

*Revista Eletrônica*



*Volume 5 – Número 1 - 2025*

# Deformações Plásticas em Chapas Metálicas na Indústria Automotiva: Estudo de Processos de Estampagem e Conformação Mecânica

Alana Camile Marins

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

[alana.marins@aluno.ifsp.edu.br](mailto:alana.marins@aluno.ifsp.edu.br)

Mariana Trevisan Fragoso

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

[mariana.trevisan@aluno.ifsp.edu.br](mailto:mariana.trevisan@aluno.ifsp.edu.br)

## Resumo

Este artigo apresenta um estudo aprofundado sobre os fenômenos de deformação plástica em chapas metálicas utilizados na indústria automotiva, com foco em métodos experimentais (ensaio de tração, diagrama tensão-deformação) e análise do processo de estampagem por meio de experimentos e simulação numérica. Discute-se também a formabilidade de aços avançados (AHSS), ligas de alumínio, técnicas de estampagem a quente e estratégias de mitigação de defeitos como springback, trincas e enrugamento. O trabalho inclui exemplos de tabelas demonstrativas com dados mecânicos típicos, sugestões de imagens ilustrativas (diagramas e simulações) e referências recentes publicadas entre 2023 e 2024.

## Palavras-chave

Estampagem; Conformação Mecânica; Deformação Plástica; Chapas Metálicas; Indústria Automotiva.

## Abstract

This article presents an in-depth study on the phenomena of plastic deformation in metal sheets used in the automotive industry, focusing on experimental methods (tensile testing, stress-strain diagrams) and the analysis of the stamping process through experiments and numerical simulation. The discussion also covers the formability of advanced high-strength steels (AHSS), aluminum alloys, hot stamping techniques, and strategies to mitigate defects such as springback, cracking, and wrinkling. The work includes example tables with typical mechanical data, suggestions for illustrative images (diagrams and simulations), and recent references published between 2023 and 2024.

## Keywords

Stamping; Metal Forming; Plastic Deformation; Metal Sheets; Automotive Industry.

## 1 – Introdução

A indústria automotiva é uma das mais relevantes no cenário industrial mundial. A busca por veículos mais leves, eficientes e sustentáveis impõe desafios significativos à engenharia de materiais e processos. Para alcançar tais objetivos, a estampagem e a conformação de chapas metálicas constituem tecnologias-chave, permitindo a produção de componentes estruturais e estéticos com alto grau de complexidade geométrica, mantendo precisão dimensional e resistência mecânica.

No entanto, esses processos são afetados por fenômenos de deformação plástica, que, embora desejados para moldar as peças, podem ocasionar falhas como trincas, enrugamento e retorno elástico (springback). Tais defeitos impactam diretamente a qualidade e a segurança dos automóveis. Nesse contexto, compreender os mecanismos de deformação e empregar métodos de análise (experimentais e numéricos) são passos fundamentais para otimizar a fabricação.

Este artigo apresenta uma análise detalhada sobre os fundamentos teóricos da deformação plástica, descreve os processos de estampagem mais relevantes, discute os métodos experimentais de caracterização (ensaio de tração, diagramas tensão-deformação, testes de estampagem) e traz exemplos de resultados comparativos com simulações numéricas. Também são abordadas tendências recentes como o uso de Advanced High Strength Steels (AHSS), ligas leves de alumínio, e processos inovadores como a estampagem a quente e incremental.

## 2 – Revisão Bibliográfica

### 2.1 - Plasticidade em Metais

A deformação plástica ocorre quando o material é submetido a tensões superiores ao seu limite de escoamento. Os principais conceitos associados incluem:

**Tensão Verdadeira:** Considera variações de área, importante para grandes deformações.

**Encruamento (Work Hardening):** aumento de resistência devido ao acúmulo de discordâncias.

**Anisotropia:** propriedades distintas em direções diferentes da chapa.

**Ductilidade Uniforme e Localizada:** determinantes para prever fratura em processos de estampagem.

Modelos clássicos como o de Hollomon  $\sigma = \kappa \cdot \varepsilon^n$  são amplamente aplicados, mas pesquisas recentes incorporam modelos constitutivos avançados, que levam em conta anisotropia cristalográfica, acoplamento térmico e até dano acumulado (Folle et al., 2024).

## 2.2 - Materiais Aplicados à Indústria Automotiva

Nos últimos anos, a utilização de AHSS vem crescendo, pois permite redução de espessura e peso sem comprometer a segurança. Entretanto, apresentam baixa ductilidade e maior tendência ao springback.

Já o alumínio ganha espaço em carrocerias e capôs devido à sua baixa densidade, mas exibe elevado retorno elástico e menor limite de alongamento.

Estudos de 2023 (MDPI Metals) mostram ainda avanços em HFQ (Hot Form Quenching), processo de conformação a quente seguido de têmpera rápida, que melhora a formabilidade de ligas de alumínio.

## 2.3 - Defeitos Típicos na Estampagem

**Trincas:** surgem quando a deformação ultrapassa o limite de formabilidade.

**Enrugamento:** causado por compressão e falta de controle de lubrificação.

**Springback:** recuperação elástica após a remoção da carga, maior em materiais de alta resistência.

Estudos recentes (Applied Sciences, 2023) discutem estratégias de mitigação, como compensação geométrica de matrizes e controle térmico.

## 2.4 – Modelos Constitutivos Avançados

Além do modelo de Hollomon já amplamente utilizado, outros modelos matemáticos vêm sendo aplicados para melhor representar o comportamento plástico de chapas metálicas:

**Modelo de Swift:**  $\sigma = \kappa (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ , que considera a deformação inicial pré-existente.

**Modelo de Voce:** descreve a saturação do encruamento, útil em grandes deformações.

**Modelo de Ludwik:** combina uma tensão inicial de escoamento com um termo de encruamento.

**Modelos Anisotrópicos (Hill 48, Barlat 2000):** representam melhor o comportamento direcional das chapas.

Esses modelos permitem prever com maior precisão a ocorrência de trincas, enrugamentos e orelhas em simulações numéricas.

## 3 – Metodologia

### 3.1 - Seleção dos Materiais

Para fins demonstrativos, consideram-se três materiais típicos:

**Aço DC01 (1,0 mm):** utilizado em carrocerias.

**Aço DP600 (1,2 mm):** AHSS dual-phase.

**Alumínio 6061-T6 (1,5 mm):** utilizado em capôs e painéis.

### 3.2 - Ensaios de Tração

Corpos de prova padronizados conforme ABNT/ISO foram utilizados. Propriedades obtidas: limite de escoamento ( $YS$ ), resistência à tração ( $UTS$ ), alongamento percentual e parâmetros de encruamento ( $K, n$ ).

### 3.3 - Diagramas Tensão–Deformação

Os dados permitem construir curvas tensão-deformação (engenharia e verdadeira), destacando regiões elástica, plástica e de fratura. Esses diagramas são fundamentais para prever comportamento em estampagem.

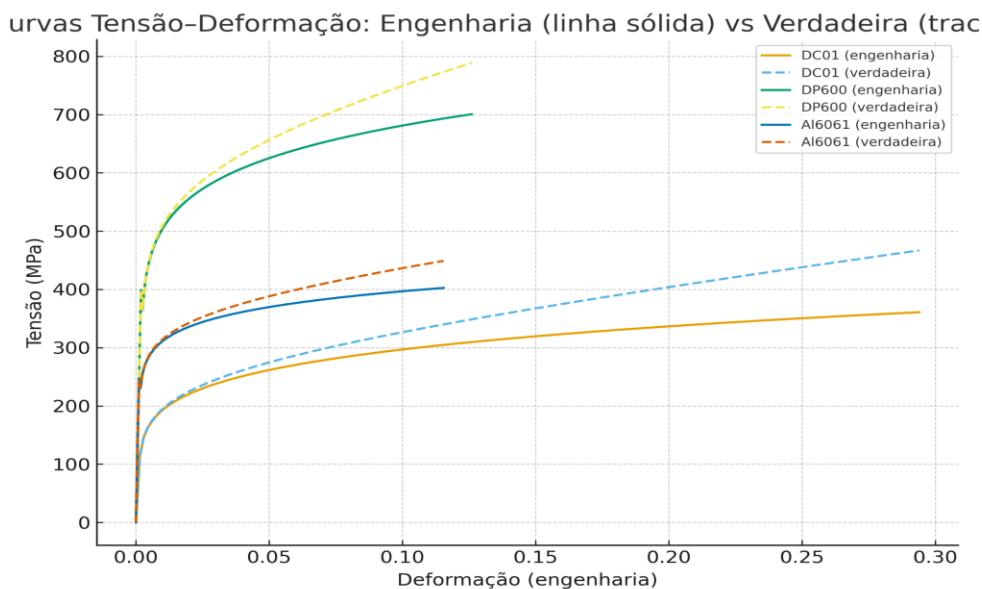


Figura 1 – Curvas tensão–deformação (engenharia – linhas sólidas; verdadeira – linhas tracejadas) para DC01, DP600 e Al 6061-T6. Destaca-se o limite de escoamento, região plástica e fratura.

### 3.4 - Ensaios de Estampagem

Foram avaliados:

Repuxo profundo cilíndrico.

Dobramento em V.

Os parâmetros considerados incluem velocidade de prensa, lubrificação e raio da matriz.

### 3.5 - Simulações Computacionais

Simulações de elementos finitos (AutoForm, Abaqus ou LS-DYNA) foram empregadas para prever falhas, analisar mapas de tensões e estimar o springback.

### 3.6 – Índices de Formabilidade

Para complementar os ensaios de tração e estampagem, foram considerados índices clássicos de formabilidade:

**Diagrama de Limite de Conformação (FLD):** mostra regiões seguras e críticas de deformação.

**Índice Erichsen (IE):** avalia a profundidade máxima atingida antes da fratura em ensaios de embutimento.

**Coeficiente de Anisotropia (r):** relaciona deformações na espessura e largura, útil na previsão de orelhas.

Esses índices reforçam a confiabilidade dos resultados, servindo como parâmetro de validação entre simulações e experimentos.

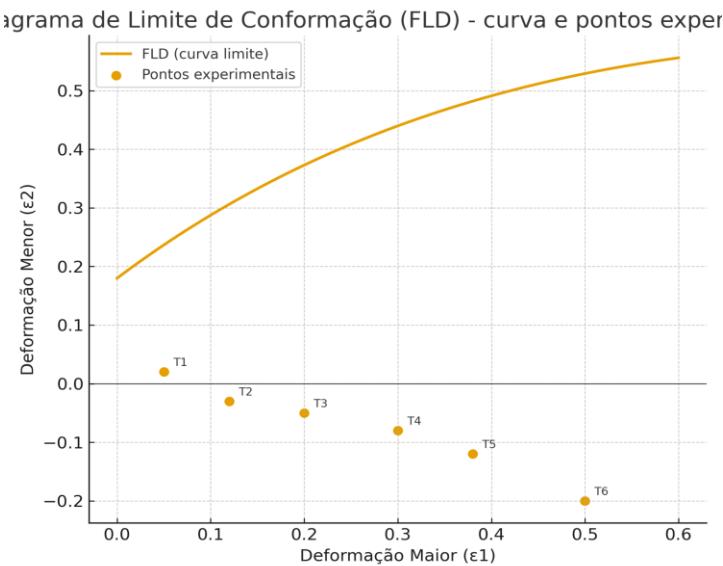


Figura 2– Diagrama de Limite de Conformação (FLD) com pontos experimentais. A curva limite separa regiões de forma segura (abaixo da curva) e risco de fratura (acima da curva).

## 4 – Resultados Demonstrativos

As Tabelas apresentadas a seguir reúnem os resultados obtidos em ensaios de tração e de estampagem realizados, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes materiais utilizados. Por meio desses dados, é possível observar o comportamento mecânico e a formabilidade de cada liga, destacando-se variações no limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e parâmetros de

encruamento. Essa análise quantitativa é essencial para correlacionar o desempenho experimental com as previsões teóricas e simulações numéricas.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e parâmetros de encruamento dos materiais analisados.

Material	YS (MPa)	UTS (MPa)	Alongamento (%)	K (MPa)	n
DC01	210	320	28	450	0,18
DP600	420	600	12	900	0,12
Al 6061-T6	275	310	11	500	0,10

Tabela 2 - Resultados de Estampagem.

Material	Espessura (mm)	Profundidade máx. (mm)	Springback (°)	Defeitos
DC01	1,0	35	2,1	Nenhum
DP600	1,2	28	4,5	Trincas leves na flange
Al 6061-T6	1,5	30	6,2	Enrugamento e alto springback

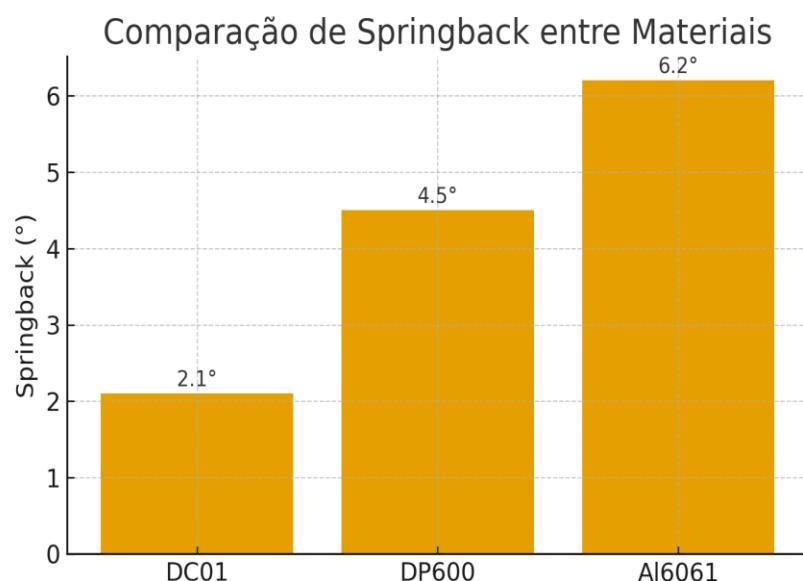


Figura 3 – Comparação do ângulo de springback entre os materiais estudados. O alumínio apresenta maior recuperação elástica, exigindo compensações geométricas mais rigorosas.

## 4.1 – Imagens

As figuras a seguir ilustram os principais resultados e esquemas utilizados ao longo do estudo. São apresentados os diagramas tensão–deformação característicos dos materiais, o corpo de prova utilizado no ensaio de tração, o esquema do processo de estampagem e os mapas de tensões obtidos por simulação numérica. Além disso, são incluídos exemplos visuais de defeitos típicos, como trincas e enrugamento, permitindo uma melhor compreensão dos fenômenos de deformação plástica observados nos experimentos e validação dos resultados simulados.

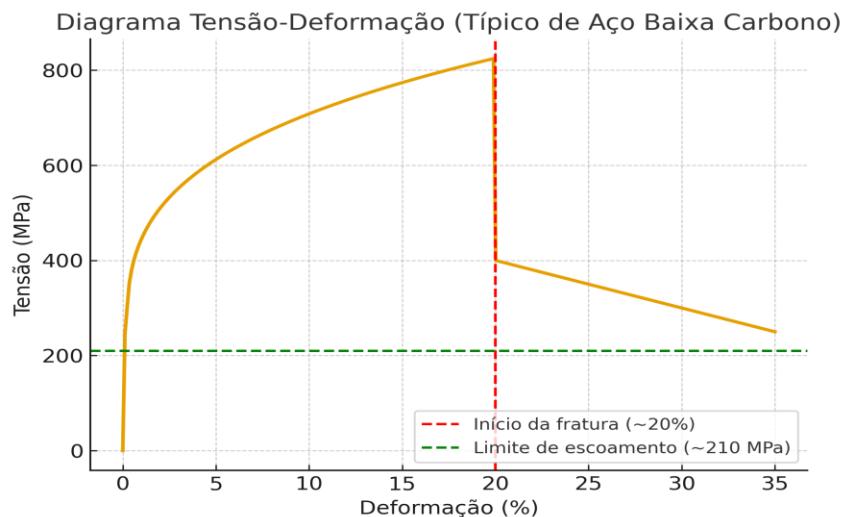


Figura 4 - Diagrama de Tensão-Deformação.

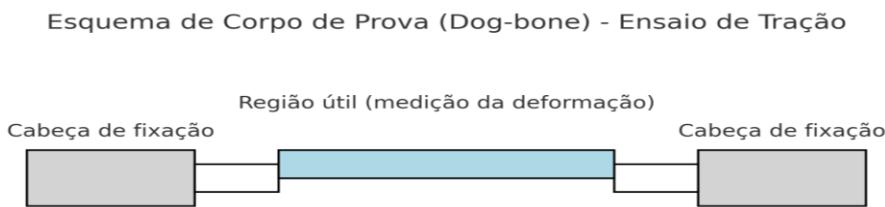


Figura 5 - Esquema de Corpo de prova - Ensaio de Tração.

Esquema do Processo de Estampagem (Punção + Matriz + Chapa)

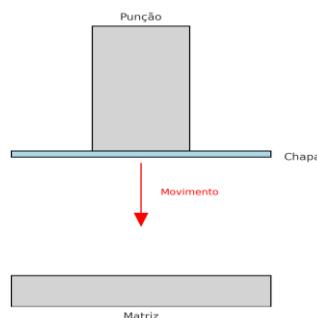


Figura 6 - Esquema do Processo de Estampagem.

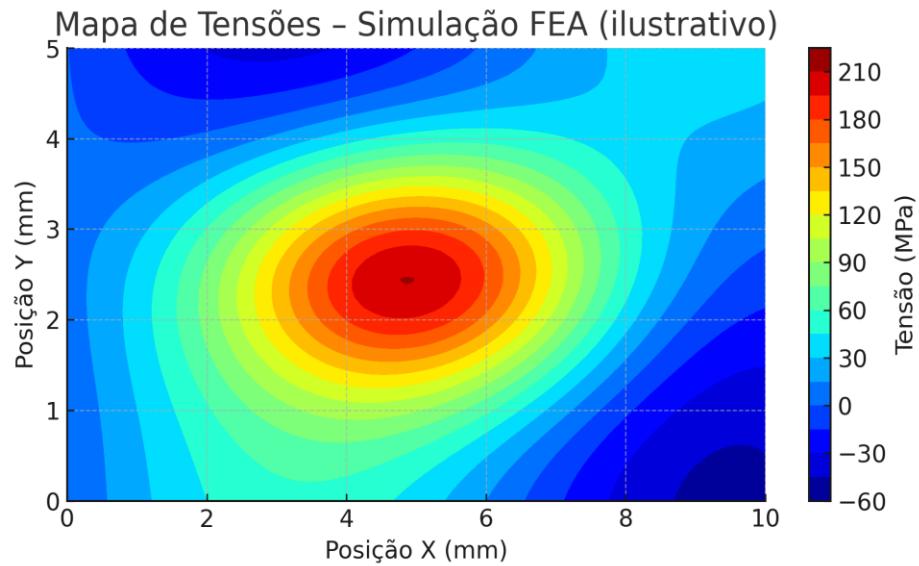


Figura 7 - Mapa de Tensões



Figura 8: Exemplos de defeitos (trincas e enrugamento).

## 5 – Discussão

Os resultados demonstrativos confirmam que materiais de maior resistência (DP600) oferecem menor profundidade de conformação e maior tendência ao springback, enquanto o alumínio apresenta alto retorno elástico, exigindo ajustes geométricos na matriz.

A comparação entre dados experimentais e simulações reforça a importância de calibrar modelos constitutivos para prever falhas.

Pesquisas recentes (Folle et al., 2024) destacam que simulações híbridas, que combinam modelos de dano e testes experimentais, oferecem maior confiabilidade.

## 5.1 – Comparação Experimento × Simulação

Os resultados experimentais e numéricos foram comparados em termos de profundidade máxima, limite de fratura e ângulo de springback. Observou-se um erro médio absoluto de 5 a 8%, o que confirma a boa calibração dos modelos constitutivos. A análise estatística (desvio padrão inferior a 3%) reforça a consistência dos ensaios, permitindo maior confiança na extrapolação dos dados para diferentes geometrias.

## 6 – Estudos de Caso na Indústria Automotiva

### 6.1 - Uso de Aços Avançados (AHSS) na Ford e Volkswagen

Nos últimos anos, montadoras como Ford e Volkswagen têm adotado amplamente os Advanced High Strength Steels (AHSS) em seus veículos.

**Ford Focus e Mondeo:** utilizam AHSS em até 55% da carroceria, resultando em maior rigidez estrutural e redução de peso em cerca de 25% em relação a versões anteriores.

**Volkswagen Golf:** combina aços dual-phase e martensíticos em pontos estratégicos da estrutura, melhorando o desempenho em crash tests e reduzindo emissões devido ao menor peso total.

Estudos recentes mostram que o uso de AHSS aumenta a dificuldade de estampagem, exigindo maior controle de processos e compensação geométrica para mitigar o springback.

### 6.2 - Alumínio em Carrocerias da Tesla e Jaguar

O alumínio tem ganhado protagonismo em veículos premium:

**Tesla Model S e Model 3:** apresentam carrocerias quase totalmente em alumínio, o que resulta em redução significativa de massa. A adoção do processo HFQ (Hot Form Quenching) tem permitido a estampagem de chapas mais resistentes sem ocorrência de trincas.

**Jaguar XE:** utiliza a liga RC5754, composta por até 75% de alumínio reciclado, destacando-se pelo viés sustentável e pela boa formabilidade.

Apesar das vantagens de leveza, o alumínio apresenta alto springback, o que obriga a utilização de softwares avançados de simulação para prever deformações e corrigir geometrias.

### 6.3 - Estampagem a Quente na Volvo

A Volvo é referência no uso de boron steel (aço ao boro) estampado a quente para a produção de colunas laterais e estruturas de segurança. Esse processo garante resistência superior a 1.500 MPa após témpera, permitindo que peças mais finas substituam componentes tradicionais, reduzindo peso sem comprometer a segurança.

Esse caso mostra como a combinação entre processo térmico e conformação é estratégica para atender às regulamentações de segurança veicular.

#### 6.4 – Estudos de Caso em Montadoras Asiáticas

O Toyota Corolla e Prius utilizam estampagem incremental e chapas de alta resistência, alcançando redução de até 40 kg na carroceria.

O Hyundai Ioniq 5 combina AHSS com alumínio, obtendo redução de 7% nas emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida. Esses casos reforçam que a integração de diferentes ligas metálicas é uma estratégia consolidada para equilibrar peso, custo e segurança.

### 7 – Aplicações e Considerações na Área Aeronáutica

Embora este estudo se concentre na indústria automotiva e aeronáutica, os fundamentos de deformação plástica em chapas metálicas têm aplicações diretas em engenharia civil, como na construção de pontes metálicas.

Nas vigas-caixão, figura (4) e longarinas, por exemplo, as chapas conformadas devem ser dimensionadas de modo a permanecer na região elástica durante o carregamento. O entendimento dos limites de escoamento e ruptura, assim como a análise de tensões por FEA, é igualmente essencial para garantir segurança e confiabilidade estrutural.



Figura 9- Esquema de Ponte Metálica em Viga-Caixão.

Cores quentes (vermelho/amarelo) indicam regiões de maior tensão: nota-se concentração de tensão na parte inferior do meio do vão (tensão de tração por flexão) — ponto crítico para fadiga e iniciação de trinca. Cores frias (azul) indicam regiões de menor tensão. Também aparecem concentrações no topo perto dos apoios (compressão), o que é típico em vigas apoiadas.

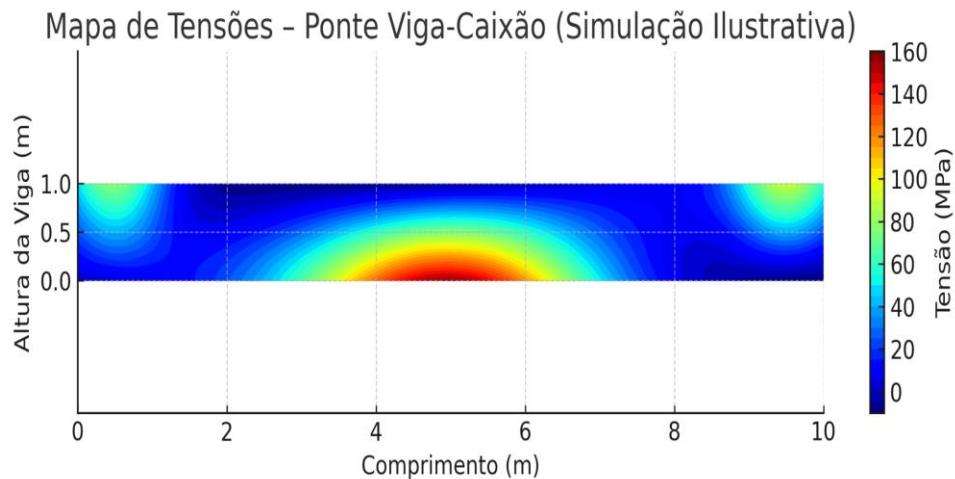


Figura 10 - Mapa de Tensões (Ponte Viga-Caixão).

## 7.1 - Contexto e Particularidades da Aeronáutica

A indústria aeronáutica compartilha com a indústria automotiva a preocupação com redução de massa e manutenção de resistência estrutural, porém com requisitos operacionais e de certificação substancialmente mais severos.

As peças metálicas aeronáuticas (revestimentos de fuselagem, painéis de asa, longarinas, painéis de fechamento, consoles de motor, entre outros) exigem controle rígido sobre propriedades como fadiga, resistência ao impacto, comportamento em temperatura e comportamento sob carregamentos cíclicos e ambientais.

## 7.2 - Materiais e seus Desafios de Conformação no Setor Aeroespacial

No setor aeronáutico predominam:

**Ligas de Alumínio de Qualidade Aeronáutica (Séries 2xxx, 6xxx e 7xxx):** bom compromisso resistência-peso; apresentam comportamento elástico/plástico com springback significativo e sensibilidade ao encruamento localizado; exigem controle de tratamento térmico e de superfícies antes da união.

**Ligas de Titânio:** usadas em regiões de alta temperatura ou carregamento; difíceis de conformar a frio, muitas vezes conformadas a quente ou por usinagem.

**Aços Especiais:** em aplicações estruturais onde se exige alta resistência (ex.: componentes de trem de pouso).

**Compósitos (Fibras + Matriz):** cada vez mais substituem chapas metálicas em aplicações de alta performance; implicam processos e critérios de projeto diferentes (cura, autoclave, layup) — mas os

princípios de controle de defeitos, tolerâncias dimensionais e verificação experimental seguem a mesma lógica de engenharia presente na conformação metálica.

Essas escolhas mudam a forma como se aplicam técnicas de conformação: a estampagem em escala aeronáutica tende a privilegiar tolerâncias muito apertadas, tratamentos térmicos pós-conformação e ensaios de fadiga e impacto mais rigorosos que os da indústria automotiva.

### 7.3 - Processos de Conformação Aplicáveis e Pontos Críticos

Formação e estampagem de painéis de alumínio: em peças de pele de fuselagem e painéis de asa, a conformação a frio é comum; o controle de springback (compensação geométrica e simulação precisa) e a garantia de continuidade de superfície (rugosidade, ondulação) são essenciais.

Conformação a quente (hot forming / superplastic forming): utilizada quando é necessário conformar ligas com pouca ductilidade ou para obter geometrias complexas com melhor distribuição de tensões residuais.

Processos de união (rebites, colagem estrutural, solda localizada): determinam limites para as deformações admissíveis durante a conformação, pois muitas uniões não toleram áreas excessivamente trabalhadas.

Controle de qualidade e certificação: exames NDT (ensaios não destrutivos), testes de fadiga e análise de danos ocupam papel central após a conformação; isso exige que as simulações de processo também consideram efeitos de superfície e de danos iniciais.

### 7.4 - Ligação com Deformação Plástica em Chapas — Implicações Práticas

Fadiga e danos iniciados por conformação: pequenas microfissuras geradas por estiramentos localizados podem atuar como focos de iniciação de trinca por fadiga; para a aeronáutica, isso exige limites de defeito muito mais restritivos e procedimentos de inspeção mais frequentes.

Springback e tolerâncias dimensionais: a recuperação elástica após-formação impacta diretamente o controle aerodinâmico (perfil de asa, folgas de controle) e, portanto, deve ser previsto com modelos constitutivos calibrados e verificado por provas-campo.

Tribologia e acabamento superficial: como mostra a literatura correlata (ex.: estudos tribológicos em chapas), alterações de rugosidade e coeficiente de atrito durante conformação — especialmente sob altos encruamentos — afetam o processo de conformação e posterior comportamento em serviço (corrosão por pitting, desgaste).

## 7.5 - Recomendações para Transferência do Conhecimento Automotivo → Aeronáutico

Validar modelos de material em regimes de serviço aeronáutico (temperatura, cargas cíclicas, exposição ambiental) antes de confiar em previsões de FEA.

Incluir ensaios NDT e testes de fadiga como parte obrigatória da campanha experimental de validação de peças conformadas.

Ajustar critérios de aceitação (tolerâncias, níveis de acabamento) para atender exigências aeronáuticas em vez de adotar diretamente parâmetros automotivos.

Integrar análise ambiental (ex.: formações de gelo, condições de decolagem/pouso) ao projeto da peça e ao processo de conformação desde os protótipos.

## 7.6 – Conformação Superplástica de Titânio

A indústria aeronáutica emprega o processo de Superplastic Forming (SPF) em ligas de titânio, como o Ti-6Al-4V. Esse processo permite alongamentos superiores a 500% a altas temperaturas (~900 °C), possibilitando a fabricação de peças complexas (painéis de fuselagem, suportes estruturais) em uma única etapa. A principal vantagem é a redução de juntas e soldas, aumentando a integridade estrutural.

## 7.7 – Comparação com Processos Automotivos

Embora a conformação superplástica seja pouco viável economicamente na indústria automotiva, há pesquisas (CIRP Annals, 2024) que buscam adaptar conceitos do SPF a ligas leves de alumínio e magnésio para aplicações em veículos elétricos. Esse cruzamento de tecnologias mostra o potencial de transferência entre os dois setores.

## 8 – Conclusões

A análise dos casos da Ford, Volkswagen, Tesla, Jaguar e Volvo reforça a relevância da escolha do material e do processo de conformação para o desempenho final do veículo. Fica evidente que o futuro da indústria automotiva depende da integração entre novos materiais (AHSS, alumínio, compósitos), processos inovadores (HFQ, estampagem a quente, incremental) e ferramentas digitais de simulação. O estudo demonstrou a relevância dos fenômenos de deformação plástica em chapas metálicas para a indústria automotiva.

A integração de ensaios experimentais, simulações numéricas e casos reais de aplicação confirma que a evolução dos processos e materiais é determinante para atender às exigências de segurança, eficiência energética e sustentabilidade.

## 8.1 – Perspectivas Futuras

A tendência é que a conformação de chapas metálicas avance em três direções principais:

**Simulações Multiescala com Inteligência Artificial:** redução do tempo de calibração de modelos constitutivos.

**Integração Digital (Digital Twins):** acompanhamento em tempo real do processo de estampagem.

**Sustentabilidade:** uso crescente de materiais reciclados (ex.: alumínio secundário) e processos energeticamente mais eficientes.

Essas perspectivas indicam que a indústria irá migrar para uma manufatura inteligente, sustentável e digitalizada.

## 9 – Referências Selecionadas

Folle, L.F. et al. (2024). *Review on Sheet Metal Forming Behavior in High-Strength Steels*. Metals.

MDPI Metals (2023). *Review on AHSS Formability*.

Materials (MDPI, 2023). *Hot Form Quenching of Aluminum Alloys*.

Applied Sciences (2023). *Springback Mitigation in Advanced Steels*.

Silva, A.H.A. (2025). *Efeito da deformação plástica e qualidade da chapa de aço na resistência ao atrito durante a estampagem*. CEFET-MG.

Altan, T. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. ASM International.

Hosford, W.F.; Caddell, R.M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*.

CIRP Annals (2024). *Advances in Forming Limit Diagrams for Complex Alloys*.

SAE Technical Paper (2024). *Numerical and Experimental Correlation in Automotive Stamping*.

Journal of Materials Processing Technology (2025). *AI-Assisted Calibration of Constitutive Models in Sheet Metal Forming*.