



# **PME 3543**

## **Estruturas Mecânicas e de Veículos**

### **Notas de Aula**

**Prof. Leandro V. da S. Macedo**

## **02**

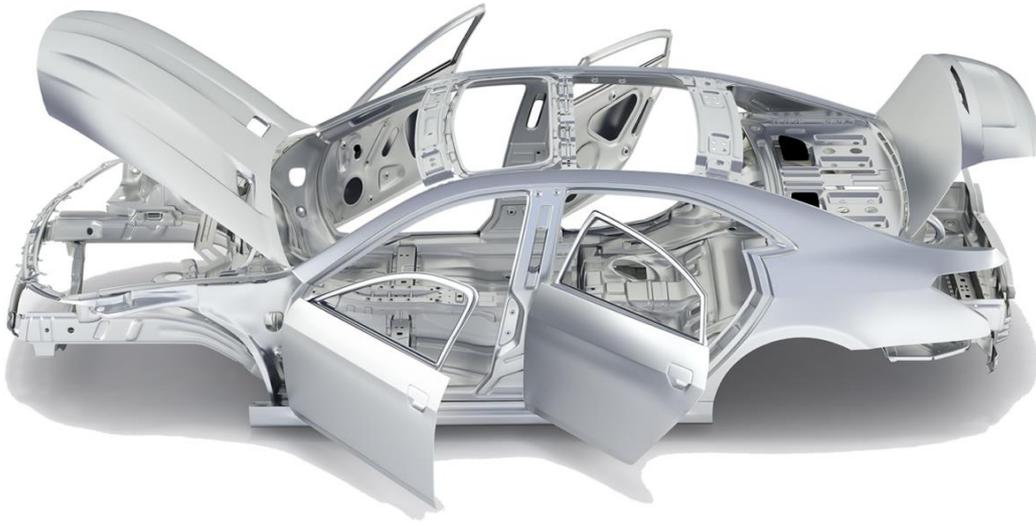
### **Casos de carregamento**

### **Rigidez de BIW e partes móveis**

### **Testes de amassamento e ancoragem**



## Requisitos sobre o desempenho estrutural



### Projeto Otimizado:

- massa
- tamanho de blank
- quantidade de solda
- quantidade de peças
- custo variável e investimento
- ...

**Rigidez** → minimizar deformações elásticas → funcionalidade

**Rigidez dinâmica** → minimizar vibrações → ruído, conforto e durabilidade

**Resistência mecânica** → quebras e durabilidade

**Desempenho em colisão baixa velocidade** → custo de reparo

**Desempenho em colisão alta velocidade** → segurança de ocupantes, absorção de energia, célula de sobrevivência, proteção de pedestres



## Casos de carregamento

2

Rigidez dinâmica - Análise modal de BIW  
Rigidez de BIW - Torção e flexão estáticas  
Rigidez de BIW - Rigidez de colunas  
Rigidez de BIW - Rigidez de travessas e ancoragens  
Rigidez dinâmica – Análise modal e resposta forçada de Body Trimmed  
Rigidez dinâmica – Resposta em frequência local (ancoragem de suspensão, bancos, tanque de combustível...)  
Carregamentos de rodagem (carregamento inercial vertical, lateral, longitudinal)  
Carregamentos de rodagem (sinais de pista)

1

Rigidez de partes móveis – Capô; Portas; Tampa traseira  
Proteção de Pedestres (Cabeça vs. Capô)

4

Desempenho em Crash - Frontal/ODB/Traseiro  
Custo de reparo (RCAR) - Dianteiro e Traseiro  
Proteção de Pedestres (Perna vs. Para-choques)  
Desempenho em Crash – Lateral veículo e Lateral Poste  
Proteção de Ocupantes (Frontal, Lateral, Knee Mapping)  
Obtenção de sinais de aceleração para disparo de sistemas de retenção

1

Rigidez do suporte da coluna de direção  
Rigidez do front-end  
Ancoragens de cintos e bancos  
Amassamento de Teto  
Amassamento de Portas  
Amassamento de painéis (teto, para-lamas, portas)  
Outras avaliações localizadas de rigidez, análises de tensão e estabilidade elástica



## Rigidez de BIW

Uma característica básica fundamental sob o ponto de vista técnico para o conforto, segurança e durabilidade do veículo é uma alta e bem distribuída rigidez de carroceria. Esta característica aparece claramente também numa avaliação subjetiva de conforto e qualidade do veículo sob o ponto de vista do consumidor.

Trabalha-se exaustivamente em busca de uma construção mais leve, pois uma ênfase no menor peso resulta nos benefícios de menor custo, menor consumo de combustível e menores emissões, contribuindo-se assim com objetivos de proteção ao meio ambiente e economia de recursos naturais. Para atingir-se o objetivo de alta rigidez com uma construção o mais leve possível é feito um desenvolvimento buscando-se as melhores soluções no que diz respeito à geometria e distribuição de espessuras para as diversas chapas e reforços de carroceria.

Atenção especial é dada à construção dos nós onde há a conexão das colunas, travessas e longarinas que formam o esqueleto principal do veículo.

Todavia atenção especial é dada também para a rigidez local nas posições onde são montados ou ancorados os componentes, tais como as posições das dobradiças das portas e tampas, as ancoragens de suspensão dianteira e traseira, os suportes dos coxins de motor e câmbio, as ancoragens de bancos e cintos de segurança, as ancoragens do tanque de combustível, do sistema de escapamento, etc... O desenvolvimento de rigidez de carroceria é feito considerando-se a rigidez estática e a rigidez dinâmica.



A rigidez estática global da carroceria é avaliada em ensaios de torção e flexão. A rigidez estática à torção é solicitada em situações práticas do dia a dia da rodagem do veículo com o consumidor ao transitar em baixas velocidades por vias esburacadas, sobre lombadas, em subida de guias, etc... A rigidez à flexão é importante para o correto dimensionamento da carroceria para suportar o peso do conjunto motopropulsor, o peso dos ocupantes e itens de acabamento do veículo, o peso de bagagem e carga da caçamba. A rigidez estática de colunas (ancoragens das dobradiças), rigidez das laterais da caçamba, dentre outras, são obtidas também em ensaios sob carregamentos representativos para cada uma destas situações. Em todas as situações de avaliação de rigidez estática busca-se limitar as deflexões e deslocamentos relativos na carroceria que poderiam levar a consequências funestas para o bom desempenho da mesma, tais como problemas de desalinhamento impedindo abertura de portas e tampas e deformações excessivas que a longo prazo originam trincas.

A rigidez dinâmica por sua vez é avaliada principalmente a partir da análise modal, que identifica os modos e frequências naturais de vibrar da estrutura. Estas características, isto é os valores destas frequências em cada modo de vibrar, que por sua vez são as formas que a estrutura assume, influenciam diretamente os deslocamentos relativos da estrutura da carroceria submetida a carregamentos dinâmicos em rodagem. Novamente aqui busca-se minimizar os deslocamentos relativos que são os responsáveis por desconforto, ruído e problemas de durabilidade (novamente o surgimento de trincas no longo prazo).

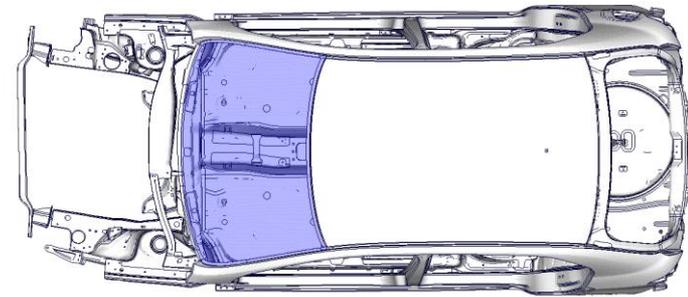
Consegue-se isto maximizando os valores das frequências e evitando-se concentrações de energia de deformação na estrutura. Outras rigidezes dinâmicas locais importantes, principalmente sob o ponto de vista de conforto, são obtidas a partir de uma resposta forçada em função da frequência de excitação em carregamentos localizados.



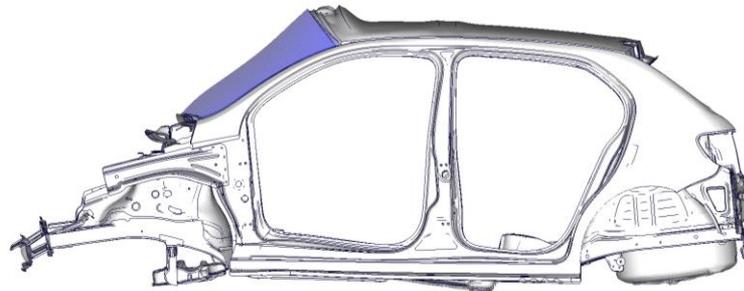
## Análise Modal de BIW



**Modo de Torção**



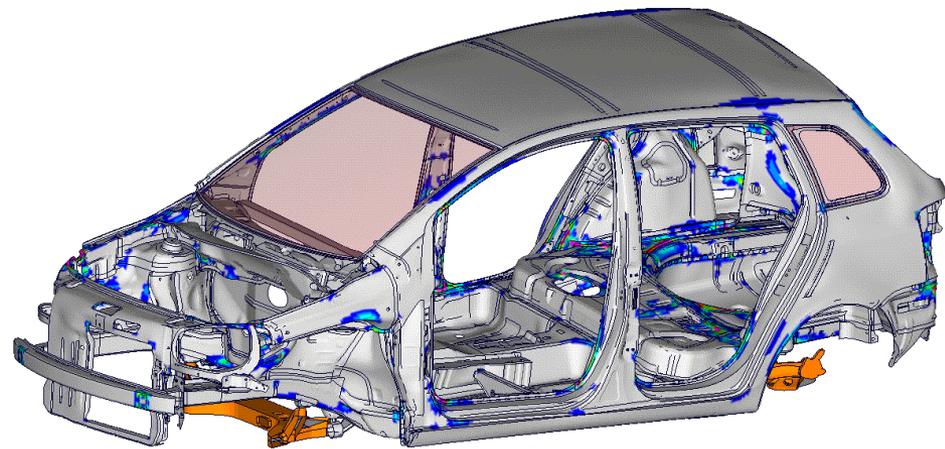
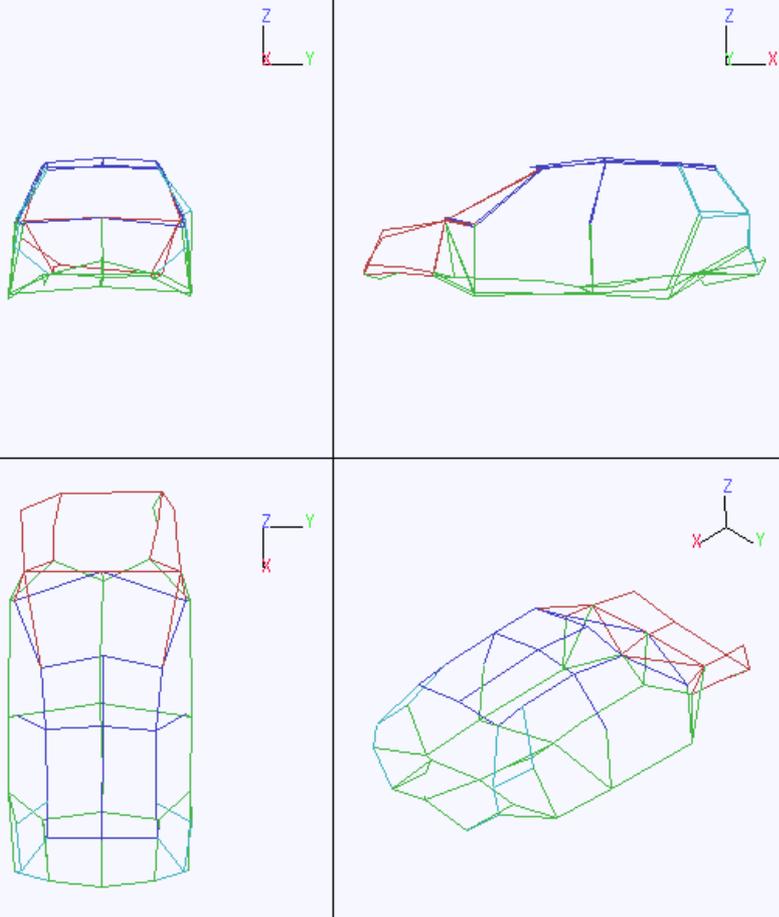
**Modo de Flexão horizontal  
(ou lateral)**



**Modos de Flexão vertical  
(Z) e (U)**

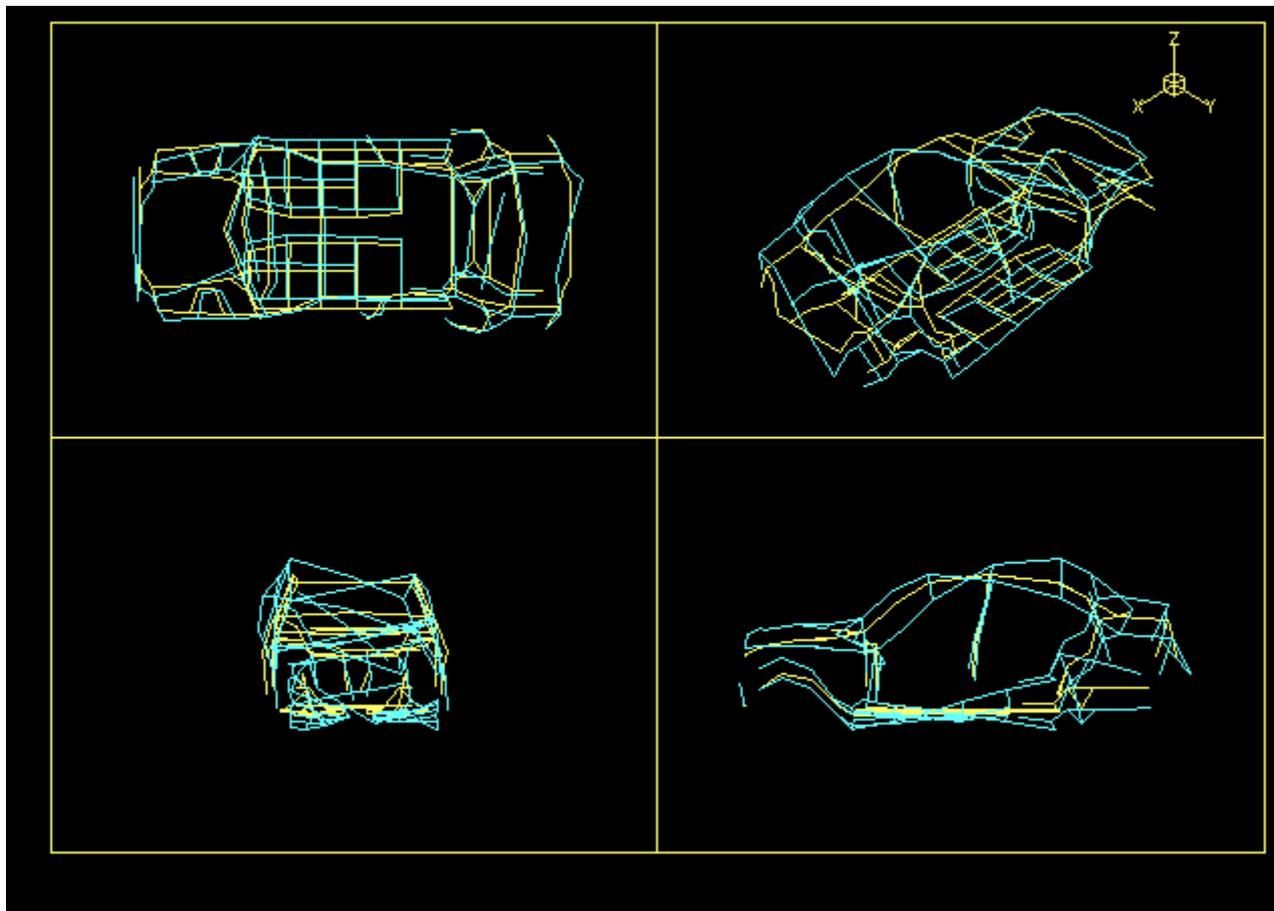


# Análise Modal de BIW (experimental e CAE)





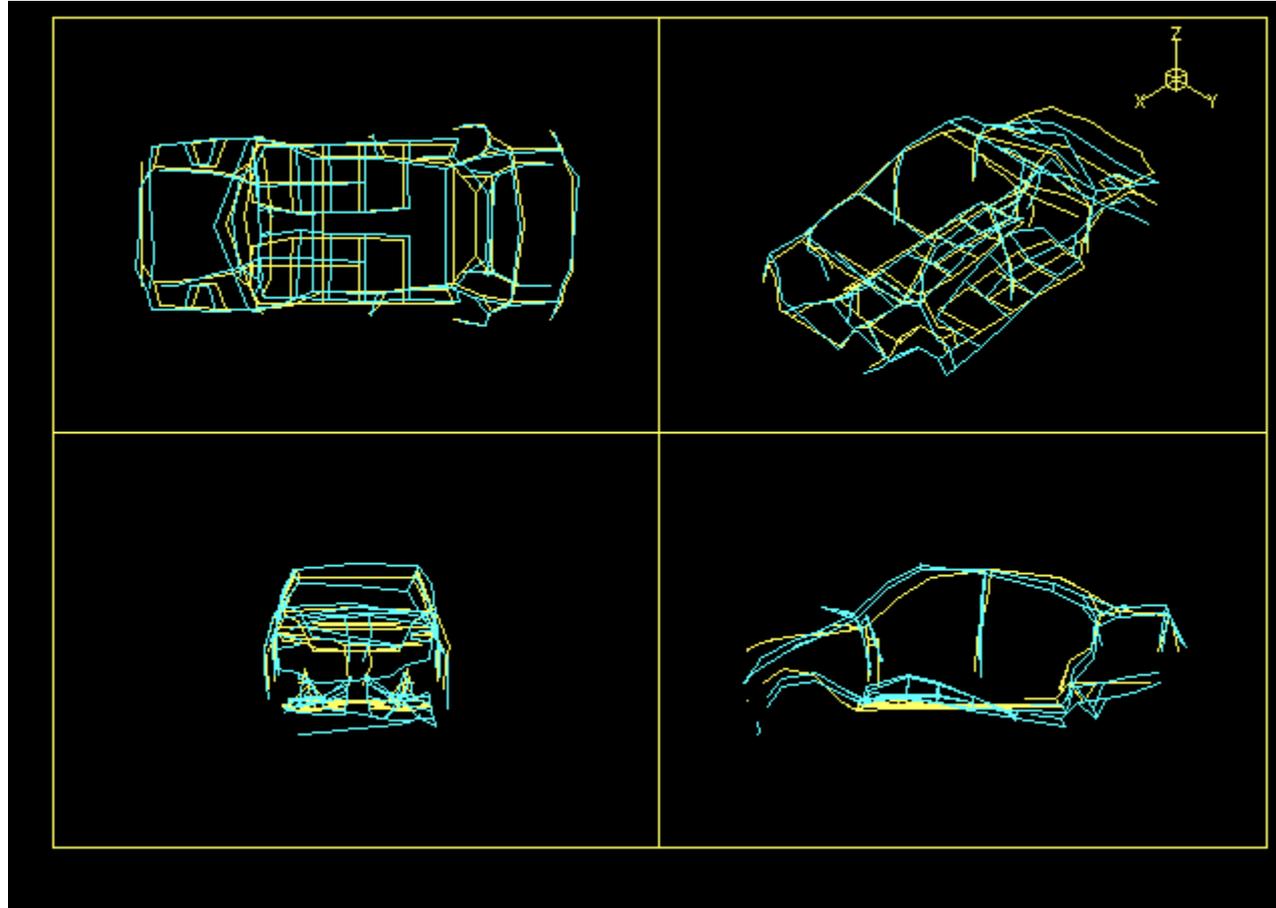
## Análise modal – resultados experimentais



**Chrysler Neon – modo de torção (1st torsion)** (U Michigan)



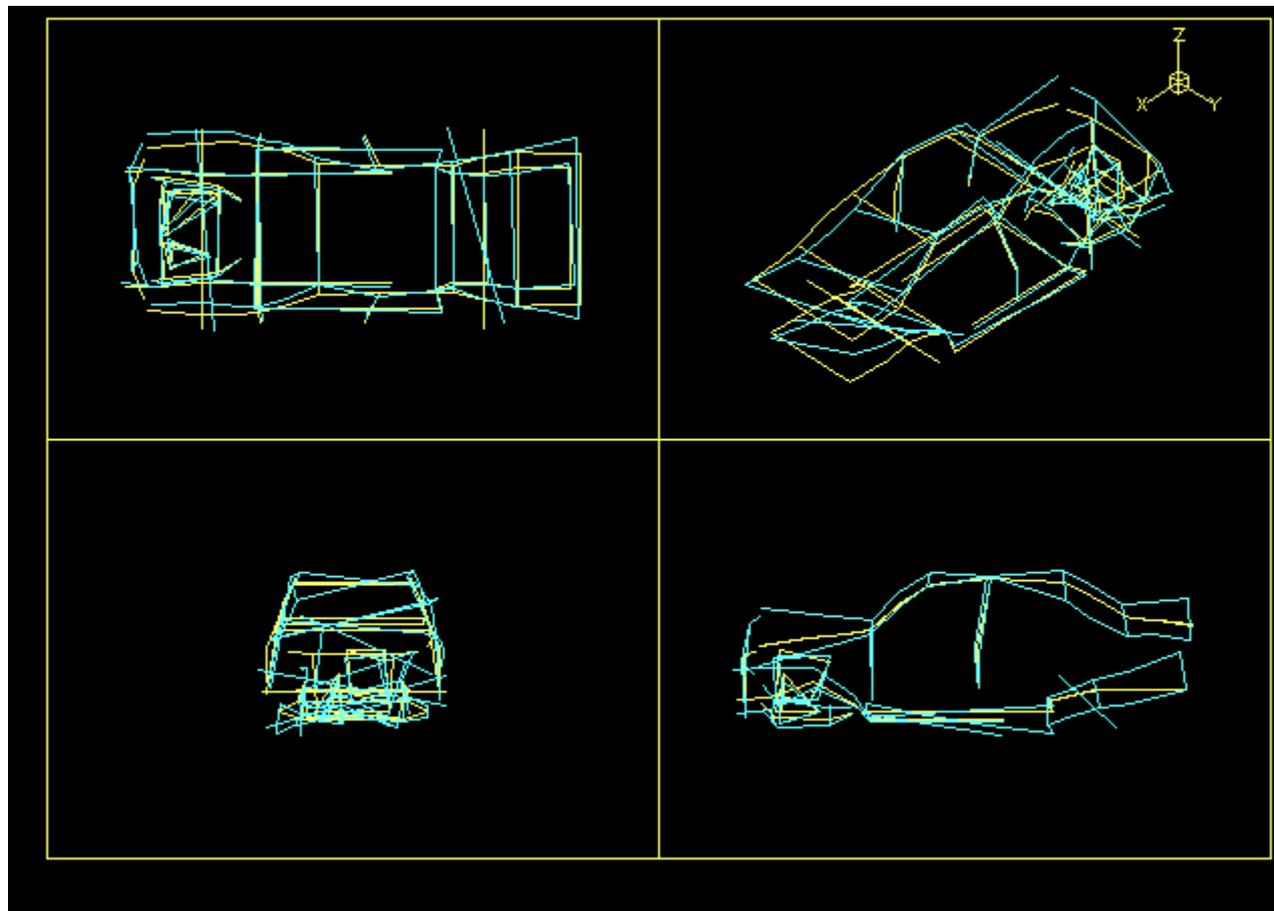
## Análise modal – resultados experimentais



**Chrysler\_Neon modo de flexão “Z” (Z Bending) (U Michigan)**



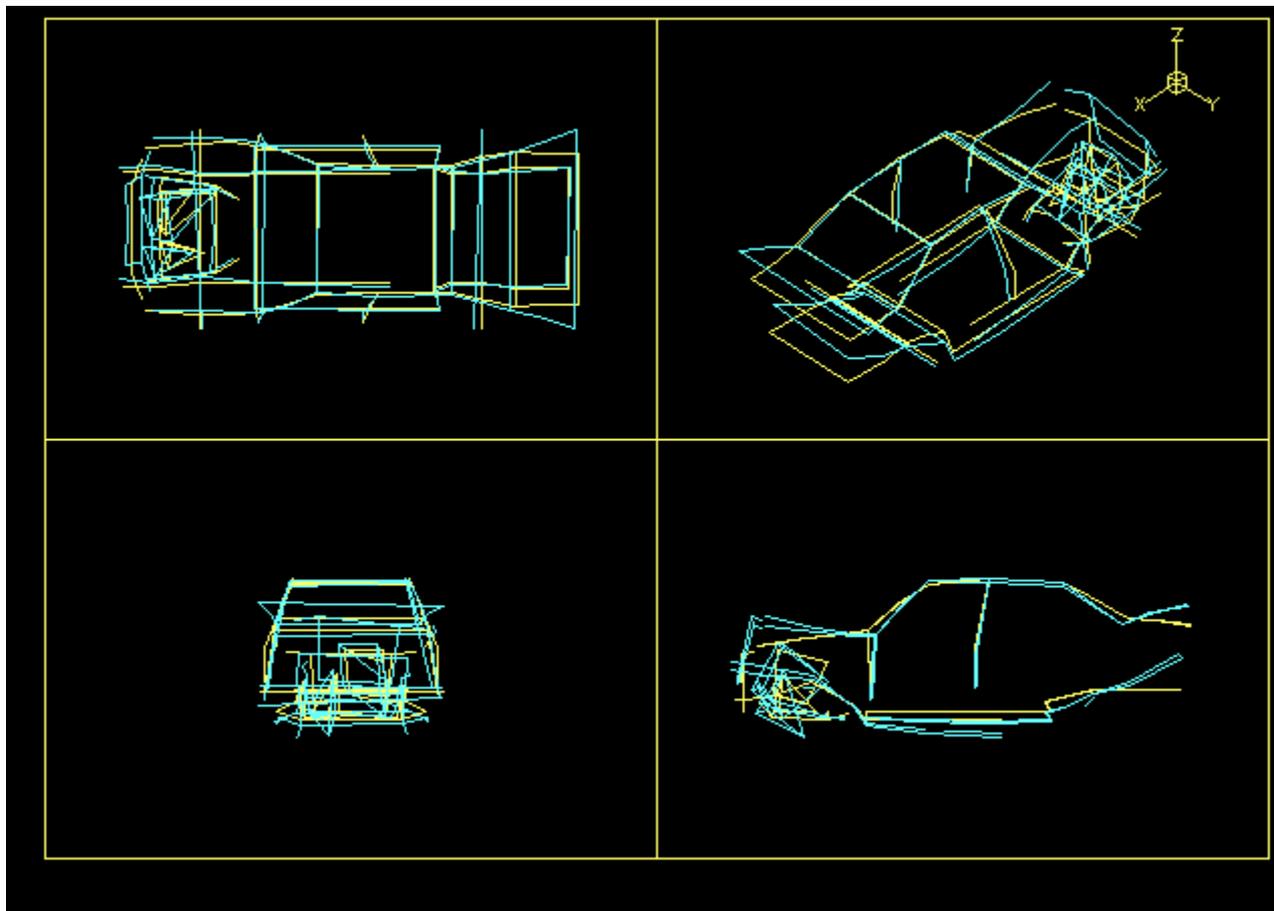
## Análise modal – resultados experimentais



**Toyota Camry modo de torção (1st torsion)** (U Michigan)



## Análise modal – resultados experimentais



**Toyota Camry modo de flexão “U” (U Bending) (U Michigan)**



# Ensaio de Análise Modal

**Ensaio de Análise Modal**  
**Projeto: ABC777**

Grandeza	Unidade	Limite	Versão	LM01_LM01	LM02_LM01	LM03_LM02	LM04_LM02
Massa informada pelo modelo CAE	kg		Descrição	Base	#xyz05 new t = 1,0 #xyz03 t =1 ==> 1,5	#xyz04 t =1 ==> 1,5	#xyz06 t =1 ==> 1,5
Massa de BIW	kg						
1ª torção	Hz	> 38					
Flexão "U"	Hz	> 40					
Flexão "Z"	Hz	> 40					
Flexão lateral	Hz	> 40					

**Grandezas a serem controladas e correspondentes limites são know-how de cada empresa (aqui valores apenas para exemplo)**

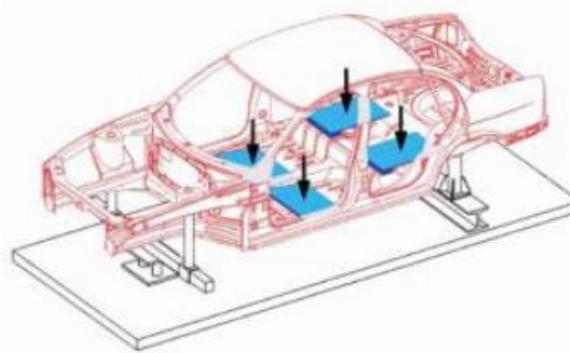




## Carregamentos estáticos

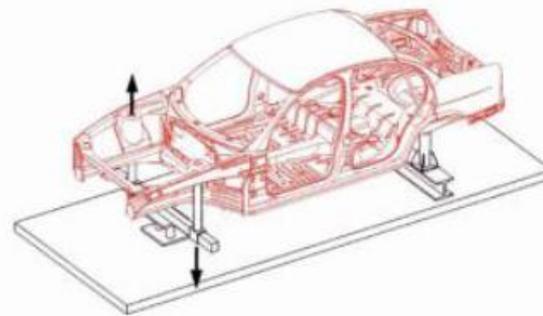
### Rigidez à flexão

Static body rigidity is measured with equal loads applied on each side at the front and rear of the B-pillar as shown. The body is restrained at four ends, and flexing is observed along the body rails.



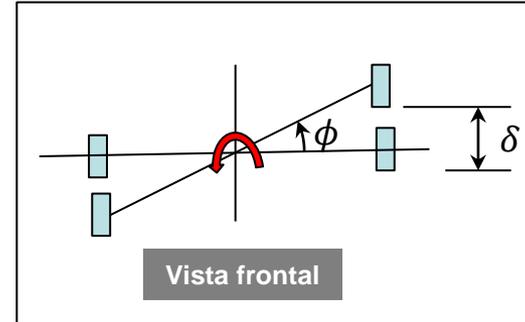
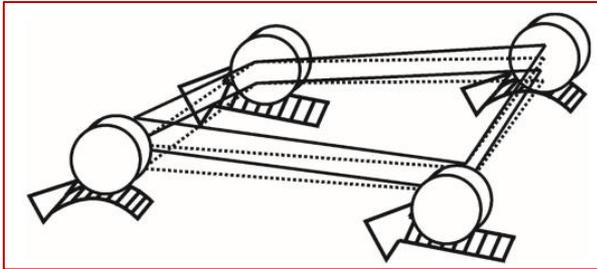
### Rigidez à torção

Static torsion rigidity is measured with only the rear ends restrained and opposing direction loads applied at the front end, and twist angle is observed.

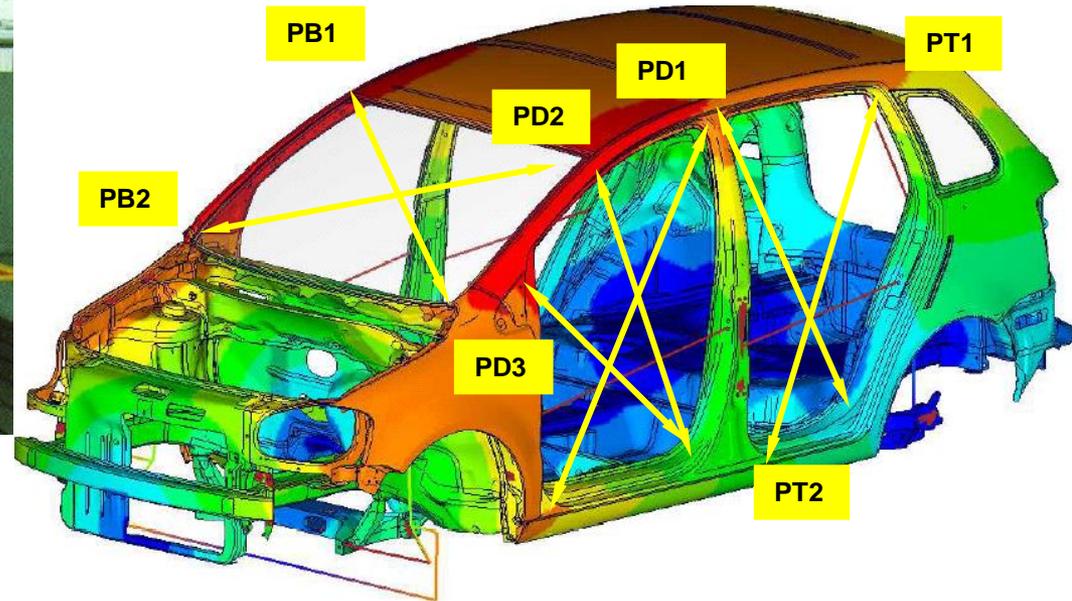
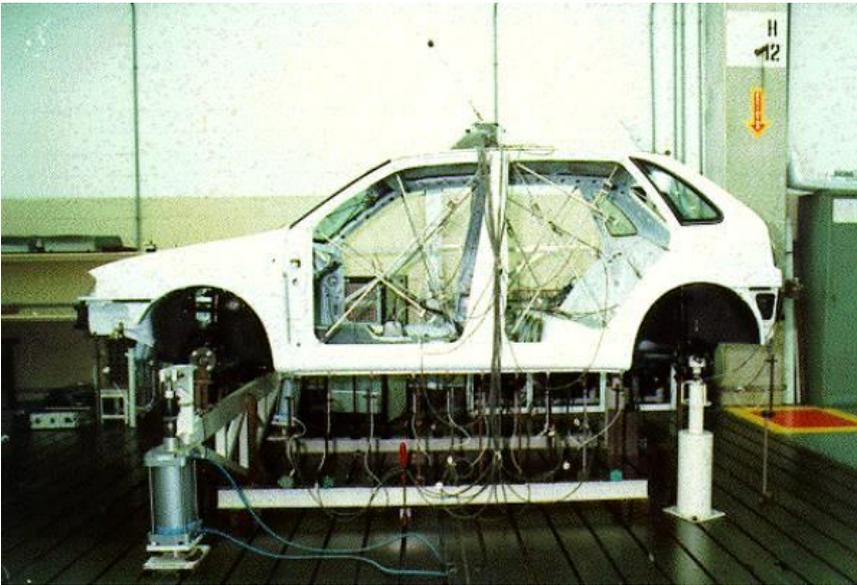




# Ensaio de Torção Estática



$$\phi = \arctan \frac{\delta}{\frac{1}{2} \text{bitola}}$$



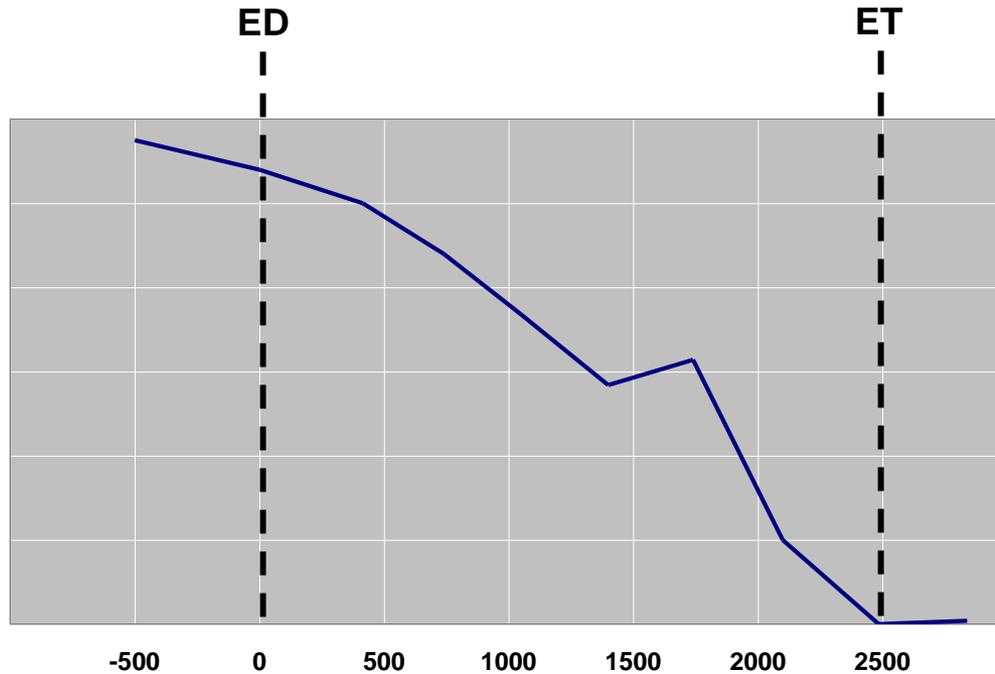
Medição dos deslocamentos de vãos de portas, parabrisa, tampa traseira, diagonais...



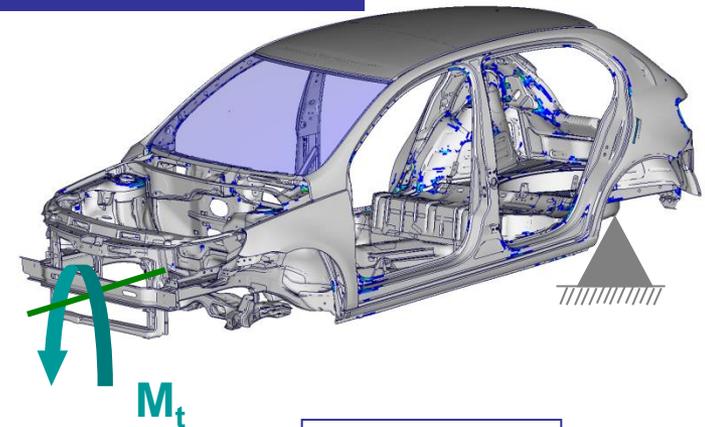
# Ensaio de Torção Estática

## Curva de Deformação Angular de Carroceria

Deformação Angular [min.]



Cota longitudinal do veículo [mm]



$$C_t = \frac{M_t}{\phi}$$

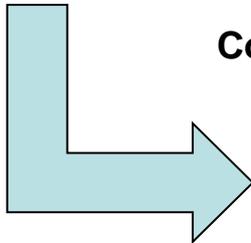
$C_t$  = rigidez torcional de BIW [Nm/°]

$M_t$  = momento torsor (aplicado) [Nm]

$\phi$  = ângulo de torção no ED (medido) [°]

$$\phi = \arctan \frac{\delta}{\frac{1}{2} \text{bitola}}$$

É de interesse também obter a derivada desta curva em relação à cota longitudinal → indicação de possíveis zonas de transição brusca de rigidez.





## Índice de qualidade de construção leve

“Leichtbaugüte”

$$\text{lightweight quality } L = \frac{m_{\text{str}}}{c_T \times A} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{Nm/}^\circ \times \text{m}^2} \times 10^3 \right]$$

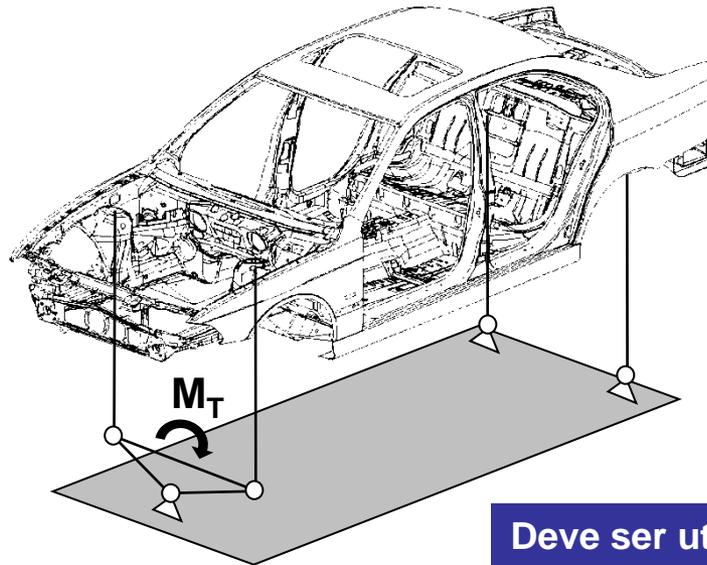
$m_{\text{str}}$  = weight of the structure (without doors and lids)

$c_T$  = torsional stiffness (with glazing)

$A$  = wheel track x wheel base

$$L = 1000 \frac{m_{\text{BIW}}}{C_t \cdot A}$$

$m_{\text{BIW}}$  = massa do BIW [kg]  
 $C_t$  = constante torcional [Nm/°]  
 $A$  = área projetada [m<sup>2</sup>]



Quanto menor o valor deste índice, melhor é a eficiência do peso acrescentado à estrutura para aumentar a rigidez da mesma.

Deve ser utilizado para comparar veículos de mesma classe, competidores entre si, ou gerações sucessivas de um mesmo veículo de um determinado fabricante.



# Ensaio de Torção Estática

Entre eixos	2550	mm
Bitola	1600	mm
Momento torsor aplicado	5000	Nm

**Ensaio de Torção Estática**  
**Projeto: ABC777**

		Versão	LM01_LM01	LM02_LM01	LM03_LM02	LM04_LM02
		Descrição	Base	#xyz05 new t = 1,0 #xyz03 t = 1 ==> 1,5	#xyz04 t = 1 ==> 1,5	#xyz06 t = 1 ==> 1,5
Grandeza	Unidade	Limite				
Massa informada pelo modelo CAE	kg		266			
Massa de BIW	kg		251			
Constante torcional	Nm/grau	12000	11111			
Lightweight quality			5,87			
Ângulo de torção entre eixos	minutos de grau	< 25'	27			
Gradiente de torção entre eixos	min. de grau/dm	< 3' /dm	2,9			
Diagonal de parabrisa	PB1 mm	< 2 mm	1,8			
Diagonal de parabrisa	PB2 mm	< 2 mm	1,8			
Diagonal de porta dianteira	PD1 mm	< 2,5 mm	1,9			
Diagonal de porta dianteira	PD2 mm	< 2,5 mm	1,8			
Diagonal de porta dianteira	PD3 mm	< 2,5 mm	2			
Fechadura de porta dianteira	FPD4 mm	< 2,5 mm	2			
Diagonal de porta traseira	PT1 mm	< 2,5 mm	2,2			
Diagonal de porta traseira	PT2 mm	< 2,5 mm	2,2			
Fechadura de porta traseira	FPT3 mm	< 2,5 mm	2,4			
Diagonal de tampa traseira	TT1 mm	< 2,5 mm	2,7			
Diagonal de tampa traseira	TT2 mm	< 2,5 mm	2,7			
Fechadura de tampa traseira	TT3 mm	< 2,5 mm	2,4			
Diagonal suspensão traseira e assoalho	TMD1 mm	< 2,5 mm	2,4			
Diagonal suspensão traseira e assoalho	TMD2 mm	< 2,5 mm	2,4			

Grandezas a serem controladas e correspondentes limites são know-how de cada empresa (aqui valores apenas para exemplo)

Controle das versões:  
LM04\_LM02 → versão nova 04  
feita modificando versão 02

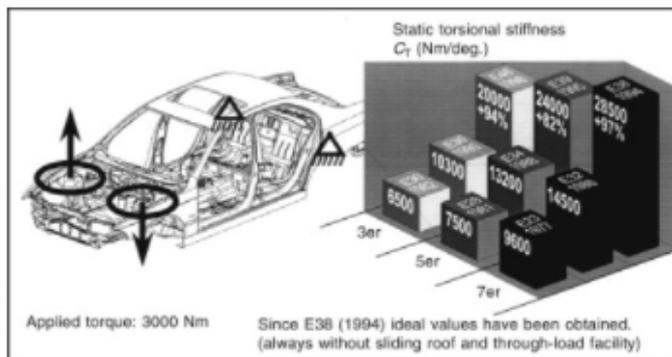


## Design and material utilization

Geoffrey Davies, in *Materials for Automobile Bodies (Second Edition)*, 2012

### 2.4.3 Design for static stiffness

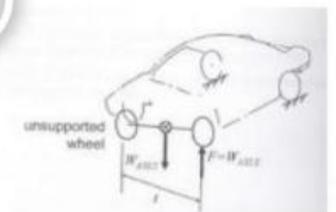
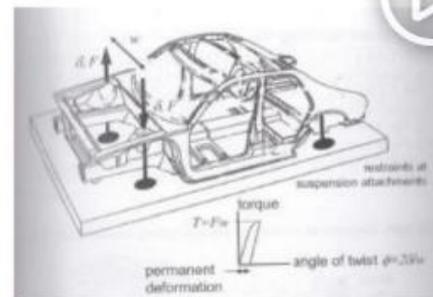
Static design entails the optimization of torsional stiffness and strength under quasi-static loading conditions, and good **static stiffness** values are fundamental requirements for target dynamic characteristics previously described. The variation in torsional stiffness with vehicle **curb weight** ( $K_w$ ) has been developed, and is shown in Figure 2.10 for BMW models, the target  $C_t$  value being  $15 \times K_w$ . To avoid excessive loading of the windscreen and stone chipping damage resulting from excessive surface stresses, the inherent stiffness without glass must reach 66% of the final stiffness. Specific design improvements were made in the latest models to key joints and structural members to increase torsional stiffness from 20,000 Nm/° to 28,500 Nm/°. Again the progression through successive BMW models is shown in Figure 2.11 with a doubling of previous values.



### DESIGN FOR BODY TORSION

Body torsion strength requirement

- The body has to recover its shape with little to no permanent deformation during twist ditch maneuver
- The twist ditch torque can be obtained by multiplying axle load ( $W$ ) by half of the wheel track ( $t$ ).
- The angle of twist can be determined by  $2 \times$  deflection divided by width of the loaded points ( $w$ )



where:  
 $W_{axle}$  = Weight for the axle with the highest static load,  
 $t$  = Track for that axle.

All materials in this slide are taken from Donald E Malen, 2011. *Fundamentals of Automobile Body Structure Design*, SAE International

SMC 4133 AUTOMOT

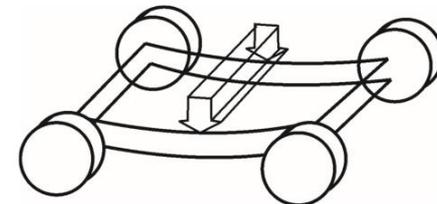
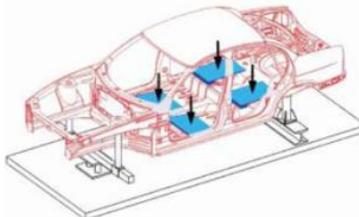


Download





# Ensaio de Flexão Estática



I - Carga aplicada no motor	2550	kg
II - Carga aplicada linha dianteira	1600	kg
III - Carga aplicada linha traseira	5000	kg
IV - Carga aplicada porta- malas	5000	kg

**Ensaio de Flexão Estática**  
**Projeto: ABC777**

		Versão				LM01_LM01				LM02_LM01				LM04_LM02							
		Descrição				Base				#xyz05 new t = 1,0 #xyz03 t =1 ==> 1,5				#xyz06 t =1 ==> 1,5							
		Limite vs caso de carregamento																			
Grandeza		Unidade		I	I+II	I+II+III	I+II+III+IV														
Massa informada pelo modelo CAE	kg					266	266	266	266												
Massa de BIW	kg					251	251	251	251												
Flecha máxima soleira	Nm/grau	0,5	1	1,2	1,2	0,40	0,80	0,90	0,85												
Flecha máxima túnel		0,5	1,2	1,4	1,2	0,38	1,10	1,30	1,15												
Flecha máxima linha dianteira	minutos de grau	0,8	1	1,8	1,6	0,75	0,85	0,95	0,82												
Flecha máxima linha traseira	min. de grau/dm	0,8	1	1,8	1,6	0,74	0,83	0,88	0,85												
Diagonal de porta dianteira	PD1 mm	< 2,5 mm				1,90	1,90	1,90	1,90												
Diagonal de porta dianteira	PD2 mm	< 2,5 mm				1,80	1,80	1,80	1,80												
Diagonal de porta dianteira	PD3 mm	< 2,5 mm				2,00	2,00	2,00	2,00												
Fechadura de porta dianteira	FPD4 mm	< 2,5 mm				2,00	2,00	2,00	2,00												
Diagonal de porta traseira	PT1 mm	< 2,5 mm				2,20	2,20	2,20	2,20												
Diagonal de porta traseira	PT2 mm	< 2,5 mm				2,20	2,20	2,20	2,20												
Fechadura de porta traseira	FPT3 mm	< 2,5 mm				2,40	2,40	2,40	2,40												
Diagonal de tampa traseira	TT1 mm	< 2,5 mm				2,70	2,70	2,70	2,70												
Diagonal de tampa traseira	TT2 mm	< 2,5 mm				2,70	2,70	2,70	2,70												
Fechadura de tampa traseira	TT3 mm	< 2,5 mm				2,40	2,40	2,40	2,40												

Grandezas a serem controladas e correspondentes limites são know-how de cada empresa (aqui valores apenas para exemplo)

Não há obrigatoriedade de calcular a flexão estática para todas aquelas versões calculadas em torção ou modal.



## Respostas em frequência locais

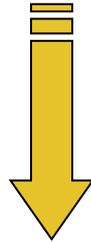
- Ancoragens de motor
- Ancoragens de suspensão
- Ancoragens de bancos





### Carregamentos inerciais

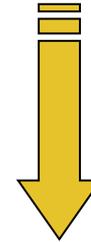
Vertical  
(e.g. 3g)



Longitudinal  
(e.g. 1g)

Lateral  
(e.g. 1g)

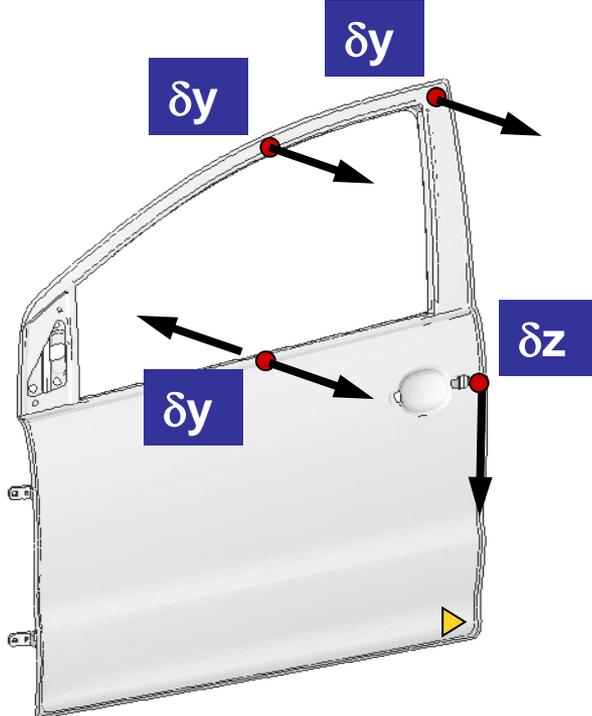
### Carregamentos de rodagem (sinal de pista)



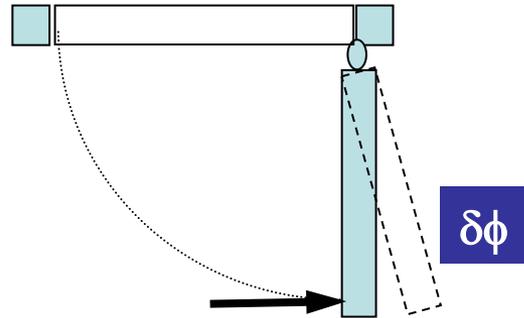


## Portas

Rigidez à flexão  
Rigidez do quadro superior  
Rigidez do vão da janela (int. e ext.)



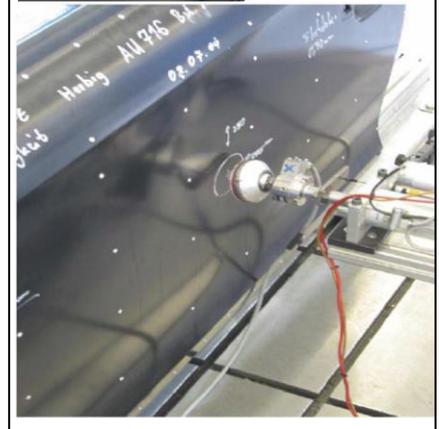
## Rigidez à abertura excessiva



## Ensaio de bate-portas



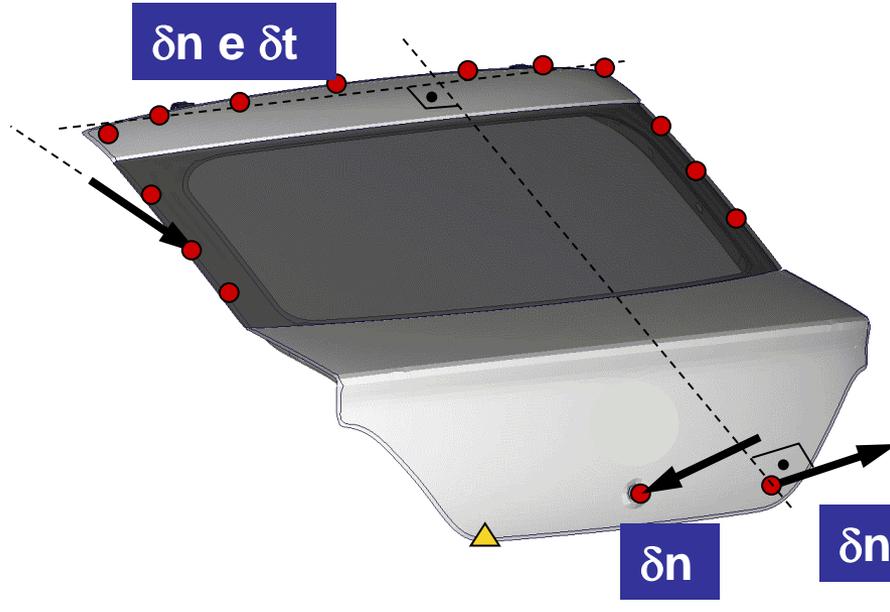
## Resistência ao amassamento ("denting")





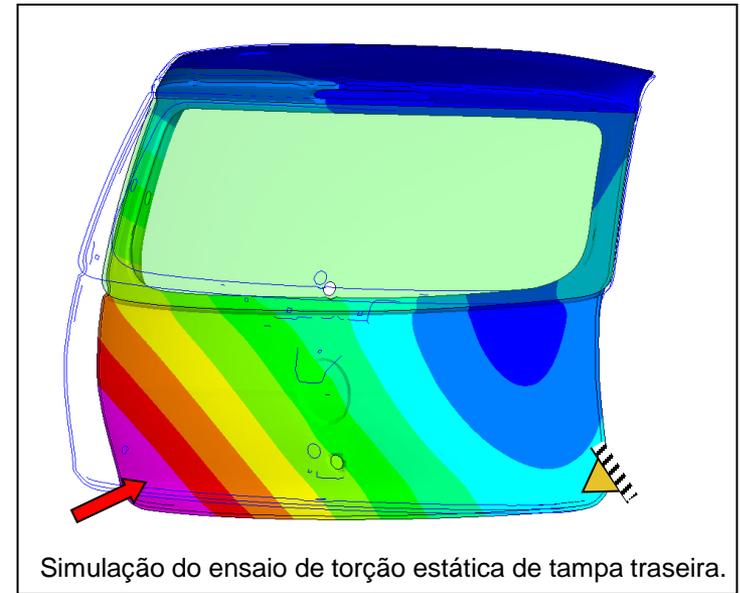
## Tampa traseira

Rigidez à torção  
Rigidez à flexão  
Rigidez ao carregamento da mola a gás



Resistência ao amassamento  
("denting")

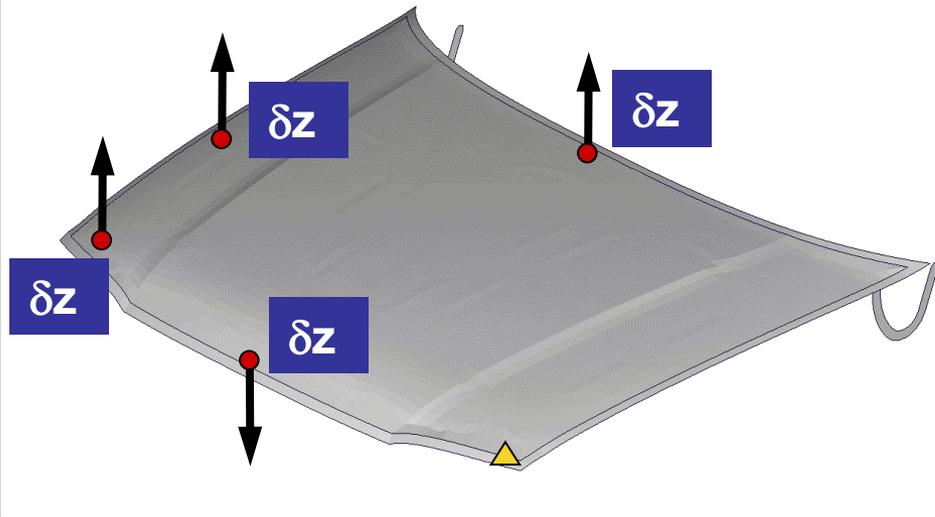
Ensaio de bate-tampa





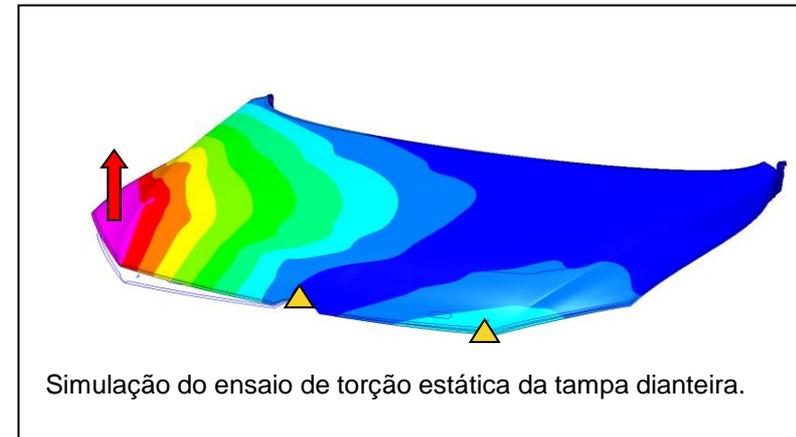
## Tampa dianteira

Rigidez à flexão da travessa frontal  
Rigidez à flexão da travessa lateral  
Rigidez à flexão da travessa traseira  
Rigidez à tração na fechadura



Resistência ao amassamento  
("denting")

Ensaio de bate-tampa





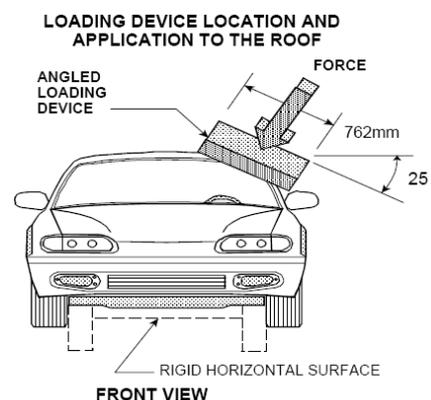
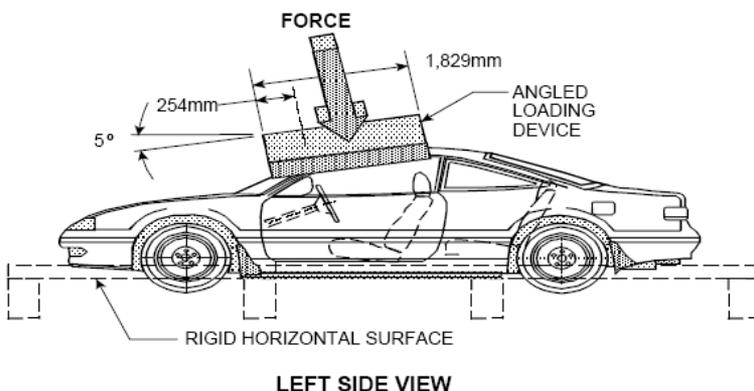
## FMVSS216 Amassamento do teto (Roof Crush)

Revisada em 2009: Começa a partir de 2012 → 100 % dos veículos novos a partir de 2017.

3 x peso do veículo (m < 6000 lb, 2670 kg) (1,5 x peso do veículo para m > 6000 pounds)

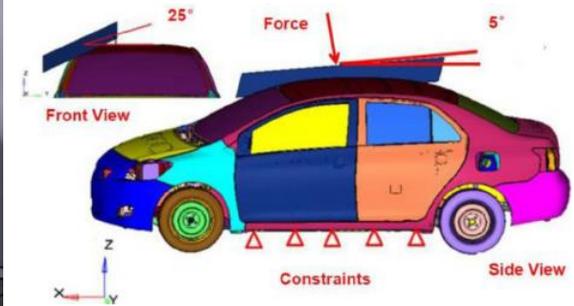
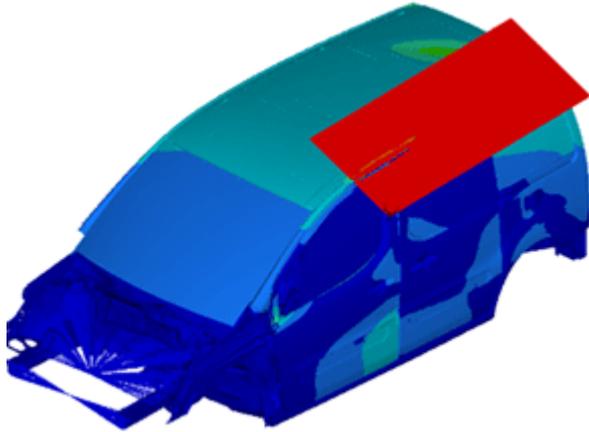
Teto não pode tocar a cabeça de um adulto masculino 50%

Logo, o quanto o teto pode abaular dependerá das dimensões do veículo.





# FMVSS216 Amassamento do teto (Roof Crush)





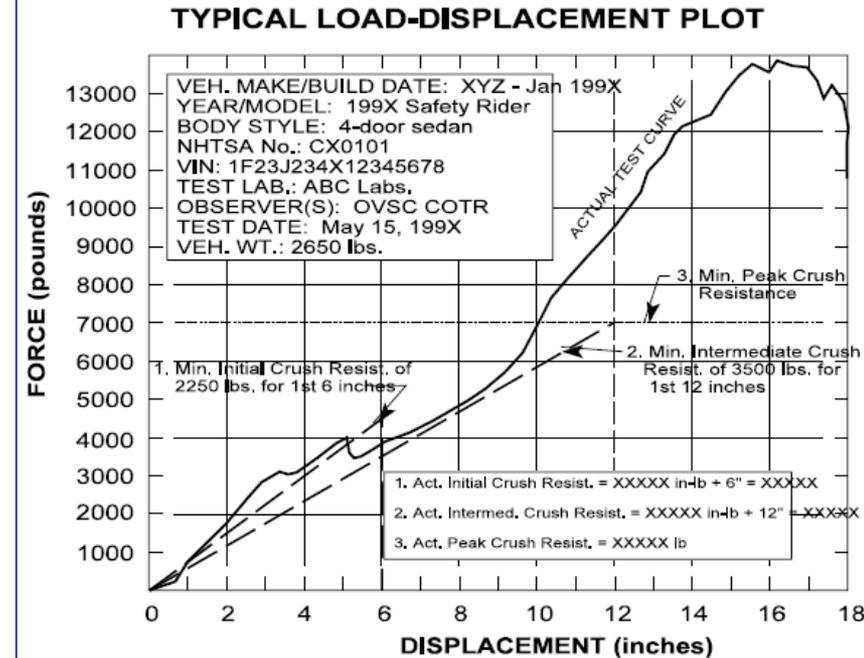
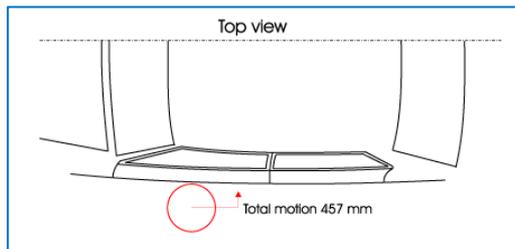
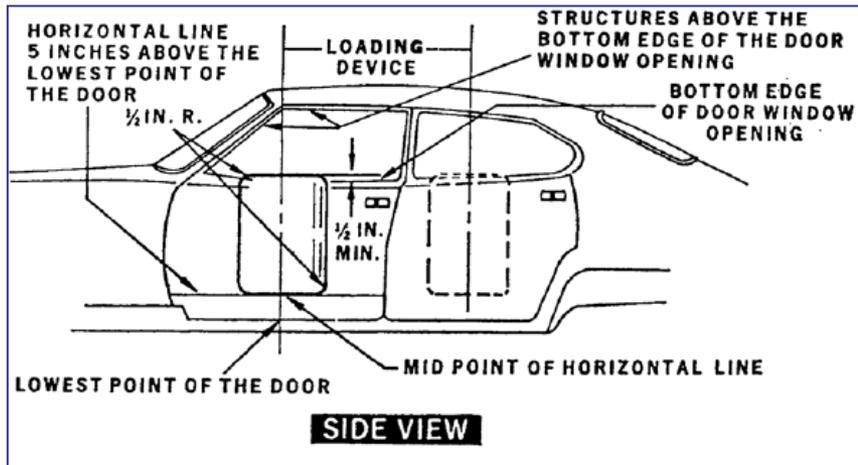
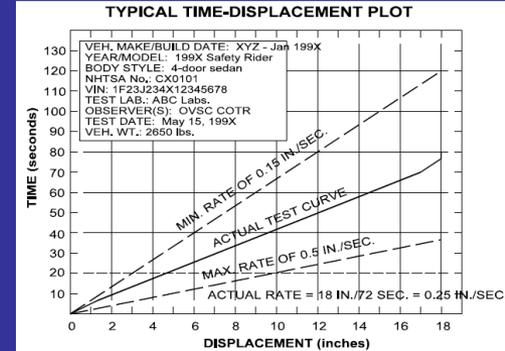
# FMVSS214S Amassamento de porta estático (Door crush)

Teste sem os bancos:

**Resistência inicial** > 2250 lbf (10012 N)  
(força média nas primeiras 6" (152,4 mm) de intrusão)

**Resistência intermediária** > 3500 lbf (15575 N)  
(força média nas primeiras 12" (304,8 mm) de intrusão)

**Pico de resistência** > min { 3,5 x peso do veículo em ordem de marcha ; 7000 lbf (31138 N) }  
(pico de força durante o deslocamento total de 18" (457.2 mm) crush).





## ECE R14 Ancoragem de cintos de segurança

Especificação ECE R14 para veículos de passeio:

Teste estático

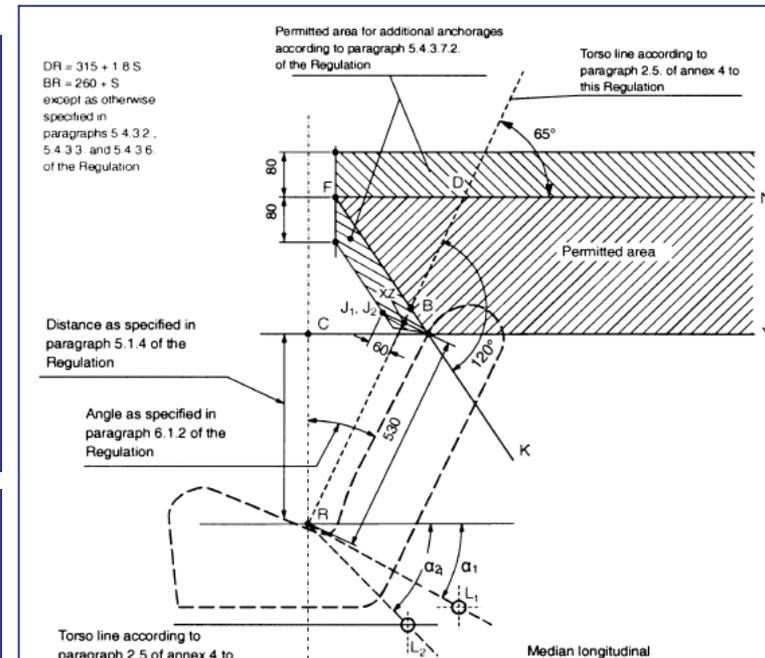
Carga de tração longitudinal: 13500 +/-20 N

Aplicados no cinto subadominal e no diagonal simultaneamente por dispositivos reproduzindo a geometria do torso e do abdomen, em todas as posições de uma fileira de bancos

Caso o cinto seja ancorado total ou parcialmente em uma estrutura do banco aplica-se uma força adicional igual a 20 vezes o peso do banco à própria estrutura deste.

Extrato dos requisitos da norma:

- Todas as ancoragens devem ser capaz de suportar o teste. Deformações permanentes, incluindo ruptura parcial ou quebra não constituem falha se a força requerida foi suportada pelo tempo especificado.
- Durante o testes os mínimos espaçamentos dos pontos de ancoragem efetivos devem ser respeitados.
- Caso uma ancoragem superior esteja presa à estrutura do banco, o ponto efetivo de ancoragem não deve se deslocar durante o teste além de um plano transversal passando pelos pontos R e C do banco em questão (veja a figura).

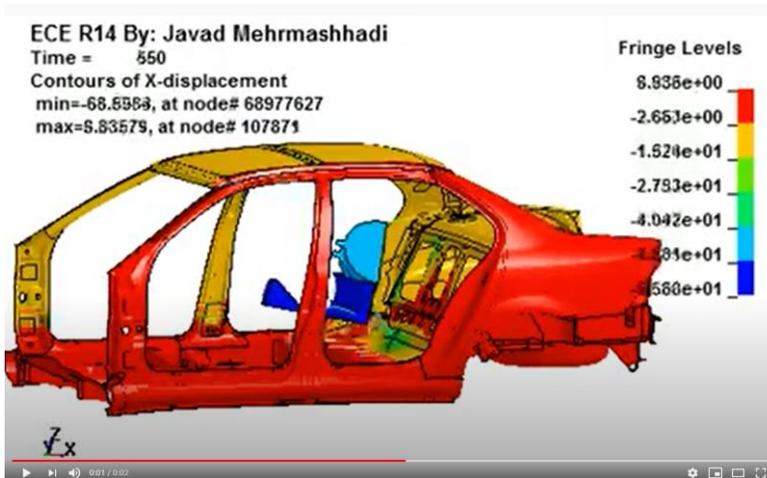




# ECE R14 Ancoragem de cintos de segurança

Tente no  YouTube<sup>BR</sup> : BIW ECE R14 ou Rohbau ECE R14...

YouTube: Jerba Seat Belt Anchorage Test





**FIM 02**