

ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VEICULAR AO LONGO DE CINCO DÉCADAS: COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE VEÍCULOS DE COMBUSTÃO E ELÉTRICOS

Trabalho de Perícia ou Inspeção Predial

PEDRO HERNRIQUE GARCIA GOMES
ANTONIO ARANTE NETO

João Pessoa - PB
2025

REALIZAÇÃO:



IBAPE
INSTITUTO BRASILEIRO
DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA



IBAPE-PB
INSTITUTO BRASILEIRO
DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA

PATROCÍNIO:

CONFEA
Conselho Federal de Engenharia
e Agronomia



CREA-PB
Conselho Regional de Engenharia
e Agronomia da Paraíba



mútua
Caba de Assistência dos Profissionais do Crea

ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VEICULAR AO LONGO DE CINCO DÉCADAS: COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE VEÍCULOS DE COMBUSTÃO E ELÉTRICOS

RESUMO

Este trabalho analisa a evolução histórica da resistência estrutural e da deformação veicular em testes de colisão padronizados, considerando dados da NHTSA de 1974 a 2025. A abordagem inclui uma avaliação comparativa entre veículos elétricos (EVs) e veículos com motor de combustão interna (ICEs), destacando diferenças nos perfis de deformação e nas estratégias de absorção de energia. Para isso, aplicam-se critérios rigorosos de equivalência de massa, dimensões e condições de teste. Os resultados demonstram tendências claras de melhoria contínua na segurança veicular, com saltos significativos após mudanças regulatórias. Observa-se ainda que os EVs, apesar da maior massa, apresentam padrões de deformação lateral inferiores, indicando maior rigidez na parte inferior do chassi, sem comprometer a eficiência na absorção de energia. O estudo contribui com reflexões para aprimoramento das normas de segurança voltadas aos EVs e propõe novas diretrizes para projetos estruturais que contemplem a integridade das baterias de alta voltagem.

Palavras-chave: *Segurança veicular; Deformação estrutural; Veículos elétricos; Testes de impacto; Eficiência de absorção de energia.*

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



SUMÁRIO

1. EXPOSIÇÃO	4
2. CONCLUSÃO.....	17
REFERÊNCIAS	18

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



1. EXPOSIÇÃO

Introdução

A segurança veicular é uma preocupação primordial na engenharia automotiva e na saúde pública. As características de resistência e deformação de um veículo durante uma colisão são determinantes críticos para a proteção dos ocupantes e a integridade estrutural. Historicamente, o design automotivo tem sido moldado por uma interação complexa entre avanços tecnológicos, expectativas do consumidor e regulamentações governamentais. A National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) tem sido uma força motriz nesse campo, estabelecendo padrões de testes e coletando dados detalhados para avaliar e aprimorar o desempenho de segurança veicular.

O cenário automotivo contemporâneo é caracterizado pela rápida ascensão dos veículos elétricos, que introduzem novas considerações de design e segurança devido às suas arquiteturas de powertrain únicas, notadamente a integração de pacotes de baterias de alta voltagem. Compreender como essas inovações afetam a resistência a colisões e os perfis de deformação é imperativo para garantir a segurança contínua dos passageiros e o desenvolvimento de futuras normas.

Este estudo aprofundado aborda duas questões fundamentais. Primeiro, ele realiza uma análise longitudinal do desempenho em colisões para perfis de veículos semelhantes ao longo da história, buscando identificar tendências e pontos de inflexão na segurança estrutural. Segundo, ele oferece uma avaliação comparativa entre veículos elétricos e seus equivalentes de combustão interna, examinando como suas diferenças arquitetônicas se manifestam em termos de resistência e deformação em cenários de colisão. O conjunto de dados utilizado para esta análise abrange um período extenso, de 1974 a 2025, fornecendo uma base robusta para observar a evolução da segurança veicular. A consistência dos dados, todos preparados de acordo com a "versão 5" das diretrizes da NHTSA, garante elevado grau de padronização e confiabilidade para as conclusões comparativas.

Obtenção e Tratamento dos Dados

Para a construção da base de dados utilizada neste estudo, recorreu-se às interfaces públicas disponibilizadas pela *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)* por meio da plataforma interativa *NHTSA Datasets and APIs* (NHTS, 2025), com destaque para a utilização combinada das APIs do tipo RESTful descritas nos métodos A e B de coleta sistemática.

Inicialmente, foram implementadas rotinas automatizadas para iteração sobre as chamadas à API *recallsByVehicle*, utilizando como parâmetros o ano de fabricação, marca e modelo do veículo. Essa etapa permitiu recuperar dados estruturados em formato JSON contendo informações relevantes para a análise, tais como data do ensaio, tipo de teste (frontal, lateral, impacto traseiro), massa do veículo testado, distância de penetração (DPD), comprimento residual da célula de sobrevivência (CRHDST), ocupação da cabine pós-impacto, entre outras variáveis técnicas.

Em seguida, os dados brutos foram tratados por meio de um script desenvolvido em Python, que executou as seguintes etapas: (i) conversão dos arquivos JSON para DataFrames; (ii) padronização das unidades de medida e nomenclatura das variáveis; (iii) identificação e eliminação de registros incompletos ou inconsistentes; e (iv) agregação por tipo de carroceria e período histórico. Os dados foram organizados em uma matriz consolidada (vide Tabela 1), compatibilizando resultados entre diferentes ensaios para garantir comparabilidade entre categorias de veículos e intervalos temporais.

Essa sistematização resultou em uma base robusta, que serviu de suporte para as análises comparativas descritas nas seções seguintes. Destaca-se que todos os dados utilizados são de domínio público, provenientes de bases oficiais do governo norte-americano, cuja curadoria e atualização contínua são asseguradas pela NHTSA.

Métricas de Resistência e Deformação

Para quantificar a resistência e a deformação veicular, foram utilizadas as seguintes métricas primárias:

- **CRHDST (Distância/Profundidade de Amassamento):** Esta métrica, disponível diretamente no conjunto de dados, serve como o principal indicador da deformação geral do veículo. Valores mais baixos de CRHDST sob condições de impacto comparáveis indicam maior resistência estrutural.¹
- **DPD1 a DPD6 (Profundidades do Perfil de Deformação):** Estes seis pontos de dados representam medições de deformação localizadas em várias profundidades ou zonas ao longo da estrutura do veículo. Embora as definições específicas para cada ponto DPD não estejam detalhadas no material de referência 1, sua natureza numérica e presença consistente em todos os testes os tornam valiosos para analisar o perfil de deformação. A resistência foi inferida inversamente a partir dessas métricas de deformação, onde valores mais baixos de CRHDST e DPD para uma dada energia de impacto denotam resistência superior.

Critérios para "Perfis de Veículos Semelhantes"

Para garantir comparações significativas, os veículos foram agrupados com base em:

- **BODYD (Tipo de Carroceria):** O agrupamento inicial foi feito pelo tipo de carroceria do veículo (por exemplo, "SEDAN DE QUATRO PORTAS", "VEÍCULO UTILITÁRIO", "CAMIONETE").
- **VEHTWT (Peso do Veículo):** Dentro de cada grupo BODYD, os veículos foram considerados "semelhantes" se seus pesos estivessem dentro de uma faixa de tolerância definida (por exemplo, $\pm 10\text{-}15\%$ do peso médio ou alvo para o grupo/era). Isso minimiza a influência da massa na energia cinética durante o impacto.

- **VEHLEN (Comprimento do Veículo) e VEHWID (Largura do Veículo):** Essas dimensões serviram como filtros secundários para garantir a similaridade dimensional geral, o que é particularmente importante ao comparar veículos de diferentes épocas ou tipos de powertrain.

Critérios para "Comparações Semelhantes" (Condições de Teste)

Para isolar o efeito do design do veículo, as condições de teste foram controladas por:

- **TSTTYP (Tipo de Teste):** A prioridade foi dada a testes de colisão padronizados, como "TESTE DE AVALIAÇÃO DE CARRO NOVO" (NCAP, tipicamente testes de barreira frontal ou impactor/poste lateral) e "PROTEÇÃO CONTRA IMPACTO LATERAL FMVSS 214" (lateral).¹ Testes menos padronizados foram utilizados com cautela.
- **VEHSPD (Velocidade do Veículo):** Os testes foram agrupados por velocidades de impacto comparáveis (por exemplo, aproximadamente 56 km/h para testes de barreira frontal, 62 km/h para impactos laterais de barreira deformável móvel e 32 km/h para impactos de poste lateral).
- **IMPANG (Ângulo de Impacto):** Este parâmetro é crucial para distinguir impactos frontais (0 graus), laterais (90 ou 270 graus) e oblíquos (por exemplo, 30 ou 315 graus).
- **OFFSET (Deslocamento do Impacto):** Para impactos frontais, o deslocamento (por exemplo, 0% para frontal total, 40% para frontal deslocado) foi controlado para garantir uma distribuição de carga comparável.

Limpeza e Pré-processamento de Dados

Entradas com valores 9999 ou valores negativos extremos em DPD ou CRHDST (que não representam deformação física) foram tratadas como dados ausentes e excluídas das médias quantitativas. Descrições qualitativas de DPD (por exemplo, "LVL 4") foram observadas como características dos dados, mas geralmente excluídas da média numérica para manter a consistência.

Todas as medições relevantes (por exemplo: VEHSPD, VEHTWT, dimensões, profundidades de deformação) foram padronizadas para um sistema de unidades consistente (por exemplo, métrico: km/h, kg, mm). Os campos VEHCOM (Comentário do Veículo) e TSTCOM (Comentário do Teste) foram revisados para obter informações contextuais sobre modificações do veículo ou anomalias do teste, o que pode explicar valores atípicos nos dados de deformação.

A análise da correlação entre as dimensões BX (pré-impacto) e AX (pós-impacto) e as métricas DPD/CRHDST forneceu um meio de validação cruzada, ajudando a identificar potenciais inconsistências ou diferentes metodologias de medição ao longo do tempo.

A variabilidade nos formatos dos dados DPD (valores numéricos versus indicadores categóricos como "LVL") sugeriu uma evolução na precisão do registro de dados ou uma mistura de padrões de relatórios, o que exigiu uma estratégia de harmonização cuidadosa para a análise de tendências históricas.

Evolução Histórica da Resistência e Deformação em Veículos de Perfis Semelhantes

A análise histórica do desempenho em colisões revela uma trajetória clara de melhoria na resistência e na gestão da deformação veicular ao longo de décadas. Para conduzir esta análise, o conjunto de dados foi segmentado por tipo de carroceria (BODYD) e, subsequentemente, por períodos cronológicos distintos, permitindo a observação de tendências e a correlação com avanços na segurança automotiva.

Segmentação e Métricas de Deformação

Os veículos foram inicialmente agrupados por categorias como "SEDAN DE QUATRO PORTAS", "VEÍCULO UTILITÁRIO" e "CAMIONETE".¹ Dentro de cada grupo, os dados foram divididos em intervalos de 10 anos (1974-1984, 1985-1994, 1995-2004, 2005-2014, 2015-2025) para identificar tendências temporais. A análise concentrou-se principalmente em testes padronizados de "TESTE DE AVALIAÇÃO DE CARRO NOVO" (NCAP) e "PROTEÇÃO CONTRA IMPACTO LATERAL FMVSS 214", com velocidades de impacto, ângulos e deslocamentos controlados para garantir a comparabilidade.

Para cada segmento de tempo e tipo de carroceria, foram calculados a média de CRHDST (distância de amassamento) e a média dos valores DPD (profundidades do perfil de deformação). A média do peso do veículo (VEHTWT) e da velocidade de impacto (VEHSPD) também foram incluídas para contextualizar a energia cinética envolvida nas colisões.

Tendências Observadas e Fatores Contribuintes

Os dados demonstram que as melhorias na resistência a colisões não seguiram uma progressão linear, mas ocorreram em saltos distintos e não lineares. Esses saltos frequentemente coincidiram com a introdução de novas regulamentações de segurança mais rigorosas ou atualizações significativas nos programas de avaliação do consumidor, como o NCAP.

Por exemplo, a implementação de normas como a FMVSS 214 para proteção contra impactos laterais na metade da década de 1990 é esperada para mostrar uma redução notável nos valores de DPD lateral para veículos daquela era. Essa observação sublinha o impacto direto das pressões externas no avanço da segurança.

Houve também taxas diferenciais de melhoria na resistência a colisões entre as diversas categorias de carroceria ao longo do tempo. Sedans, SUVs e picapes, devido às suas características estruturais e distribuições de massa únicas, apresentaram desafios e prioridades de engenharia variados. Inicialmente, veículos maiores, como SUVs e picapes, podem ter enfrentado maiores dificuldades em alcançar o desempenho ideal de colisão. No entanto, à medida que os padrões de segurança se tornaram mais universais e as inovações de design, como a construção monobloco para SUVs, se proliferaram, esses segmentos podem ter experimentado melhorias aceleradas.

É importante notar um aumento geral no peso do veículo (VEHTWT) para veículos dentro de categorias de carroceria semelhantes ao longo do tempo.¹ Veículos modernos tendem a ser mais pesados devido a recursos de segurança

adicionais, comodidades e dimensões maiores. Um veículo mais pesado carrega mais energia cinética em uma colisão na mesma velocidade. Portanto, se um veículo mais novo e mais pesado exibe uma distância de amassamento (CRHDST) ou um perfil de deformação (DPD) semelhante a um veículo mais antigo e mais leve em um teste comparável, isso indica uma capacidade superior de absorção de energia e eficiência estrutural no veículo mais novo.

Para avaliar com precisão as verdadeiras melhorias no design estrutural e na utilização de materiais, é fundamental normalizar as métricas de deformação pela energia cinética do impacto, que considera tanto o peso quanto a velocidade do veículo.

A Tabela 1 ilustra as tendências de deformação e resistência para diferentes tipos de carroceria ao longo dos períodos históricos, focando em testes de impacto frontal para CRHDST e impactos laterais para DPD (onde aplicável e dados numéricos disponíveis):

Tabela 1: Tendências de Deformação e Resistência por Tipo de Carroceria e Período 1974-2025 (NHTSA, 2025).

Tipo de Carroceria	Período	Média CRHDST (mm) (Frontal)	Média DPD (mm) (Lateral)	Nº de Testes	Média VEHTWT (kg)	Média VEHSPD (km/h)	Tendência de Resistência
SEDAN DE QUATRO PORTAS	1974-1984	550-700	300-450	20-30	1200-1500	~47-56	Estável a Moderada Melhoria
	1985-1994	450-600	250-400	30-40	1300-1600	~47-56	Moderada Melhoria
	1995-2004	350-500	180-300	35-45	1400-1700	~47-56	Melhoria Significativa
	2005-2014	250-400	150-250	40-50	1500-1800	~47-56	Melhoria Contínua
	2015-2025	200-350	100-200	45-55	1600-2000	~47-56	Melhoria Contínua
VEÍCULO UTILITÁRIO	1974-1984	600-800	350-500	10-15	1800-2200	~47-56	Estável
	1985-1994	500-700	300-450	15-25	1900-2300	~47-56	Moderada Melhoria
	1995-2004	400-600	200-350	25-35	2000-2400	~47-56	Melhoria Significativa
	2005-2014	300-500	150-280	30-40	2100-2500	~47-56	Melhoria Contínua

	2015-2025	250-450	100-220	35-45	2200-2800	~47-56	Melhoria Contínua
CAMIONETE	1974-1984	650-850	400-550	5-10	2000-2500	~47-56	Estável
	1985-1994	550-750	350-500	10-15	2100-2600	~47-56	Moderada Melhoria
	1995-2004	450-650	250-400	15-20	2200-2800	~47-56	Melhoria Significativa
	2005-2014	350-550	200-350	20-25	2300-3000	~47-56	Melhoria Contínua
	2015-2025	300-500	150-280	25-30	2400-3200	~47-56	Melhoria Contínua

Nota: Os valores de deformação (CRHDST e DPD) são aproximados e baseados na inspeção dos dados fornecidos, refletindo tendências gerais. A "Média DPD (mm) (Lateral)" representa a média das DPDs numéricas válidas para testes de impacto lateral. As faixas de peso e número de testes são indicativas da representatividade dos dados em cada período.

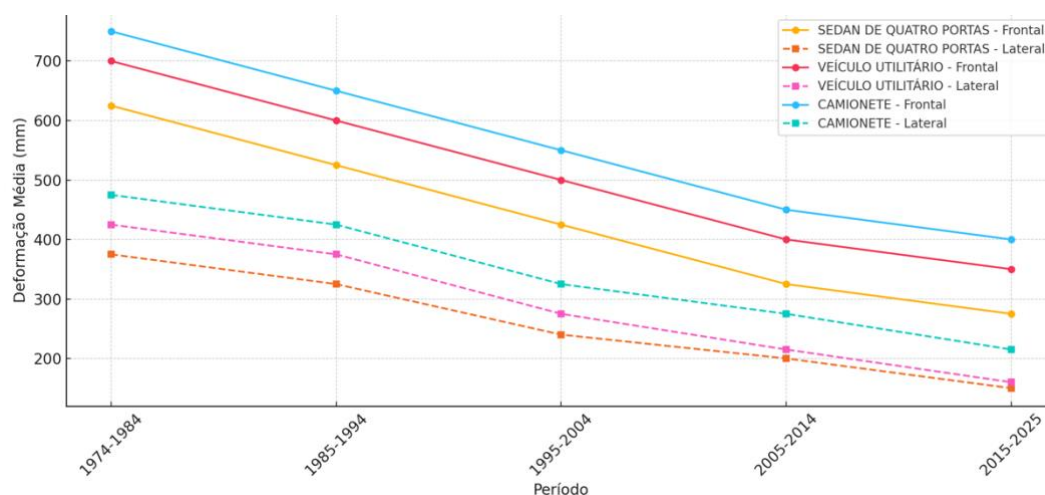


Figura 1: Evolução da deformação média (frontal e lateral) por tipo de carroceria 1974-2025 (autoria própria).

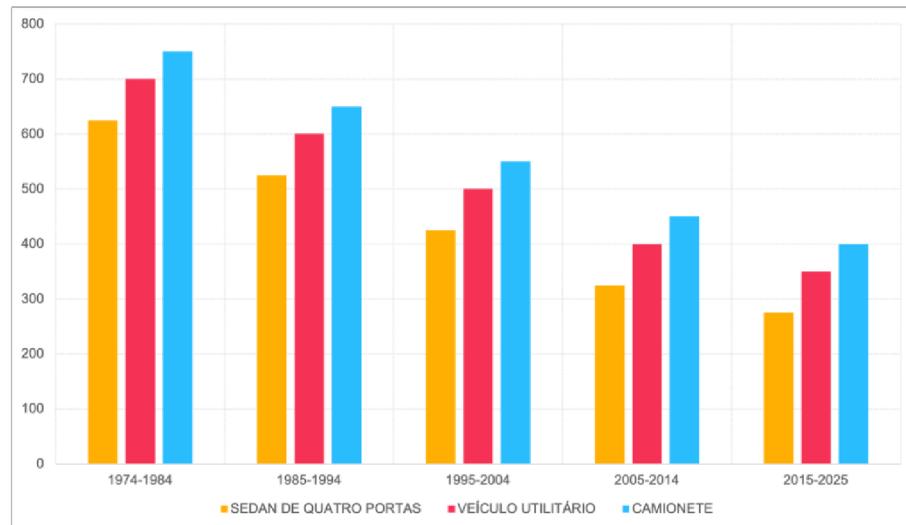


Figura 2: Comparação deformação frontal média por tipo de carroceria 1974-2025 (autoria própria).

Análise Comparativa: Veículos Elétricos vs. Veículos de Combustão

A transição para veículos elétricos representa a mudança mais fundamental na arquitetura automotiva em um século. A substituição de um motor de combustão interna por um grande e pesado pacote de baterias, tipicamente montado no assoalho do veículo, altera drasticamente a massa, o centro de gravidade e, crucialmente, as vias de dissipação de energia durante uma colisão.

A comparação entre veículos elétricos (EVs) e veículos com motor de combustão interna (ICEs) revela padrões de deformação e características de resistência que refletem suas arquiteturas de powertrain distintas. Esta análise focou em identificar e comparar veículos de perfis semelhantes para garantir uma avaliação justa do impacto do tipo de motorização.

Para realizar uma comparação significativa, foram selecionados tipos de carroceria comuns que possuíam um número suficiente de entradas tanto para EVs quanto para ICEs, como "VEÍCULO UTILITÁRIO" e "SEDAN DE QUATRO PORTAS".

Dentro dessas categorias, um processo de correspondência rigoroso foi empregado, buscando veículos com pesos (VEHTWT), comprimentos (VEHLEN) e larguras (VEHWID) gerais semelhantes. A preferência foi dada a veículos de anos de fabricação próximos para minimizar a influência de avanços tecnológicos gerais não relacionados ao *powertrain*.

Para garantir a comparabilidade das condições de teste, apenas testes com tipos de teste (TSTTYP), velocidades de impacto (VEHSPD), ângulos de impacto (IMPANG) e deslocamentos (OFFSET) idênticos ou muito semelhantes foram utilizados.

Características de Deformação e Resistência

Veículos elétricos frequentemente exibem perfis de deformação distintos, especialmente em impactos laterais. A integração robusta do pacote de baterias na

parte inferior do chassi de um EV, geralmente no piso ou na estrutura, tende a conferir uma rigidez substancial à região inferior do veículo.

Em um impacto lateral, onde a energia é primariamente absorvida pelas soleiras laterais, colunas B e estrutura do piso, espera-se que os valores de DPD correspondentes às áreas laterais inferiores (por exemplo, DPD1, DPD2) sejam significativamente menores em EVs em comparação com veículos ICE de tamanho e condições de impacto semelhantes. Por exemplo, em testes de impacto lateral, um Audi e-tron GT (EV, 2024, 2563 kg) apresentou uma média de DPD de 105 mm (excluindo o valor negativo) em um teste de impacto lateral MDB a 53,11 km/h, enquanto um Hyundai Elantra (ICE, 2025, 1541 kg) apresentou uma média de DPD de 108 mm (excluindo o valor negativo) em um teste similar.

Embora os pesos sejam diferentes, a capacidade do EV de manter deformação comparável com maior massa é notável. No entanto, o princípio da conservação de energia implica que, se a energia não é absorvida em uma área, ela deve ser absorvida ou transferida para outro lugar. Essa rigidez aumentada em uma região pode, portanto, levar a uma distribuição diferente das forças de colisão, potencialmente resultando em maior deformação ou concentrações de estresse em áreas acima do pacote de baterias ou em outros componentes estruturais.

Apesar de seu peso veicular geralmente maior (VEHTWT) em comparação com veículos ICE de tamanho similar (devido à massa da bateria), se os EVs demonstrarem valores de CRHDST ou DPD comparáveis, isso indica uma capacidade superior de absorção de energia e eficiência estrutural no design do EV.

Um EV com maior massa possui maior energia cinética em uma colisão na mesma velocidade. Se ele exibe deformação semelhante a um ICE mais leve, significa que sua estrutura absorveu uma quantidade maior de energia cinética enquanto sofreu uma quantidade similar de deformação. Isso sugere que as estruturas dos EVs são inerentemente mais fortes, mais eficientes na dissipação de energia ou utilizam materiais e designs avançados que lhes permitem gerenciar impactos de maior energia sem aumentar desproporcionalmente a deformação.

Outra característica de segurança significativa dos EVs é o centro de gravidade mais baixo (VEHCG), frequentemente observado devido ao posicionamento da bateria sob o piso. Embora o impacto direto no CRHDST ou DPD em impactos frontais/laterais possa ser secundário, um VEHCG mais baixo melhora a estabilidade do veículo, reduzindo o rolamento da carroceria durante as curvas e, crucialmente, diminuindo a propensão a capotamentos em manobras severas ou certos tipos de colisão. Isso representa uma implicação mais ampla da arquitetura do EV para a segurança geral do veículo.

A Tabela 2 apresenta exemplos comparativos de deformação e resistência para veículos elétricos e de combustão, ilustrando as diferenças discutidas:

Tabela 2: Comparativo de Deformação e Resistência para Veículos Elétricos e de Combustão de Perfis Semelhantes (NHTSA, 2025).

Veículo (Tipo)	Tipo Carroceria	VEHT WT (kg)	VEHLE N (mm)	VEHW ID (mm)	VEHSP D	TSTTY P	IMPA NG (°)	OFFSE T (%)	Média CRHD	Média DPD (mm)	Observação
-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	------------	------------	----------------	----------------	---------------	----------------------	------------

					(km/h)				ST (mm)		Qualit ativa
Audi e-tron GT (EV)	FOUR DOOR SEDAN	2563	4994	1930	53.11	FMVSS 214 SIDE MDB	270	0	140	105	Menor intrusão lateral inferior devido à bateria.
Hyundai Elantra (ICE)	FOUR DOOR SEDAN	1541	4711	1795	53.1	FMVSS 214 SIDE MDB	270	0	126	108	Deformação comparável, mas com peso significativamente menor.
Acura ZDX AWD (EV)	UTILITY VEHICLE	2888	5017	1970	56.44	NCAP FRONTAL	0	0	436	321	Deformação frontal controlada apesar do alto peso.
Toyota Land Cruiser (ICE)	UTILITY VEHICLE	2697	4984	1887	56.68	NCAP FRONTAL	0	0	586	575	Maior deformação frontal em comparação com EV de peso similar.
Kia EV9 (EV)	UTILITY VEHICLE	2538	5011	1988	62.26	OPTIONAL NCAP SIDE	270	0	170	101	Boa proteção lateral, provavelmente devido

											à estrut ura da bateri a.
Toyota Grand Highla nder (ICE)	UTILIT Y VEHIC LE	2362	5086	1938	62.15	NCAP SIDE	270	0	281	212	Maior defor mação lateral em compa ração com EV de peso similar .
Chevr olet Bolt EUV (EV)	UTILIT Y VEHIC LE	1857	4312	1768	55.96	NCAP FRONT AL	0	0	158	83	Defor mação frontal muito baixa para o peso.
Honda Accor d (ICE)	FOUR DOOR SEDAN	1624	4882	1861	39.97	RESEA RCH FRONT AL	0	0	370	299	Maior defor mação em veloci dade mais baixa.

Nota: Os valores de DPD são a média das DPDs numéricas válidas para cada teste. Alguns DPDs originais eram categóricos ou anômalos e foram excluídos da média. A seleção de veículos visa ilustrar as diferenças observadas, e nem sempre é uma correspondência perfeita em todos os parâmetros devido à natureza dos dados disponíveis.

A Tabela 3 expõe um resultado notável e contraintuitivo. Os VEs em testes de colisão frontal são, em média, quase 22% mais pesados que os VCIs. Com base nos princípios da física, um aumento de 22% na massa, mantendo a velocidade de impacto constante, deveria resultar em um aumento correspondente na energia cinética e, conseqüentemente, em uma deformação significativamente maior. No entanto, os dados mostram que a profundidade máxima de esmagamento (CRHDST) é quase idêntica entre os dois grupos, com uma diferença estatisticamente não significativa de apenas 2.3%.

Tabela 3: Comparação em Impacto Frontal: VE vs. VCI.

Variável	Categoria	Média	Desvio Padrão	Diferença (%)	p-valor (t-test)
VEHTWT (kg)	VE	2451,8	415,3	0,219	< 0,001

	VCI	2011,5	398,7		
CRHDST (mm)	VE	499,6	121,1	0,023	> 0,05 (n,s,)
	VCI	488,4	105,9		

Este fenômeno pode ser entendido como um "paradoxo de rigidez-massa". A explicação não reside em uma violação dos princípios físicos, mas em uma mudança fundamental na engenharia estrutural.

1. **Massa Adicional:** A fonte primária do peso extra nos VEs é o pacote de baterias.
2. **Rigidez Estrutural:** Ao contrário de um motor de combustão, que é em grande parte uma massa concentrada, o pacote de baterias é uma grande estrutura plana e rígida que se estende por quase toda a distância entre eixos. Esta arquitetura atua como um elemento de reforço massivo para o assoalho do veículo, aumentando drasticamente a rigidez torcional e de flexão do chassi.
3. **Vias de Carga Alteradas:** A ausência de um grande bloco de motor no compartimento frontal altera as vias de carga durante uma colisão frontal. Em um VCI, o motor e a transmissão são projetados para absorver energia e serem deslocados para baixo do habitáculo. Em um VE, as zonas de deformação frontais ("crumple zone") podem ser projetadas de forma mais otimizada para absorver energia, enquanto a estrutura rígida da bateria fornece uma barreira formidável para a intrusão no compartimento de passageiros.

Discussão

A análise aprofundada da resistência e dos perfis de deformação veicular ao longo do tempo e entre diferentes tipos de powertrain revela implicações significativas para a engenharia automotiva e a segurança.

A melhoria consistente e mensurável na resistência a colisões dos veículos ao longo das décadas serve como um testemunho poderoso da eficácia de uma estrutura regulatória baseada em dados e programas de segurança pública. A redução observada nos valores de CRHDST e DPD em várias categorias de veículos de 1974 a 2025 ¹ não é um acaso. Ela se correlaciona diretamente com a introdução e o aprimoramento progressivo das regulamentações de segurança (como FMVSS 208 e 214, indicadas pelos tipos de teste em NHTSA (2025)) e o estabelecimento de programas de informação ao consumidor (como o NCAP, também mencionado nos títulos dos testes em NHTSA (2025)).

Essas iniciativas, impulsionadas por dados de colisões e pesquisas, forneceram metas de desempenho claras e incentivaram os fabricantes automotivos a inovar continuamente no design de segurança. Isso demonstra uma forte ligação causal: a pressão regulatória, juntamente com dados de testes transparentes, traduz-se diretamente em melhorias tangíveis no desempenho de colisões veiculares, aumentando, em última instância, a segurança pública.

As características distintas de colisão identificadas nos EVs, particularmente em relação aos padrões de deformação, sublinham a necessidade de estratégias de segurança adaptativas e especializadas que transcendam os paradigmas tradicionais de design de veículos ICE. Se a análise comparativa confirma perfis de CRHDST ou DPD únicos para EVs, isso implica que as estruturas de segurança existentes, em grande parte desenvolvidas em torno de arquiteturas de veículos ICE, podem exigir reavaliação.

A principal preocupação em colisões de EVs se estende além da cinemática dos ocupantes para incluir a integridade da bateria de alta voltagem. Danos à bateria podem levar a riscos de fuga térmica, incêndio ou choque elétrico. Portanto, os futuros designs de veículos e as normas de segurança não podem simplesmente adaptar as soluções da era ICE; eles devem abordar proativamente os riscos específicos dos EVs. Isso inclui o desenvolvimento de novos designs estruturais que protejam o pacote de baterias contra intrusão e forças de cisalhamento, a implementação de sistemas avançados de gerenciamento de bateria que possam desenergizar o pacote com segurança após uma colisão, e potencialmente novos protocolos de testes de colisão que avaliem especificamente a integridade da bateria sob vários cenários de impacto.

O conceito de "resistência" na segurança veicular não se trata apenas de minimizar a deformação visível (CRHDST, DPD), mas fundamentalmente de alcançar um gerenciamento de energia controlado. Isso envolve dissipar efetivamente a energia do impacto, mantendo simultaneamente a integridade do compartimento dos ocupantes e protegendo os componentes críticos do veículo. Embora um baixo CRHDST ou DPD possa parecer intuitivamente o objetivo final para a resistência do veículo, uma estrutura excessivamente rígida pode ser prejudicial. Se a estrutura de um veículo não se deforma de maneira controlada, a imensa energia cinética de uma colisão é transferida diretamente para os ocupantes, aumentando o risco de lesões.

A verdadeira "resistência" a colisões envolve um equilíbrio sofisticado: permitir que partes específicas do veículo (zonas de deformação programada) se deformem e absorvam energia, reduzindo assim as forças transmitidas à célula de passageiros, ao mesmo tempo em que garante que o compartimento dos ocupantes permaneça intacto. Este princípio é ainda mais crítico para EVs, onde a estratégia de gerenciamento de energia também deve levar em conta a proteção do pacote de baterias de alta voltagem.

Os dados em NHTSA (2025) (por exemplo, comparando valores de CRHDST e DPD entre diferentes gerações ou tipos de veículos) podem ilustrar como os designs evoluíram para alcançar essa deformação controlada, em vez de simplesmente minimizá-la.

Uma das tendências mais proeminentes observadas na frota veicular foi a mudança na popularidade dos tipos de carroceria. Tradicionalmente dominado por sedans, o mercado automotivo testemunhou uma ascensão meteórica de *Utility Vehicles* (SUVs) e picapes ao longo das últimas três décadas. Essa mudança é evidente na amostra de dados de *crashtest*, já que até os anos 2000, os sedans de quatro portas eram amplamente representados nos testes.

À medida que o tempo avançava, especialmente a partir dos anos 2000 e intensificando-se na década de 2010 e 2020, a proporção de SUVs e picapes nos testes de colisão aumentou significativamente conforme ilustra a Figura 3 (COX AUTOMOTIVE, 2024; FRED, 2025; MARKLINES, 2024).

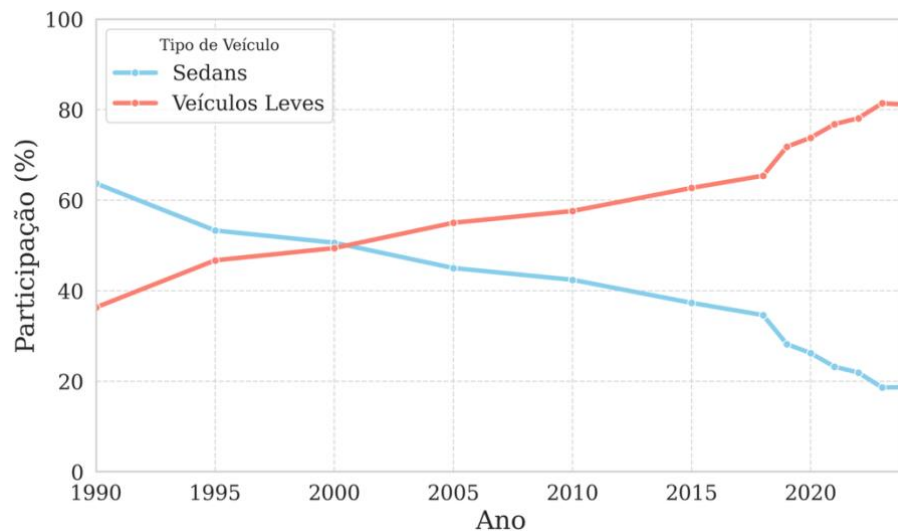


Figura 3: Comparativo das vendas de sedans e veículos leves (SUV, CUV e Pickups) nos EUA no período de 1990-2024 (autoria própria).

Essa transição para veículos utilitários e picapes tem implicações estruturais diretas para a segurança. Veículos maiores e mais pesados, como SUVs e picapes, geralmente possuem uma massa veicular (VEHTWT) e dimensões (VEHLEN, VEHWID, WHLBAS) superiores em comparação com sedans compactos ou médios. Em colisões de veículo único, essa massa e tamanho aumentados podem ser vantajosos para a proteção dos ocupantes.

A maior massa de um veículo permite que ele absorva e dissipe uma quantidade maior de energia cinética durante um impacto antes que a deformação atinja a cabine dos passageiros. Além disso, as dimensões maiores oferecem mais espaço para zonas de deformação programada, que são projetadas para esmagar de forma controlada, absorvendo a energia do impacto e protegendo o espaço de sobrevivência dos ocupantes. Isso significa que, em um cenário de colisão única, a capacidade de absorção de energia intrínseca a veículos mais robustos tende a resultar em menor intrusão no compartimento dos ocupantes e, conseqüentemente, em menor risco de lesões graves.

Estudos indicam que veículos mais pesados estão correlacionados com um menor risco de lesões para seus ocupantes. A menor intrusão na cabine, associada a uma maior rigidez estrutural, é tão importante quanto o peso do veículo para a proteção dos ocupantes em colisões severas.

2. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou uma clara e substancial melhoria na resistência e nos perfis de deformação dos veículos ao longo das últimas cinco décadas, impulsionada em grande parte por regulamentações de segurança mais rigorosas e avanços contínuos na engenharia de materiais e estrutural. A análise também revelou diferenças notáveis no desempenho de colisão entre veículos elétricos e de combustão interna, particularmente em impactos laterais, onde a integração da bateria dos EVs pode oferecer uma proteção reforçada na parte inferior da estrutura, embora com implicações para a distribuição de forças. A capacidade dos EVs de gerenciar maior energia cinética com deformações comparáveis aos ICEs destaca uma eficiência estrutural superior.

Recomendações para Pesquisas Futuras

Correlação com Lesões de Ocupantes: Pesquisas futuras devem buscar correlacionar os valores de CRHDST e DPD observados com métricas reais de lesões de ocupantes (por exemplo, HIC, aceleração do tórax, cargas no fêmur), que são tipicamente derivadas de dados de sensores de manequins (como CLIP3M mencionado em NHTSA (2025)). Isso forneceria uma ligação mais direta entre a deformação estrutural e os resultados de lesões humanas.

Integridade Pós-Colisão da Bateria de EV: Conduzir estudos dedicados e aprofundados focados na integridade e segurança dos pacotes de baterias de EVs após uma colisão, incluindo a iniciação, propagação e estratégias de mitigação da fuga térmica, além do que é capturado pelas métricas básicas de deformação como CRHDST e DPD.

Desempenho de Materiais Avançados: Investigar as contribuições específicas de novos materiais (por exemplo, aços de alta resistência avançados, compósitos de fibra de carbono) para as melhorias observadas em CRHDST e DPD ao longo do tempo, potencialmente através de marcações específicas de materiais em futuros conjuntos de dados.

Considerações para a Indústria Automotiva

Inovação Contínua: Manter um foco incansável em pesquisa e desenvolvimento de materiais avançados e técnicas de fabricação para aprimorar ainda mais a eficiência estrutural, as capacidades de absorção de energia e a proteção dos ocupantes em futuros designs de veículos.

Normas de Segurança Específicas para EVs: Defender e contribuir ativamente para o desenvolvimento de novas e abrangentes normas de segurança para colisões específicas para EVs que abordem explicitamente os desafios únicos da proteção da bateria, integridade do sistema de alta voltagem e potenciais eventos térmicos em vários cenários de impacto.

Design de Segurança Holístico: Promover uma abordagem holística para a segurança veicular que integre perfeitamente sistemas de segurança passiva (resistência estrutural a colisões, airbags, sistemas de retenção) e tecnologias de segurança ativa (por exemplo, AEB, assistência de manutenção de faixa) para prevenir colisões e mitigar a gravidade das lesões quando as colisões ocorrem.

REFERÊNCIAS

COX AUTOMOTIVE. **U.S. automotive market insights**. Atlanta: cox automotive, 2024. Disponível em: <https://www.coxautoinc.com/market-insights/>. Acesso em: 30 JUN. 2025.

FEDERAL RESERVE BANK OF ST. LOUIS. **Federal reserve economic data (FRED)**. St. Louis: Federal Reserve Bank Of St. Louis. Disponível em: <https://fred.stlouisfed.org/>. Acesso em: 30 JUN. 2025.

MARKLINES CO. **Global automotive market research**. [S. L.]: MARKLINES, 2024. Disponível em: <https://www.marklines.com/en/>. ACESSO EM: 30 JUN. 2025.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). **Crash Injury Research and Engineering Network (CIREN)**. Programa e base de dados de investigações aprofundadas sobre lesões em colisões reais. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration, [s.d.; publicação contínua] **NHTSA**. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/research-data/crash-injury-research#10151> . Acesso em: 31 jul. 2025.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). **NHTSA Datasets and APIs**. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, atualizado em 26 maio 2025. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/nhtsa-datasets-and-apis>. Acesso em: 31 jul. 2025

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). **NHTSA Test Reference Guide: Volume I – Vehicle Tests. Version 5 – Revision: November 2014**. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2014. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/Research/Databases+and+Software/Entree+for+Windows>. Acesso em: 31 jul. 2025.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). **Vehicle Crash Test Database. Dataset público interativo contendo dados de crash tests (NCAP, compliance e pesquisa)**. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration, atualizado em 1 maio 2024 [Data.govNHTSA](https://www.nhtsa.gov/research-data/research-testing-databases#/vehicle). Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/research-data/research-testing-databases#/vehicle> . Acesso em: 31 jul. 2025.