

## AÇOS TRIP – CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO\*

João Francisco Batista Pereira<sup>1</sup>  
Gleyder Oliveira Bustamante<sup>2</sup>  
Rafael Fagundes Ferreira<sup>3</sup>

### Resumo

Nos últimos anos a indústria automotiva tem evoluído de forma significativa em relação à preservação ambiental (redução da emissão de CO<sub>2</sub>) e com respeito à segurança veicular. A Usiminas, alinhada com esse direcionamento, tem realizado diversos estudos visando obter novos produtos de alta resistência mecânica que possibilitem a redução do peso dos veículos e diminuição do consumo de combustível, além do aumento da segurança. O aço TRIP, desenvolvido e recentemente comercializado pela Usiminas, é um exemplo dessa nova geração de produtos avançados, que conciliam alta resistência mecânica e alta capacidade de conformação. O trabalho apresenta as características do aço TRIP desenvolvido pela Usiminas assim como os resultados de aplicação em peças automotivas da Fiat Chrysler Automobiles.

**Palavras-chave:** Segurança veicular; Aços TRIP; Propriedades mecânicas.

### TRIP STEELS – CHARACTERISTICS AND APPLICATION

### Abstract

In recent years the automotive industry has evolved significantly in relation to environmental protection (reduction of CO<sub>2</sub> emissions) and with respect to vehicle safety. Usiminas, in line with the new trends, has conducted several studies to obtain new high-strength steel products that enable the reduction of vehicle weight, decrease fuel consumption and increased safety. TRIP steels, recently developed by Usiminas, are an example of this new generation of advanced steels, which conciliate high mechanical strength with formability capacity. The paper presents the characteristics of the TRIP steels developed by Usiminas as well as the applications results in automotive parts of Fiat Chrysler Automobiles.

**Keywords:** Vehicle safety; TRIP steels; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista de Produto, Atendimento ao Cliente, Garantia da Qualidade e Produto, Usiminas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista de Assistência Técnica, Atendimento ao Cliente, Garantia da Qualidade e Produto, Usiminas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc., Engenharia de Materiais e Ecologia do Produto, Fiat Chrysler Automobiles, Betim, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva, por força de uma legislação cada vez mais restritiva, tem buscado o aumento da segurança veicular e também a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, através de melhorias, tais como: maior eficiência dos motores, melhor aerodinâmica e diminuição de peso do veículo. Em sintonia com as novas tendências, a Usiminas mantém um programa de desenvolvimento de aços de alta resistência mecânica que possibilitam a utilização de peças de menor espessura, contribuindo assim, para a redução de peso nos veículos.

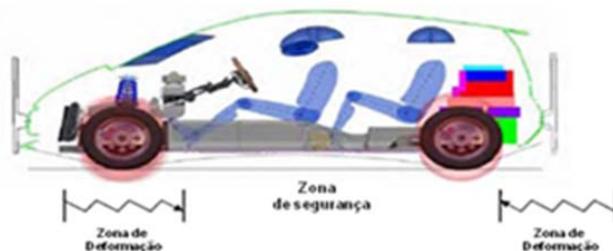
Os aços TRIP, desenvolvidos na Usiminas ao longo dos últimos 10 anos homologados recentemente pela Fiat Chrysler Automobiles, se enquadram nessa perspectiva. Esses materiais oferecem uma combinação de propriedades bastante interessante. Eles representam um passo significativo ao encontro do ideal do leve e resistente, pois permitem produzir componentes de menor espessura em substituição de outros, mas com propriedades de conformação iguais ou superiores. De fato, a baixa capacidade de conformação sempre foi o fator limitador do uso de materiais mais resistentes. Um aumento de resistência mecânica é geralmente acompanhado de uma redução na ductilidade. Atenuando esse efeito, os aços TRIP oferecem hoje um vasto campo de aplicação.

O trabalho apresenta as características do aço TRIP desenvolvido pela Usiminas assim como os resultados de aplicação em peças automotivas da Fiat Chrysler Automobiles.

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1 As Novas Tendências na Construção Automotiva

Várias considerações direcionam a seleção de materiais na construção automotiva. A seleção é feita de forma a preencher, da forma mais eficiente possível, requisitos como: segurança, eficiência no consumo de combustíveis, desempenho ecológico, manufatura, durabilidade, etc. Em relação à segurança, o desempenho em testes de impacto é o principal requisito na escolha dos aços. Nesses testes, os aços devem atender aos requisitos de duas zonas distintas, identificadas na figura 1.



Zonas	Característica Para Alto Desempenho	Propriedades Mecânicas	Evidência de Desempenho
Zona de Deformação Progressiva	Alta absorção de energia em evento de impacto	Alto encruamento, resistência e ductilidade	Grande área sob a curva tensão-deformação
Zona de Segurança	Nenhuma deformação/intrusão durante impacto	Alto LE	LR no ensaio de tração

Figura 1. Tendências na construção automotiva [1].

O compartimento dos passageiros, designado como zona de segurança, é projetado para proteger os passageiros em eventos de baixa ou alta velocidade de impacto; a estrutura deve prevenir qualquer deformação ou intrusão que poderia comprometer a zona de segurança e interferir com o espaço ao redor dos passageiros. As zonas de deformação, localizadas na frente e na traseira do veículo, são projetadas para absorver a maior quantidade possível da energia de impacto no evento de uma colisão frontal ou traseira. Pela absorção da energia, a zona de deformação irá amortecer o impacto e ajudar a preservar a estrutura do compartimento de passageiros.

Claramente, as propriedades mecânicas requeridas em uma aplicação guiam a escolha do tipo correto de aço. No caso particular do aço TRIP, como se verá, ele é normalmente aplicado nas zonas de deformação, as quais, em um evento de colisão, devem se deformar absorvendo boa parte da energia de impacto.

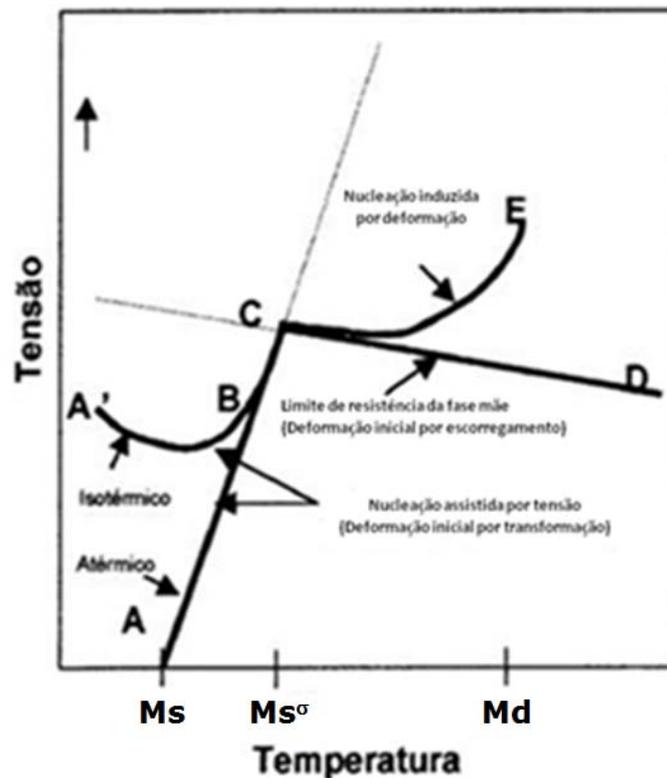
## 2.2 O Efeito TRIP

O efeito TRIP pode ser definido como uma transformação de fase provocada por uma deformação plástica macroscópica. Este efeito é conhecido desde os anos 50, e foi primeiramente estudado por Zackay et al, citado por Moutinho [2], nos aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis de alta resistência, e fortemente ligados ao cromo, níquel, molibdênio e silício.

Os aços multifásicos com efeito TRIP apresentam a particularidade da austenita se transformar em martensita no decorrer da deformação plástica. Essa transformação proporciona, simultaneamente, uma ductilidade crescente, associada a uma elevada resistência mecânica. A importância dessa transformação é dupla: primeiramente provoca um efeito de endurecimento estático causado pelo surgimento de uma fase dura, a martensita e, simultaneamente, provoca um amaciamento dinâmico graças à própria transformação e ao fato de que ela mesma provoca uma deformação suplementar.

Segundo Olson e Cohen, citados por Moutinho [2], uma deformação pode estimular a cinética de transformação de fase no estado sólido, pelo efeito termodinâmico da tensão aplicada e pelo efeito catalítico da produção de novos defeitos quando da deformação plástica.

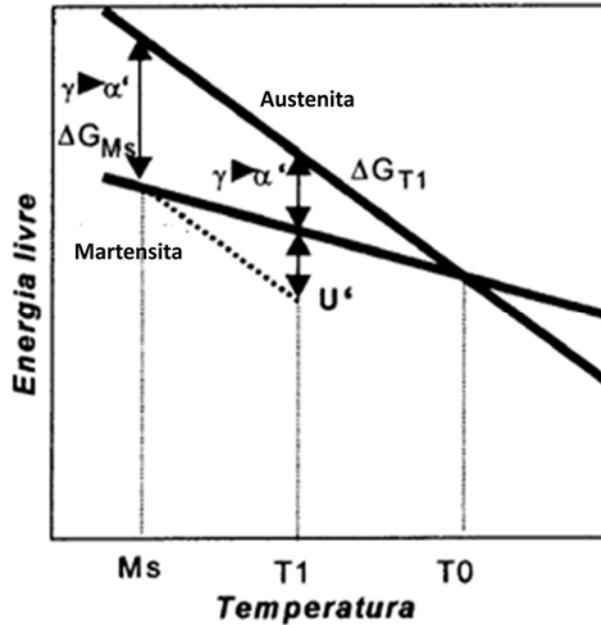
Uma distinção é feita entre transformação assistida por tensão (*stress-assisted transformation*), na qual a nucleação da martensita ocorre nos mesmos locais responsáveis pela transformação espontânea no decorrer do resfriamento, e transformação induzida pela deformação (*strain-assisted transformation*), na qual a martensita é nucleada sobre os novos locais criados na deformação plástica, figura 2.



**Figura 2.** Variação da tensão a ser aplicada para provocar a transformação martensítica, em função da temperatura [2].

Ms é a temperatura na qual a transformação martensítica se inicia espontaneamente após resfriamento desde o campo austenítico. É possível provocar a transformação martensítica a uma temperatura superior a Ms, fornecendo um acréscimo suplementar à força motriz da transformação sob a forma de energia mecânica. Com isso a tensão a ser aplicada para produzir a transformação martensítica aumenta quando a temperatura aumenta. Isso ocorre até que seja atingido o limite de elasticidade da austenita ( $\sigma^a$ ) à temperatura Ms $\sigma$ . Para temperaturas inferiores a Ms $\sigma$ , a transformação ocorre antes do início da deformação plástica da austenita. Acima da temperatura Ms $\sigma$  há uma mudança de regime: nesse caso a austenita deforma-se plasticamente antes da transformação ser estimulada mecanicamente. Ao se atingir a temperatura Md, a tensão necessária para deformar a austenita torna-se tão elevada que é praticamente impossível provocar a sua deformação. Assim, Md é definida como a temperatura acima da qual a transformação  $\gamma$ - $\alpha'$  não pode ser induzida mecanicamente.

Consideremos a variação da energia livre da austenita e da martensita para diferentes temperaturas, figura 3. Para se formar martensita espontaneamente, é necessário um sobrefrescimento até a temperatura Ms o que implica uma energia de ativação  $\Delta G_{Ms}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ . À temperatura T1, a energia de ativação não é suficiente para induzir a transformação. Falta uma energia U' em relação à força motriz mínima  $\Delta G_{Ms}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ . U' pode ser fornecida externamente ao material sob a forma de uma energia mecânica no caso do efeito TRIP.



**Figura 3.** Energia livre da martensita e austenita puras para diferentes temperaturas [2].

Suponhamos agora, que graças ao ajuste dos elementos de liga gamagêneos, seja possível estabilizar a austenita à temperatura ambiente. Isto significa que a variação da energia livre de Gibbs,  $\Delta G_{Ms}^{\gamma \rightarrow \alpha'}$ , não será uma força motriz suficiente para provocar a transformação no decorrer do resfriamento, ou que a temperatura na qual se dá início a transformação martensítica é inferior a temperatura ambiente. Devido ao seu efeito termodinâmico, a tensão aplicada permite então que a transformação se produza devido ao complemento de força motriz por ela cedido.

Se a temperatura Ms se aproxima da temperatura ambiente, uma pequena energia de ativação complementar (provocada por uma tensão elástica) é suficiente para provocar a transformação. Ao contrário, se Ms é bastante inferior à temperatura ambiente, então é necessário entrar no domínio plástico para atingir a tensão que permite fornecer o complemento de energia de ativação suficiente para ocorrer a transformação.

Como tal, é necessário controlar a estabilidade da austenita controlando a temperatura Ms em relação a temperatura de trabalho na conformação do material, de modo a acentuar o efeito TRIP.

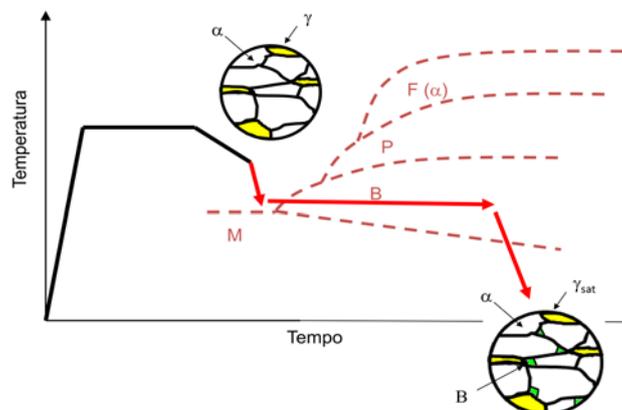
### 3 CARACTERÍSTICAS DO AÇO TRIP PRODUZIDO NA USIMINAS

O aço TRIP é o resultado da combinação de um projeto de liga e um processo de fabricação adequados. Essa combinação conduz a uma microestrutura que, em última análise, é a responsável pelas propriedades do material. A Usiminas desenvolveu o aço TRIP nos graus 700 e 780. A composição química básica e o processo esquemático de recozimento contínuo são mostrados, respectivamente, na tabela 1 e figura 4.

**Tabela 1.** Composição química (%peso)

<b>C (max.)</b>	<b>Si (max.)</b>	<b>Mn (max.)</b>	<b>S (max.)</b>	<b>P (max.)</b>	<b>Al (min.)</b>	<b>Cu (max.)</b>
0,30	2,2	2,5	0,015	0,090	0,010	0,20

(Ni + Cr + Mo) < 1,5%

**Figura 4.** Desenho esquemático do processo de recozimento contínuo do aço TRIP.

Os principais elementos presentes no aço TRIP produzido pela Usiminas são C, Si e Mn. Desses elementos, C e Mn são gamagêneos, isto é, retardam a transformação  $\gamma \rightarrow \alpha$  aumentando a estabilidade da austenita. Já o Si é estabilizador da ferrita e está presente para promover a reação bainítica. Nessa reação ocorre a rejeição do carbono para a austenita, aumentando sua estabilidade e inibindo a precipitação da cementita. Com isso o fluxo de carbono na ferrita é menor, contribuindo para uma austenita mais estável.

De acordo com o ciclo térmico, figura 4, o material é aquecido até o campo  $\gamma + \alpha$ , e resfriado até a temperatura de transformação bainítica. Nessa temperatura, a austenita se transforma parcialmente em bainita rejeitando carbono para a austenita remanescente. Um novo resfriamento acelerado até a temperatura ambiente, assegura uma microestrutura constituída de ferrita, bainita e austenita retida. É essa austenita remanescente metaestável que dará origem à martensita durante a conformação em mecanismo como o descrito nas figuras 2 e 3.

A distribuição das fases presentes no aço TRIP780 é apresentada na tabela 2.

**Tabela 2.** Análise metalográfica típica do aço TRIP780 (%)

Ferrita	Martensita	Austenita	Outros <sup>(1)</sup>
27	5,7	13,9 <sup>(2)</sup>	53,4

(1) Bainita, carbonetos e perlita (2) Teor de carbono = 1,3%

São características do aço TRIP, a presença de austenita retida de alto teor em carbono e uma porcentagem elevada de bainita.

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas a tração típicas

GRAU	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	R <sub>0</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>90</sub>	R <sub>m</sub>	ΔR	n <sub>0</sub>	n <sub>45</sub>	n <sub>90</sub>	BH (MPa)
700	473	751	29	0,9	0,8	1,2	0,9	0,21	0,23	0,22	0,22	85
780	505	790	35	0,9	0,9	1,2	1,0	0,18	0,25	0,24	0,24	90

Com relação às propriedades mecânicas, Tabela 3, observa-se que a característica principal desse material é a elevada ductilidade, caracterizada pelo alto alongamento total. O coeficiente de encruamento, valor  $n$ , é outra propriedade interessante. Além do alto valor, a quase igualdade de valores em relação às diferentes direções da chapa (0°, 45° e 90°), assegura um comportamento quase isotrópico do material em relação à capacidade de encruamento, criando facilidade adicional para o posicionamento de blanks.

Ainda sobre as propriedades do aço TRIP, o alto valor BH é uma característica bastante importante desse aço. Esse parâmetro caracteriza o aumento adicional da resistência mecânica devido ao envelhecimento por deformação quando a carroceria do veículo é levada à estufa para a cura da pintura.

Contrariamente aos aços *Bake Hardenable*, cujo aumento da resistência tende a diminuir com o aumento da deformação, nos aços TRIP esse parâmetro tende a aumentar com o aumento da deformação, figura 5 [3].

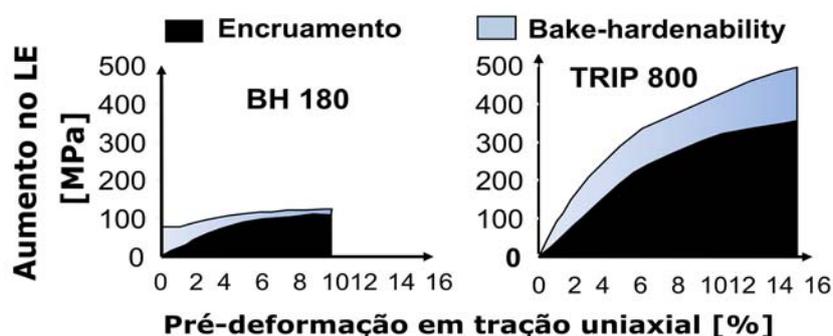


Figura 5. Influência da deformação no valor BH de aços [3].

A explicação para o fenômeno é que sobram deslocações livres (ou com pouco carbono) no aço TRIP no interior dos grãos de ferrita, o que faz com que o aumento do limite de escoamento seja pequeno para baixa deformação. À medida que alguma deformação é aplicada as deslocações que estão na interface ferrita/martensita são liberadas e escorregam em direção ao interior dos grãos de ferrita, tornando a distribuição de deslocações mais uniforme. Com o tratamento de envelhecimento, o carbono também se distribui mais uniformemente entre as deslocações, ancorando-as todas, o que resulta em um aumento do valor BH. No material BH tradicional, com o aumento adicional da pré-deformação, novas deslocações são introduzidas e o bloqueio torna-se menos efetivo em função do teor limitado de carbono em solução sólida.

Uma propriedade que tem assumido destaque especial nos aços de alta resistência é capacidade de estiramento de flange/borda, visto a presença frequente desse modo de deformação na estampagem de peças estruturais e sua correlação com a vida em fadiga e o comportamento à fratura. O ensaio de expansão de furo é o teste laboratorial que melhor expõe o material a este modo de deformação e, por isso, em conjunto com as propriedades mecânicas em tração, tem sido bastante utilizado para a previsão do comportamento durante estampagem desses aços.

A figura 6 apresenta resultados médios de expansão cônica de furo, ECF, do aço TRIP780 em comparação com o aço DP780. Os ensaios foram realizados com furos puncionados com folga de corte de 12%, norma ISO/TS 16630:2003 [4]. O melhor resultado de ECF no aço TRIP é atribuído à presença mais significativa da bainita nesses aços do que nos aços Dual Phase, o que contrabalança a diferença de

resistência entre fases, responsável por criar caminhos preferenciais para propagação de trincas.

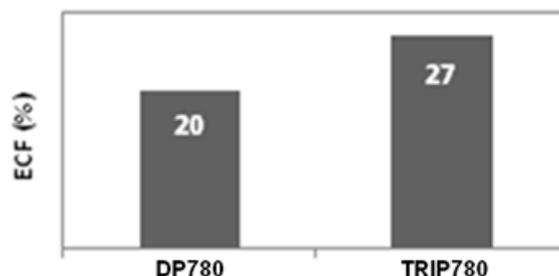


Figura 6. Resultados médios de expansão cônica de furo para o aço TRIP780 e DP780 [5].

## 4 APLICAÇÃO DO AÇO TRIP

Dois tipos de aplicações têm sido observadas para o aço TRIP. A primeira delas está relacionada à maior capacidade de conformação desse aço em relação a outros aços de resistência mecânica similar. Nessas aplicações, quase sempre uma forma mais complicada é requerida, além da alta resistência.

O segundo tipo está relacionado à absorção de energia que esse aço é capaz de proporcionar em um evento de impacto. Nesse caso, ele é aplicado em peças do veículo cuja função é se deformar e absorver a energia de impacto. Não raro, no entanto, o aço TRIP é aplicado em partes onde ambas as características são requeridas.

### 4.1 Barra de Segurança de Porta

Nesse exemplo, a substituição pelo TRIP leva em consideração a maior capacidade de conformação e de absorção de energia desse aço. O aço originalmente especificado era o DP780 com revestimento GI. Contudo, em casos frequentes, durante a conformação esse material apresentava trincas nas bordas e/ou na região de fixação da barra à estrutura do veículo. Foi avaliada a possibilidade de substituição pelo aço TRIP780 com revestimento eletrozincado EG.

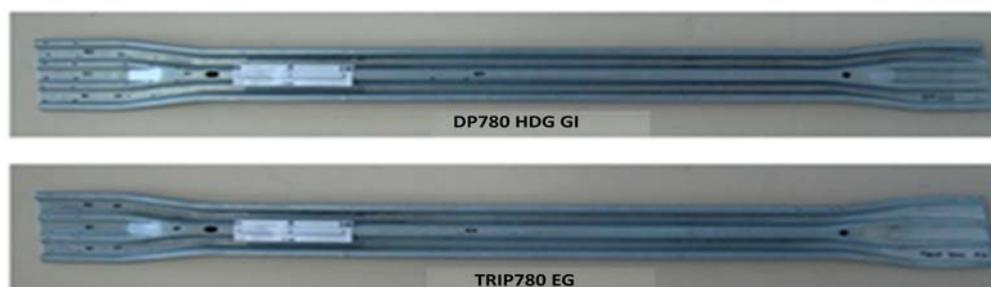
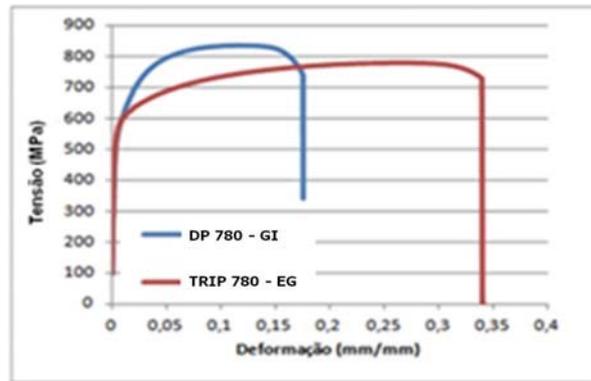


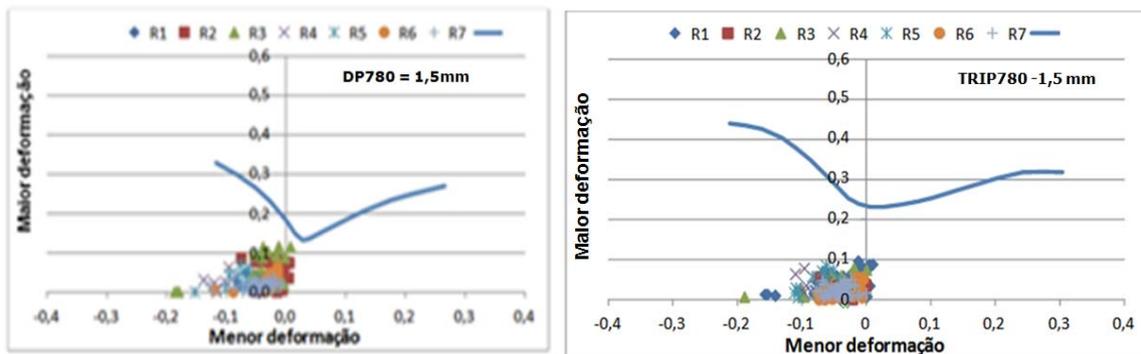
Figura 7. Aspecto da peça barra de segurança de porta estampada de um veículo Fiat Chrysler produzida com os aços DP780 GI e TRIP780 EG, ambos com 1,5 mm de espessura.

**Tabela 4.** Propriedades mecânicas dos materiais avaliados

Identificação	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)	n <sub>10%-eu</sub>	R
DP780	437	841	17,6	0,121	0,759
TRIP780	549	790	33,5	0,220	1,141
Norma FIAT-Chrysler DP780	420~550	>780	>15	>0,11	-
Norma FIAT-Chrysler TRIP780	440~560	>780	>20	>0,22	-



Fonte: Usiminas

**Figura 8.** Curvas tensão-deformação dos aços Dual Phase780 GI e TRIP780 EG.

Fonte: Usiminas

**Figura 9.** Diagrama Limite de Conformação de regiões da barra de segurança de porta automotiva estampada com os aços DP780 e TRIP780.

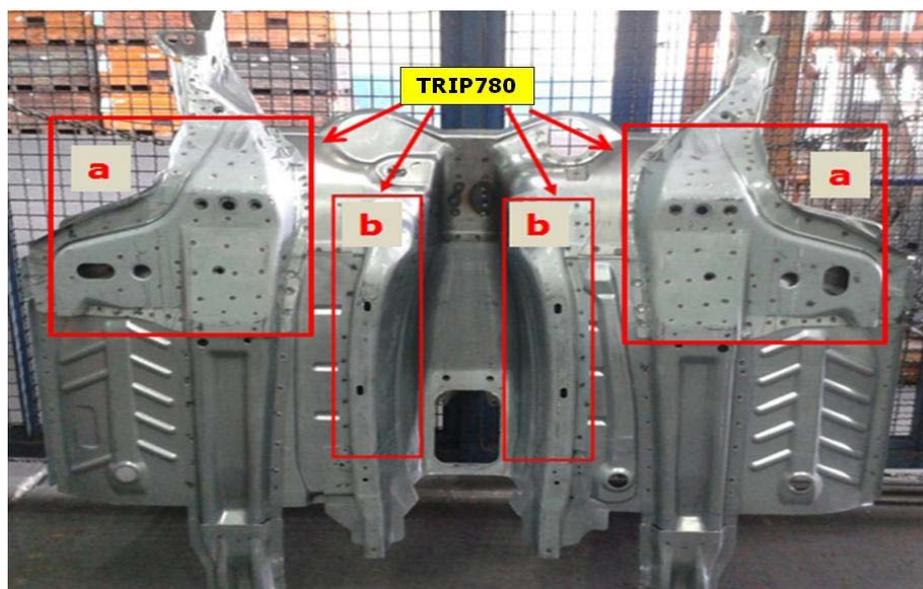
Os Diagramas Limites de Conformação, que contemplam a CLC do aço e as deformações de locais da peça, são mostrados na figura 9.

Nota-se que as deformações da peça estampada com o aço DP780 encontram-se próximas da CLC, indicativo de que a estampagem da peça é bastante crítica para esse aço, principalmente na região 3. Para o TRIP780, verifica-se que as deformações encontram-se bem abaixo da CLC, indicando assim que esse material está melhor especificado para a aplicação.

#### 4.2 Subconjunto do Assoalho

Nesse exemplo, figura 10, o uso de aços de resistência mecânica da classe de 780MPa foi adotado em substituição ao aço microligado da classe de 500MPa de resistência mecânica como forma de melhorar o desempenho do veículo em testes de impacto. Ao assoalho do carro, foram soldadas peças cuja função é aumentar a rigidez do subconjunto e absorver a energia de impacto no caso de uma colisão. O

aço inicialmente proposto para substituir o microligado foi o DP780 GI. Contudo, ambas as peças, principalmente a peça **a**, demandam alta capacidade de conformação de forma que o aço TRIP780 foi usado com absoluto sucesso.



**Figura 10.** Subconjunto do assoalho de um veículo Fiat Chrysler mostrando as peças **a** e **b**, esquerda e direita, produzidas com aço TRIP780

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aço TRIP representa um passo significativo ao encontro do ideal do leve e resistente, pois permite produzir componentes de menor espessura e de formas mais complexas, com igual ou superior capacidade de conformação.

Essa versatilidade tem se tornado um atrativo para aplicações onde se quer reduzir peso e, sobretudo, aumentar a capacidade de absorção de energia em eventos de impacto.

Como uma empresa em sintonia com as tendências mais modernas na construção automotiva, a Fiat Chrysler Automobiles tem especificado o aço TRIP em vários componentes de seus novos modelos, sempre visando aumentar a segurança e contribuir com a redução da emissão.

## REFERÊNCIAS

- 1 World Auto Steel, AHSS, Applications Guidelines, Version 5.0, Maio 2014
- 2 Moutinho, M. J. P., Perspectivas de produção de componentes em chapa para a indústria do automóvel, Escola de Engenharia, Universidade do Porto, Agosto 2000.
- 3 ULSAB-AVC, Considerations in the Selection of Advanced High Strength Steels (AHSS) for the ULSAB-AVC, Materials Working Group, May, 2000.
- 4 ISO/TS 16630 – Metallic Materials – Method of hole expanding test, First edition, 2003
- 5 Caetano, R. A., Avaliação da Conformabilidade do Aço Transformation Induced Plasticity (TRIP780) Eletro galvanizado e Dual Phase (DP780) Galvanizado Por Imersão a Quente, Dissertação de mestrado, Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015, 104p.