

# NOVAS TENDÊNCIAS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DE CHAPAS

Antonio Augusto Gorni



CINTEC 2009 – Mecânica e Automação  
Joinville, Setembro 2009

# INTRODUÇÃO

- Nas últimas décadas a metalurgia dos aços para chapas vem evoluindo continuamente, proporcionando **economia e eficiência** cada vez maiores na fabricação e uso dos bens de consumo duráveis.
- Nas **aplicações automotivas** o impacto dessas melhorias é mais intenso devido ao enorme tamanho desse mercado e seu impacto global na economia. O principal objetivo: **redução de peso através de aumento de resistência mecânica**.
- Pontos de Transição Históricos:
  - **1973**: Guerra no Oriente Médio - Primeira Crise do Petróleo;
  - **1990**: Globalização e Hipercompetição;
  - **2000**: Conscientização Ecológica: Aquecimento Global;
  - **2008**: Barril a US\$ 150 - Início do Fim da Era do Petróleo?

# EVOLUÇÃO DOS AÇOS A.H.S.S.

Desenvolvimentos de Aços Avançados de Alta Resistência para a Indústria Automobilística Feitos desde 1975

Objetivo:  
Estruturas Leves de Aço

Novos Processos?

Projeto de Materiais?

22MnB5 LR > 1000 MPa

Aços TWIP LR > 500 MPa

Aços Fase Complexa, LR = 800~1000 MPa

Aços Parcialmente Martensíticos - LR = 600 ~ 1000 MPa

Aços Super IF - LE = 200 MPa, LR = 300 MPa

Aços TRIP - LR > 600 MPa

Aços Isotrópicos - LE = 250 MPa

Aços IF de Alta Resistência - LR > 350 MPa

Aços Bake Hardening - LE = 180 ~ 300 MPa

Aços Bifásicos - LE = 450 ~ 950 MPa

Aços Refosforados - LE = 220 ~ 300 MPa

Aços Microligados - LE = 260 ~ 420 MPa

1975

1980

1985

1990

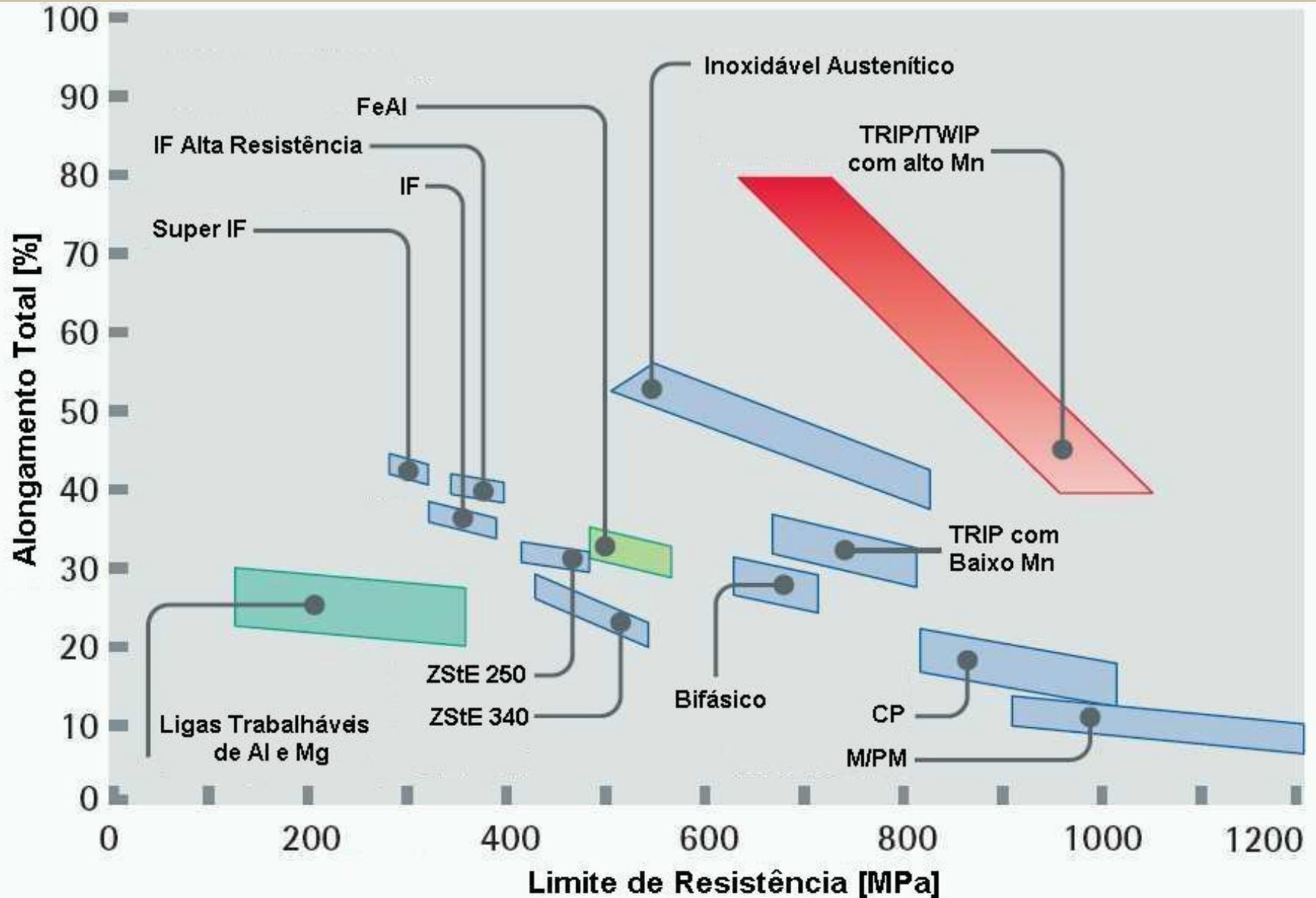
1995

2000

2005

2010

# BALANÇO RESISTÊNCIA x DUCTILIDADE



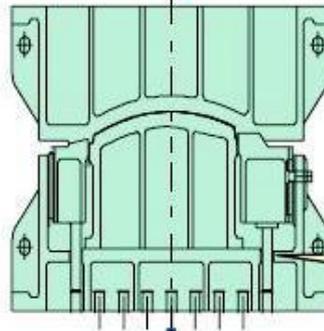
# MAS QUAL É O LIMITE?

- Há limites para se conciliar **resistência mecânica** e **ductilidade** dos aços, apesar dos enormes avanços feitos em termos de microestrutura e processos.
- Afinal, ao se definir um novo um limite, logo se deseja **ultrapassá-lo**.
- O principal problema não é a conformabilidade propriamente dita, mas sim o **efeito-mola** (*springback*) típico dos aços com maior resistência mecânica.
- A peça chega a ser estampada, mas as tensões residuais afetam sua **precisão dimensional** ou a **distorcem** de forma intolerável.

# EFEITO MOLA

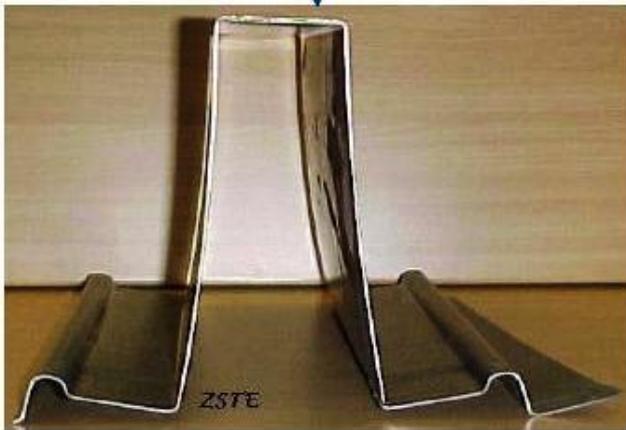
Vergleich der Rückfederung anhand eines Versuchswerkzeuges

**ZStE 340**  
( $s_0 = 2,5 \text{ mm}$ )



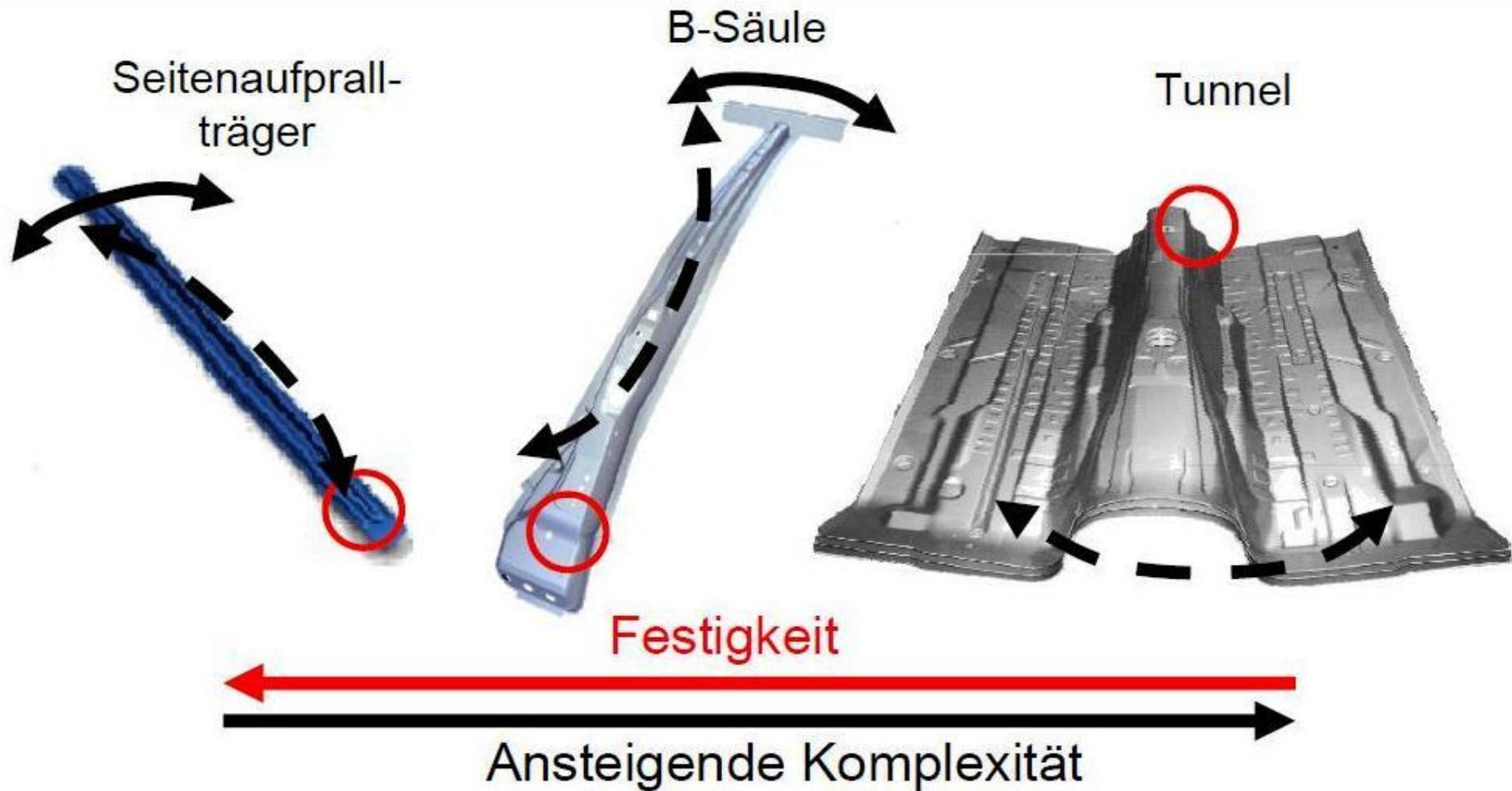
**DP 600**  
( $s_0 = 2,5 \text{ mm}$ )

Versuchswerkzeug



Kolleck, Einführung in den Maschinenbau, 2006

# LIMITES DA ESTAMPAGEM A FRIO



Legende:



Risse

- - - Rückfederung

— Verdrehung

Kolleck, Einführung in den Maschinenbau, 2006

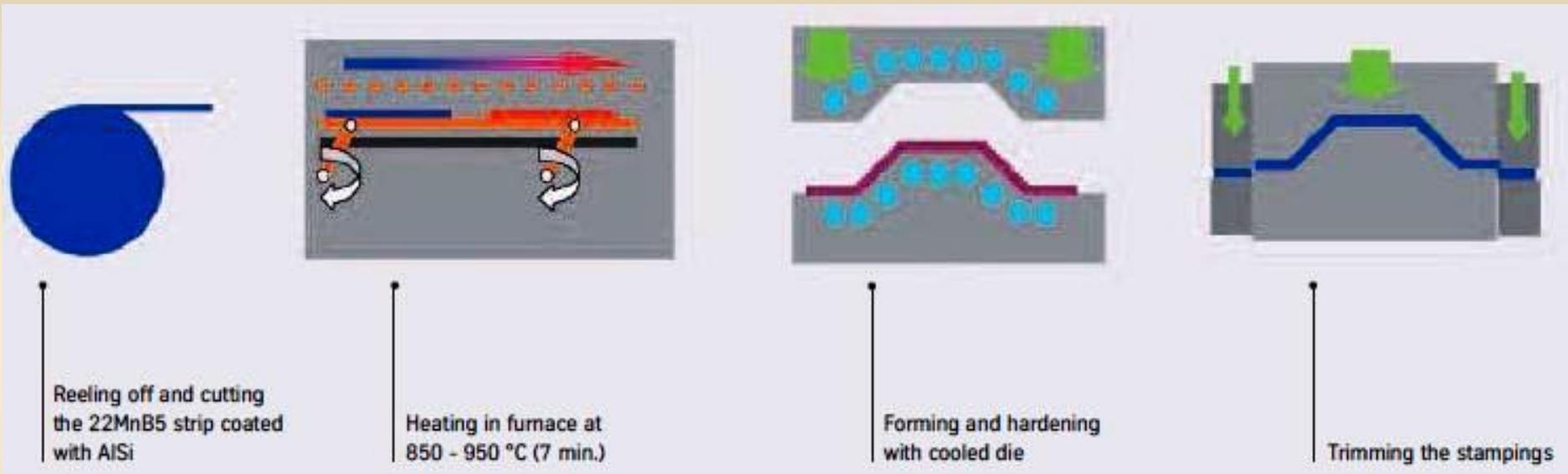
# A TEMPERATURA COMO VARIÁVEL

- É necessário **desvincular** as características de **processamento** e de **aplicação** do material.
- **Nova abordagem:** auxiliar o processo de conformação de chapas através do uso de maiores temperaturas, ativando os planos cristalinos de escorregamento:
  - **A Morno:** feita sob temperaturas onde **não ocorre recristalização** do material após deformação;
  - **A Quente:** feita sob temperaturas onde **ocorre recristalização** do material após deformação. E, no caso do aço, pode-se efetuar **tratamentos termomecânicos** (ex: austenitização, estampagem e têmpera), em busca de **alta resistência mecânica** (máx. **1500 MPa**) ou **perfis mais favoráveis** de propriedades mecânicas.
- Surge então a idéia da **estampagem a quente**.

# HISTÓRICO

- O processo de **estampagem a quente** (*hot stamping* ou *press hardening*) foi originalmente desenvolvido na empresa sueca *Plannja Hard Tech* em **1973** e começou a se tornar mais comum no **final da década de 1990**.
- Atualmente voltado para a produção de componentes **anti-intrusão** e de **reforços estruturais** para carros de passageiros, cujo **porte e formato complexo** torna difícil o uso de aços AHSS estampados a frio.
- Estima-se que em **2004** o processo consumiu de **60.000 a 80.000 toneladas** de chapas de aço na Europa.
- Expectativas para **2009** (pré-crise):
  - Consumo de **300.000 t** na Europa;
  - Construção de mais **20 novas** linhas de estampagem a quente.

# PRINCÍPIO DO PROCESSO



4 ~ 10 min

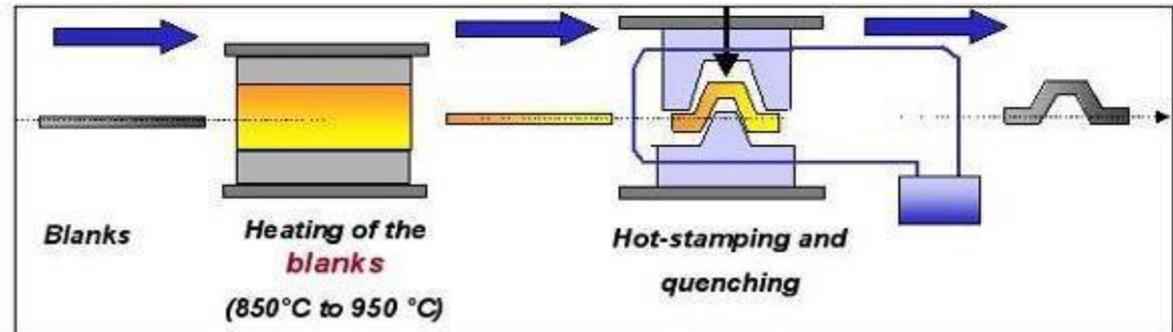
15 ~ 25 seg

Nicholas, ThyssenKrupp Tech Forum, July 2005

# LINHAS INDUSTRIAIS

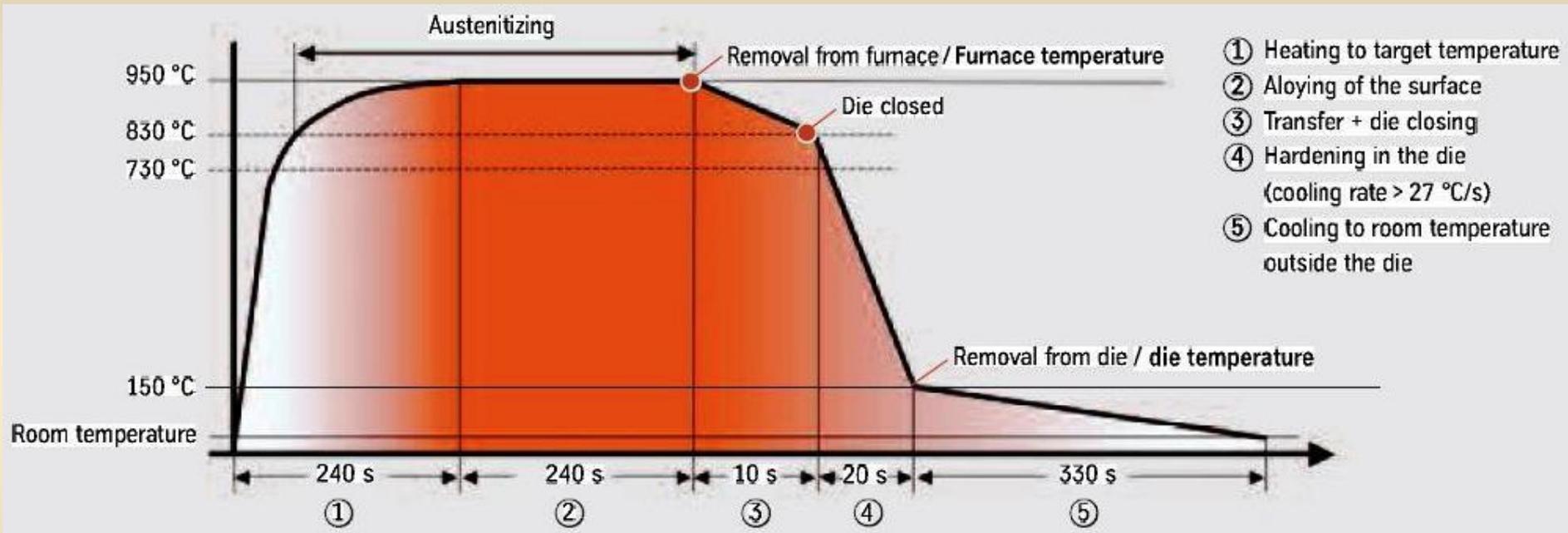


20 lines in Europe



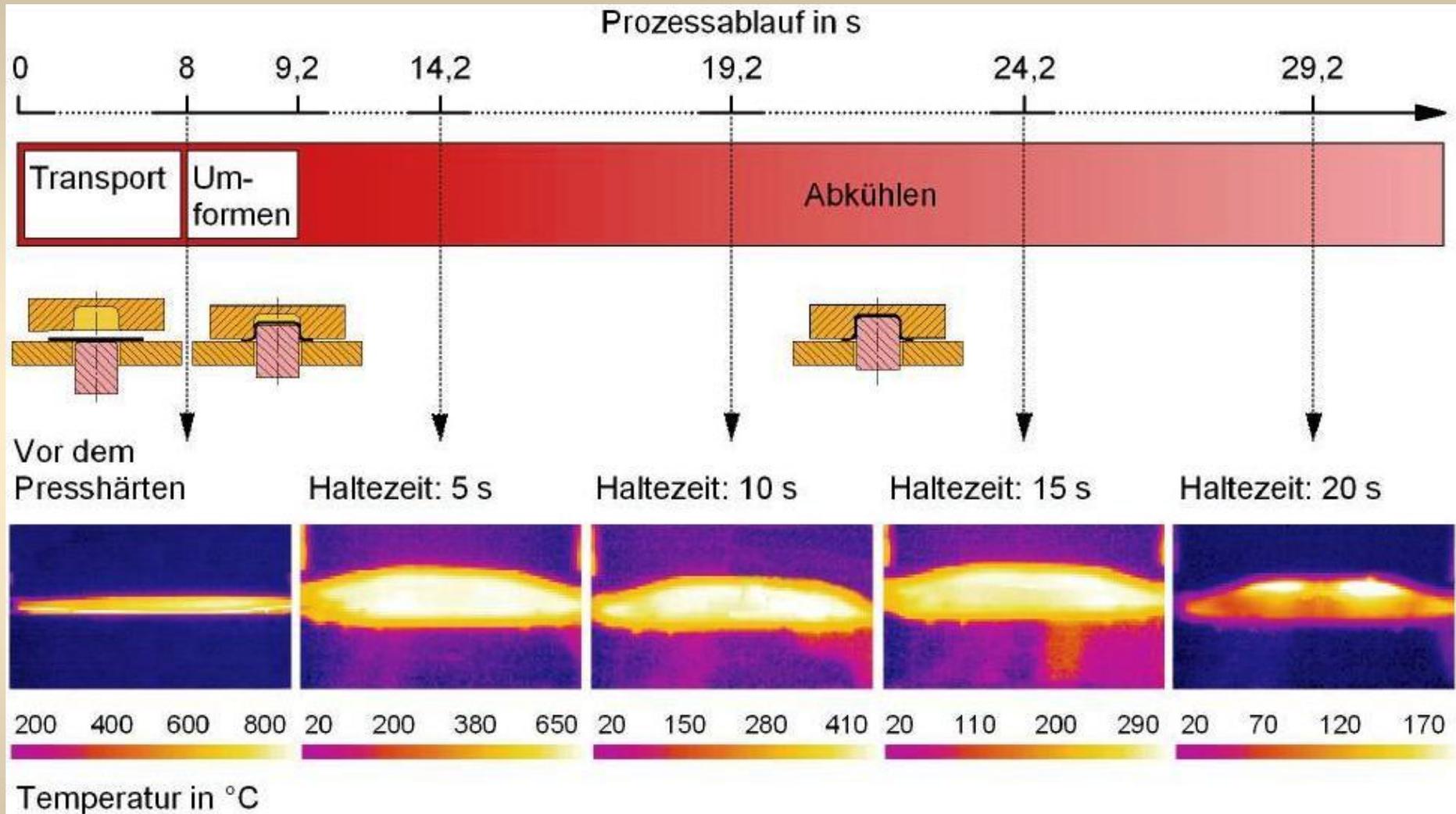
Ferreira, Congresso Anual da ABM, 2009

# CICLO TÉRMICO DO PROCESSO



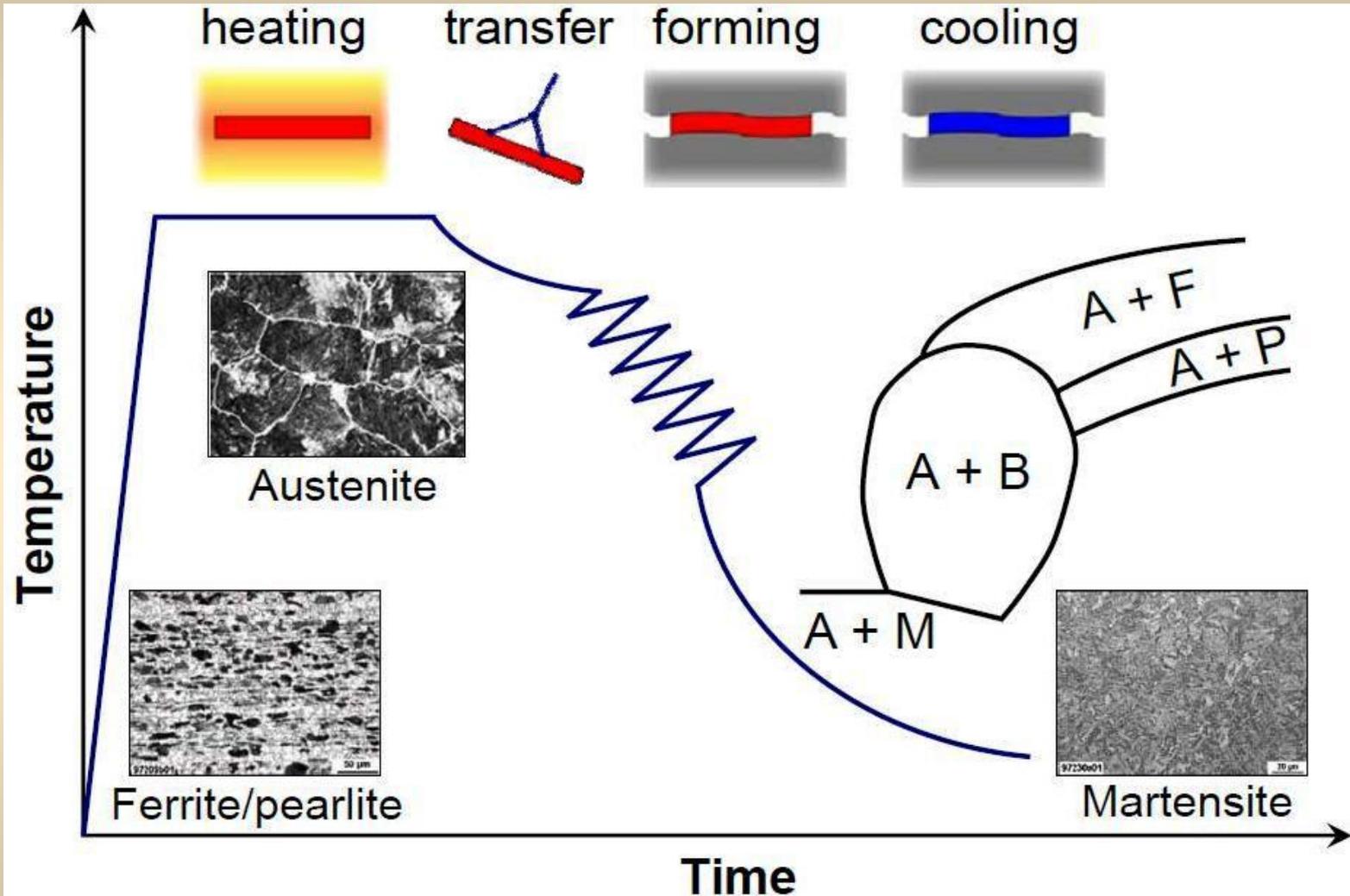
Maas, ThyssenKrupp Tech Forum, Jan. 2008

# TERMOGRAFIA DO PROCESSO



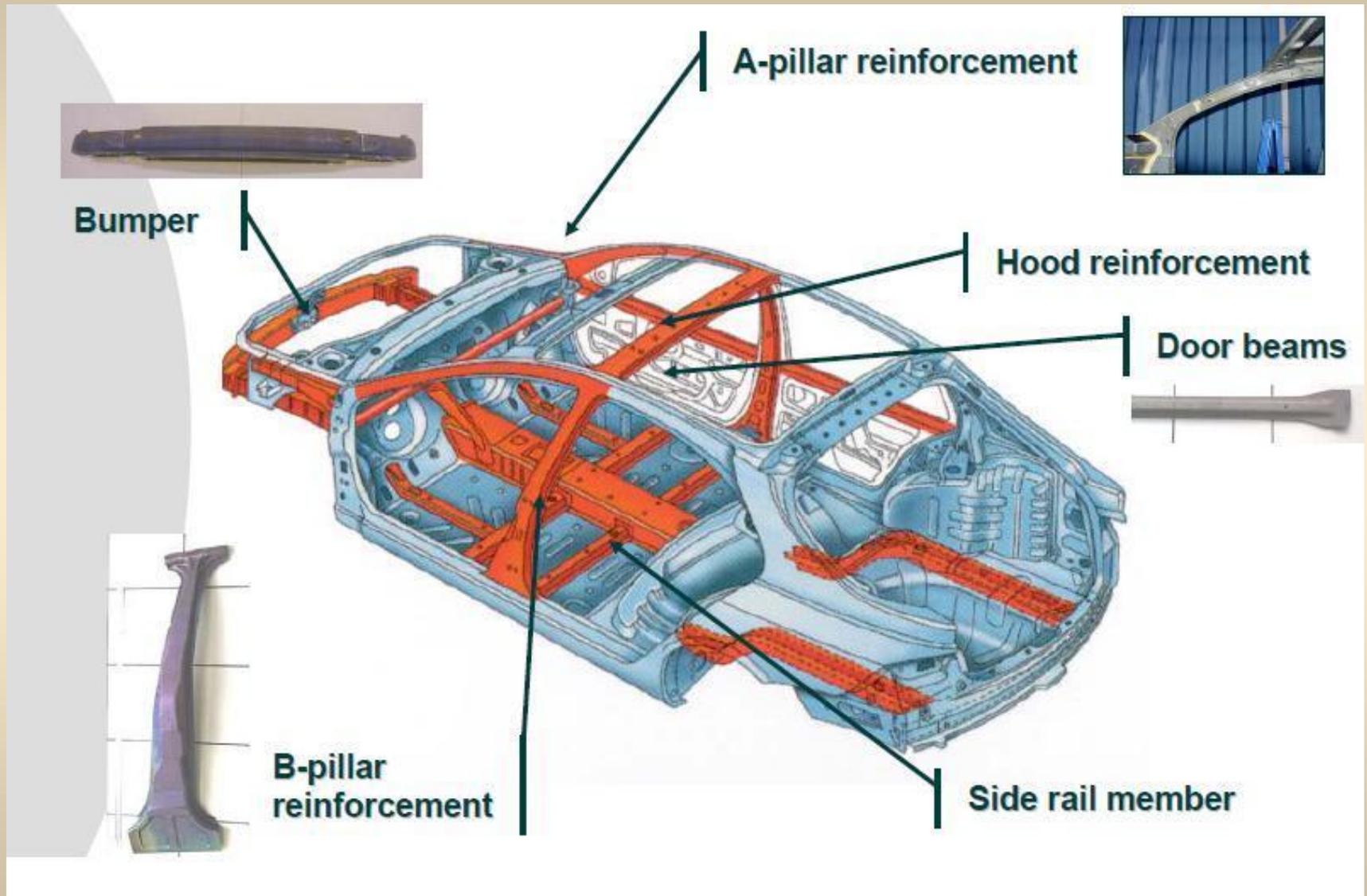
Klimmek, LS-DYNA Anwenderforum, 2007

# METALURGIA DO PROCESSO



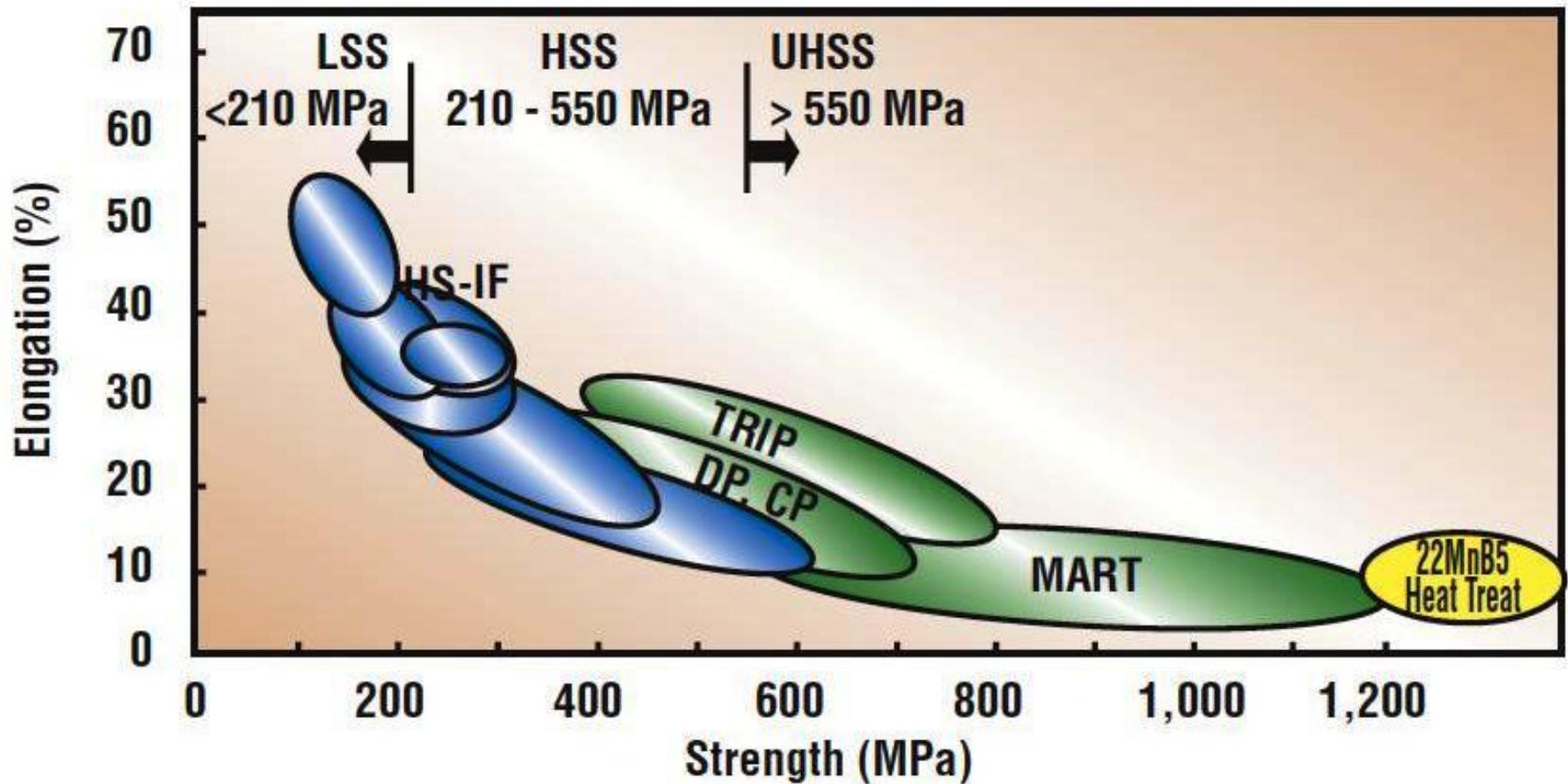
Turetta, Doctor Thesis, Università di Padova, 2008

# EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

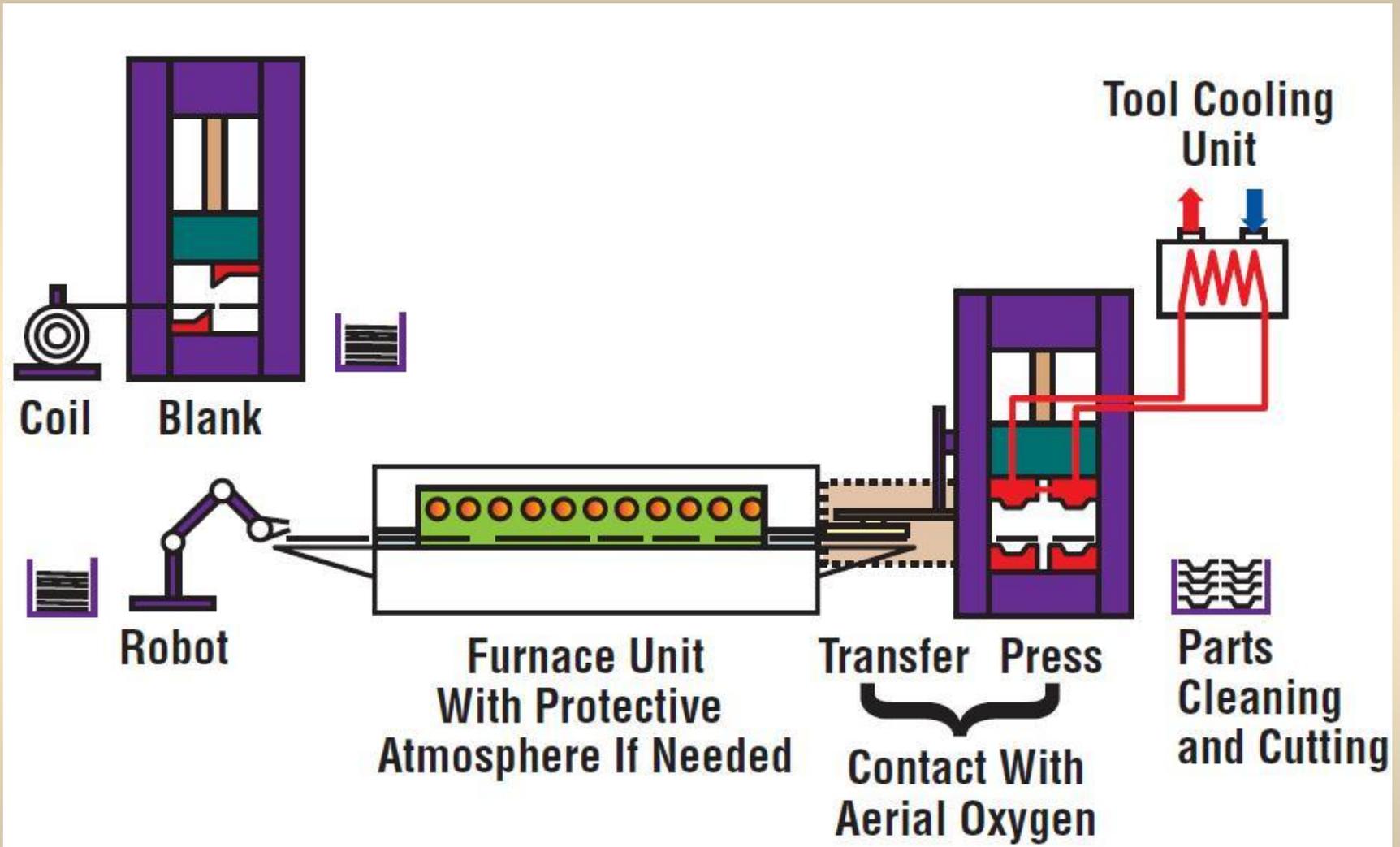


# PERFIL DE PROPIEDADES

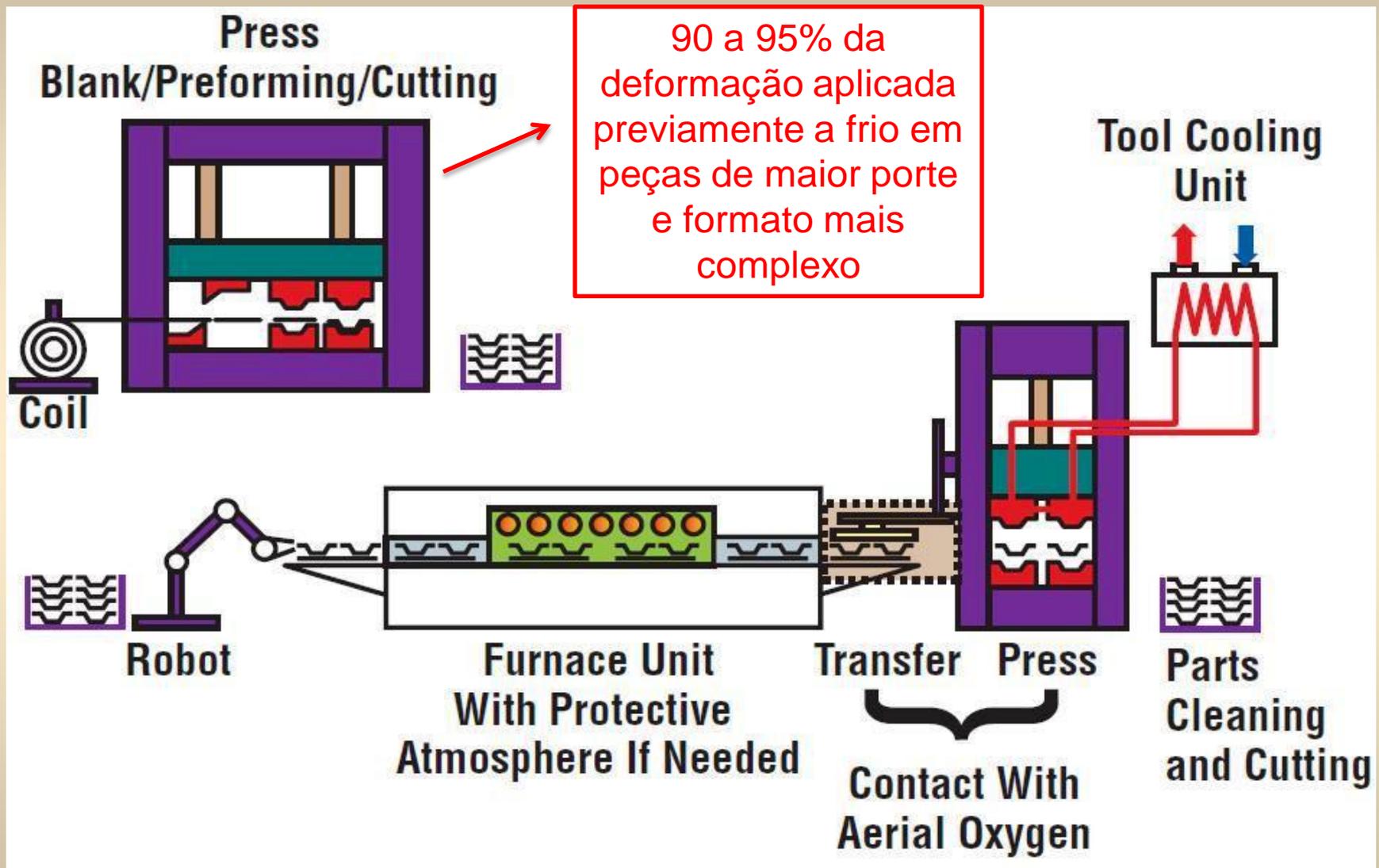
## Steel Strength and Elongation Classification



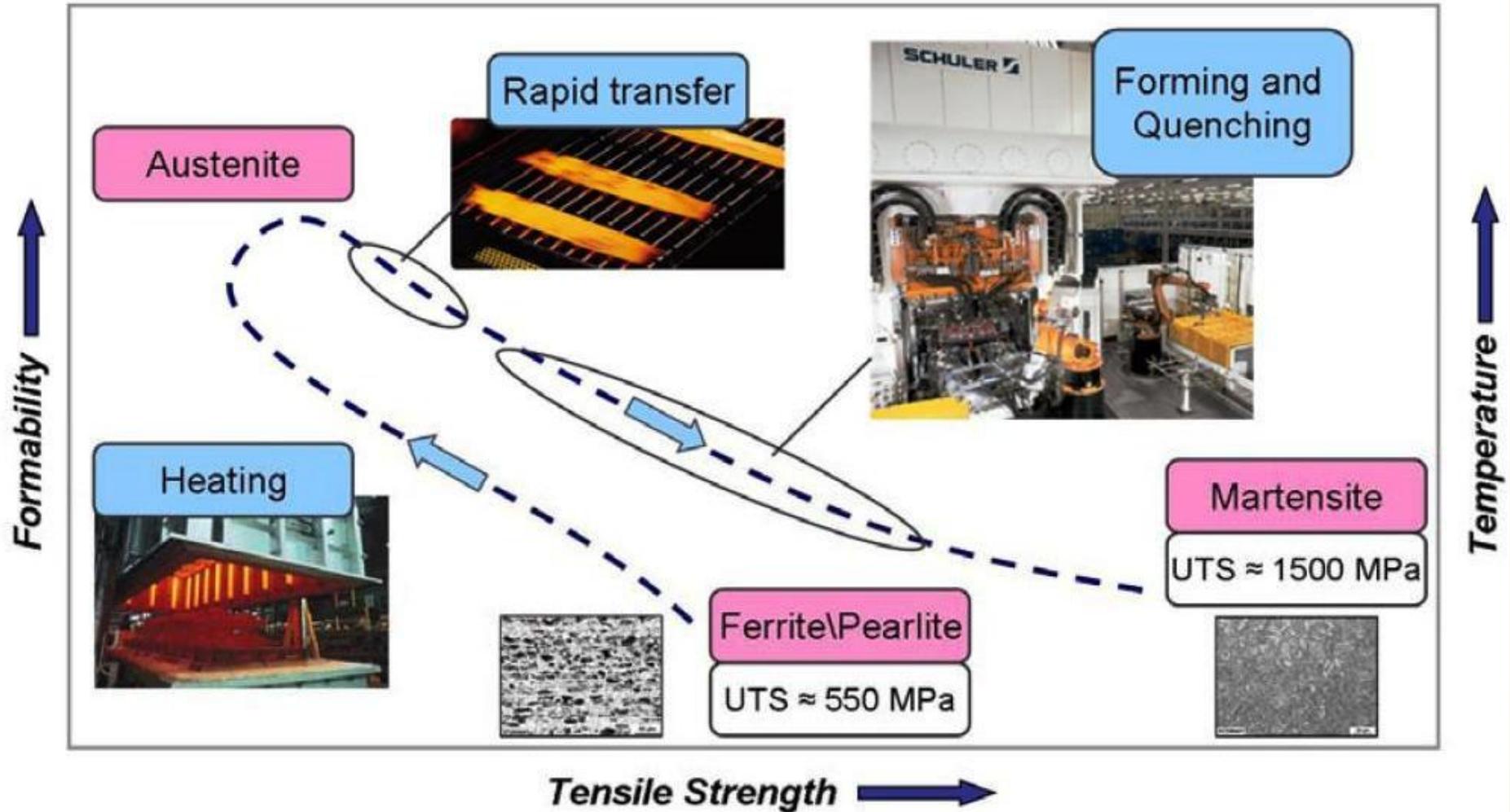
# PROCESSO DIRETO



# PROCESSO INDIRETO



# SEQÜÊNCIA DO PROCESSO

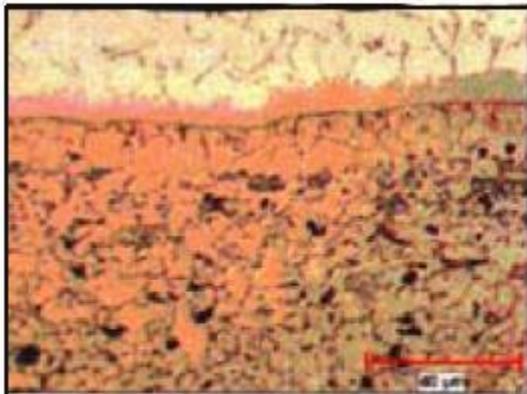


# PREPARAÇÃO DOS BLANQUES

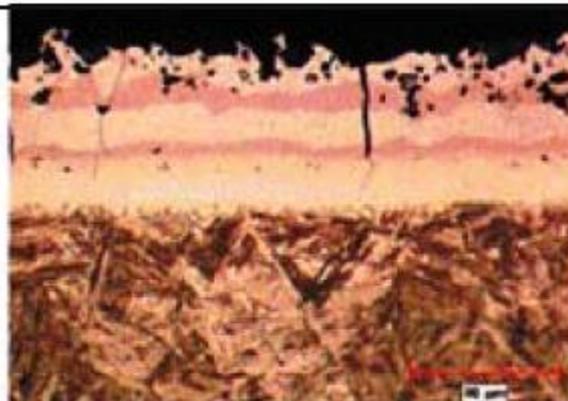
- A indesejável oxidação da superfície do aço desprotegido é **inevitável** durante sua austenitização.
- Uma possível solução é o uso de **fornos com atmosferas protetivas**, mas neste caso é impossível evitar alguma oxidação/descarbonetação (até 60  $\mu\text{m}$ ) durante a transferência do blanque do forno para a prensa.
- **Problemas:**
  - A carepa (óxido) superficial é **extremamente dura**, promovendo acelerado **desgaste** da matriz de estampagem;
  - A descarbonetação **prejudica as propriedades** da peça acabada.
  - O **jateamento com granalha ou areia** da peça acabada para remover a camada de óxido é cara e pode **afetar as tolerâncias geométricas** das peças, as quais apresentam espessura relativamente pequena.

# PREPARAÇÃO DOS BLANQUES

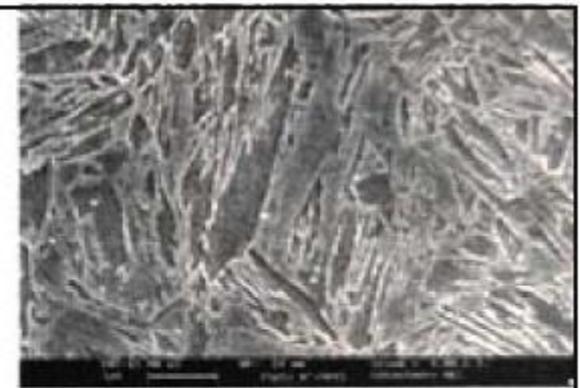
- Solução: **revestir** os blanques com uma camada de **alumínio-10% silício** com espessura entre 23 e 32  $\mu\text{m}$ .
- Durante o aquecimento esse revestimento se transforma numa **camada ligada de Fe-Al-Si** altamente aderente ao substrato, concedendo-lhe boa resistência à corrosão.
- O uso desse revestimento permite pintar a peça de forma direta, **dispensando o jateamento**.



A. Alloyed layer structure after hot stamping



B. Martensitic structure after hot stamping



C. Al-Si coating before hot stamping

# AÇOS RECOMENDADOS

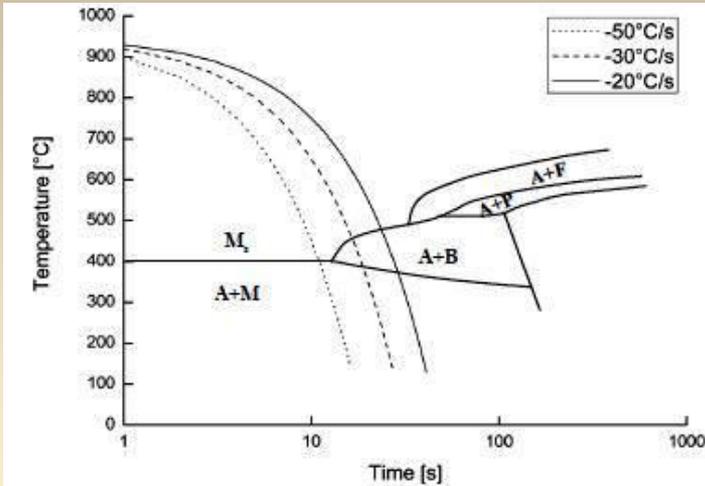
- Os aços mais adequados às **janelas de processo** do ponto de vista técnico e econômico são **ao B** e contêm **alto Mn**:

**Table 1 Compositions of hot stamping steels and their estimated  $M_s$  temperatures [6, 9-11]**

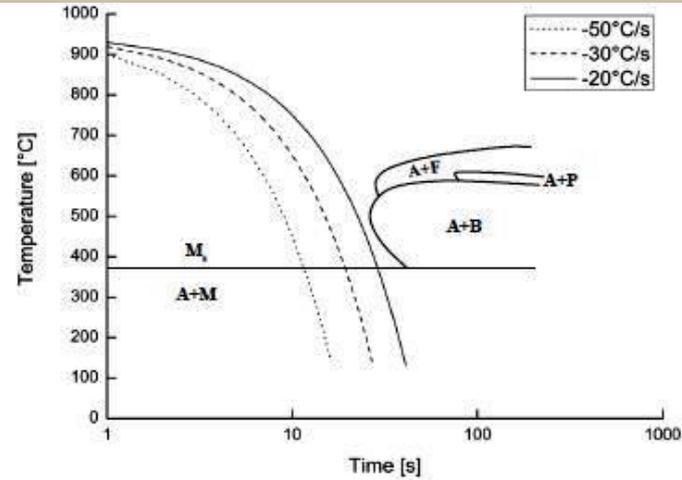
$$M_s = 499 - 308 \times C - 32.4 \times Mn - 27.0 \times Cr - 16.2 \times Ni - 10.8 \times (Si + Mo + W) + 10 \times Co$$

Steel	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	P [%]	S [%]	B [%]	Al [%]	Ti [%]	Mo [%]	$M_s$ [°C]
1	0.23	0.29	1.25	0.211	0.013	0.003	0.0030	\	\	\	405
2	0.211	0.25	2.14	\	0.012	0.006	\	0.031	\	\	388
3	0.20	0.19	1.22	0.24	\	\	0.0019	\	\	\	420
4	0.225	0.25	1.25	0.155	0.0025	0.008	0.0035	0.015	0.035	0.10	406

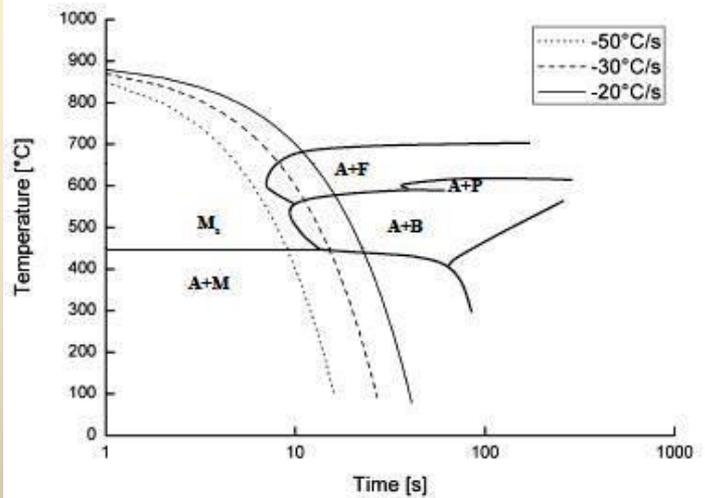
# DIAGRAMAS TRC



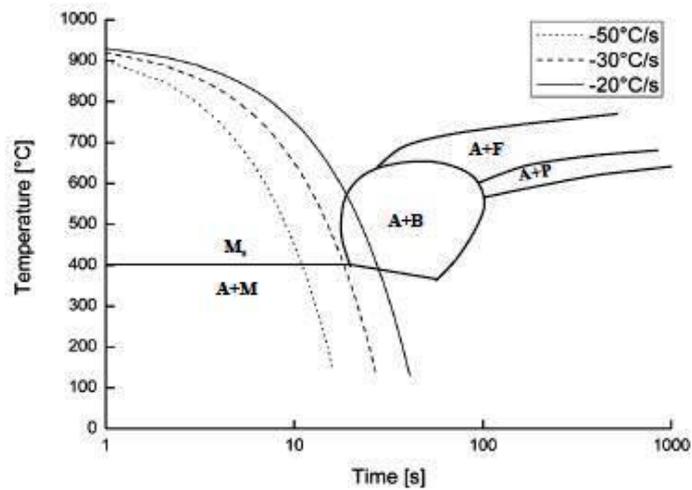
(a)



(b)

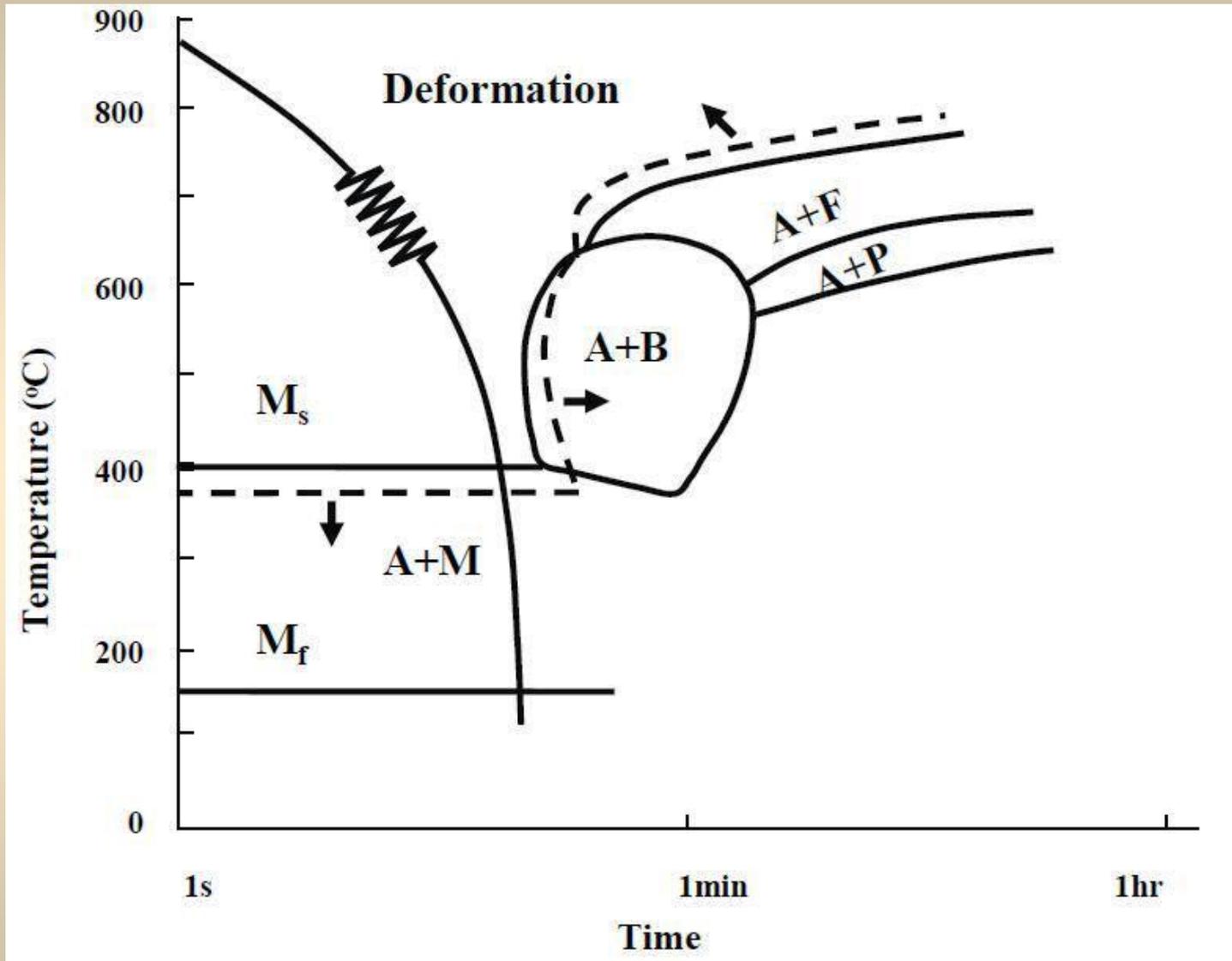


(c)



(d)

# EFEITO DA DEFORMAÇÃO



# VANTAGENS DO NOVO PROCESSO

- **Menores cargas** de conformação;
- Menor incidência do **efeito-mola** (*springback*), promovendo maior precisão dimensional do componente final;
- **Melhor conformabilidade**, ou seja, maior liberdade de *design* para as peças;
- **Distribuição mais uniforme** de propriedades mecânicas através da peça (não depende do grau local de deformação, como na estampagem a frio);
- Conformação executada **em uma só etapa**, com a correspondente redução no número de matrizes;
- Obtenção de **perfis otimizados** de propriedades mecânicas mediante tratamentos termomecânicos.

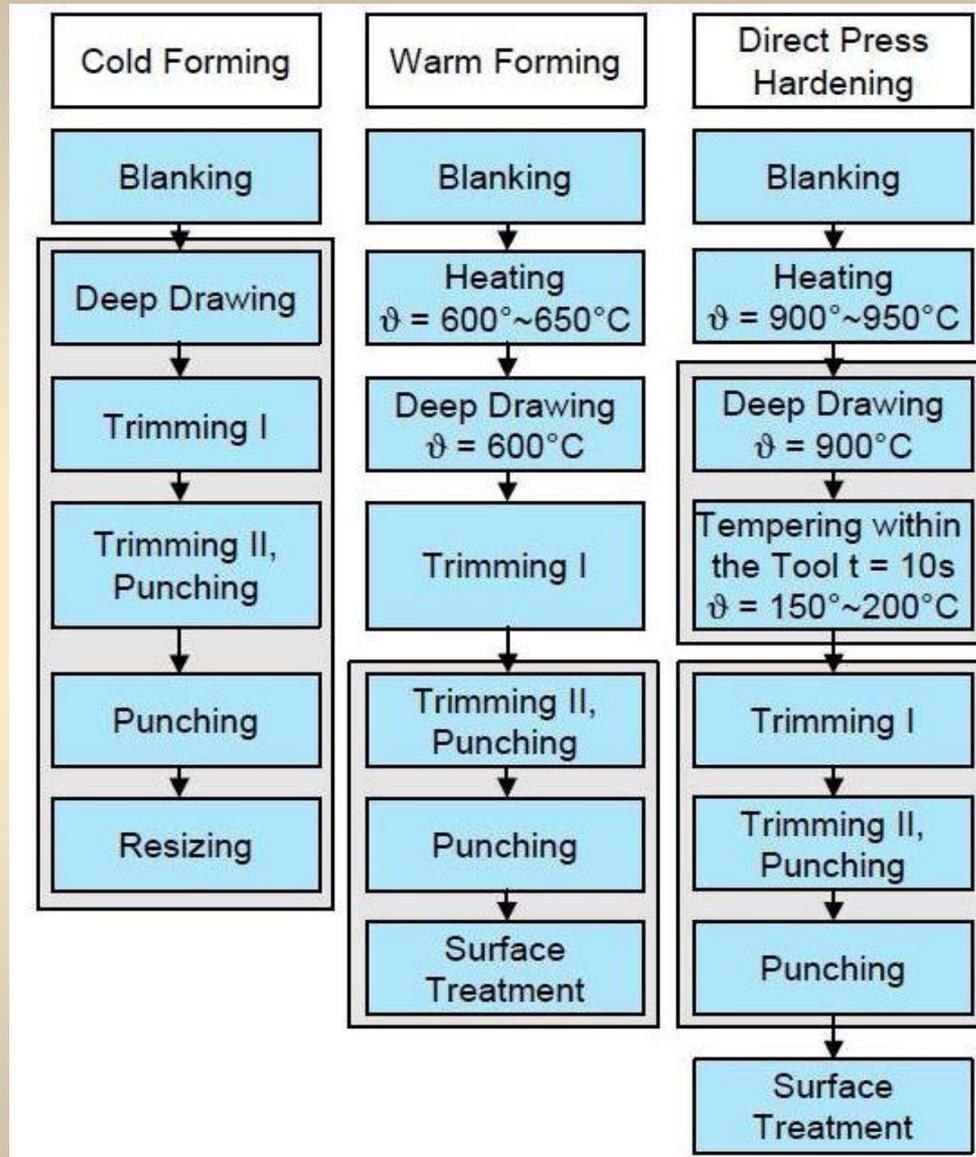
# DESVANTAGENS

- **Requer energia** para aquecer e resfriar o blanche, cujo custo é equivalente a **quatro vezes** o valor correspondente no caso da estampagem a frio!
- Necessidade de **proteção do blanche** contra oxidação descarbonetação, o que aumenta os custos;
- Requer equipamentos e ferramentais **resistentes ao calor**;
- **Maiores tempos de ciclo** em função do resfriamento controlado (têmpera e, eventualmente, revenido), resultando em **menores níveis de produtividade**.

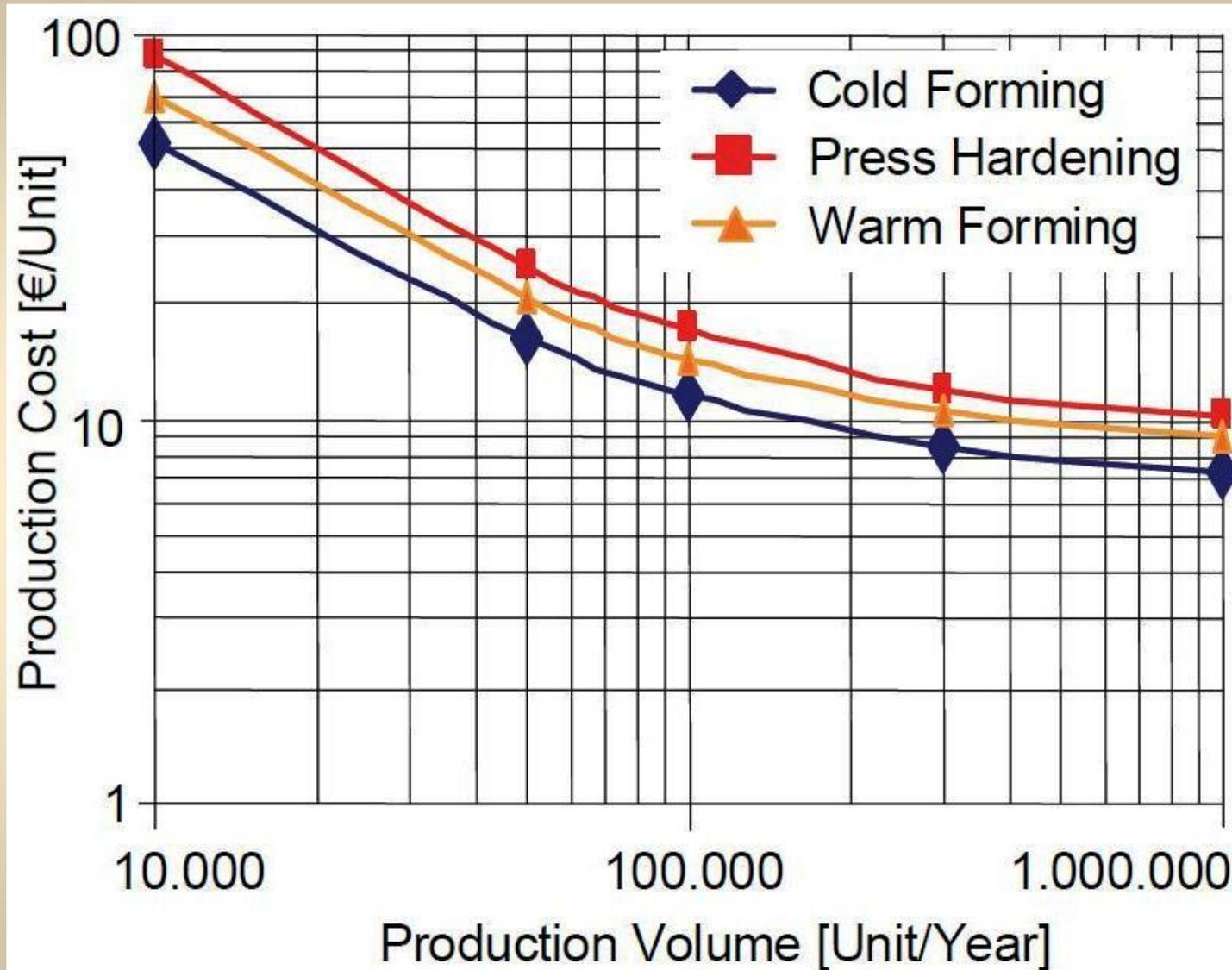
# COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS

- Peça selecionada: **pilar “B”** para automóvel
- Alternativas consideradas:
  - **Estampagem a frio** de chapas de aço bifásico (DP 600), com espessura de 2,2 mm e revestidas com zinco;
  - **Estampagem a morno** (600°C) de chapas de aço bifásico (DP 600), com espessura de 2,2 mm e revestidas com zinco;
  - **Estampagem a quente** (900°C), têmpera (15 s) e revenido (150~200°C, 10 s) de chapas de aço 22MnB5 com espessura de 1,85 mm e revestido com AlSi.
- Versão feita por estampagem a quente, além de apresentar **menor espessura**, dispensa os **componentes para reforço estrutural** presentes nas outras versões. Isso contribui para reduzir mais o **peso do veículo** em comparação com as outras abordagens.

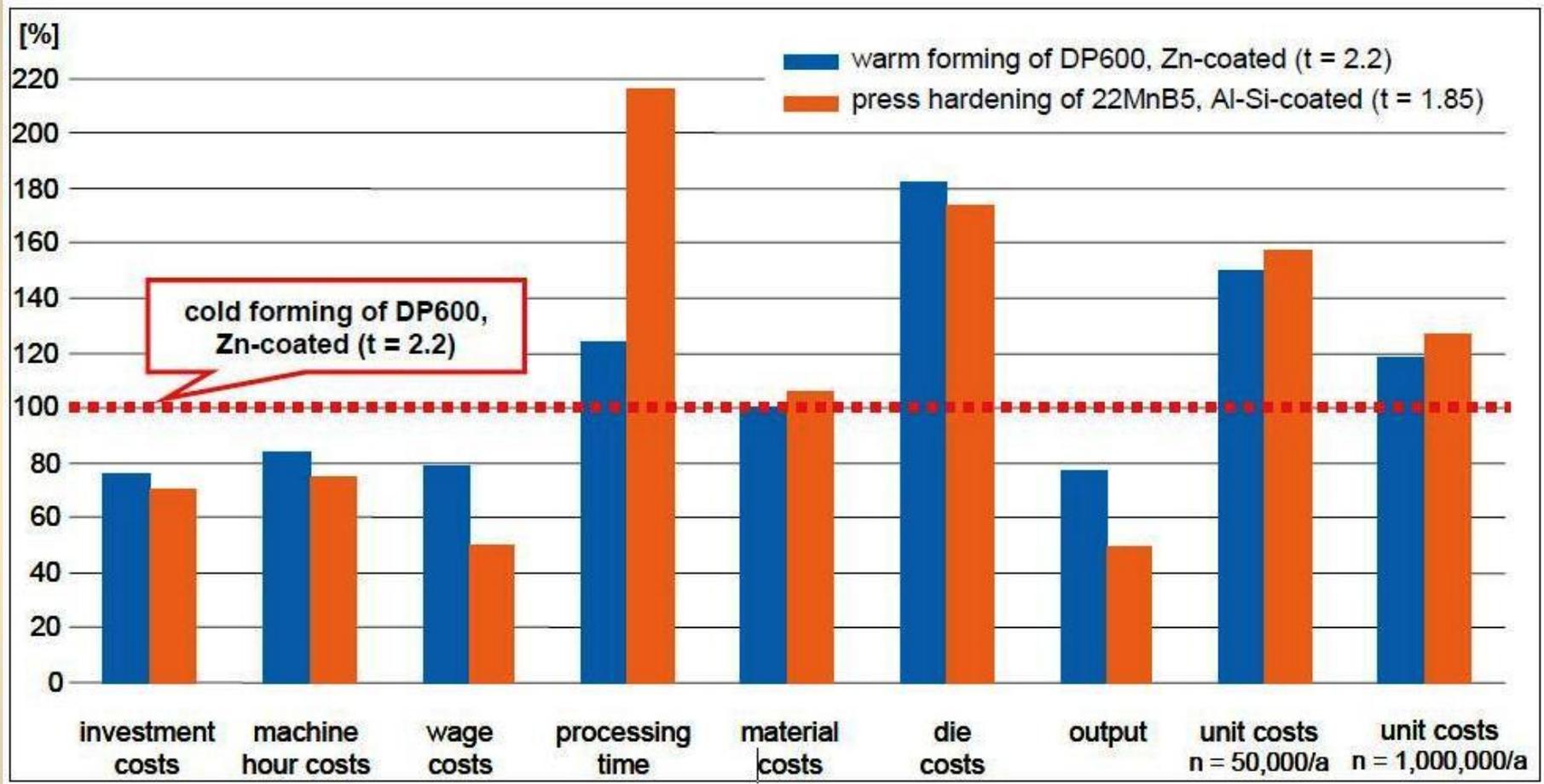
# COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS



# COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS



# COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS



# PORTANTO, EM TERMOS DE CUSTOS:

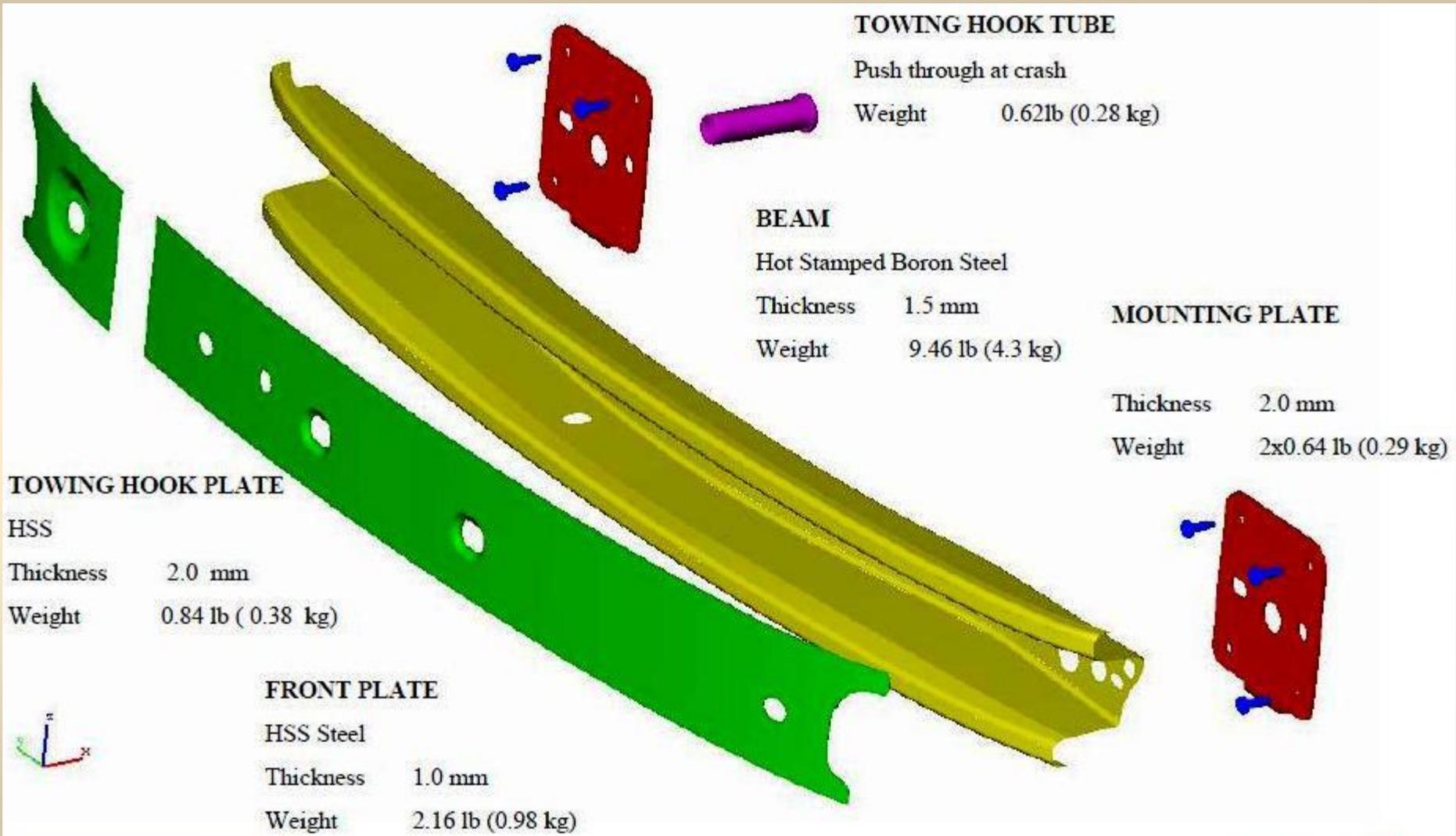
- A estampagem a quente é **imbatível** quando se trata de fabricar **componentes complexos** e com **resistência mecânica muito alta**, sob níveis que só podem ser alcançados com a **têmpera** do material.
- Ela tende a ser **mais cara** quando se trata de componentes cuja fabricação seja **viável** através da **conformação a frio de aços AHSS**.
- Eventualmente outros fatores podem **favorecer** a estampagem a quente apesar de seu maior custo:
  - Prioridade na **redução de peso** do veículo;
  - **Redução do número de componentes** através de sua incorporação à uma **única peça, maior e com formato mais complexo**;
  - Altos requisitos de **precisão dimensional** do componente.

# EXEMPLOS REAIS

- **Para-Choques Frontal** do Ford Focus, fabricado pela Gestamp Hardtech:



# EXEMPLOS REAIS

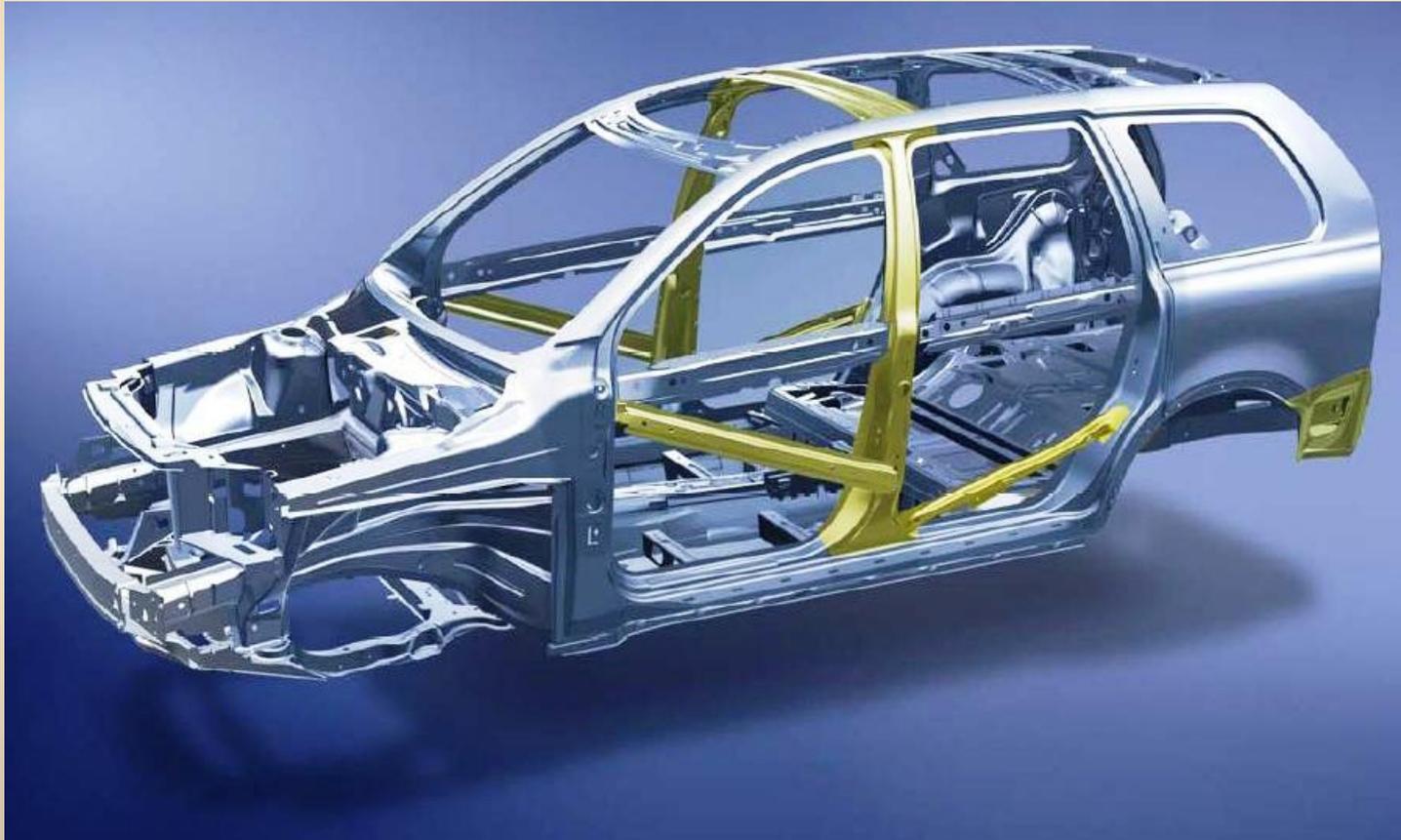


# EXEMPLOS REAIS

- Em **2004** foram compiladas **33 versões de pára-choques** feitos nos E.U.A. por **estampagem a quente** para diversos modelos de veículos em várias montadoras – **VW, GM, Citroën, Ford e Smart**;
- Aços Usados: **SAE 10B21 e 15B21**;
- Blanques com **espessura** variando entre **1,50 e 3,50 mm**;
- Propriedades típicas pós-têmpera:
  - Limite de Escoamento: **1140 MPa**
  - Limite de Resistência: **1520 MPa**
  - Alongamento Total: **12%**
  - Dureza: **479 HV**

# EXEMPLOS REAIS

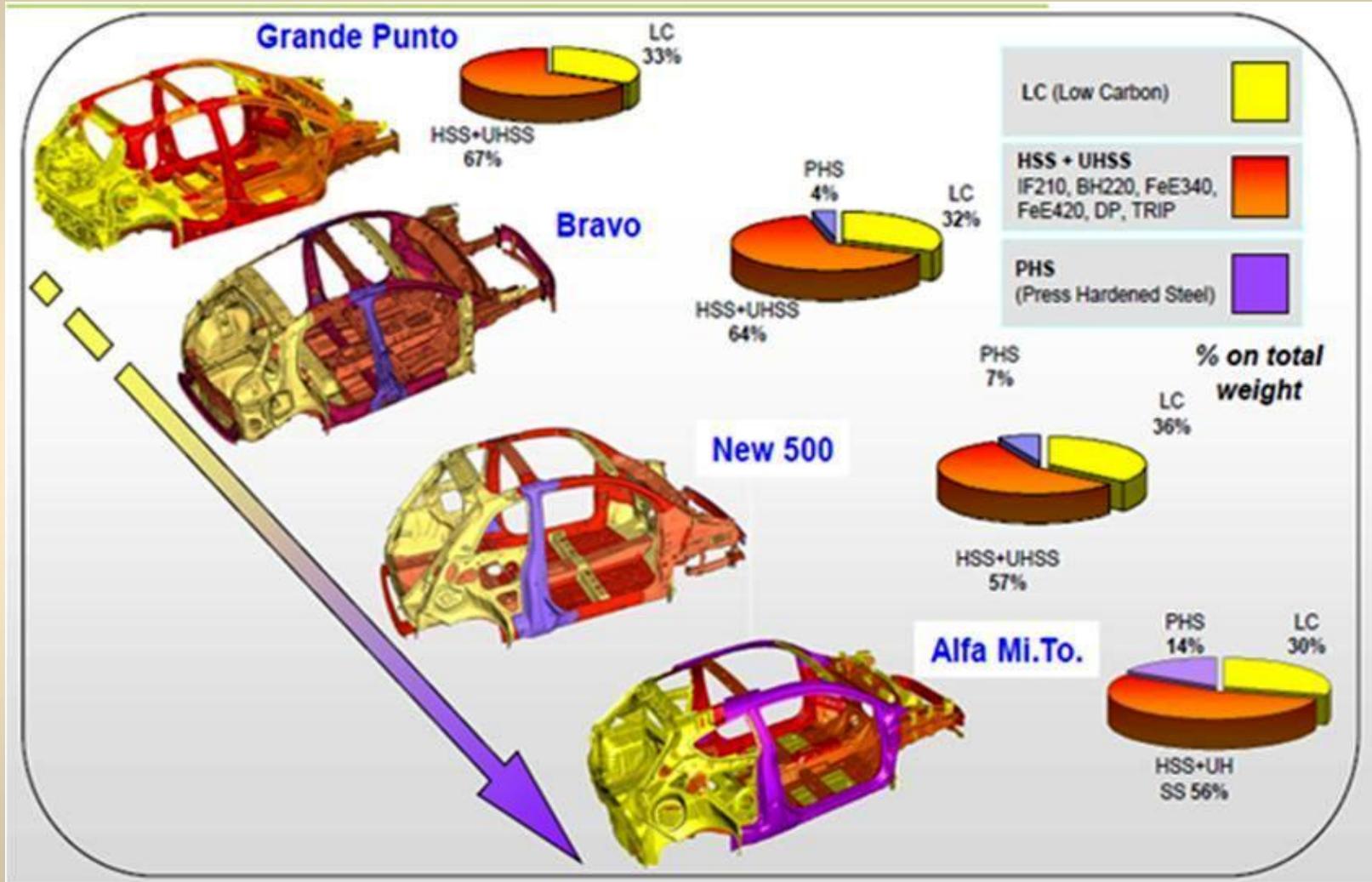
- **Barras de Impacto e Reforço do Pilar B** do Volvo XC60, fabricados pela Gestamp Hardtech, permitindo redução de peso de 15 quilos:



Jonsson, Great Designs in Steel, 2005

# EXEMPLOS REAIS

- Evolução na FIAT:



# INOVAÇÕES: *TAILORED BLANKS*

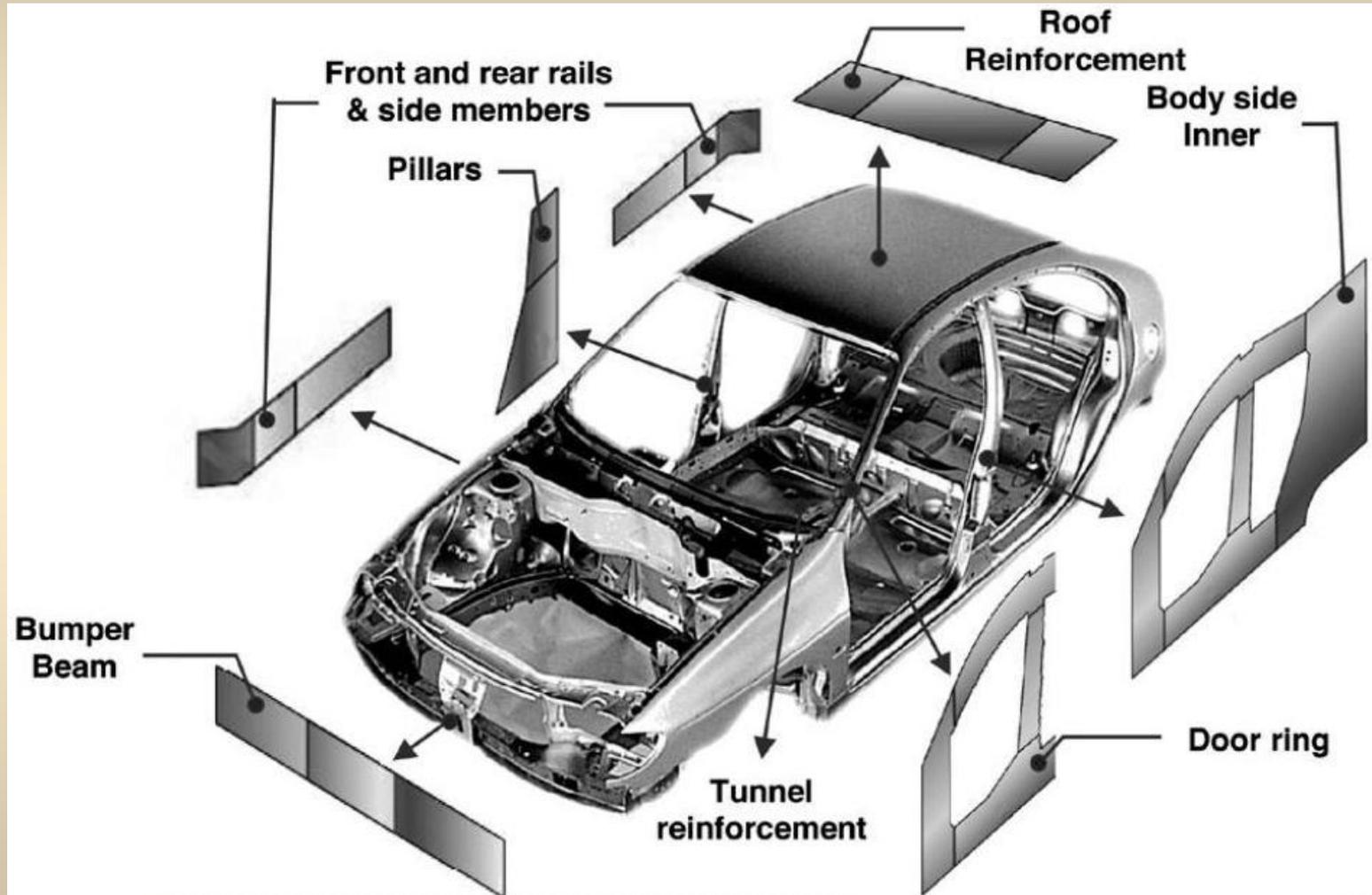
- Pilar B com área para absorção de energia:



Nicholas, ThyssenKrupp Tech Forum, July 2005

# INOVAÇÕES: *TAILORED BLANKS*

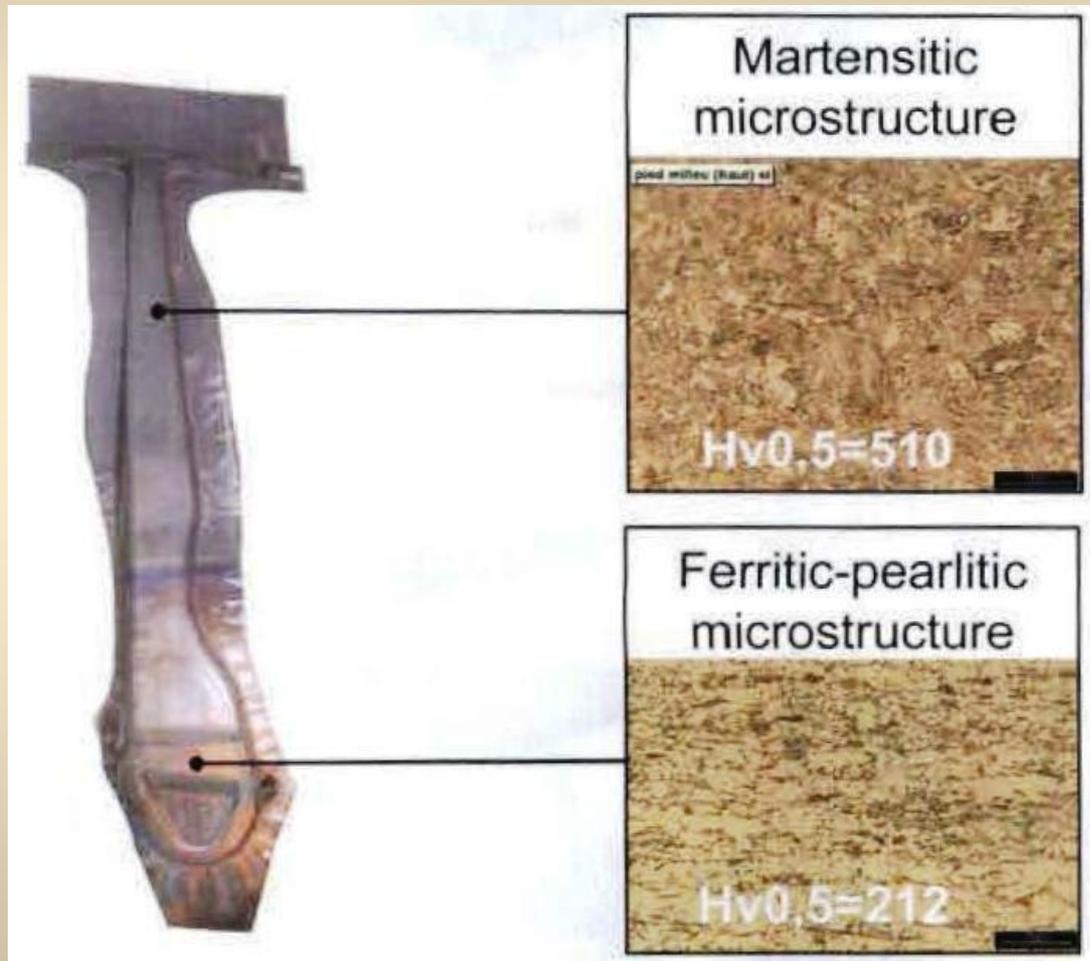
- Outras aplicações:



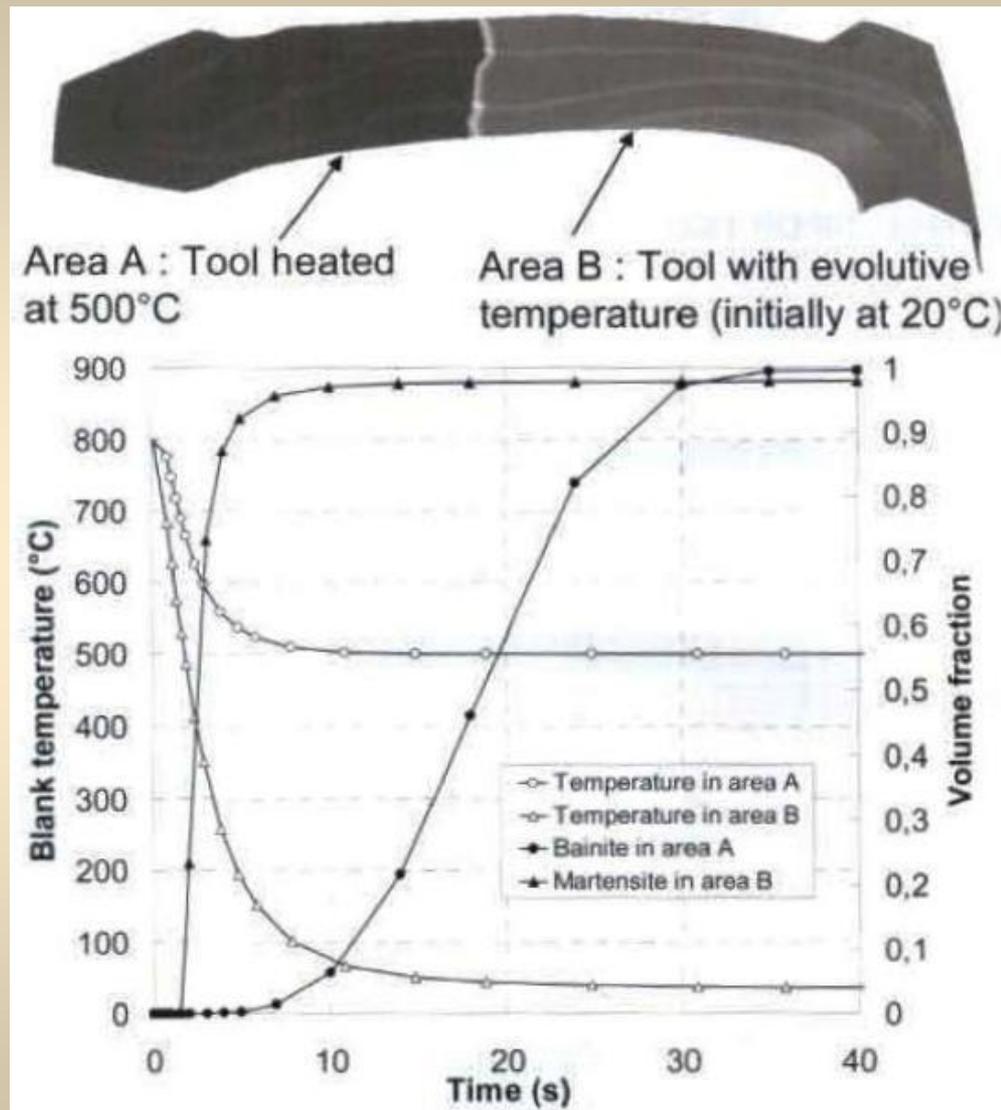
Pic, Revue de Métallurgie, Jan. 2008

# INOVAÇÕES: *TAILORED PROPERTIES*

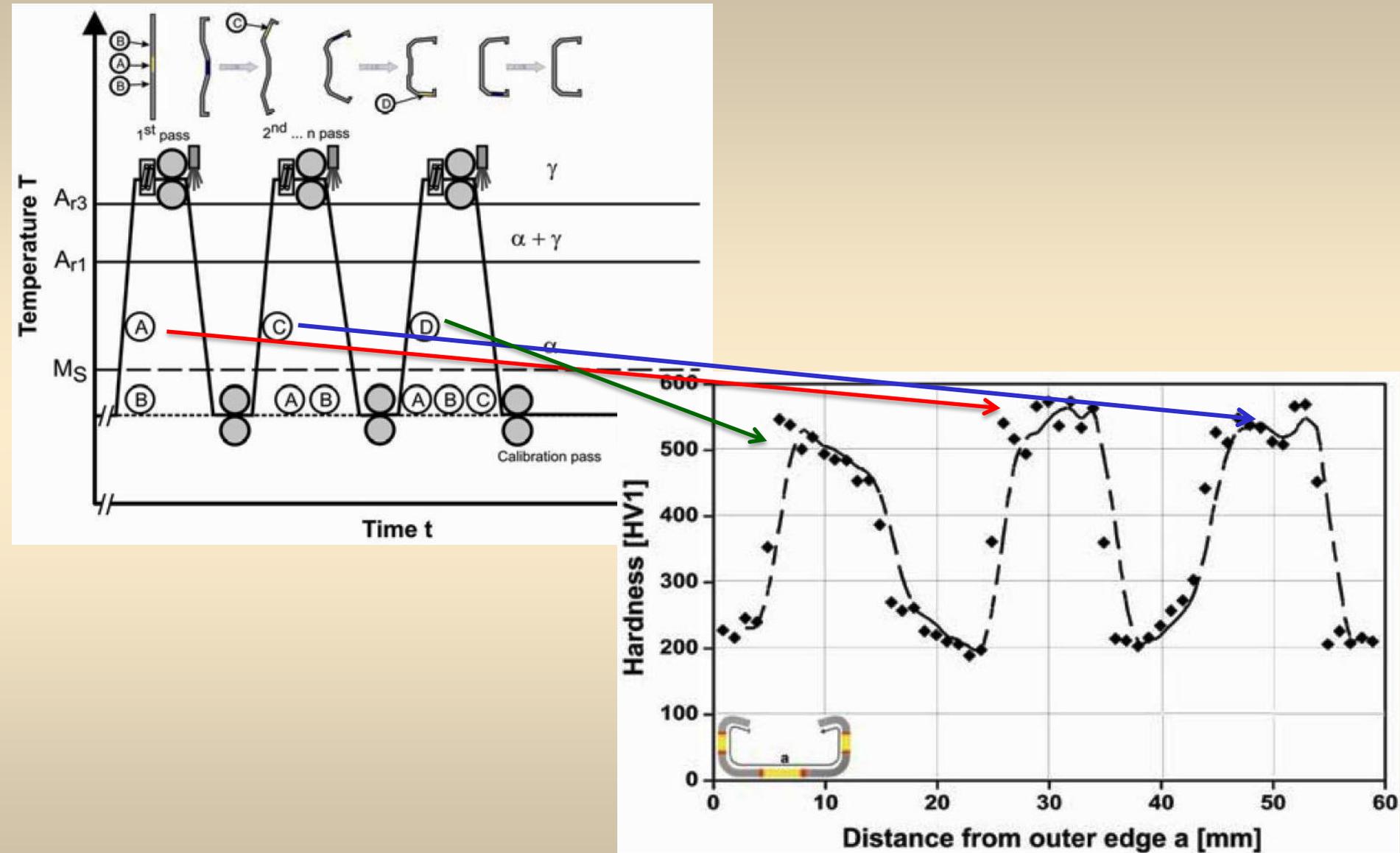
- Perfil diferencial de propriedades mecânicas na peça final através de **austenitização** ou **têmpera parcial**:



# INOVAÇÕES: *TAILORED PROPERTIES*



# INOVAÇÕES: TAILORED PROPERTIES



# OUTRAS INOVAÇÕES

- **Novos revestimentos** à base de **Zn** com papel duplo:
  - Proteção do **blanque** contra oxidação e descarbonetação durante a **estampagem a quente**;
  - Proteção da peça final da **corrosão atmosférica**;
- *Tailored-rolled blanks*: blanques de mesmo material, mas com **espessuras variáveis** aplicadas por laminação a frio antes da estampagem a quente;
- **Estampagem hidrodinâmica** a morno ou a quente;
- **Hidroconformação** a morno ou a quente;
- Extensão do processo para ligas de **magnésio** e **alumínio**.

# CONCLUSÕES

- A incorporação de **tecnologia metalúrgica** nos processos de conformação mecânica, na forma de **tratamentos termomecânicos**, já vem ocorrendo há muitos anos na **laminação de produtos planos**.
- A **crescente adoção** do processo de **estampagem a quente** mostra que essa tendência chegou ao processamento final dos produtos planos.
- As **desvantagens** inerentes à conformação a quente – principalmente em termos da **qualidade superficial** do material – estão sendo resolvidas em grau suficiente para justificar o aproveitamento de suas **vantagens: baixas cargas** de conformação e maior **conformabilidade**, permitindo aumentar a complexidade e precisão dimensional dos componentes finais.



# NOVAS TENDÊNCIAS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DE CHAPAS

*GRATO PELA ATENÇÃO!*

CINTEC 2009 – Mecânica e Automação  
Joinville, Setembro 2009