

Tema: Produtos metálicos ferrosos

ESTAMPAGEM A QUENTE: CARACTERÍSTICAS, TÉCNICAS E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS NO DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE PRODUTOS*

Claudio Pereira Diogo¹
Ronaldo Antonio Souza Cruz²
Willy Ank De Moraes³

Resumo

Este trabalho descreve a estampagem a quente seguida de têmpera promovida pela matriz de estampagem. As peças obtidas por esta técnica podem apresentar uma resistência de até 1,6GPa, portanto bem acima das peças equivalentes produzidas através de estampagem a frio ou obtidas com aços conformáveis de alta resistência. O processo permite efetiva redução de peso em importantes componentes estruturais de segurança do automóvel com qualidade dimensional, grande resistência mecânica e à fratura, características essas essenciais a um processo produtivo eficiente e para obter um produto seguro, assim indo ao encontro das necessidades impostas pelo Inovarauto.

Palavras-chave: Aços; autopeças; Inovarauto; estampagem a quente; 22MnB5.

HOT STAMPING: CHARACTERISTICS, TECHNIQUES AND INDUSTRIAL APPLICATIONS ON PRODUCT DEVELOPMENT AND MANUFACTURE

Abstract

This work describes the hot stamping process and subsequent quenching promoted by the stamping matrix. Parts obtained by this technique can show strength levels until 1.6Gpa, therefore far above of the similar parts obtained by cold stamping or by the employment of high strength steels. The process allows effective weight reduction in major structural and safety car componentes, dimensional quality, high mechanical strength and fracture toughness, these characteristics essential to an efficient production process and to produce a safe product, thus meeting the needs imposed by Inovarauto.

Keywords: Steels, autoparts, Inovarauto; hot stamping; 22MnB5.

- ¹ Formando em Engenharia de Produção e Técnico em Metalurgia. Consultor Comercial na Duferco do Brasil, São Paulo, SP, Brasil; diogo@duferco.com.br.
- ² Gerente de Marketing da Ferrolene, São Paulo, SP, Brasil; mkt4@ferrolene.com.br.
- ³ Doutorando, Mestre em Eng.^a de Materiais e Técnico em Metalurgia. Professor Adjunto da Unisanta, Vice Diretor da Divisão Técnica de Ensino da ABM e Consultor Técnico da Inspebras, Santos, SP, Brasil; willyank@unisanta.br e willyank@inspebras.com.br.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as várias linhas de modernização da indústria automobilística, três pontos serão destacados neste trabalho: (1) redução do impacto ambiental, (2) melhoria de segurança e (3) modernização de processos. Soluções surgidas a partir destas demandas têm impactado a produção de novos automóveis, inclusive nos processos e materiais envolvidos.

1.1 Redução do Impacto Ambiental

Com o incremento da poluição nos grandes centros urbanos e com o impacto no aquecimento global, a indústria automobilística tem como principal objetivo hoje reduzir o chamado “rastros de carbono” (*carbon footprint*) de seus automóveis. Esse impacto ambiental dos automóveis ocorre nas três etapas de sua vida: fabricação, uso e descarte do produto. As principais técnicas empregadas para reduzir o rastro de carbono de um automóvel durante a sua fabricação e descarte se baseiam na intensificação do uso de materiais avançados, adoção de materiais mais recicláveis e o emprego de processos produtivos mais racionais. O consumo de combustível, com a conseqüente emissão de gases de escapamento (*tailpipe emissions*), é o principal impacto ambiental gerado por um automóvel ao longo de sua vida útil.

O consumo de combustível de um automóvel está principalmente associado à eficiência dos seus sistemas de propulsão e transmissão, simplificada como “*powertrain*”. O peso total do veículo (partes mecânicas e carroceria) é o próximo item que mais colabora na emissão de poluentes. A aerodinâmica, apesar da sua aparente influência, tem uma importância secundária neste aspecto, especialmente em veículos de uso urbano, nos quais deseja-se uma maior redução na emissão de poluentes. É possível reduzir o peso do veículo nos seus equipamentos (motor, transmissão, eixos, etc.) ou na sua carroceria. No caso da carroceria, esta equivale a aproximadamente $\frac{1}{4}$ do peso total do veículo, e neste caso o ganho em peso é diretamente proporcional ao aumento de resistência das chapas empregadas [1].

1.2 Melhoria da Segurança

Por outro lado, os níveis de segurança para motoristas e passageiros estão cada vez mais rigorosos, particularmente no Brasil depois da criação do *Latin NCAP*. De forma a atender às exigências de segurança, uma solução cada vez mais consolidada é o emprego de estrutura automotiva mista. Na estrutura de um automóvel seguro, existem duas regiões, com comportamentos mecânicos antagônicos, que atuam em perfeita harmonia entre si durante um acidente:

- a) estrutura periférica deformável, que irá absorver e dissipar a energia de um acidente através de sua deformação plástica, assim reduzindo os danos que poderiam ser impostos aos ocupantes de um veículo conforme ilustrado na Figura 1.a.
- b) célula de sobrevivência indeformável, responsável por evitar que os ocupantes do veículo sejam atingidos pela deformação periférica do mesmo, preservando a sua integridade física, conforme ilustrado na Figura 1.b.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

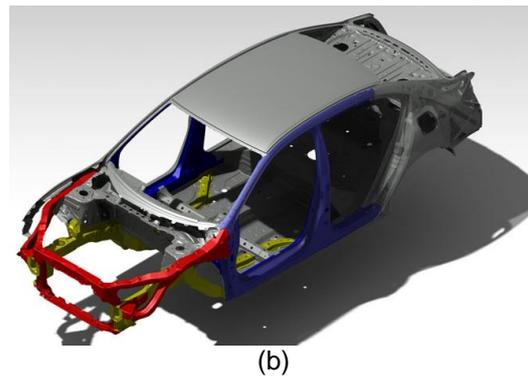
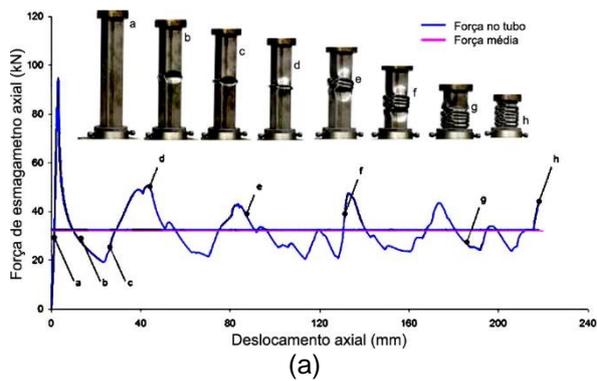


Figura 1. Mecanismos de segurança nos automóveis modernos: (a) componente estrutural perfurado que se deforma estavelmente sob compressão [2]; (b) Estrutura de deformação progressiva (em vermelho) e célula de sobrevivência (em roxo) de um veículo moderno [3].

1.3 Modernização dos Processos

É cada vez mais necessário que os processos de produção atenda mais rapidamente, com menor custo e maior precisão, a demanda do setor automotivo (excelência, agilidade e pontualidade). Os componentes automobilísticos precisam apresentar um controle dimensional muito apurado para ser enquadrado nos atuais processos de produção, pequenas diferenças podem inviabilizar o uso do componente.

- De forma a viabilizar a diminuição da espessura dos componentes automobilísticos, suas geometrias vão se tornando mais complexas de forma a compensar mecanicamente a perda da rigidez destes componentes em relação aos componentes mais espessos. Vincos, dobras e protuberâncias são características geométricas que aumentam mecanicamente a rigidez dos automóveis, permitindo o emprego de componentes mais finos, e por isso estão cada vez mais presentes nos novos veículos.
- Menor quantidade de peças a serem montadas tornam a estrutura mais robusta e rígida, assim como menos susceptível a vibrações e ruídos que podem aparecer ao longo do seu uso. Em paralelo uma menor quantidade de soldas ou juntas parafusadas/rebitadas tornam a montagem do automóvel mais rápida, eficiente (menos propensa a falhas na montagem ou no uso) e obviamente mais barata.

1.4 Opções Tecnológicas – aços de alta resistência mecânica

É relativamente comum o emprego do termo “aços leves” para aplicações automobilística, porém este termo é incorreto. Um aço mais resistente ainda possui a mesma massa específica, que vale aproximadamente $7,85 \text{ g/cm}^3$ para aços ferríticos [4]. Porém empregando-se aços mais resistentes é possível fazer um mesmo componente estrutural mais fino, ainda suportando o mesmo nível de carregamento. Desta forma, o componente e a estrutura como um todo torna-se mais leve pelo menor uso do aço, que possui praticamente o mesmo peso de um aço comum.

Apesar do grande potencial de redução de peso, o emprego de aços de alta resistência apresenta algumas limitações, que podem ser resumidas desta forma [1]:

- são mais caros;
 O custo de aços com graus de resistência da ordem de 800MPa chega a ser até 50% mais elevado do que um aço comum (tipo SAE 1012),

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

muitas vezes a economia no peso final pode ser maior, mas o preço inicialmente mais elevado sempre será um paradigma a ser superado.

- menor disponibilidade;
Por serem fabricados para demandas muito específicas, a quantidade e dimensões disponíveis são poucas; ademais o fabricante (siderúrgica) deve produzir uma quantidade mínima para um aço ser economicamente viável e o mercado deve estar desenvolvido ou em um estágio de desenvolvimento tal que viabilize a disponibilidade deste novo aço.
- mais difíceis de se trabalhar;
Estes aços apresentam grande dificuldade na conformabilidade (para corte, dobra e estampagem) especialmente a frio, limitando as geometrias das peças que pode ser obtidas. Para o trabalho com estes aços são necessárias mais etapas de conformação para distribuir as deformações impostas de maneira mais homogênea e suportável pelo aço. Neste caso normalmente são empregadas prensas com processo de transferência (*transfer*). Peças com geometrias mais complexas só podem ser obtidas com aços menos resistentes, que apresentam a conformabilidade necessária, mas geram peças mais espessas e conseqüentemente mais pesadas [5].
- maior retorno elástico;
O grau de resistência mais elevado dos aços de alta resistência torna o controle dimensional mais complexo, pois o retorno elástico é muito mais intenso para estes aços. O retorno elástico dificulta a obtenção de dimensões e ângulos precisos em peças conformadas e este fenômeno é tanto mais intenso quanto maior for o grau de resistência do aço e menor sua espessura, que são exatamente as duas características mais desejáveis para estes aços nesta aplicação [5, 6].

1.5 Opções Tecnológicas – novos materiais

Novos materiais com desempenho superior ao aço em muitas aplicações já são empregados na indústria automobilística, com especial destaque para os polímeros, empregados no revestimento interno (painéis) e algumas partes da carroceria (grades, laterais, acessórios). Resinas de polióxido de fenileno (PPO + PA) para pára-lamas e painéis de carrocerias reduzem o peso em até 50 por cento, se comparado ao aço e ainda permitem a pintura da peça na linha de montagem, sem o uso de primer [7].

Porém a substituição do material de um componente estrutural por outro material, além dos desafios em termos de projeto e ciclo produtivo, ainda é visto com muito receio e mesmo preconceito especialmente entre os usuários finais dos veículos.

O aço é o material mais pesquisado pela humanidade e mesmo assim existe muita coisa a se descobrir. O grau de aprofundamento no conhecimento de um novo material é proporcional ao tipo de material e ao grau de inovação na substituição do aço. Dos principais candidatos a substituir o aço têm-se, em ordem: alumínio, ligas leves (por exemplo baseadas no Magnésio), ligas avançadas (por exemplo baseadas no titânio) e compósitos fibrosos (de fibra de vidro, carbono e kevlar). Estes desenvolvimentos são demorados, pois não apenas o material deve ser estudado e caracterizado, como também o desempenho do componente deve ser avaliado e o processo produtivo equacionado de forma a tornar econômica a aplicação do novo material.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1.6 Opções Tecnológicas – novos processos de produção

A indústria automobilística possui uma dinâmica global, as boas inovações são rapidamente difundidas neste setor gerando novos métodos de produção que são incorporados na cadeia produtiva. Nos últimos anos, por exemplo, foi introduzido e consolidado no Brasil o uso de *blanks* soldados a laser (*tailored blanks*) a partir de uma demanda oriunda de fabricantes que já empregavam componentes produzidos com esta tecnologia.

Existem várias tecnologias novas disponíveis, dentre estas a estampagem a quente, que já é conhecida a longa data. Porém, no caso da estampagem a quente, o seu desenvolvimento só se iniciou recentemente no Brasil especialmente devido à demanda e mesmo assim com a necessidade de importação de máquinas, equipamentos e até mesmo matéria-prima para torna-la viável.

Os novos processos, por melhores que sejam, sempre necessitarão de adaptações e/ou ajustes por parte de quem os utiliza. Treinamentos, mudanças de *lay-out* são alguns itens que, dentro outros, costumeiramente necessitam ser revistos. Neste sentido o INOVAR AUTO e a instalação de novas montadoras de automóveis mais sofisticados terá muito a contribuir como força motriz.

2 ESTAMPAGEM A QUENTE

A estampagem a quente com têmpera promovida pela matriz surgiu no final dos anos 90 pelo emprego de aços ao boro para produzir componentes automobilísticos simples como reforços de portas e para-choques [5]. A Figura 2 ilustra os tipos de componentes produzidos.

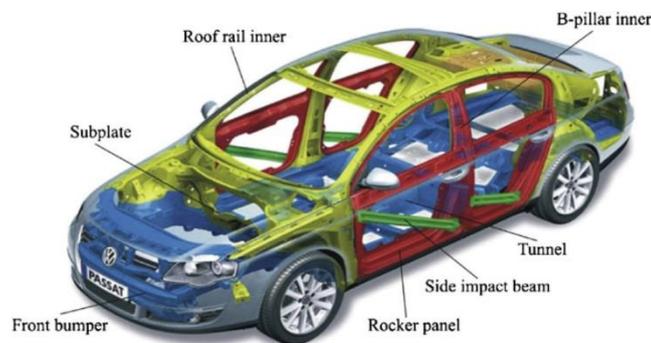


Figura 2. Aplicações de peças produzidas por estampagem a quente [8].

2.1 Aços empregados

São empregados aços com teores de carbono intermediários, cujas composições químicas são similares aos aços-carbono SAE na faixa 'B' da Tabela 1. Em relação a estes aços são feitas adições de manganês e boro (eventualmente cromo) para otimizar os resultados após têmpera. Estes aços são conhecidos pela antiga notação DIN, sendo o mais comum o 22MnB5 (0,22%C; 1,25%Mn e 0,0050%B), mas também empregados os aços 27MnCrB5 e 37MnB4 [12].

Aços do tipo 22MnB5 [9] podem ser empregados para produzir partes complexas, resistentes e tenazes empregadas, por exemplo, em barras de proteção e colunas de automóveis. As peças podem apresentar uma resistência de até 1,6GPa, que está

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

bem acima da resistência que poderia ser obtida com aços comuns, através de estampagem a frio, e dos aços conformáveis de alta resistência mecânica.

Tabela 1. Composições químicas simplificadas e propriedades mecânicas após têmpera de aços carbono comuns da norma SAE J403 família 10XX [4,10].

Faixa	SAE J403 grau	Elementos de Liga Principais		%C _{médio}	Propriedades recomendáveis após Têmpera (90%Martensita)		
		%C	%Mn		HRC	HB	SLR (MPa)
A	1015	0,13 a 0,18	0,30 a 0,60	0,155	35,5	331	1122
	1016		0,60 a 0,90	0,155	35,5	331	1122
	1017	0,15 a 0,20	0,30 a 0,60	0,175	37,5	349	1181
	1018		0,60 a 0,90	0,175	37,5	349	1181
	1019		0,70 a 1,00	0,175	37,5	349	1181
B	1020	0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,205	40	373	1259
	1021		0,60 a 0,90	0,205	40	373	1259
	1022		0,70 a 1,00	0,205	40	373	1259
	1023	0,20 a 0,25	0,30 a 0,60	0,225	41,5	387	1310
	1025			0,25	43,5	408	1383
	1026	0,22 a 0,28	0,60 a 0,90	0,25	43,5	408	1383
C	1029	0,25 a 0,31	0,60 a 0,90	0,28	45	425	1442
	1030	0,28 a 0,34		0,31	46,5	442	1505
	1033	0,30 a 0,36	0,70 a 1,00	0,33	47,5	455	1551
	1035	0,32 a 0,38	0,60 a 0,90	0,35	48,5	467	1599
	1037		0,70 a 1,00	0,35	48,5	467	1599
	1038	0,35 a 0,42	0,60 a 0,90	0,385	50	488	1675

HRC – Dureza Rockwell escala “C”; HB – Dureza Brinell; SLR – Limite de Resistência em tração.

A estampagem dos aços ocorre em uma faixa de temperaturas entre 650 e 850°C dentro das quais o aço apresenta uma grande plasticidade, conforme ilustrado na Figura 3, de forma que um *blank* pode ser conformado para uma forma complexa em uma única operação. Porém nesta condição o aço apresenta baixa capacidade de estiramento, devido à diminuição da sua capacidade de encruamento. Por isso pode ser necessária uma operação prévia de conformação.

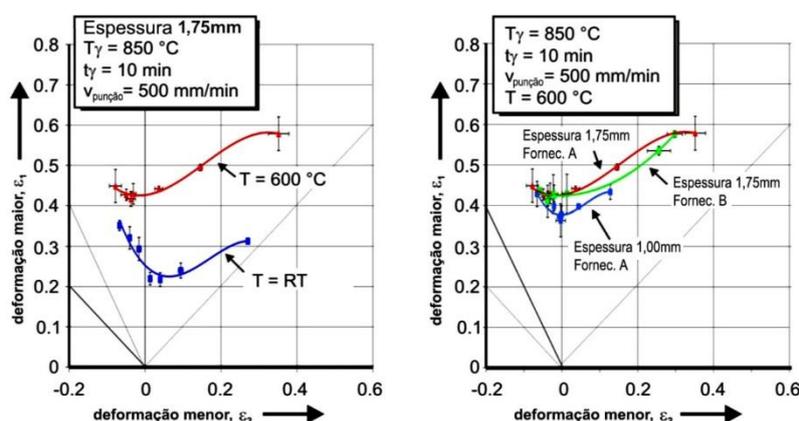


Figura 3. Curvas Limites de Conformação (CLC) de aços 22MnB5 recobertos com liga de Al-Si [11].

O efeito das adições a mais de Manganês e Boro presentes no aço 22MnB5 podem ser vistas na Figura 3. Esta figura descreve a distribuição de propriedades mecânicas em uma chapa de 5mm de espessura, maior espessura tipicamente empregada neste processo, após têmpera em água. A temperatura de formação da martensita no resfriamento (M_s), que é um importante parâmetro para controle do processo, pode ser estimada pela composição química através de várias equações, tais como [9]:

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

$$M_s = 499 - 308\%C - 32,4\%Mn - 27\%Cr - 16,2\%N - 10,8(\%Si+\%Mo+\%V) + 10\%Co \quad (1)$$

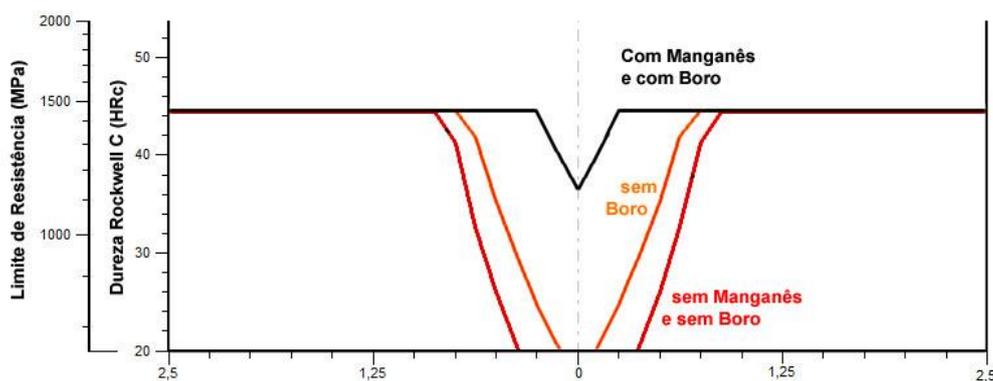


Figura 3. Distribuição de dureza (HR_C) e de Limite de Resistência (S_{LR}) em uma chapa de aço com 5mm de espessura. A composição base é 0,22%C; 0,80%Mn e 0,15%Si. As adições são de 1,20%Mn e 0,0030%B (em aço com 0,0050%N). Calculado através de [10].

A adição de Mn e B tornam as propriedades mecânicas muito mais homogêneas ao longo da espessura da peça, mesmo na região central, onde a efetividade do resfriamento por têmpera é menor. Ademais, o Mn auxilia na austenitização do aço. Quando adicionado o Cromo tem um efeito similar ao Mn em termos de temperabilidade, porém como é elemento ferrogêneo este não é favorável para a etapa do aquecimento sendo preterido em relação ao Mn, que também é mais barato. O teor de carbono define o grau de resistência do aço após a têmpera. Como não é desejável o mesmo nível de resistência mecânica dos aços ferramenta, o teor de carbono é mais baixo.

2.2 Processo

Blanks de aço para estampagem a quente são inicialmente austenitizados em temperaturas entre 900 e 950°C durante alguns minutos (de 5 a 10min.) em fornos geralmente contínuos e com atmosfera controlada [8]. Como a espessuras dos *blanks* é relativamente pequena o aquecimento gera uma estrutura austenítica relativamente homogênea em toda a peça, mesmo em um tempo tão curto [6].

Devido às limitações de estiramento do aço na estampagem a quente, peças pré conformadas podem ser empregadas no lugar dos *blanks* planos [5,6,9]. Imediatamente após sair do forno o *blank* é transferido, conforme ilustrado na foto da Figura 4.a, para a prensa onde este é conformado a quente através de matrizes resfriadas. O resfriamento ocorre pela troca de calor entre a peça e as matrizes que ocorre ainda sendo exercida pressão de estampagem. Como o aço deve estar na estrutura austenítica durante o processo de conformação, este deve terminar em temperaturas acima da temperatura de formação da martensita (M_s) do aço (Eq. 1) O tempo total do resfriamento depende da espessura da peça obtida, após completada a deformação induzida na estampagem. Durante este período de tempo, a peça conformada é resfriada nas matrizes, internamente resfriadas a água, de forma a obter taxas de resfriamento de 50 a 100°C/s, até completar a têmpera.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

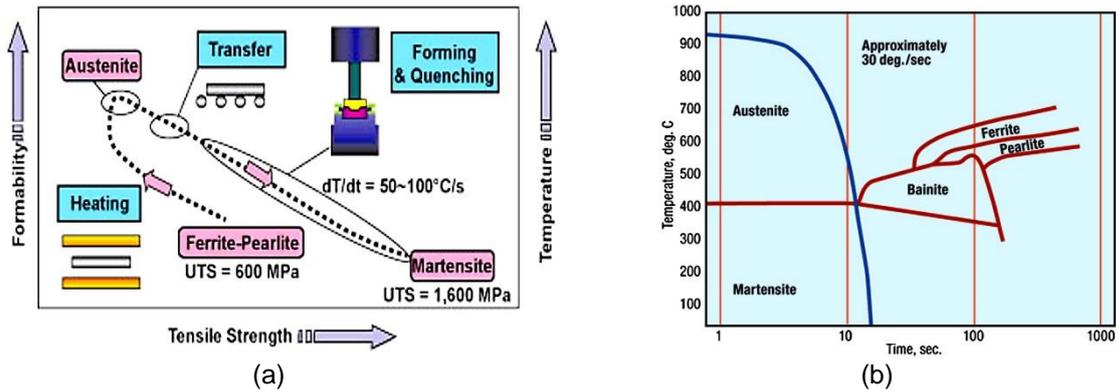


Figura 4. Estampagem a quente: (a) ciclo térmico e microestrutural do processo e (b) evolução ideal da temperatura em função do tempo em uma curva CCT típica destes aços [5].

Finalmente a peça conformada é extraída da prensa a uma temperatura em torno de 150°C e já apresentando uma alta resistência (limite de resistência e de escoamento por volta de 1,5GPa e 1,1GPa, respectivamente). A variação microestrutural e das características mecânicas do aço ao longo do processo variam conforme descritas a seguir e apresentado na Tabela 2:

- A estrutura inicial é constituída de ferrita e perlita. Como o aço foi laminado a quente em condições para apresentar uma melhor conformabilidade, a microestrutura apresenta um certo bandeamento (vide Tabela 2.a).
- Após aquecimento no forno, a uma temperatura de cerca de 925°C, a estrutura torna-se homoganeamente austenítica. A conformabilidade do *blank* aumenta consideravelmente [11], permitindo ser moldado em geometrias complexas.
- Durante um tempo que varia de 15 a 30 segundos, em função da espessura da peça obtida, o aço resfria rapidamente, de 50 a 100°C/s sob condições de têmpera. Devido à composição química, a austenita transforma-se em martensita que apresenta uma alta resistência.

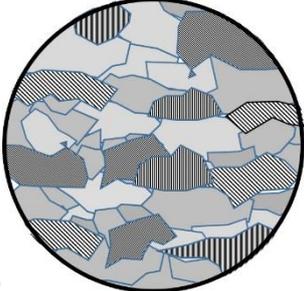
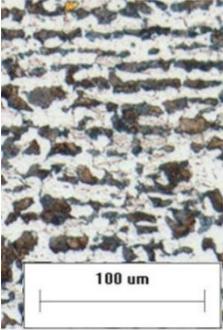
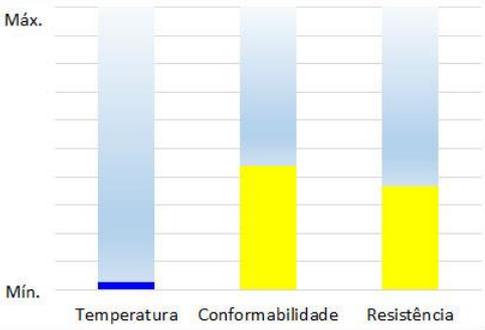
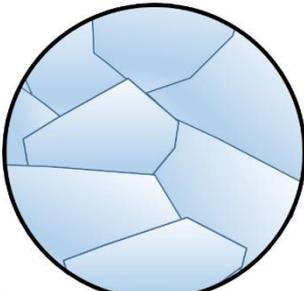
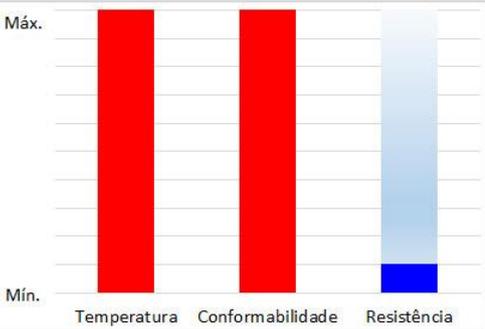
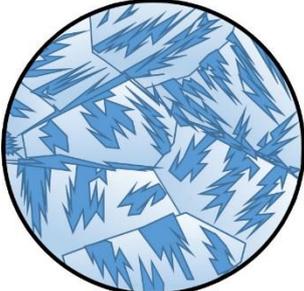
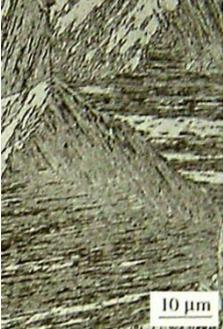
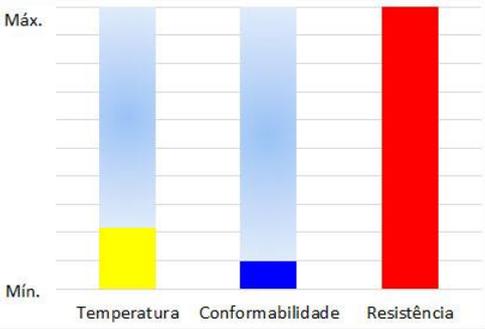
2.3 Oxidação (carepas)

A oxidação da chapa de aço (*blank* ou peça pré deformado a frio) é evitada no aquecimento quando o forno tem uma atmosfera controlada. Porém na etapa de transferência da chapa para a prensa, durante a saída do forno e o contato com as matrizes resfriadas o aço oxida-se ao ar formando uma camada irregular de óxido. Esta carepa gerada possui uma dureza mais elevada e produz desgaste nas matrizes, reduzindo a sua vida útil.

O contato da chapa de aço com o oxigênio do ar nesta etapa também promove um descarbonetização superficial que pode alcançar até 60 µm. Esta descarbonetização prejudica as propriedades mecânicas finais do componente. Para a retirada dos óxidos formados é empregada uma operação de jateamento (*shotblaster*), porém esta é uma operação que além de acarretar custo pode ser prejudicial ao acabamento e às tolerâncias geométricas da peça acabada.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

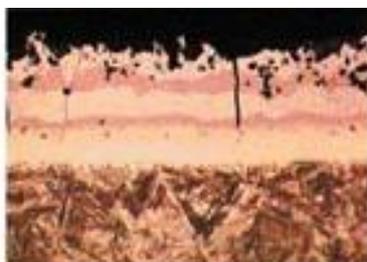
Tabela 2. Variações microestruturais e de propriedades mecânicas de aços ao longo da execução do processo de estampagem a quente.

Representação da microestrutura	Exemplo de microestrutura	Propriedades mecânicas relativas
(a) 		
(b) 		
(c) 		

A solução para evitar este problema é o emprego de aços recobertos com ligas protetoras, especialmente Al-Si [9], conforme ilustrado na Figura 5. Durante o aquecimento, este revestimento protetivo é transformado em uma camada de liga Fe-Al-Si que é altamente aderente ao substrato e apresenta boas resistências à corrosão [12]. Após a operação, as peças podem ser pintadas diretamente, sem jateamento.



Camada de proteção após a estampagem a quente.



Estrutura martensítica após a estampagem a quente.



Camada de Al-Si antes da estampagem a quente.

Figura 5. Estampagem a quente: (a) transferência do *blank* na temperatura austenítica (cerca de 900°C) para a prensa e (b) ciclo térmico e microestrutural do processo [5].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3 TENDÊNCIAS

A faixa de resistência mecânica obtida, entre 600MPa a 1,5GPa para o limite de resistência (S_{LR}) e a ductilidade, descrita por valores de alongamentos em tração de 20 a 6% [9], levam ao material a apresentar uma grande resistência à fratura (tenacidade). Assim, o comportamento mecânico do aço após a estampagem é propício à absorção de energia por deformação plástica [1].

O gráfico da Figura 6 ilustra o posicionamento deste comportamento do material estampado a quente em relação a outras ligas de engenharia. Ressalta-se que o aço empregado no processo de estampagem a quente praticamente não possui elementos de liga (além do C, Mn, B e, eventualmente, Cr) em relação aos demais materiais comparados na Figura 6.

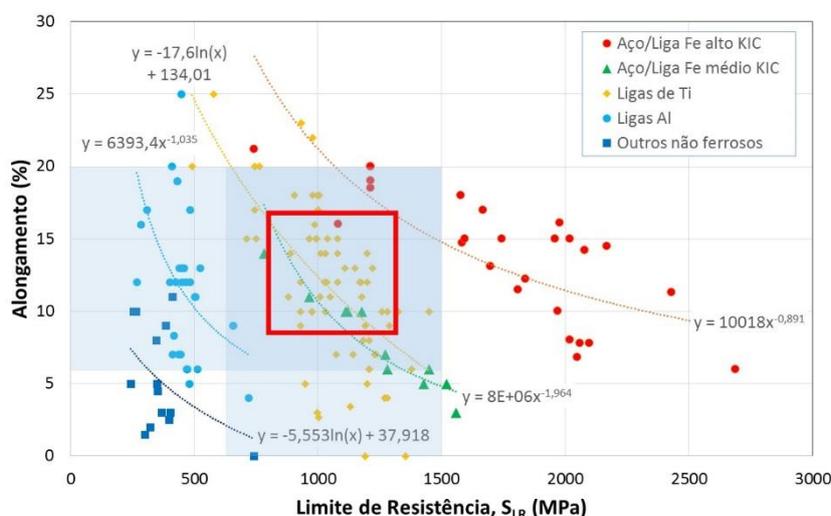


Figura 6. Relação entre ductilidade (representada pelo alongamento) e resistência (representada pelo limite de resistência) obtidos em ensaios de tração de inúmeras ligas de engenharia em relação à faixa obtida com os aços estampados à quente. Gráfico produzido com dados obtidos em [12].

Processo já empregado no exterior, com equipamentos e tecnologia disponíveis. Permite efetiva redução de peso em importantes componentes estruturais de segurança do automóvel, como as colunas “A” e “B” [5]. Além da qualidade dimensional, estas partes requerem grande resistência mecânica e à fratura, essenciais ao um processo produtivo eficiente e para obter um produto seguro, como por exemplo as colunas “A” e “B”, que são as principais partes estruturais da “célula de sobrevivência” de um automóvel (ver item 1.2.b), ilustradas na Figura 7.



Figura 7. Componente estruturais importantes da carroceria de um automóvel que estão sendo fabricados pelo processo de estampagem a quente [13].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Para se ter uma ideia do incremento do processo de estampagem a quente, em 2004 o consumo estimado de aços ao boro para estampagem a quente era de cerca de 70 mil toneladas por ano na Europa. Cinco anos depois o consumo aumentou para cerca de 300 mil toneladas. Japão e Estados Unidos estão seguindo esta tendência [5]. Adicionalmente, a produção de veículos automotores está sentindo uma grande expansão nos países emergentes, especialmente nos chamados BRICS (Brasil, Rússia, Índica, China e África do Sul), como mostrado no gráfico da Figura 8.

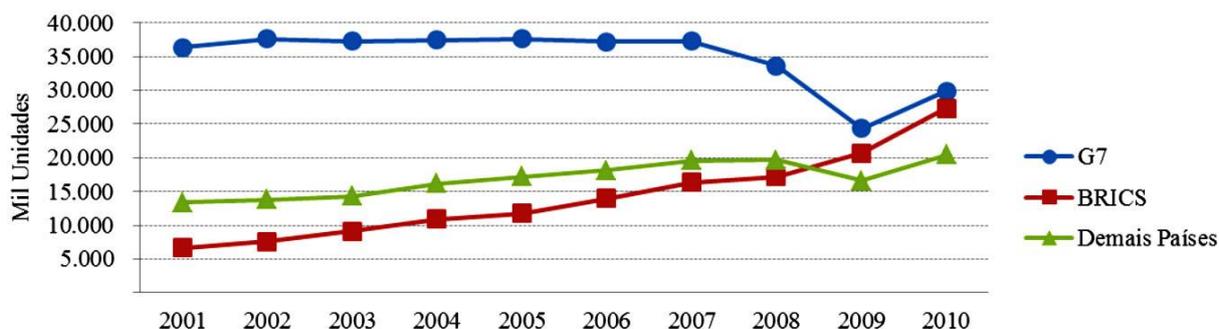


Figura 8. Evolução recente da produção mundial de veículos automotores [14].

Com a maior produção, haverá uma demanda proporcionalmente maior de novas tecnologias que, no caso em particular do Brasil, serão incentivadas pelo INOVAR-AUTO, novo regime automotivo de promoção da competitividade da indústria automotiva nacional. Destas novas tecnologias, o processo de estampagem a quente encontra-se entre os mais promissores, inclusive sendo motivo de divulgação de seu uso na produção de parte estruturais dos mais recentes lançamentos automobilísticos, como no caso do automóvel Volkswagen Up!, lançado recentemente, e que conta com 76% de sua estrutura construída de aços de alta e ultra alta resistência mecânica. Neste caso, o emprego do processo de estampagem a quente foi destacado na divulgação das características do novo veículo como forma de aumentar a segurança e economia do veículo [15].

Em termos nacionais o aço já é produzido pelas siderúrgicas, mas existe a necessidade de desenvolvimento de fornecedores de chapas/bobinas deste aço para menores quantidades. Além disso, o aço adequado para a estampagem à quente não é produzido no Brasil com o revestimento superficial protetivo (liga Al-Si) adequado. Porém, recentemente uma siderúrgica multinacional anunciou investimentos para o fornecimento ao mercado deste material.

4 CONCLUSÕES

A estampagem a quente é uma técnica que começou a ser desenvolvida industrialmente no anos 90 e agora está sendo incorporada no país. A produção de componentes a partir da estampagem a quente apresenta diversas vantagens em termos econômicos e de desempenho. Basicamente um aço relativamente simples é conformado em altas temperaturas ao mesmo tempo em que é temperado e assim fornecendo um componente de alta resistência e tenacidade. Os novos lançamentos automobilísticos possuem, como ponto em comum, o bom desempenho destes no testes de impacto (*crash tests*) do Latin NCAP. Existem algumas limitações em termos de fornecimento de matéria-prima, mas investimentos já estão sendo feitos e logo o processo estará sendo consolidado no país.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



REFERÊNCIAS

- 1 Morais WA, Borges HC. Condições técnico-econômicas para viabilizar o emprego de aços planos de elevada resistência mecânica em aplicações práticas. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2009;6(1):1-6.
- 2 Bodlani SB, Yuen CK, Nurick GN. The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities - Part I: experiments. *J. Appl. Mech.* 2009;76(4):360-371.
- 3 2013 Honda Accord body structure. 2014 [acesso em 7 mar. 2014]. Disponível em: <http://boronextrication.dev.fireemblogs.com/tag/honda/>.
- 4 Morais WA, Fernandes AA, Costa AK, Borges HC. Revisão das principais características que definem as aplicações de aços planos não ligados. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 67º Congresso da ABM; 31 de Julho a 3 de Agosto; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2012. p.2661-2673.
- 5 Altan T. Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts. 2006 [acesso em 10/01/2014]; Dec. Disponível em: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/hot-stamping-boron-alloyed-steels-for-automotive-parts>.
- 6 Kusumi K, Nomura N, Maki J. Formability and FEM simulation of steel sheets in the hot stamping process. *Nippon Steel Technical Report*. 2013; May: 47-54.
- 7 Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). Veículo mais leves. 2014 [acesso em 01 abr. 2014]. Disponível em: <https://www.sabic-ip.com/gep/pt/AboutUs/SustainabilitySolutionsDetail/automotiveweightout.html>.
- 8 Karbasian H, Tekkaya AE. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, v.210 (n.15): 2103-2118.
- 9 Fan, D.W.; Kim, H.S.; Biroasca, S; Coomna, B.C. Critical review of hot stamping technology for automotive steels. *Materials Science and Technology*. 2007; Set.: p.16-20.
- 10 SteCal - Low-alloy steels: Their properties and how to obtain them. Version 3.0.3. Materials Park (USA): ASM International, 2004.
- 11 Lechler J, Merklein M. Hot stamping of ultra high strength steels as a key technology for lightweight construction. *Materials Science and Technology*. 2008; Oct.: p.1698-1709.
- 12 Matweb: Material Property Data. 2014 [acesso em 26 fev. 2014]. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>.
- 13 Body & Chassis Systems: Hot Stamping. 2014 [acesso em 13 jan. 2014]. Disponível em: <http://www.magna.com/capabilities/body-chassis-systems/innovation-technology/hot-stamping>.
- 14 Costa RM, Henkin H. Estratégias Competitivas e Desempenho da Indústria Automobilística no Brasil. In: Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia. Anais do XL Encontro Nacional de Economia; 11 a 14 de Dezembro; Porto de Galinhas, Brasil. Niterói: ANPEC; 2012. [acesso em 12 mar. 2014]. Disponível em: <http://www.anpec.org.br/novosite/br/encontro-2012>.
- 15 Campo Grande P. Mudança de fase - teste Volkswagen UP !. *Revista Quatro Rodas*. 2014; Fev. Ed. 653..

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.