse valor, porém, é muito próximo da carga crítica de flambagem da coluna. Segundo ZIEMIAN (2010), a carga de flambagem da placa obtida por este método é conservadora, o que pode ser comprovado pela análise das cargas de flambagem das placas adjacentes. Por possuírem larguras diferentes, as cargas que estas placas suportam diferem das calculadas para a placa de flambagem. Na prática, as placas adjacentes aumentam a carga que a placa de flambagem pode suportar, e, por este motivo, pode ser esperado para estas colunas tanto flambagem localizada quanto global.

A peça N°3 apresenta tendência a flambar localmente devido à flambagem elástica das placas. Os valores de carga suportados por esta coluna, porém, são muito maiores que os das outras duas. É interessante notar que essa coluna possui carga de escoamento do material menor que a carga de flambagem global.

Ambas as colunas são classificadas como colunas não compactas e tenderão a deformar-se com dobras largas e irregulares (MAHMOOD e PALUSZNY, 1981), fato que pode levar à uma desestabilização durante a compressão dinâmica. A inserção de corrugados e iniciadores de deformação, além de diminuir a força de pico e aumentar a eficiência de força de compactação, faz-se necessário nas peças N°1 e N°2 como uma estratégia para impedir a flambagem global.

#### 4.4.2. Taxas de deformação envolvidas

O valor nominal de velocidade escolhido para os testes foi de 16 km/h. Para o cálculo da taxa de deformação envolvida foram utilizadas as formulações encontradas por

ABRAMOWICZ e JONES (1984) e indicadas na Tabela 2.4. A seção transversal das peças utilizadas possui cinco arestas, totalizando cinco SE com comprimentos distintos, explicitados na Figura 4.4. Por isso o comprimento considerado para a taxa de deformação deve ser o comprimento médio (AMBROSIO, 2001).

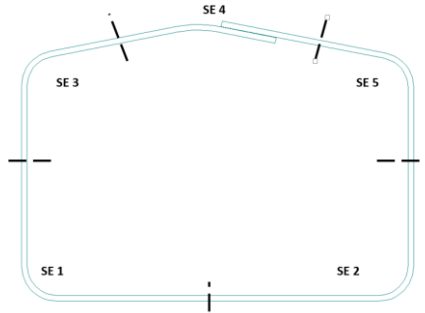


Figura 4.4 - Seção transversal dividida em 5 SE

Fonte: Autor, 2020

Tabela 4.7 - Taxas de deformação esperadas para diferentes modos de deformação

Modo de deformação	$\dot{\epsilon}$ estimada [ $s^{-1}$ ]
Simétrico	20
Assimétrico tipo A	27
Assimétrico tipo B	24

Fonte: Autor, 2020

Os valores encontrados na Tabela 4.7 devem ser tomados como uma estimativa, pois a formulação proposta por ABRAMOWICZ e JONES (1984) leva em consideração seções quadradas. Não foi encontrado na literatura formulação específica para a geometria estudada neste trabalho. Porém, uma pequena variação da taxa de deformação não é tão importante, devido ao baixo valor do expoente  $\frac{1}{q}$  na EQUAÇÃO (2.24) (AMBROSIO, 2001).

Para comprovar este fato, foram encontrados os coeficientes D e q da equação de Cowper e Symonds tomando como base os resultados expostos na Figura 2.25. Esta figura indica os valores na escala logarítmica da taxa de deformação e da tensão de escoamento do aço DP600. Em seu trabalho, OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007) indicaram que duas inclinações diferentes foram encontradas: uma para taxas de deformação abaixo de  $10s^{-1}$  e outra para taxas acima deste valor. As equações das curvas logarítmicas que representam a sensibilidade à variação da taxa de deformação do DP600 para estes resultados são indicadas nas EQUAÇÕES (4.1) e (4.2).

$$\log(\dot{\epsilon}) = 2,652 + 0,014 \log(\sigma_E), \dot{\epsilon} \leq 10s^{-1} \quad (4.1)$$

$$\log(\dot{\epsilon}) = 2,652 + 0,034 \log(\sigma_E), 10 < \dot{\epsilon} \leq 200s^{-1} \quad (4.2)$$

A partir destas duas equações, foram calculadas oito tensões de escoamento em diferentes taxas de deformação, variando entre 0,001 e 200  $s^{-1}$ . A equação de Cowper-Symonds, EQUAÇÃO (2.8), foi manipulada algebricamente para chegar à forma demonstrada na EQUAÇÃO (4.3). Esta por fim foi utilizada para plotar o logarítmico das tensões de escoamento em diferentes taxas de deformação, Figura 4.5. A determinação dos coeficientes pode ser realizada através do ajuste linear dos dados, EQUAÇÃO (4.4).

$$\log \dot{\epsilon} = \log D + q \log\left(\frac{\sigma'_E}{\sigma_E} - 1\right) \quad (4.3)$$

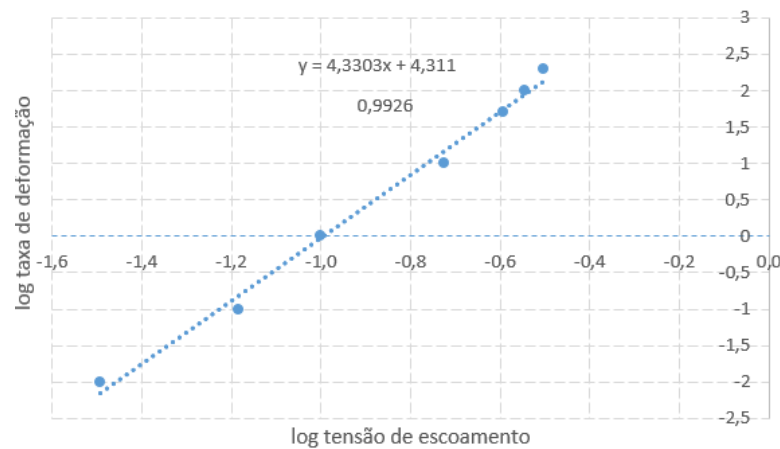


Figura 4.5 - Gráfico logarítmico da taxa de deformação pela tensão de escoamento

Fonte: Autor, 2020

$$\log \dot{\epsilon} = 4,311 + 4,330 \log\left(\frac{\sigma'_E}{\sigma_E} - 1\right) \quad (4.4)$$

O coeficiente de determinação encontrado para o ajuste linear da curva foi de 0,99. As constantes  $q$  e  $D$  da equação de Cowper e Symonds para o aço DP600, a partir dos experimentos realizados por OLIVER, JONES e FOURLARIS (2007), valem 4,33 e 20462 respectivamente. De posse desses valores, a EQUAÇÃO (2.24) pode então ser utilizada para determinar a

variação da força média de compactação para as taxas de deformação encontradas na Tabela 4.7. Os valores obtidos estão representados na Tabela 4.8 e indicam uma variação máxima de 1,6%, resultado que vai ao encontro do exposto por AMBROSIO (2001) e que indica que uma determinação muito precisa de  $\dot{\epsilon}$  traz pouco ganho aos cálculos de  $P_m^D$ .

Tabela 4.8 - Forças médias esperadas para diferentes modos de deformação

Modo de deformação	$\dot{\epsilon}$ estimada [ $s^{-1}$ ]	$P_m^D$
Simétrico	20	1,20 $P_m$
Assimétrico tipo A	27	1,22 $P_m$
Assimétrico tipo B	24	1,21 $P_m$

Fonte: Autor, 2020

#### 4.4.3. Coerência dos dados

A Tabela 4.9 indica as velocidades mensuradas da barreira móvel no momento do impacto e a energia cinética total disponível em cada ensaio. A variação máxima da energia cinética foi de 1,2%, indicando boa repetição do ensaio.

Tabela 4.9 - Velocidades e energia cinética dos testes de compressão dinâmica

Peça	$M_2$ [kg]	$V_o$ [km/h]	$E_c$ [kJ]
Nº1	1110	16,10	11,1
Nº2	1110	16,00	11,0
Nº3	1110	16,06	11,0

Fonte: Autor, 2020

O primeiro ponto analisado foi a coerência dos dados obtidos pelos acelerômetros. Segundo XU e WANG (2016), acelerômetros montados nas extremidades esquerda e direita da barreira e que possuam sinais semelhantes indicam que os dados obtidos são confiáveis. Para essa verificação, foi plotado um gráfico para cada teste, contendo os três sinais de aceleração filtrados na direção X com filtro CFC 60 e observado se há discrepâncias entre os sinais obtidos do lado esquerdo, lado direito e centro de gravidade. A Figura 4.6 mostra o gráfico obtido nos três acelerômetros na direção X para a peça Nº1, indicando uma leve variação, considerada normal, entre os sinais obtidos. Além disso, foi também calculada a relação cruzada normalizada entre o sinal do acelerômetro do centro de gravidade com os acelerômetros posicionados do lado esquerdo e do lado direito da barreira, obtendo uma correlação em torno

de 96% para ambas comparações em todos os testes. Nenhum ensaio apresentou variação anormal de dados.

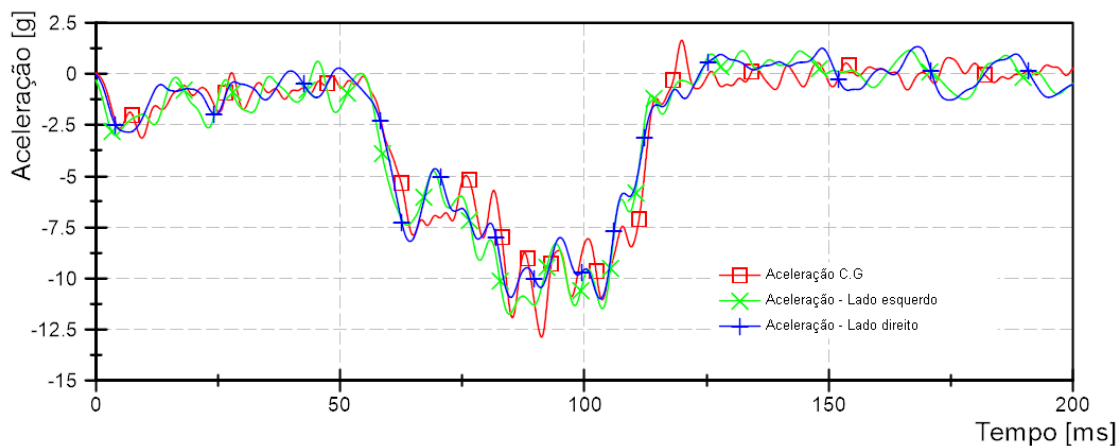


Figura 4.6 – Comparação dos dados dos 3 acelerômetros (X) - peça N°1

Fonte: Autor, 2020

#### 4.4.4. Teste N°1

A Figura 4.7 mostra a desaceleração e velocidade da barreira móvel em função do tempo, obtida através do acelerômetro posicionado no C.G. Este gráfico foi dividido em três regiões, representando momentos distintos do ensaio.

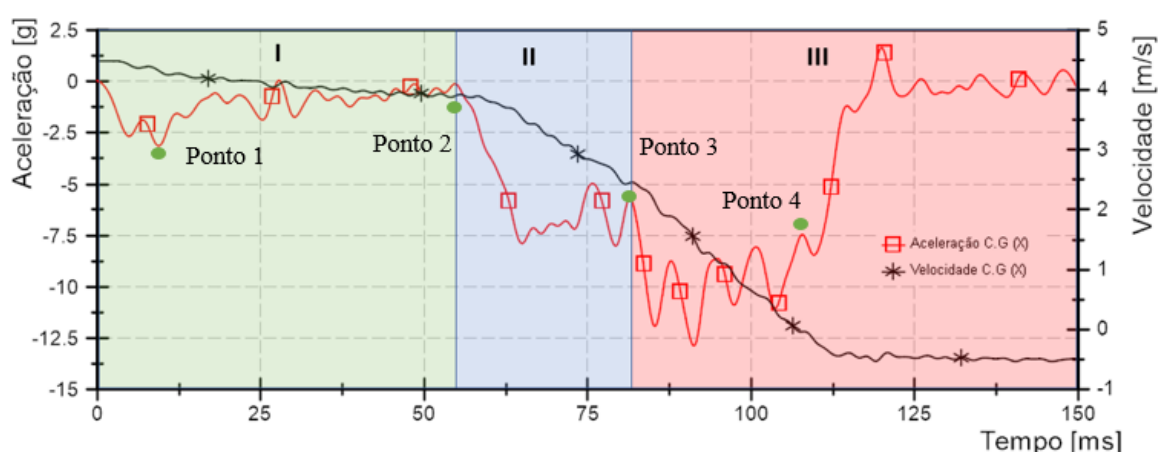


Figura 4.7 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

A região I possui baixos níveis de desaceleração da barreira, máximo de 3,13 g, indicando uma baixa força de reação do objeto de prova. A barreira toca inicialmente o crash-

box fora do seu centroide devido ao ângulo da travessa, ilustrado anteriormente na Figura 3.8. Este toque fora do centroide faz com que haja um carregamento excêntrico, diminuindo a tensão crítica suportada pela coluna (HIBBELER, 2004).

É possível perceber que esta região do gráfico representa o colapso da estrutura, que dobra integralmente para a direita. Entre 8 e 9 ms surge uma dobra localizada, próxima ao corrugado da base. A formação desta dobra corresponde à atenuação da magnitude de desaceleração dada pelo ponto 1 na Figura 4.7, indicando queda na força de reação da estrutura. HIBBELER (2004) indica comportamento de flambagem semelhante ao observado na peça N°1 para estruturas com uma extremidade fixa e carregamento na outra extremidade livre, Figura 2.27. A Figura 4.8 mostra a sequência de imagens onde é possível perceber este detalhe.

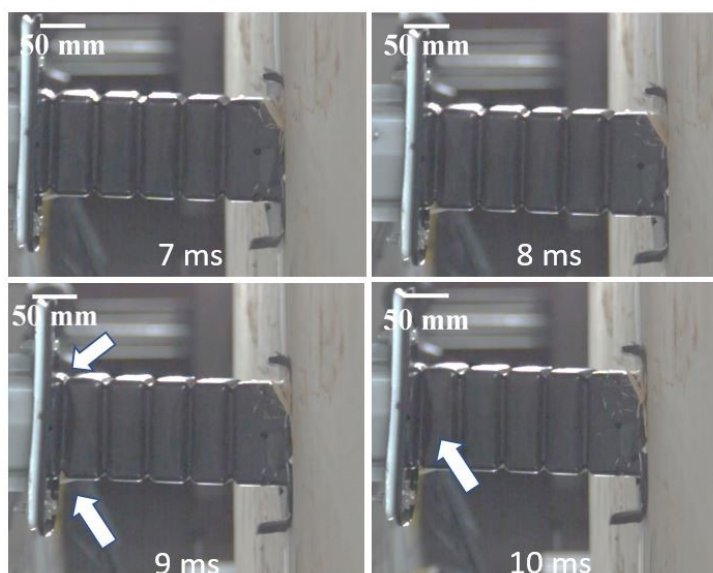


Figura 4.8 – Surgimento de dobra plástica no corrugado próximo à base - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

Após este evento, a estrutura continua a ser empurrada pela barreira. A solda da chapa de conexão entre o crash-box e a longarina não é o suficiente para suportar o momento causado sobre ela, fenômeno indicado na Figura 4.9. O colapso do crash-box e da chapa de conexão segue até os 54 ms.

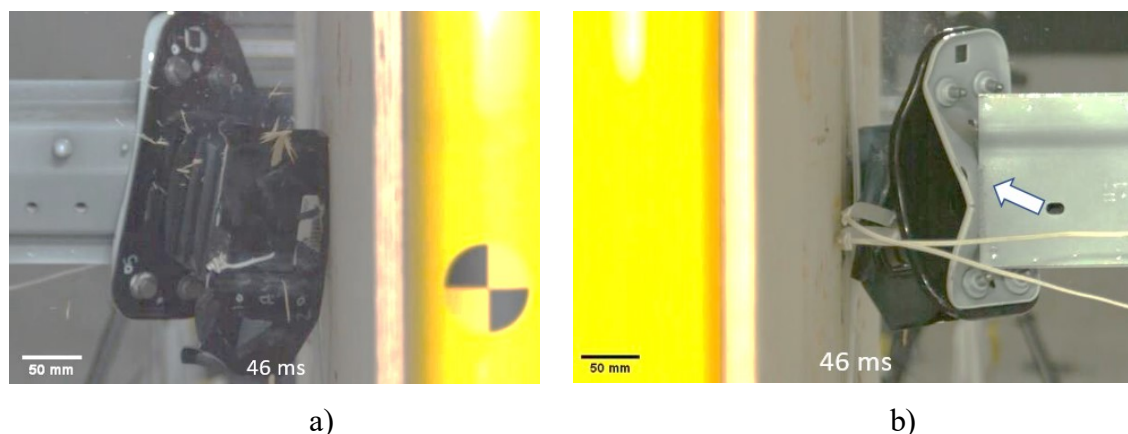


Figura 4.9 – Colapso global: a) lado direito e b) lado esquerdo - Peça N°1, 46 ms

Fonte: Autor, 2020

A partir dos 54 ms, ponto 2 da Figura 4.7, tem-se o início da região II. Nesta região, a flexão do crash-box termina e ocorre maior escorregamento do crash-box e chapa de conexão sobre a parte anterior da longarina. Este fenômeno é seguido por um aumento repentino na magnitude de desaceleração sofrida pela barreira, devido à deformação de parte da seção da longarina no lado direito, com pico de 7,8 g aos 65 ms, sendo finalizada no ponto 3 aos 81 ms.

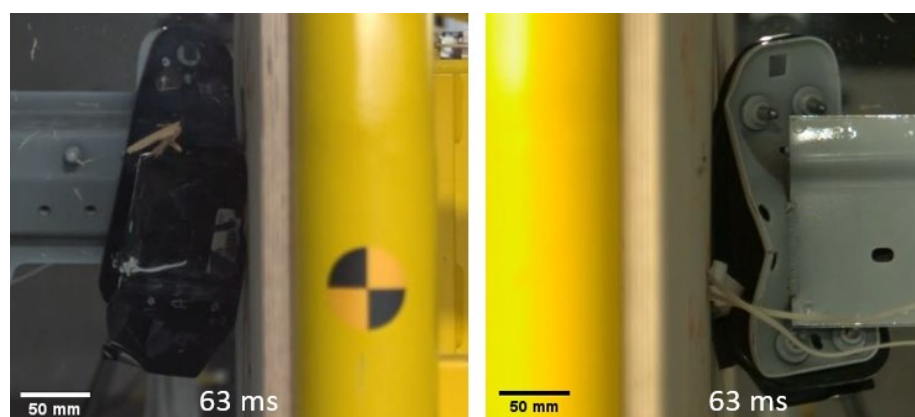


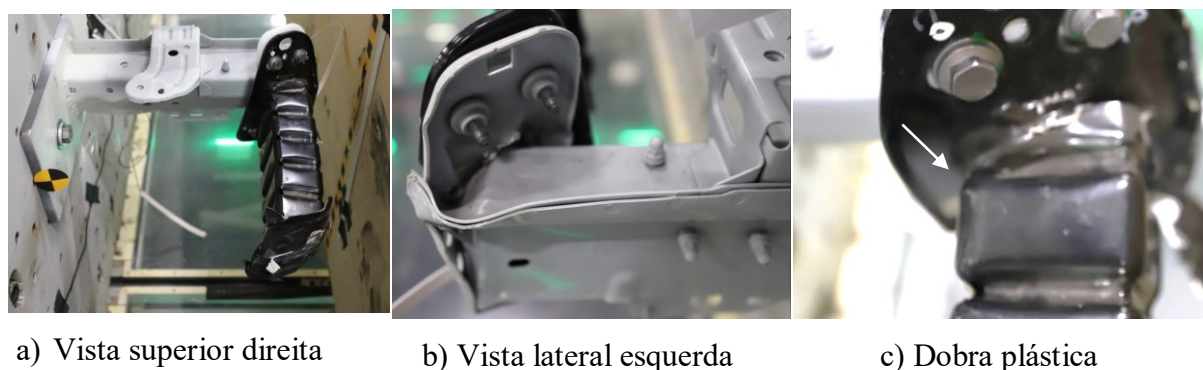
Figura 4.10 - Compactação da lateral: a) Lado direito e b) lado esquerdo - Peça N°1, 63ms

Fonte: Autor, 2020

A partir do ponto 3 da Figura 4.7 ocorre a compactação da longarina. Essa compactação é seguida por um outro aumento nos níveis de desaceleração da barreira, atingindo picos de 12,8 g. Este aumento repentino da desaceleração devido a iterações com estruturas rígidas é também observado por DU BOIS et al., (2004). A compactação ocorre até o ponto 4 (107 ms), onde a velocidade da barreira chega a zero, trocando de sentido e passando a se afastar do objeto



de prova, finalizando o teste. Aos 150 ms, acontece o acionamento do freio automático da barreira, travando-a em posição. Na Figura 4.11 são exibidos os registros do objeto de prova momentos após a finalização do ensaio. É possível perceber nestas imagens a baixa deformação do crash-box e a dobra plástica responsável pelo colapso inicial, indicada pela seta na Figura 4.11 c).



a) Vista superior direita

b) Vista lateral esquerda

c) Dobra plástica

Figura 4.11 - Objeto de prova após o ensaio - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

A distância percorrida pela barreira em função do tempo foi obtida seguindo-se dois diferentes métodos, comparados na Figura 4.12. A curva foi considerada até o máximo deslocamento, que coincide com o momento em que a velocidade da barreira chega a zero. A maior diferença entre as duas metodologias para cálculo da distância foi de 7 mm (2,6%), sendo que o ponto de intrusão máxima da barreira foi de 344,54 mm utilizando a análise de vídeo e 345,5 mm utilizando o acelerômetro. Esses resultados reforçam a integridade dos dados obtidos.

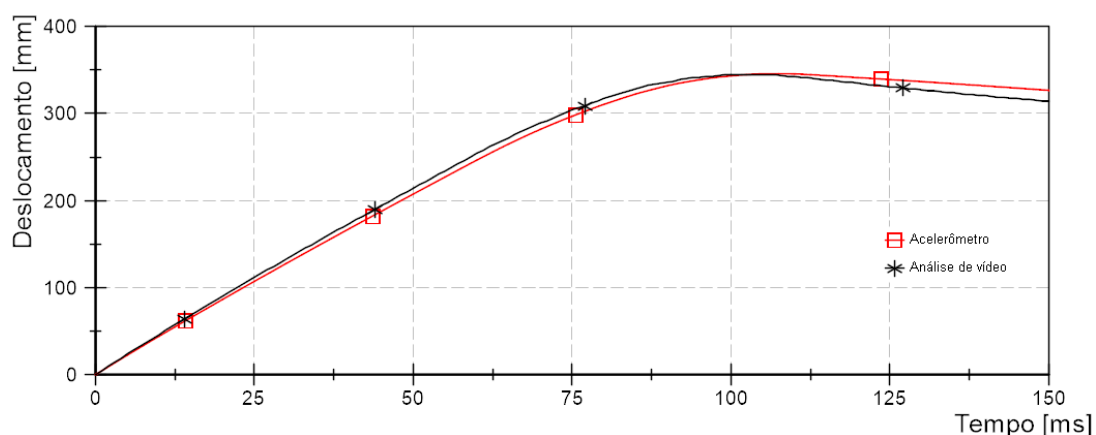


Figura 4.12 - Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

Devido à flambagem localizada ocorrida no ensaio e à existência de três regiões de carregamento distintas, foram calculadas as forças médias de cada região. Essa separação traz mais informações sobre a eficiência de absorção de energia de cada evento. Foram também calculadas as características de compactação e absorção de energia até o ponto 1 da Figura 4.7, por representar o momento imediatamente anterior à flambagem global do crash-box. A curva de energia em função do tempo, calculada a partir da distância obtida com o acelerômetro do C.G, é indicada na Figura 4.13 juntamente com o gráfico de aceleração para melhor visualização das regiões distintas. Baseado neste gráfico, foram obtidas a energia específica dissipada da barreira em cada região, assim como a aceleração média e força média de compactação. Os resultados são exibidos na Tabela 4.10.

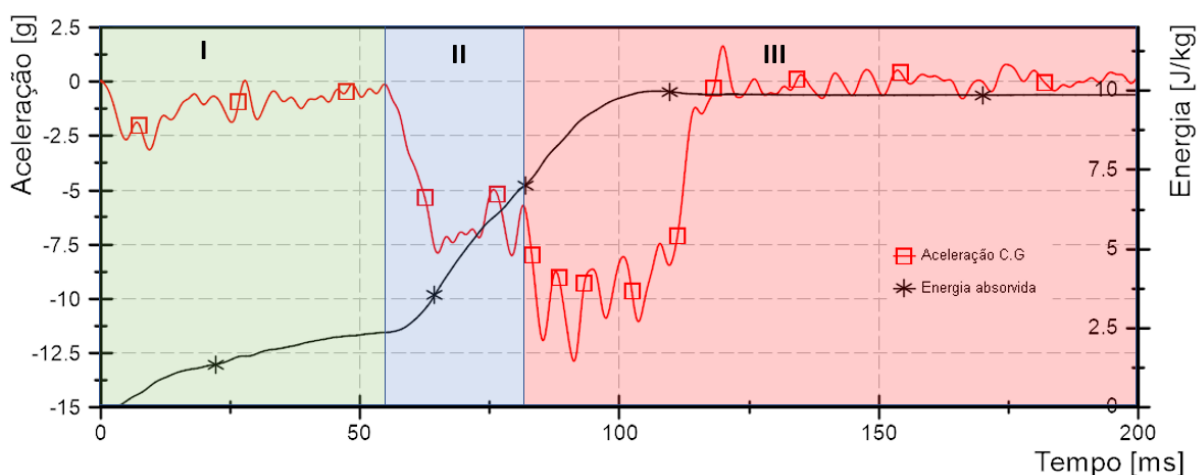


Figura 4.13 – Aceleração e energia específica dissipada da barreira em função do tempo - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

Tabela 4.10- Características de compactação - Peça N°1

Região	$\Delta t$ [ms]	$P_m^D$ [kN]	$\delta$ [mm]	$\Delta S_{eb}$ [J/kg]	$E_{absv}$ [kJ]	$E_{absv}$ [%]	$S_e$ kJ/kg	$S_{te}$ [%]
Crash-box (até ponto 1)	9,4	17,19	41,6	0,65	0,7	6,4	0,55	97
I	54,8	11,54	225	2,4	2,6	23,4	-----	-----
II	26,7	57,66	88	4,6	5,1	45,7	-----	-----
III	25,3	103,64	32	3,0	3,3	29,9	-----	-----
Total	106,8	31,84	345	10,0	11,0	99,0	-----	-----

Fonte: Autor, 2020

As regiões I, II e III na Tabela 4.10, assim como na Figura 4.7, representam a rotação do crash-box, escorregamento da estrutura sobre a longarina e deformação parcial da mesma e, finalmente, compactação da longarina, respectivamente. Pela análise da Tabela 4.10 é possível perceber a baixa característica de absorção de energia da região I. Por surgir em apenas uma das faces da coluna, a dobra desestabilizou-a e devido à este fato, a  $P_m$  da região I foi de apenas 11,54 kN, equivalente a 20% e 11% da forças média de compactação das regiões II e III respectivamente. Esta região, porém, foi responsável pela absorção de 23% da energia total do impacto, fato devido ao longo percurso sobre o qual se deu a flambagem elástica, totalizando 225 mm. Se compararmos a absorção de energia ao longo do percurso da região II com a energia absorvida da região I, nota-se que a energia absorvida na região II foi o dobro da região I em um espaço 2,5 vezes menor. Essa diferença deve-se à baixa força necessária para rotacionar o crash-box, característica de toda a região I.

Destaca-se que a energia absorvida na região I não corresponde à energia absorvida pelo crash-box, mas sim à energia necessária para colapsar a estrutura e fletir a chapa de conexão com a longarina. Desta forma, os parâmetros do crash-box indicados na Tabela 4.10 estão contidos na região I. O crash-box, no final do ensaio, apresenta apenas a deformação inicial que causou o colapso de toda a estrutura, indicado na Figura 4.11, resultando em um comprimento final com 97% do comprimento inicial. A energia para flambar o crash-box corresponde ao ponto 1 da Figura 4.7, início da flambagem, e foi de 0,7 kJ, resultando em uma absorção específica de 0,55 kJ/kg. A Figura 4.14 mostra um comparativo visual entre algumas propriedades das regiões I (verde), II (azul) e III (vermelho).

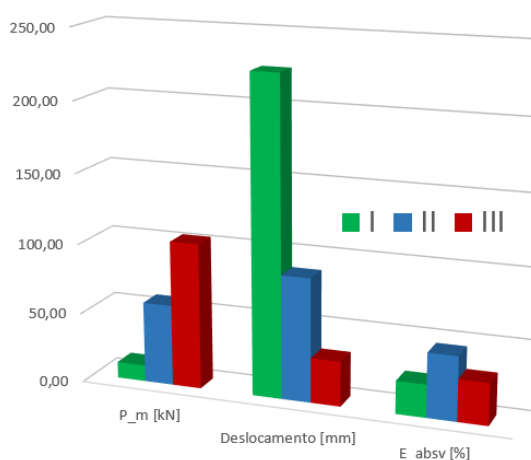


Figura 4.14 – Comparação das características principais de cada região - Peça N°1

Fonte: Autor, 2020

## 4.4.5. Teste N° 2

Os gráficos de aceleração e velocidade em função do tempo para a peça N°2 estão representando na Figura 4.15, enquanto os de aceleração e deslocamento estão indicados na Figura 4.16. Estes gráficos não foram divididos em regiões, pois a maior parte da energia foi absorvida pelo crash-box. É possível notar uma inclinação praticamente constante da curva de velocidade da barreira, o que indica certa constância da reação do objeto de prova. O detalhamento dos eventos do ensaio será realizado apenas na Figura 4.15 para maior simplicidade de apresentação dos dados. Quando necessário, as posições da peça que descrevem o comportamento do gráfico serão indicadas conforme o exposto na Figura 3.10.

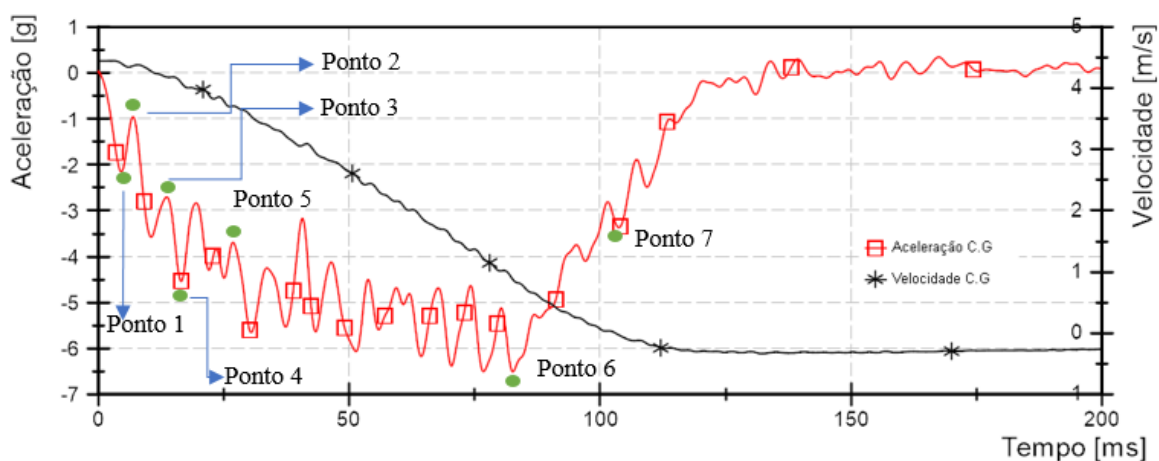


Figura 4.15 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

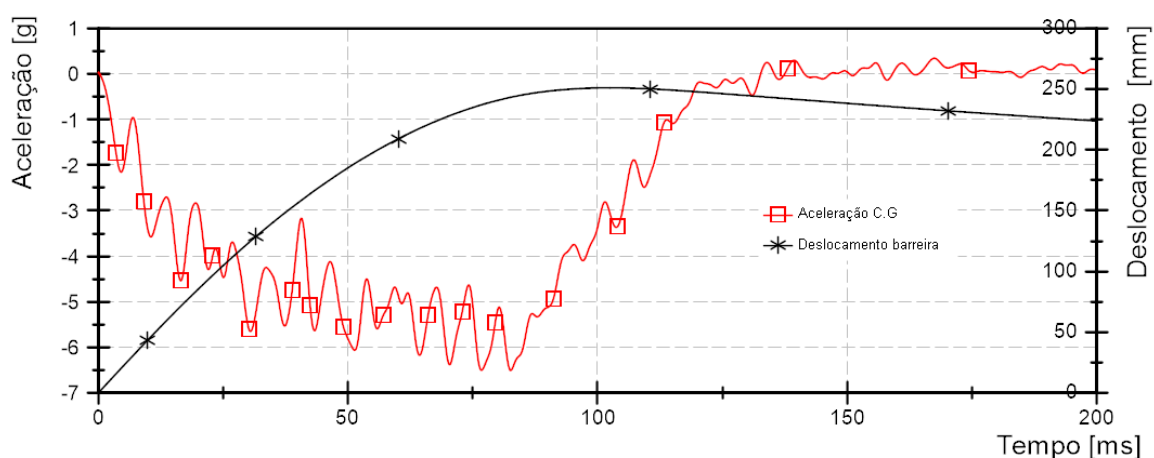


Figura 4.16 - Aceleração e deslocamento em função do tempo (X) - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

Quando a barreira toca a peça N°2, há um primeiro pico de desaceleração, indicado pelo ponto 1 na Figura 4.15. Este pico representa o início de deformação do crash-box na sua porção frontal aos 4 ms, no local onde foram inseridos os alívios adicionais descritos na Figura 3.9. Esta deformação pode ser vista na sequência de imagens da Figura 4.17, assim como a ausência da dobra plástica na base da peça N°2 aos 10 ms, indicado pelas setas na Figura 4.17.

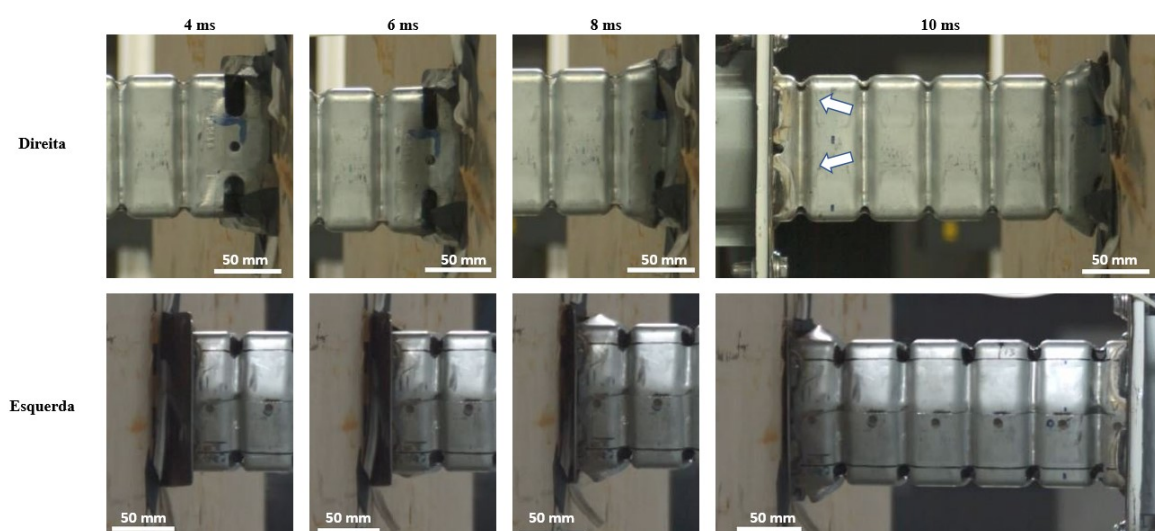


Figura 4.17 - Início de compactação do objeto de prova - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

A função dos dois entalhes na porção frontal da peça é fragilizar a face com maior comprimento. Segundo SONG et al. (2013), entalhes na face da coluna tem o efeito de diminuir a força necessária para compactação da peça. Devido à esta fragilização, a força excêntrica que a barreira impõe sobre a peça não é suficiente para causar o colapso global da mesma, deformando apenas a sua parte frontal. Como a barreira toca primeiro o lado direito da peça, este lado compactará inicialmente sem haver deformação expressiva do lado esquerdo, diminuindo o ângulo da travessa.

Conforme indicado na Figura 2.28 e descrito por HIBBELER (2004) e também por ARGENTA (2012), colunas sob carregamentos axiais possuem cargas críticas maiores que as mesmas colunas em carregamento excêntrico. Após os 7 ms, ponto 2 da Figura 4.15, a barreira passa a comprimir ambos os lados igualmente, obtendo um carregamento axial, descrito na Figura 2.30, em vez de um carregamento excêntrico como ocorrido na Peça N°1, aumentando a força de reação desenvolvida pela peça e a desaceleração imposto sobre a barreira. Este evento

corresponde a um novo aumento dos níveis de desaceleração sofrido pela barreira, indicando maior força de reação da estrutura. Ao analisar o gráfico detalhado da aceleração e deslocamento da barreira, Figura 4.18, é possível perceber que o ponto 2 corresponde a um deslocamento de aproximadamente 30 mm, que é o mesmo desnível entre as faces da peça que causam o ângulo da travessa (Figura 3.8). As linhas tracejadas indicam o ponto de 30 mm na curva de deslocamento da barreira.

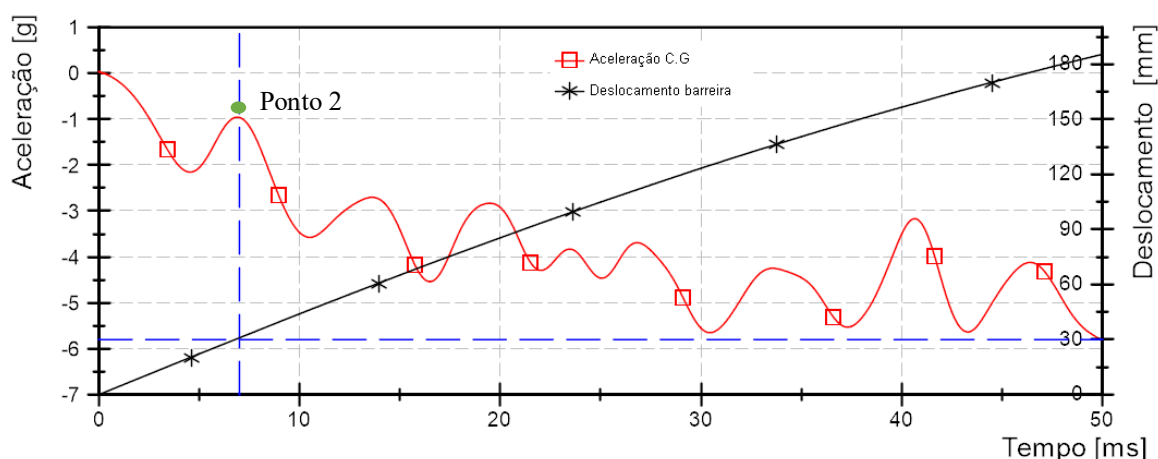


Figura 4.18 - Detalhe da aceleração e deslocamento em função do tempo - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

Aos 10,5 ms, ponto 3 da Figura 4.15, inicia-se o colapso na região do furo F1 e F2, do corrugado “a” e de parte do segmento 2. Devido à maior concentração de tensão e redução de material, o segmento 2 colapsa apenas no lado esquerdo da peça, mesmo lado onde estão localizados os furos adicionais, indicado na Figura 4.19. Este comportamento indica que o lado esquerdo da peça reduzirá seu comprimento mais rapidamente ao longo do tempo. Como o deslocamento imposto pela barreira é único para ambas as faces (direita e esquerda), para compensar o menor encurtamento, a face direita do crash-box eventualmente tenderá a deslocar-se para as laterais.

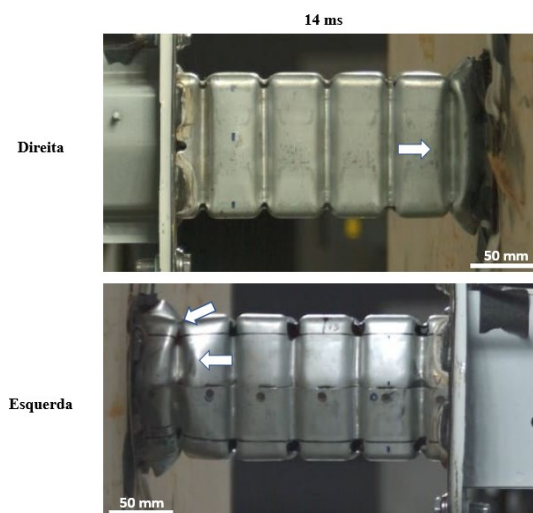


Figura 4.19 - Deformação dos furos F1 e F2, corrugado "a" e segmento 2 - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

No ponto 4 da Figura 4.15, aos 16 ms, é iniciada a compactação do segmento 5 no lado direito da peça. A Figura 4.20 mostra o estágio desta compactação, aos 20 ms. Neste momento, no lado esquerdo, os furos F1, F2 e F3 já estão compactados, fazendo com que haja o toque entre os segmentos 1, 2 e 3. Porém, do lado direito da peça, a única compactação visível está no segmento 1 e 5, sem alteração aparente no comprimento dos corrugados. A deformação do segmento 5 pelo lado direito aparenta ser a formação de um SE do tipo I, conforme descrito por WIERZBICKI e ABRAMOWICZ (1983) e indicado na Figura 2.39, porém essa formação não é finalizada. Na Figura 4.20 pode-se perceber que a dobra iniciada se estende até os limites do segmento 5.



Figura 4.20 – Compactação do crash-box aos 20 ms. a) lado direito e b) lado esquerdo

Fonte: Autor, 2020



Um novo aumento dos níveis de desaceleração da barreira ocorre a partir do ponto 5, aos 27 ms, Figura 4.21. Neste momento todos os furos quadrados (F1 a F10) presentes no lado esquerdo foram compactados, além de se observar o toque nas extremidades de todos os segmentos do lado direito. O toque dos segmentos no lado direito ocorre após a deformação dos gatilhos (*triggers*) presentes nos corrugados (Figura 3.8).

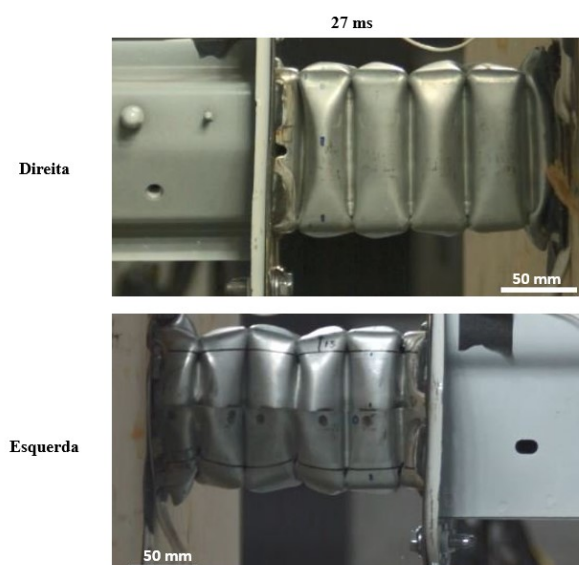


Figura 4.21 - Toque entre todos os segmentos da peça

Fonte: Autor, 2020

A partir dos 27 ms, Figura 4.22, a estrutura passa a ser “amarrotada” pela barreira. Há uma tendência dos segmentos 3 e 2 escorregarem por cima do segmento 4, forçando a deformação da estrutura para a direita. A maior compactação do crash-box acaba por gerar um leve aumento da desaceleração da barreira, porém, é possível notar que parte da estrutura do lado direito não foi compactada. Este comportamento era esperado devido ao encurtamento da face esquerda da estrutura, causado pelos furos quadrados F1 a F10.



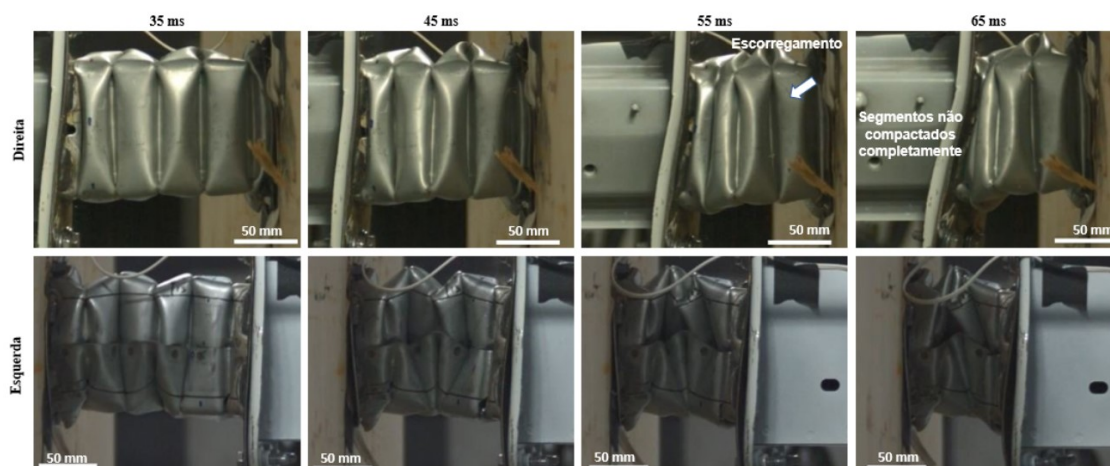


Figura 4.22 - Escorregamento do crash-box lado direito e esquerdo- Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

O escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o segmento 4 faz com que a parte frontal do crash-box não fique mais alinhada com o eixo da longarina (Figura 4.23). Desta forma, a força que a barreira aplica sobre a estrutura passa a ser excêntrica novamente. Este comportamento é visível a partir do ponto 6 na Figura 4.15 aos 82,6 ms. O resultado é uma dobra da parte anterior da longarina, semelhante ao ocorrido na peça N°1. Neste momento a velocidade da barreira é de 0,87 m/s e apenas 3,8% da energia cinética inicial ainda resta ser dissipada. Não é observado deformação do crash-box a partir deste ponto.

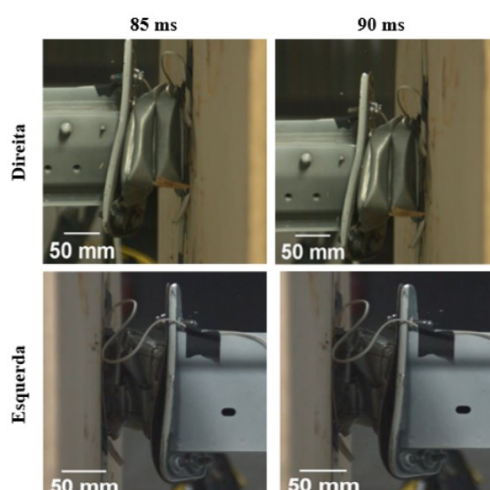


Figura 4.23 - Carregamento excêntrico e deformação da longarina - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

O ponto 7 da Figura 4.15 representa o final do carregamento, quando a velocidade da barreira é igual a zero, com deslocamento total de 251 mm. O método escolhido para

determinação do deslocamento da barreira foi através da integração dupla do acelerômetro. Devido ao enquadramento de imagem utilizado, o marcador da barreira somente fica visível aos 19 ms e, além disso, devido ao escorregamento dos segmentos da peça, a barreira tende a girar, gerando uma diferença entre os métodos maior que 5% aos 80 ms (Figura 4.24). Este giro compromete a medição realizada pela câmera, pois esta medição é feita na extremidade da barreira, enquanto o ponto de impacto da peça é no centro da mesma, gerando deslocamentos diferentes em pontos distintos da barreira móvel. A Figura 4.24 mostra o comparativo dos dados obtidos pelas duas metodologias. Como a medição da câmera tem início apenas aos 19 ms, para efeito de comparação, a curva obtida pelo acelerômetro foi compensada, tendo deslocamento igual a zero neste mesmo tempo.

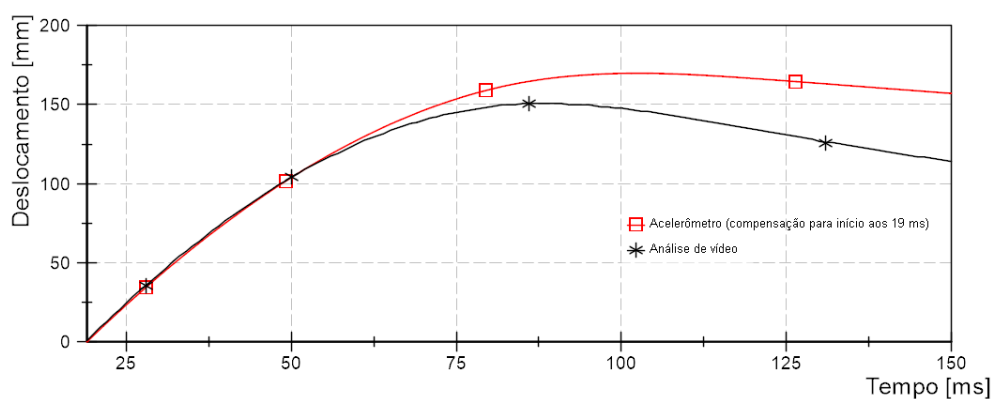


Figura 4.24 – Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos – Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

A perda da energia específica da barreira para a peça N°2 em função do tempo está plotada na Figura 4.25. Em quase toda a sua totalidade, a inclinação da curva de energia é praticamente constante, indicando a constância da força de compactação do objeto de prova. A Tabela 4.11 traz um resumo das características da peça N°2, onde a região “crash-box” traz os dados contemplando somente a compactação da mesma, e a região “total” engloba todo o evento, incluindo deformação da longarina.

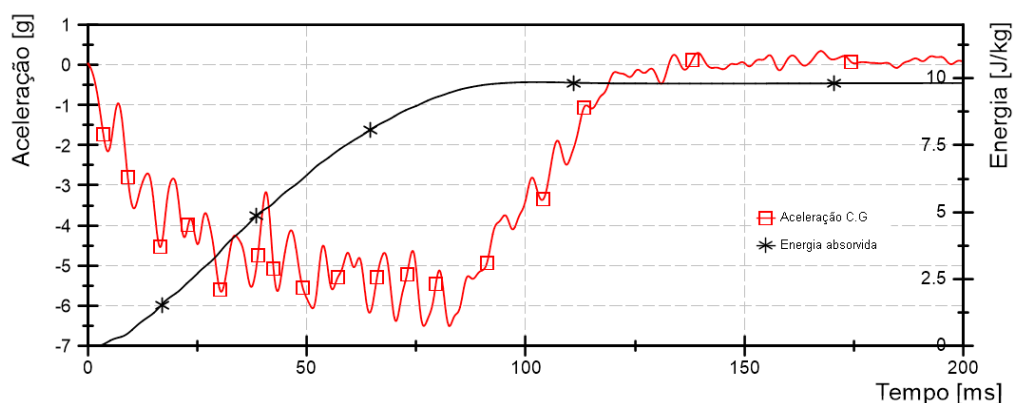


Figura 4.25 - Aceleração e energia específica da barreira em função do tempo - Peça N°2

Fonte: Autor, 2020

Tabela 4.11 -Características de compactação - Peça N°2

Região	$\Delta t$ [ms]	$P_m^D$ [kN]	$\delta$ [mm]	$\Delta S_{eb}$ [J/kg]	$E_{absv}$ [kJ]	$E_{absv}$ [%]	$S_e$ [kJ/kg]	$S_{te}$ [%]
Crash-box	82,6	43,21	243	9,46	10,5	95,8	9,34	31,27
Total	103,05	43,67	251	9,9	10,9	99,8	-----	----

Fonte: Autor, 2020

#### 4.4.6. Teste N°3

As curvas de aceleração e velocidade em função do tempo para a barreira com a peça N°3 estão representadas na Figura 4.26, enquanto a curva de aceleração e deslocamento em função do tempo estão na Figura 4.27. Assim como foi realizado para a peça N°2, quando necessário, as posições da peça serão referenciadas conforme Figura 3.12.

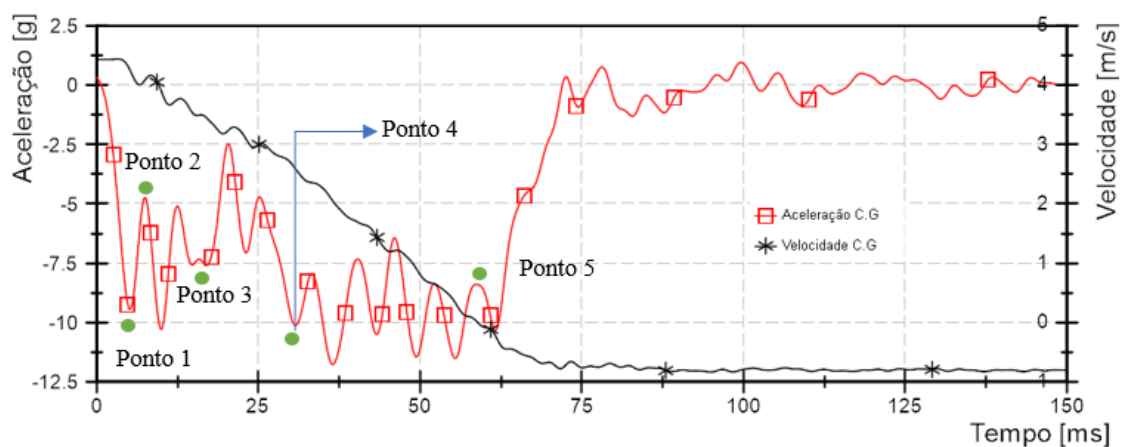


Figura 4.26 - Aceleração e velocidade em função do tempo (X) - Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

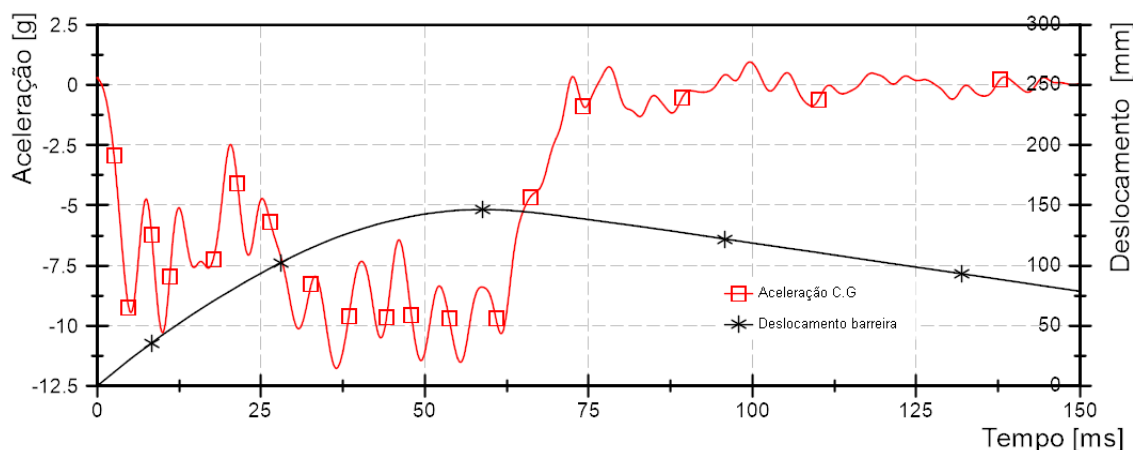


Figura 4.27 - Aceleração e deslocamento em função do tempo (X) - Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

A primeira deformação na peça acontece no Ponto 1 aos 5 ms, com a desaceleração da barreira em 9,4 g. O primeiro ponto a se deformar está situado no furo de deformação superior, no corrugado “c”, não havendo neste momento deformação no furo inferior. Este evento ocorre simultaneamente ao início da deformação nos segmentos 3, visto do lado esquerdo (Figura 4.28).

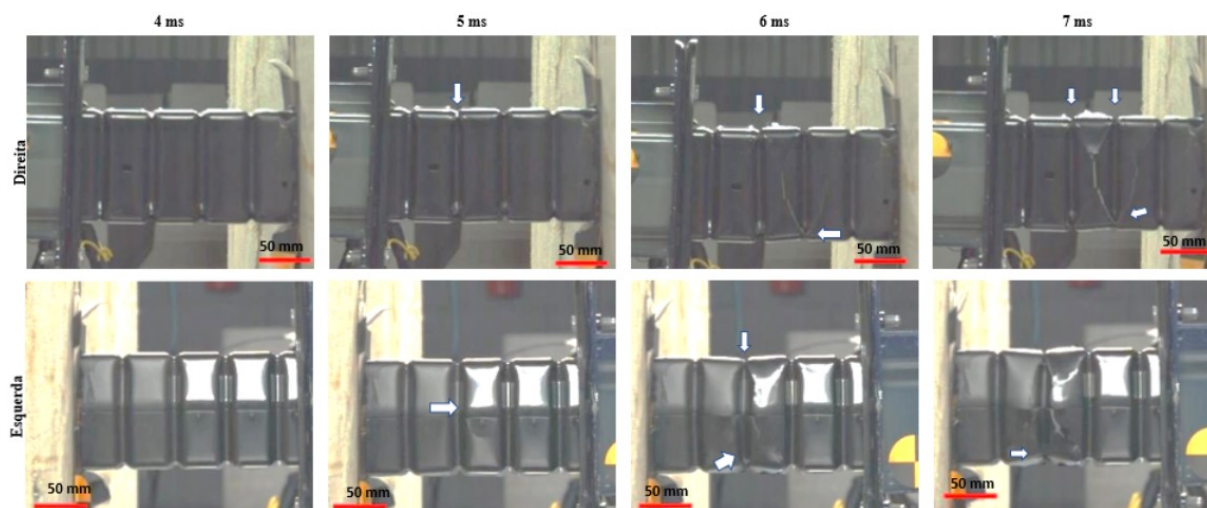


Figura 4.28- Início de compactação do objeto de prova - Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

Aos 7 ms, ponto 2 na Figura 4.26, os segmentos 2 e 3 estão em contato através das suas arestas, fenômeno visível em ambos os lados. Este fenômeno gera um novo aumento da força de reação. O segmento 2 da peça, visto pelo lado esquerdo, avança sobre o corrugado “b” e inicia uma deformação do segmento 3 (Figura 4.28). Este avanço, no entanto, não é simétrico,

pois do lado direito da peça é perceptível que ambos os segmentos 2 e 3 tem a tendência de deslocamento lateral (Figura 4.29).

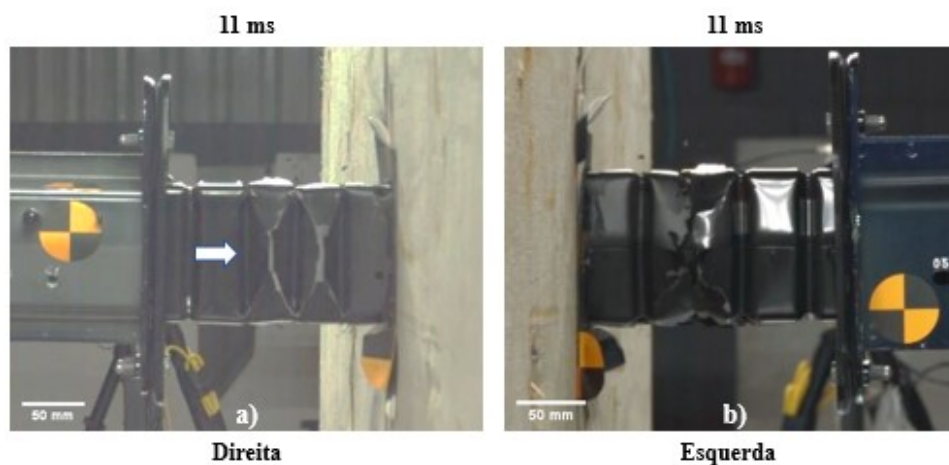


Figura 4.29 – a) Deslocamento lateral; b) avanço do segmento 2 sobre o segmento 3 – Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

No ponto 3 da Figura 4.26, aos 14 ms, ocorre o escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o corrugado “c”, visto pelo lado direito. Este fenômeno não é visto pelo lado esquerdo da peça, reforçando a ideia do escorregamento lateral em direção ao lado direito (Figura 4.30).

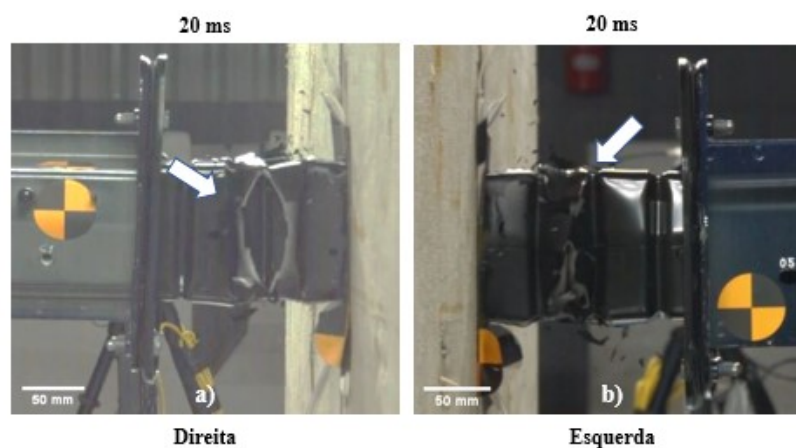


Figura 4.30 - Escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o corrugado "c"

Fonte: Autor, 2020

Aos 30,7 ms o escorregamento dos segmentos 2 e 3 é finalizado. A partir deste ponto os valores de aceleração oscilam entre patamares semelhantes devido ao princípio de deformação do segmento 4, do corrugado “d” e do segmento 5 respectivamente, culminando no ponto 5 em que a velocidade da barreira atinge zero, aos 58,9 ms, finalizando o impacto. A Figura 4.31



indica os pontos descritos anteriormente. É possível notar que a o segmento 5 e o corrugado “d” não são compactados do lado direito da peça. Não há evidências de rotação ou deformação plástica da longarina. A compactação final da estrutura é indicada na Figura 4.32.

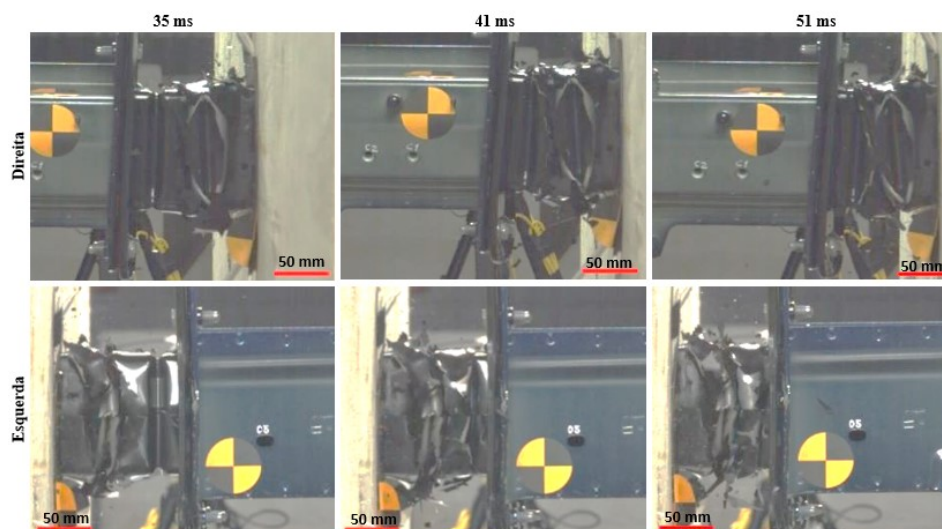


Figura 4.31 - Escorregamento dos segmentos 2 e 3 sobre o corrugado "c"

Fonte: Autor, 2020

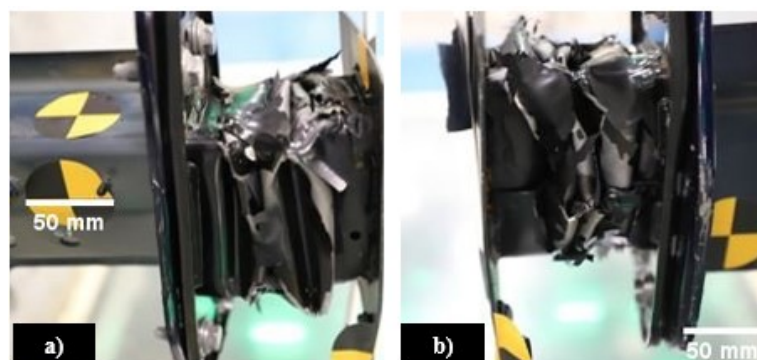


Figura 4.32 – Pós teste: a) vista do lado esquerdo e b) vista do lado direito - Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

Não foi identificada rotação da barreira durante todo o impacto, fato este reforçado pela sobreposição das curvas de deslocamento obtidas pelo acelerômetro e pela análise de vídeo (Figura 4.33). A maior diferença deu-se para o deslocamento máximo, sendo de 143 mm para análise de vídeo e 146 mm para o acelerômetro. A energia específica perdida pela barreira em função do tempo é plotada na Figura 4.34, sendo que não há variação abrupta da sua inclinação durante o ensaio. As características do objeto de prova N°3 estão indicadas na Tabela 4.12.

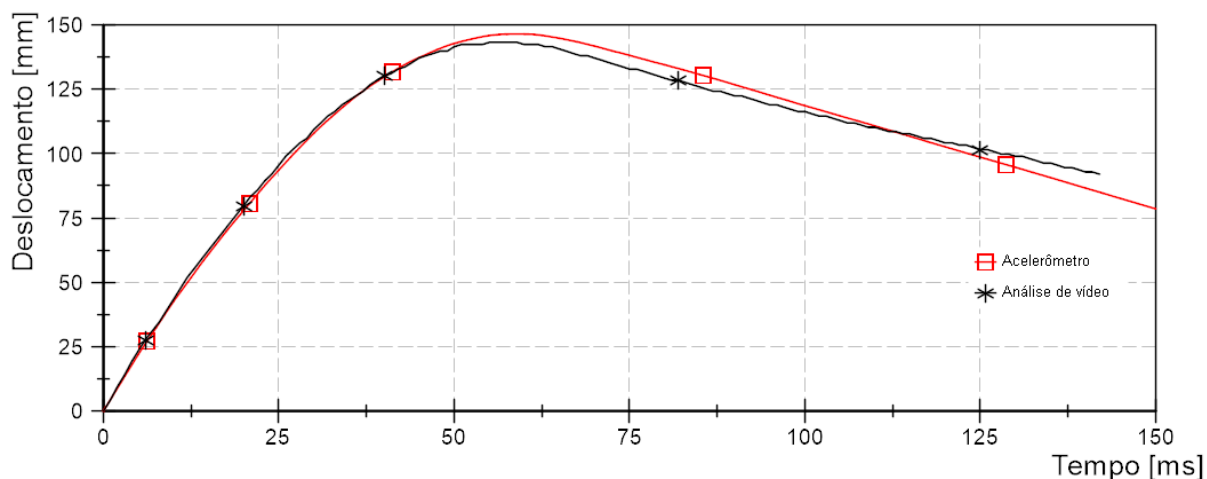


Figura 4.33 – Deslocamento da barreira obtido por dois métodos distintos– Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

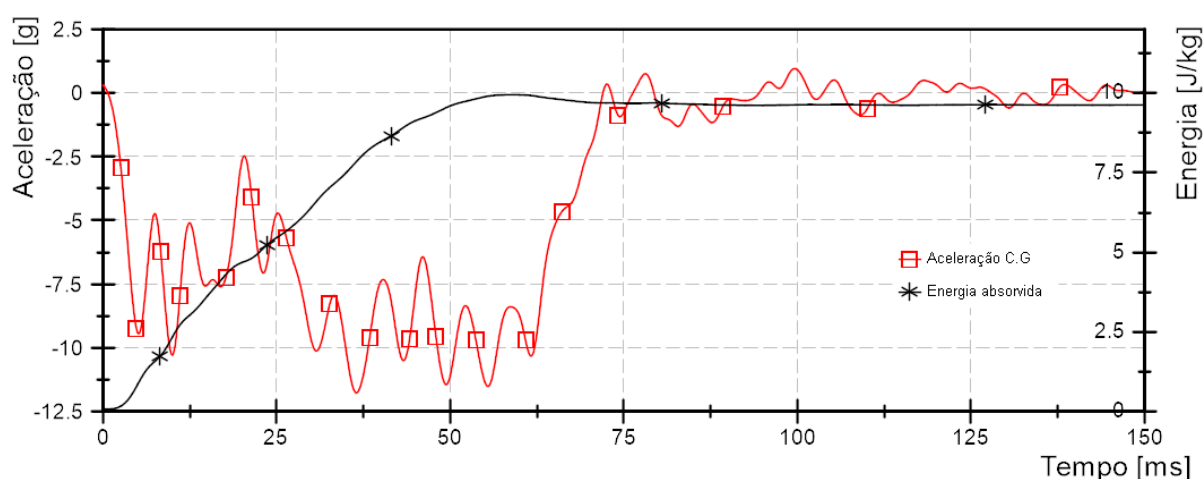


Figura 4.34 - Aceleração e energia específica da barreira em função do tempo - Peça N°3

Fonte: Autor, 2020

Tabela 4.12 - Características de compactação - Peça N°3

Região	$\Delta t$ [ms]	$P_m^D$ [kN]	$\delta$ [mm]	$\Delta S_{eb}$ [J/kg]	$E_{absv}$ [kJ]	$E_{absv}$ [%]	$S_e$ kJ/kg	$S_{te}$ [%]
Crash-box	58,9	75,63	146	9,9	11,0	100,0	9,83	38,91

Fonte: Autor, 2020

#### 4.4.7. Comparação dos objetos testados

As curvas e características dos três objetos de prova testados foram comparadas para melhor indicar a influência das modificações das peças no resultado final. A Tabela 4.13 mostra

as principais características de compactação dos três objetos de prova. Para a peça N°1 e N°2 existem dois valores de variação do tempo e deslocamento, indicando primeiramente os valores referente à deformação apenas do crash-box, ponto 1 para o crash-box N°1 (Figura 4.7 e Tabela 4.10) e região “crash-box” para a peça N°2 (Tabela 4.11), e depois o total até que a barreira móvel atinja velocidade zero. Como o foco principal é com relação às características dos crash-box, e não da estrutura completa (crash-box + longarina), todas as outras informações relacionadas às peças N°1 e N°2 referem-se somente às características do crash-box, não levando em consideração nos cálculos a interação da longarina com a barreira. Observa-se que a peça N°3 teve um tempo total de ensaio entre 42% a 45% menor que o tempo total das outras peças.

Tabela 4.13 – Características de compactação dos 3 objetos de prova

Peça	$\Delta t$ [ms]	$P_m^D$ [kN]	$\delta$ [mm]	$\Delta S_{eb}$ [J/kg]	$E_{absv}$ [kJ]	$E_{absv}$ [%]	$S_e$ kJ/kg	$S_{te}$ [%]
N°1	9,4 / 106,8	17,19	41,6 / 345	0,7	0,7	6,4	0,55	97,09
N°2	82,6/ 103,1	43,21	243 / 251	9,46	10,5	95,8	9,34	31,27
N°3	58,9	75,6	146	9,9	11,0	100,0	9,83	38,91

Fonte: Autor, 2020

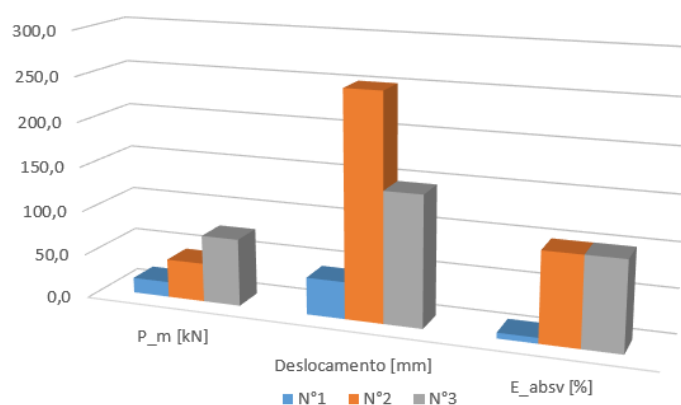


Figura 4.35 - Comparação das características principais das peças testadas

Fonte: Autor, 2020

A Figura 4.36 indica um resumo da deformação das três peças. Os entalhes realizados próximo à travessa da peça N°2 (Figura 3.9) foram fundamentais para evitar a flambagem global nesta coluna através da redução da carga inicial de colapso, tendência indicada por SONG et al. (2013). Devido à presença destes entalhes a força excêntrica inicialmente aplicada somente deformou a parte frontal do crash-box no segmento 1, impedindo o colapso total da



estrutura. Após essa deformação a carga tendeu a ser aplicada de modo axial. Pode-se perceber que aos 8 ms, a peça N°1 já possuía a dobra plástica que causou o colapso, enquanto a peça N°2 não apresentava nenhum sinal de dobra na sua base aos 10 ms. Porém, os furos adicionais na estrutura diminuíram a sua capacidade de absorção e aumentaram o efeito de deslocamento transversal do crash-box, o que pode ser observado na terceira imagem da peça N°2 da Figura 4.36, que indica segmentos sem deformação. A peça N°3 apresentou deformação axial, sendo que o início deu-se na região central da peça. Não houve a tendência de escorregamento acentuado, como observado na peça N°2.

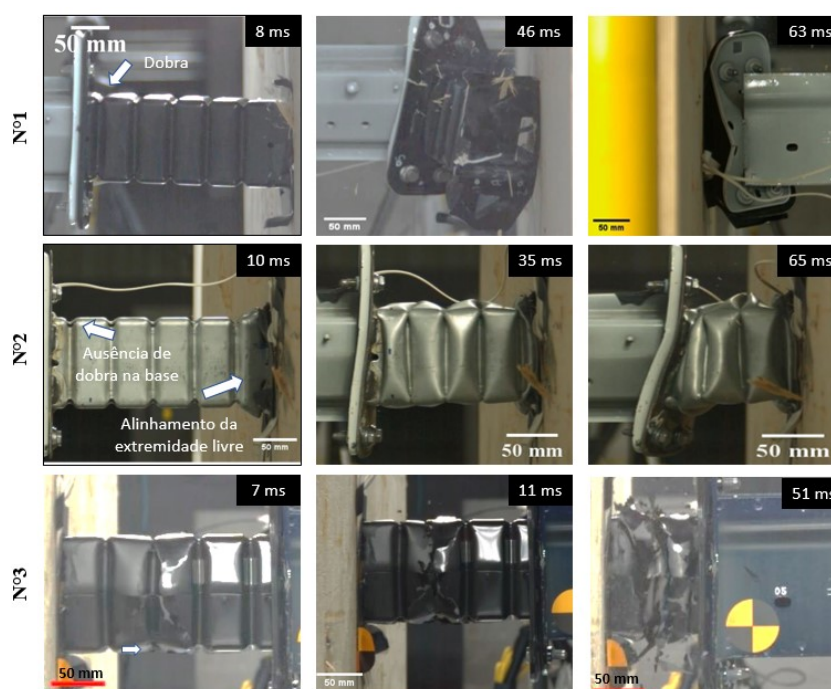


Figura 4.36 – Sumarização da deformação das três peças

Fonte: Autor, 2020

Com relação à energia absorvida, a peça N°1 obteve absorção praticamente nula. As estruturas de paredes finas absorvem energia através da deformação (DU BOIS et al., 2004). Como é possível notar na primeira linha de imagens da Figura 4.37, o crash-box N°1 apresenta pouca deformação, com destaque para o ponto inicial da flambagem, detalhado na Figura 4.11 c).

Tanto a peça N°2 quanto a N°3 obtiveram percentual de absorção próximo de 100%. A peça N°2, no entanto, causou a flexão da parte frontal da longarina nos momentos finais do ensaio devido ao deslocamento lateral e ao reaparecimento de carregamento excêntrico durante a compactação. O deslocamento lateral da estrutura fez com que os segmentos 2 e 3 fossem

parcialmente compactados, característica visível na segunda linha de imagens da Figura 4.37. É importante notar que o escorregamento da peça N°2 fez com que obtivesse melhores valores de eficiência de compactação ( $S_{te}$ ) se comparados com a peça N°3, conforme indicado na Tabela 4.13. Porém, este resultado não indica uma melhor característica, mas sim que parte do material se deslocou lateralmente, encurtando o comprimento final da coluna. A peça N°3, apesar de também ter sofrido escorregamento lateral, apresenta outros segmentos com deformação iniciada, indicadas pelas setas no crash-box N°3 da Figura 4.37. Diferente da peça N°2, caso uma maior força fosse aplicada, os segmentos da peça N°3 tenderiam a se deformar de forma axial em vez de fletirem. Este fato é confirmado pelo início da formação de dois SE do tipo I, indicados pela deformação da aresta em direção ao centro da estrutura na terceira imagem da peça N°3. Isto indica que esta peça possui capacidade de absorver mais energia do que a energia mecânica do teste. Não foram identificados danos na longarina da peça N°3.



Figura 4.37 – Peças compactadas

Fonte: Autor, 2020

As curvas de aceleração em função do tempo são retratadas na Figura 4.38. Pela análise deste gráfico, fica evidente a variação do pulso de impacto devido às modificações das peças. Essa diferença vai ao encontro da discussão feita sobre a alteração do pulso devido à rigidez da estrutura por HUANG (2002). Esta variação do pulso pode levar à necessidade de calibrações de *airbag* diversas, caso esses componentes venham a ser instalados em um veículo (RODRIGUEZ e FELICIANO, 2007).

Menores níveis de desaceleração da barreira, Figura 4.38, indicam menores forças de reação exercidas pelas peças. Dentre as curvas, é possível perceber que o objeto de prova N°3 possui níveis mais altos de desaceleração do que as outras duas peças. A peça N°1 possui níveis de desaceleração menores devido à flambagem global ocorrida, com baixas características de absorção de energia (HIBBELER, 2004). Para a absorção completa da energia da barreira, diminuir a força de reação da peça implica na necessidade de estruturas com maiores comprimentos, EQUAÇÃO (2.20). A peça N°2, apesar de ser maior que a peça N°3, não desenvolveu força de reação suficiente para absorver toda a energia da barreira durante seu percurso de compactação. A peça N°3 consegue desenvolver uma força de reação suficiente para absorver toda a energia, apesar do seu menor comprimento. Porém, o aumento indiscriminado da força de reação não traz somente resultados benéficos. A força máxima necessária para iniciar a deformação da peça N°3 é menor do que a força para deformar a longarina. Em uma situação oposta, veríamos uma compactação da longarina antes da compactação do crash-box, prejudicando a função do crash-box de proteger os subsequentes componentes do veículo.

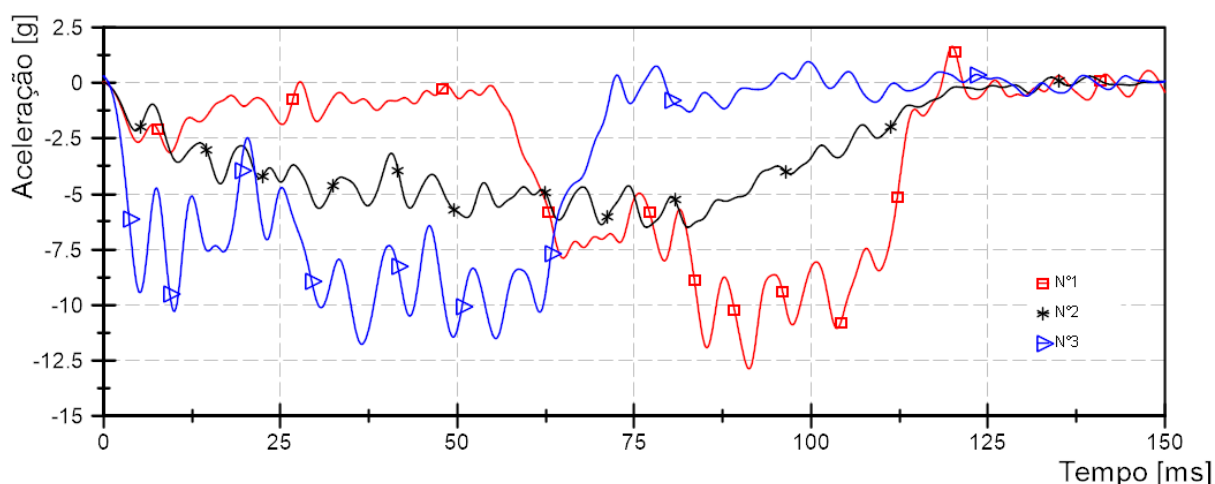


Figura 4.38 - Curvas de aceleração em função do tempo para os três objetos de prova

Fonte: Autor, 2020

A velocidade em função do tempo é apresentada na Figura 4.39. A peça N°1 apresenta duas inclinações diferentes para a curva de velocidade, sendo a primeira delas relativa à rotação da coluna. O ensaio N°2 concentra a maior parte da sua deformação no crash-box, porém fica evidente pela Figura 4.39 que a força de compactação da estrutura é menor que a da peça N°3. O ensaio N°3 apresenta a inclinação da curva de velocidade mais íngreme dentre os três ensaios, requisitando menor tempo para que a barreira móvel atinja velocidade igual a zero.

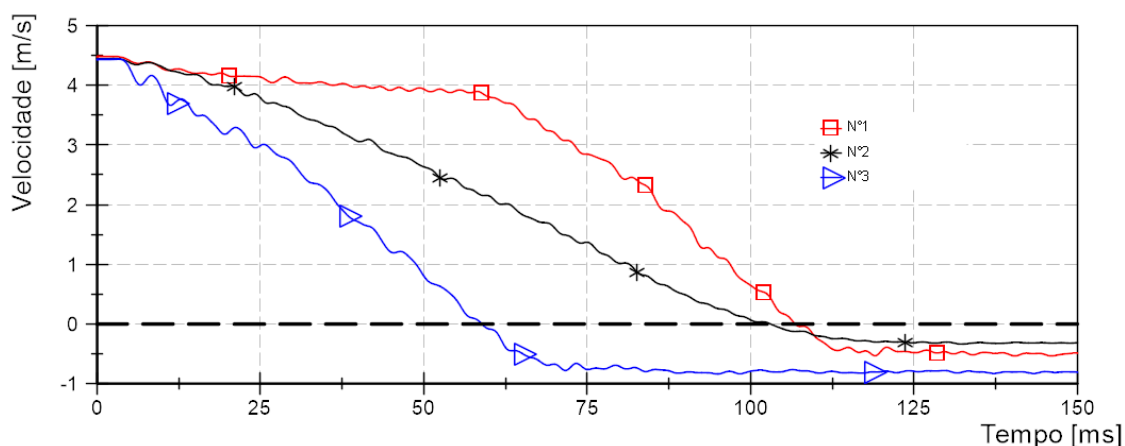


Figura 4.39 - Curvas de velocidade em função do tempo para os três objetos de prova

Fonte: Autor, 2020

Conforme discutido anteriormente, em ensaios de baixa velocidade é importante que o crash-box absorva o máximo de energia possível sem danificar outros componentes do veículo. Um bom ponto de comparação para aferir a eficiência da estrutura como elemento protetor pode ser determinada pela intrusão da barreira durante o ensaio. A Figura 4.40 mostra o comparativo das curvas de deslocamento da barreira para os três objetos de prova. A coluna N°1, por sofrer flambagem elástica, não cumpre bem a sua função de proteção aos componentes subsequentes do veículo, deixando a barreira móvel com 93,6% da energia cinética inicial após o início da flambagem. O deslocamento total da barreira para este ensaio foi de 345 mm. A peça N°2, apesar de deformar parte da longarina, cumpre esta função melhor que a peça N°1, permitindo uma intrusão da barreira de 251 mm. A peça N°3 possui 80% do comprimento das outras duas e, apesar de ser menor, a intrusão total da barreira foi de apenas 146 mm, sem deformação aparente da longarina. Além disso, foi evidenciado que este crash-box ainda possui potencial de absorção de energia após o teste.

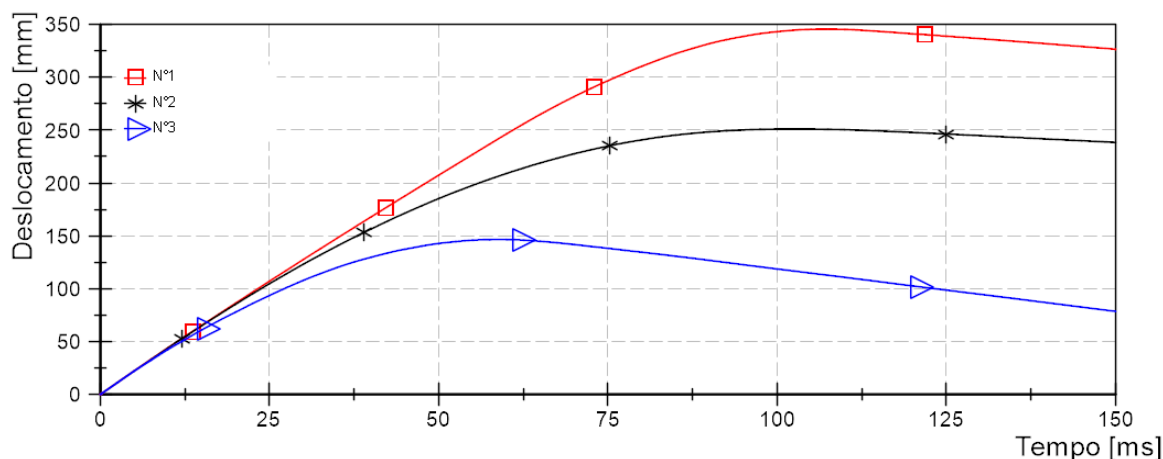


Figura 4.40 - Curvas de deslocamento em função do tempo para os três objetos de prova

Fonte: Autor, 2020

A capacidade de absorção de energia e compactação da peça Nº3, além do comportamento inicial da peça Nº2, sugerem que uma estrutura derivada da peça base (Figura 3.8) com apenas os alívios na porção anterior da peça Nº2 (Figura 3.9 a) resultaria em uma coluna satisfatória. Todas as estruturas testadas são caracterizadas como seções não compactas, e por isso não é esperado diferença significativa durante a compactação da coluna proposta e da Nº3.

Porém, conforme observado por Jones (2003), é necessário considerar diferentes situações no projeto de estruturas de paredes finas. Devido aos furos adicionais, a peça Nº2 pode ser uma melhor opção considerando os diferentes tipos de carregamento aos quais um veículo eventualmente é submetido. Estudos adicionais com diferentes tipologias de teste entre as peças Nº2 e Nº3 podem ser realizados para melhor compreensão desta possibilidade.

É importante ressaltar que o ensaio proposto neste trabalho avaliou o comportamento das estruturas de paredes finas sob as mesmas condições de prova. Este ensaio difere do apresentado por ZHOU et al. (2016) e ABEDRABBO et al. (2009) pois avalia também a interface entre crash-box e longarina. Além disso, não é possível determinar corretamente a energia específica de toda e qualquer estrutura, pois ela pode não deformar completamente, como ocorrido com a peça Nº3. Porém, velocidades maiores de teste podem ser utilizadas, assim como um aumento de massa da barreira através da adição de massas em forma de placas, resultando em energias cinéticas maiores do que a capacidade de absorção da peça.

## 5. CONCLUSÕES

O material analisado das peças N°1, N°2 e N°3 pode ser classificado como aço DP600 pela sua composição química, microestrutura e propriedades mecânicas. Ambos os lotes 1 e 2 analisados possuem percentuais semelhantes de carbono e suas microestruturas não apresentaram diferenças qualitativas significativas, indicando boa distribuição e granulometria da fase martensítica na matriz ferrítica. Quanto às propriedades mecânicas, os valores obtidos para os lotes 1 e 2, aço DP600, não possuíram diferença estatística significativa, exceto para o LRT. A diferença obtida para esta propriedade, porém, não foi considerada como significativa para o estudo realizado.

Para os ensaios dinâmicos, as taxas de deformação envolvidas estão no intervalo entre 20 a 27 s<sup>-1</sup>. Estas taxas não mostram uma variação teórica significativa de  $P_m^D$ , o que indica que uma determinação muito precisa da taxa de deformação traz pouco ganho à análise.

O carregamento excêntrico presente nas peças N°1 e N°2 torna necessário a presença de corrugados e iniciadores de deformação como uma forma de evitar o colapso global da coluna. Há uma diferença de 452% com relação à carga máxima teórica de compressão que estas colunas suportam, se livres da presença de corrugados, quando comparadas com a peça N°3. Além dos efeitos de excentricidade, há também uma redução na área total que suporta a tensão de compressão máxima.

A peça N°1 apresentou flambagem elástica com baixa absorção de energia devido ao ângulo na porção anterior do crash-box, resultando em cargas excêntricas. A maior parte da energia da barreira foi absorvida pela rotação da porção frontal da longarina e sua posterior compactação. É perceptível tanto na Figura 4.38 quanto na Figura 4.39 o repentino aumento da desaceleração sofrida e a mudança na inclinação da curva de velocidade, características da ação de um elemento com maior capacidade de força de reação. A influência da posição de aplicação da carga fica evidenciada na peça N°2 que possui alívios na face de maior comprimento a fim de evitar o carregamento excêntrico. Apenas a região na porção anterior do crash-box deforma-se nos momentos iniciais, igualando o comprimento de todas as faces e eliminando o carregamento excêntrico. Para a peça N°1, a flambagem é controlada pela geometria da coluna e não pelas características do material, de forma que uma mudança de material desta peça,

quando submetida ao ensaio proposto neste trabalho, traria resultados semelhantes aos aqui observados.

A peça N°3 apresenta as melhores características de absorção de energia dentre os objetos de prova testados, possuindo a maior energia específica e mostrando-se como a melhor opção para este ensaio em específico. A mesma foi capaz de absorver toda a energia cinética da barreira com uma estrutura de menor comprimento, sem comprometer a longarina, além de possuir regiões capazes de sofrer compressão após o teste, indicando capacidade ainda maior de absorção de energia. Esta maior capacidade absorvedora deve-se à ausência do carregamento excêntrico, com relação à peça N°1, e ausência dos furos adicionais nos corrugados, com relação à peça N°2, responsáveis pelo maior deslocamento lateral da estrutura. Estes furos (F1 a F10) mostraram-se prejudiciais à absorção de energia para este teste em específico. A  $P_m^D$  sofreu redução de 43% se comparada à desenvolvida pela peça N°3 (Tabela 4.13), fato que também teve influência da diferença de espessura entre as duas estruturas.

A diferença nas curvas de aceleração (Figura 4.38), velocidade (Figura 4.39) e deslocamento (Figura 4.40) indicam a importância de se manter sempre as peças originais do fabricante. A diferença de comportamento apresentada entre as curvas dos três crash-box indica uma possibilidade de distintas lógicas de calibração dos sistemas de retenção, caso fossem aplicadas em um veículo. A não observação deste fenômeno e a simples modificação do componente sem atualização da lógica de calibração poderia culminar em disparos dos sistemas de retenção em tempos não otimizados, reduzindo a eficiência da proteção do ocupante.

As características de absorção de energia de estruturas de paredes finas sob compressão progressiva dinâmica podem sofrer variações significativas com pequenos ajustes geométricos, como comprovado nos ensaios das peças N°1, N°2 e N°3. Este fato pode ser utilizado na indústria automotiva como uma maneira de se obter melhor desempenho estrutural dos seus veículos com menores custos associados a impactos em projetos e desenvolvimento de ferramental de produção. Este trabalho apresenta uma maneira de testar tais componentes e suas possíveis variações, tanto de geometria quanto de material, além da sua interação com outras partes do automóvel antes de se realizar um ensaio em veículo completo, reduzindo também o custo associado a mão de obra e objetos de prova.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

O método estabelecido neste trabalho consegue comparar diferentes geometrias e construção de crash-box quanto às suas características de absorção de energia. Como possíveis trabalhos futuros, sugere-se:

- Influência de diferentes geometrias de gatilhos de deformação;
- Alteração da capacidade de absorção de energia a partir da mudança do material do crash-box;
- Influência da disposição de pontos de solda nas características de absorção de energia do crash-box;
- Características da estrutura quando utilizada travessa crash-box completa, constituída de duas crash-box e travessa de conexão;
- Previsão do índice CAR GROUP a partir de ensaio simplificado, utilizando por exemplo, impacto com inclinação de  $10^\circ$  entre componente e barreira móvel;
- Previsão do comportamento da travessa crash-box completa quando impactada contra barreira deformável com 40% de sobreposição, conforme especificações da ECE R94.



## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABEDRABBO, N. et al. Crash response of advanced high-strength steel tubes: Experiment and model. **International Journal of Impact Engineering**, v. 36, p. 1044-1057, 2009.
- ABRAMOWICZ, ; JONES, N. Dynamic axial crushing of square tubes. **International Journal of Impact Engineering**, 8 Junho 1984. 179-208.
- ABRAMOWICZ, W. Thin-walled structures as impact energy absorbers. **ELSEVIER**, 2003. 91–107.
- ABRAMOWICZ, W.; JONES, N. TRANSITION FROM INITIAL GLOBAL BENDING TO PROGRESSIVE BUCKLING OF TUBES LOADED STATICALLY AND DYNAMICALLY. **International Journal of Impact Engineering**, v. 19, p. 415-437, 1997.
- AL-ABBASI, F. M.; NEMES, J. A. Micromechanical modeling of dual phase steels. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 45, p. 1449-1465, 2003.
- ALVES, M. C. **Teste t de Student**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 15. 2017.
- AMARAL, H. C. **Avaliação das características e do desempenho de uma estrutura de paredes finas em ensaios quase estáticos a diferentes taxas de deformação**. Dissertação de mestrado - CEFET-MG. Belo Horizonte. 2017.
- AMBROSIO, J. A. C. **Chashworthiness: Energy management and occupant protection**. Nova York: Springer-Verlag Wien, 2001.
- ARGENTA, M. A. ESTRUTURAS.UFPR. **http: //www.estruturas.ufpr.br/**, 2012. Disponível em: <<http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/resistencia/Apostila/Capitulo8.pdf>>. Acesso em: Outubro 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5902: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado**. ABNT. Rio de Janeiro. 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15240 - Veículos rodoviários automotores - Comportamento da estrutura do habitáculo - Requisitos para os ensaios de impacto traseiro**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15300-1: Veículos rodoviários automotores — Proteção ao ocupante — Ensaio de impacto frontal - Parte 1: Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15300-2: Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - Ensaio de impacto frontal Parte 2:**

**Procedimentos de ensaio de impacto frontal com 100% de sobreposição.** Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15300-3: Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - Ensaios de impacto frontal - Parte 3: procedimento de ensaio de impacto frontal com 40% de sobreposição.** Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16204-1: Veículos rodoviários automotores — Proteção ao ocupante — Ensaios de impacto lateral - Parte 1: generalidades.** Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16204-2: Ensaios de impacto lateral - Parte 2: procedimento e requisitos de desempenho em ensaio de impacto lateral com velocidade da barreira de impacto com um ângulo de 63° em relação ao eixo longitudinal.** Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16204-3: — Ensaios de impacto lateral - Parte 3: procedimento e requisitos de desempenho em ensaio de impacto lateral com a barreira de impacto perpendicular ao eixo longitudinal do veículo.** Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5915-2: Chapas e bobinas de aço laminadas a frio. Parte 2: Aços para estampagem.** ABNT NBR. Rio de Janeiro, p. 3-4. 2013.

ASTM. **EM/E8M: standard test methods for tension testing of metallic materials.** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. [S.l.]. 2015.

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

ASTM E517. Standard Test Method for Plastic Strain Ratio  $r$  for Sheet Metal. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, 2000.

ASTM E646. Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents ( $n$  -Values) of Metallic Sheet Materials. **American Society for Testing and Materials**, 2016.

ASTM INTERNATIONAL. Tensile Testing. Segunda edição. ed. Ohio: [s.n.], 2004. Cap. Capítulo 1. Disponível em: <<https://www.asminternational.org/>>.

BALUCH, N.; UDIN, Z. M.; ABDULLAH, C. S. Advanced High Strength Steel in Auto Industry: an Overview. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 4, n. 4, p. 686-689, 2014.

- BAROUTAJI, A.; SAJJAB, M.; OLABIC, A.-G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. **Elsevier: Thin-Walled Structures**, v. 118, p. 137-163, 2017. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/tws](http://www.elsevier.com/locate/tws)>.
- BERTOCCHI, M. **Segurança Veicular**. [S.l.]: Skill, 2005.
- BOREANAZ, M. **Development of crash-box for automotive application**. Politecnico de Torino. Torino. 2018.
- BRASIL. LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO DE 1997. **Institui o Código de Trânsito Brasileiro.**, Brasília, 23 Setembro 1997.
- CALLISTER, J. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- CAMPBELL, J. D.; COOPER, R. H. **Yield and flow of low-carbon steel at medium strain rates**. Proceedings of the Conference on the Physical Basis of Yield and Fracture. Londres: Institute of Physics and Physical. 1966. p. 77-87.
- CARHS. **Safety Companion: Knowledge for Tomorrow's Automotive Engineering**. [S.l.]. 2019.
- CERCEAU, C. R. **Estampabilidade de chapas finas laminadas a quente**. UFOP - CETEC - UEMG. Ouro Preto, p. 31-32. 2004.
- CESVI BRASIL. [cesvibrasil](http://www.cesvibrasil.com.br/). **Centro de Experimentação e Segurança Viária**, 28 setembro 2019. Disponível em: <<http://www.cesvibrasil.com.br/>>.
- COWPER, G. R.; SYMONDS, P. S. **Strain Hardening And Strain-Rate Effects In The Impact Loading Of Cantilever Beams**. Brown University. Providence, Rhode Island. 1957.
- DENG, ; KORKOLIS, Y. P. Elastic anisotropy of dual-phase steels with varying martensite content. **International Journal of Solids and Structures**, p. 264-278, 2018.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, 1961.
- DU BOIS, P. et al. **Vehicle crashworthiness and occupant protection**. Southfield, Michigan: American Iron & Steel Institute, 2004.
- FCA LATAM. **Youtube**, 17 julho 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RKy4eMj4DZs&t=62s>>.
- FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, 2015. 485.
- FERREIRA, R. F. **ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO LI (LIVRE DE INTERSTICIAL) PELO AÇO BH220 (ENDURECÍVEL POR CURA) NA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO**. Belo Horizonte. 2014.

- FIELD, J. E. et al. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. **International Journal of Impact Engineering** **30**, 16 Março 2004. 725-775.
- FILHO, U. D. **Introdução à Bioestatística para simples mortais**. 17. ed. [S.l.]: Elsevier, 1999.
- FONSECA, F. A. V. et al. **AÇO BIFÁSICO PROCESSADO VIA LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA – REVISÃO E ESTÁGIO ATUAL DE PRODUÇÃO NA USIMINAS/UNIGAL**. 2º Seminário de Laminação da ABM - Processos e Produtos. Santos, SP: [s.n.]. 2005.
- GALÁN, J. et al. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia**, v. 48, n. 2, p. 118-131, Março-Abril 2012.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos Materiais**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2012.
- GERARD, G.; BECKER, H. **Handbook of Structural Stability Part I - Buckling of Flate Plates**. National Advisory Committee for Aeronautic. Washington. 1957.
- GHASEMNEJAD, H. et al. Energy Absorption of Thin-walled Corrugated Crash Box in Axial Crushing. **SDHM**, v. 4, p. 29-45, 2008.
- GLOBO. Globo.com, 01 Janeiro 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/carros/noticia/2014/01/comeca-valer-obrigatoriedade-de-airbag-e-abs-para-carros-novos.html>>.
- GOMES, M. D. O.; RODRIGUES, P. C. D. M. **AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE ESTRUTURAS DE PAREDES FINAS SOB COMPRESSÃO PROGRESSIVA DINÂMICA**. Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Brasília: [s.n.]. 2020.
- GRANBOM, Y. **Structure and mechanical properties of dual phase steels - An experimental and theoretical analysis**. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2010.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP. **Recommendations for Dynamic Tensile Testing of Sheets Steels - Development and Round Robin Tests**. International Iron and Steel Institute. [S.l.], p. 30. 2005.
- HUANG, M. **Vehicle Crash Mechanics**. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2002.
- HUH, H. et al. Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body. **International Journal of Mechanical Sciences**, 12 setembro 2007. 918-931.
- HUH, H.; LIM, J. H.; PARK, S. H. High speed tensile test of steel sheets for the stress-strain curve at the intermediate strain rate. **International Journal of Automotive Technology**, v. 10, n. 2, p. 195-204, 2009. ISSN 1229-9138/2009/045-08.

ISO. **ISO 6487: Road vehicles - Measurement techniques in impact tests - Instrumentation**. ISO. [S.l.]. 2000.

ISO. **10275 - Metallic materials — Sheet and strip — Determination of tensile strain hardening exponent**. International Organization for Standardization. [S.l.]. 2007.

ISO. **6892-1 - Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature**. International Organization for Standardization. [S.l.]. 2019.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures. **Proceedings - Seventh International Symposium on Ballistics**, Haia, p. 541-547, Abril 1983.

JONES, N. **Structural Impact**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

KEELER, S.; KIMCHI, M.; MOONEY, P. J. AHSS Application Guidelines 6.0. **World Auto Steel**, 17 Maio 2017. Disponível em: <<https://www.worldautosteel.org/downloads/599700/>>.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Materials Park, Ohio: ASM International, 2005.

LATIN NCAP. Latin NCAP. **Latin NCAP**, 2020. Disponível em: <<https://www.latinncap.com/po/>>.

MAHMOOD, H. ; PALUSZNY, A. **Stability of Plate Type Box Columns Under Crush Loading**. Winter Annual Meeting of ASME. Phoenix: [s.n.]. 1982. p. pp. 17-33.

MAHMOOD, H. F.; PALUSZNY, A. Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management—Their Strength and Mode of Collapse. **SAE Transactions**, v. 90, p. 4039-4050, 1981.

MENEZES, M. S.; ZOTTIS, J.; ROCHA, A. D. S. **CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E ANISOTROPIA DE UMA CHAPA DE AÇO DP600**. 70º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2015. p. 2872-2880.

MESSRING. **MESSRING Safer Mobility**, 2018. Disponível em: <<https://www.messring.de/en/products/passive-safety/laser-speed-trap/>>. Acesso em: 03 maio 2020.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>>. Acesso em: 27 maio 2021.

MORAIS, W. A. D. Conformação plástica dos metais. **UNISANTA**, 2009. Disponível em: <<https://www.unisanta.br/materialdidaticorm/arquivos%5CAPOSTILAPARTEIa108518.pdf>>

- NASSER, A. et al. Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 429-436, 2010.
- NATIONAL INSTRUMENTS. Correlation. **Diadem 2018 help**, 2018. Disponível em: <[https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370858P-01/genmaths/genmaths/calc\\_correlation/](https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370858P-01/genmaths/genmaths/calc_correlation/)>. Acesso em: Junho 2021.
- 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**, p. 423-431, 2007.
- OPAS. Folha Informativa - Acidentes de Trânsito. **Organização Pan-Americana de Saúde**, 2019. Disponível em: <[https://www.paho.org/bra/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5147:acidentes-de-transito-folha-informativa&Itemid=779](https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5147:acidentes-de-transito-folha-informativa&Itemid=779)>. Acesso em: Abril 2020.
- POLITECNICO DI TORINO. **Guidelines on Optimal Architectures for Crashworthiness and Compability Improvement**. Torino. 2012.
- RCAR. AZT - automotive. **RCAR Low speed structural crash test**, Outubro 2017. Disponível em: <[https://azt-automotive.com/\\_Resources/Persistent/683b2c0557a7a308bc56e1705b31db983cce60fe/RCA%20Structure%20Test%20procedure%20Version%202\\_3.pdf](https://azt-automotive.com/_Resources/Persistent/683b2c0557a7a308bc56e1705b31db983cce60fe/RCA%20Structure%20Test%20procedure%20Version%202_3.pdf)>.
- REGO, R.; FARIA, A. R. **Influências à Conformação**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. [S.l.].
- RODRIGUEZ, C.; FELICIANO, E. Substituição parcial de peças: passo a passo. **Revista CESVI**, p. 50-55, setembro/outubro 2007.
- ROSENBERG, G.; SINAIOVÁ, I.; JUHAR, L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators. **Materials Science & Engineering A**, v. 582, p. 347-358, 2013.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 2ª. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 2004.
- SHEN, H. P.; LEI, T. C.; LIU, J. Z. Microscopic deformation behavior of Martensitic–Ferritic dual-phase steels. **Materials Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 28-33, 1986.
- SINGACE, A. A.; EL-SOBKY, H. BEHAVIOUR OF AXIALLY CRUSHED CORRUGATED TUBES. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 39, n. 3, p. 249-268, 1997.
- SONG, J.; CHEN, Y.; LU, G. Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 66, p. 239-248, 2013.

TIGRINHO, L. M. V. **ANÁLISE DA FRATURA DE CHAPAS DO AÇO AVANÇADO DE ALTA RESISTÊNCIA DP600 QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES ESTADOS DE TENSÕES**. Tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2011.

TIMOKHINA, I. B. et al. **UNDERSTANDING BAKE-HARDENING IN MODERN HIGH STRENGTH STEELS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY USING ADVANCED ANALYTICAL TECHNIQUES**. New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels. Buenos Aires, Argentina: [s.n.]. 2008.

USIMINAS. **Aços dual phase da Usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores**. 2º Workshop sobre inovações para o desenvolvimento de aços de elevado valor agregado - Foco indústria automotiva. [S.l.]: [s.n.]. 2008.

VANI, S. P. **PLATE BUCKLING DUE TO COMBINED BENDING AND COMPRESSION USING LINEAR FINITE ELEMENT METHOD**. Master of Science in Engineering in the Mechanical Engineering Program - YOUNGSTOWN STATE UNIVERSITY. [S.l.]. 2004.

WANG, W. et al. Strain Rate Effect on Tensile Behavior for a High Specific Strength Steel: From Quasi-Static to Intermediate Strain Rates. **Metals**, 29 Dezembro 2017.

WHO. Death on the roads. **World Health Organization**, 2020. Disponível em: <<https://extranet.who.int/roadsafety/death-on-the-roads/#ticker>>. Acesso em: abril 2020.

WIERZBICKI, T. **2.080J/1.573J Structural Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu/>. [S.l.], p. 1-20. Fall 2013. (License: Creative Commons BY-NC-SA).

WIERZBICKI, T.; ABRAMOWICZ, W. On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures. **Journal of Applied Mechanics**, p. 727-734, 1983.

XU, F.; WANG, C. Dynamic axial crushing of tailor-welded blanks (TWBs) thin-walled structures with top-hat shaped section. **Advances in Engineering Software**, v. 96, p. 70-82, Março 2016.

ZANLUCHI, J. J. D. **AVALIAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO PARA PROCESSOS DE ESTAMPAGEM À FRIO DOS AÇOS BIFÁSICOS DP 600 E DP 800**. Porto Alegre. 2014.

ZHOU, C. et al. Dynamic axial crushing of origami crash boxes. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 118, p. 1-12, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.09.001>>.

ZHU, D. et al. Characterization of Dynamic Tensile Testing Using Aluminum Alloy 6061-T6 at Intermediate Strain Rates. **JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS**, p. 669-679, 2011.

ZIEMIAN, R. D. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. 6<sup>a</sup>. ed. Hoboken, Canada: JOHN WILEY & SONS, INC., 2010.