

APLICAÇÃO DE AÇOS COM GRÃO ULTRA-FINO NA ÁREA AUTOMOTIVA

Antonio Augusto Gorni

I WORKSHOP SOBRE APLICAÇÃO DE MATERIAIS NA ÁREA AUTOMOBILÍSTICA

Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM
São Paulo, Dezembro de 2007

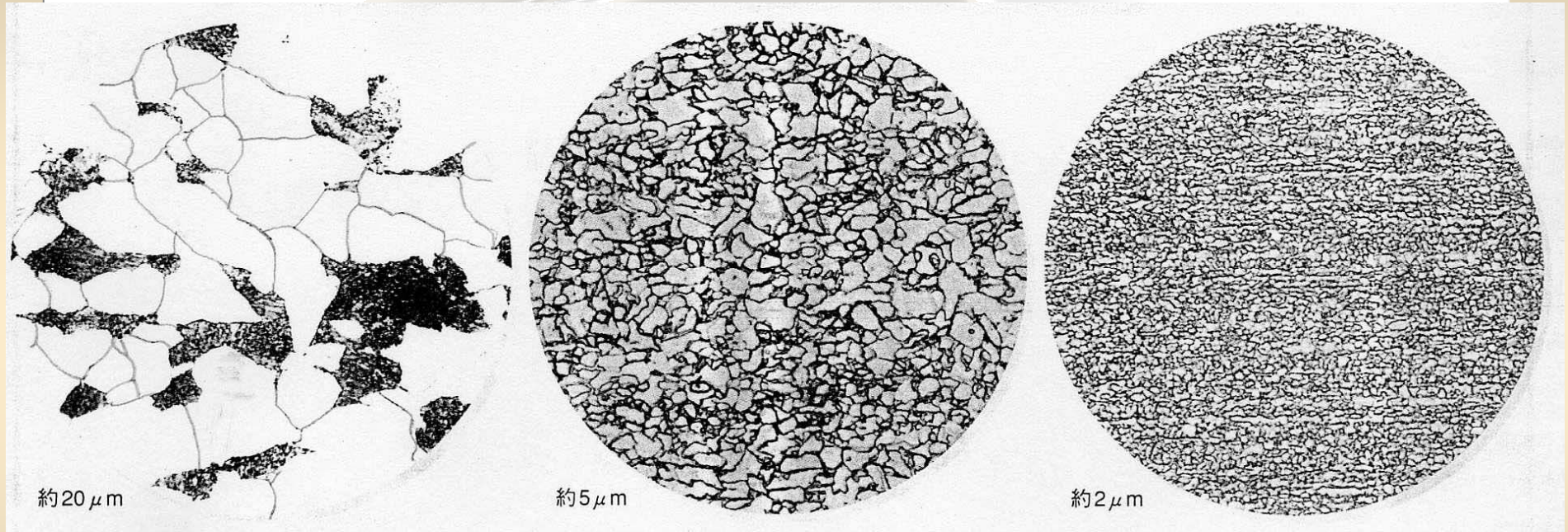
REFINO DE GRÃO NA PRÁTICA

- O refino de tamanho de grão tem sido o *Santo Graal* na metalurgia de materiais estruturais pois é o **único mecanismo de endurecimento** que eleva **tanto a resistência mecânica como a tenacidade**.
- O tratamento termomecânico (*laminação controlada*) de aços microligados tornou-se a principal abordagem adotada para se alcançar tamanhos de grão variando de **4 a 6 μm** , permitindo ainda
 - Suprimir **tratamentos térmicos** posteriores;
 - Reduzir o **carbono equivalente**;
 - Melhorar a **soldabilidade**, fator crítico de custo.
- A principal desvantagem está na complexidade do processamento, que:
 - Requer **laminadores** mais poderosos e instrumentados;
 - Impõe **perda de produtividade** da linha de laminação.

RUMO AOS AÇOS COM GRÃO ULTRA-FINO

- No final da década de 1990 foram iniciados diversos projetos visando a obtenção de **aços com grão ultra-fino** ($< 1 \mu\text{m}$) visando obter aços com relação resistência mecânica x tenacidade ainda mais favorável, no Japão (*Super Steel*), Austrália, Bélgica, Inglaterra...
- No Brasil os esforços nesse sentido se iniciaram em 2004, pela **Rede Aços** (www.redeacos.eng.br), através do projeto **Novas Ligas Estruturais para a Indústria Automobilística**.
- A maioria dos trabalhos ainda se concentra em escala laboratorial, usando processos de conformação e tratamento térmico **relativamente exóticos** do ponto de vista industrial:
 - Recristalização dinâmica da austenita + transformação;
 - Transformação dinâmica da austenita;
 - Laminação intercrítica + recristalização/recuperação profunda;
 - Têmpera + laminação a frio da martensita + recristalização.

EVOLUÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO



Convencional

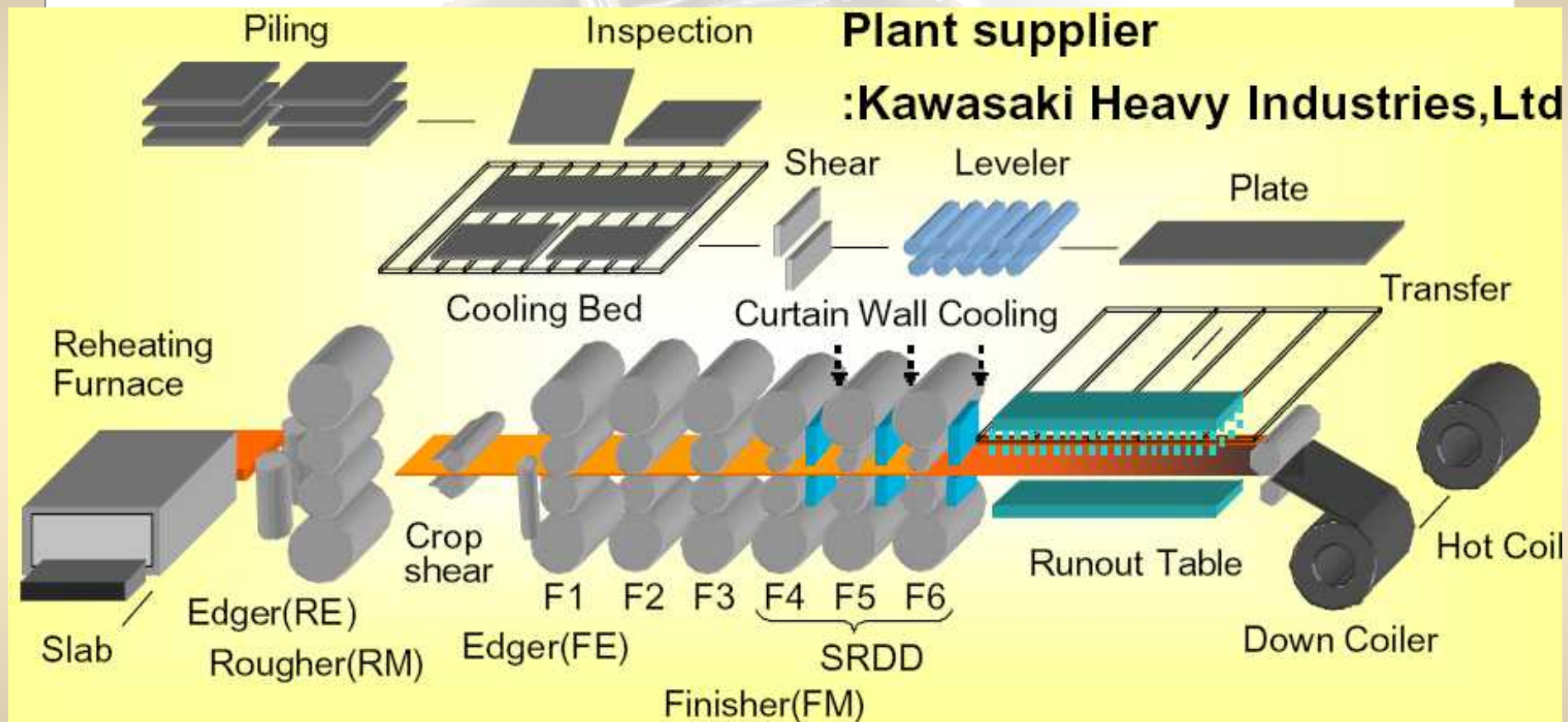
TM

Grão Ultra-Fino

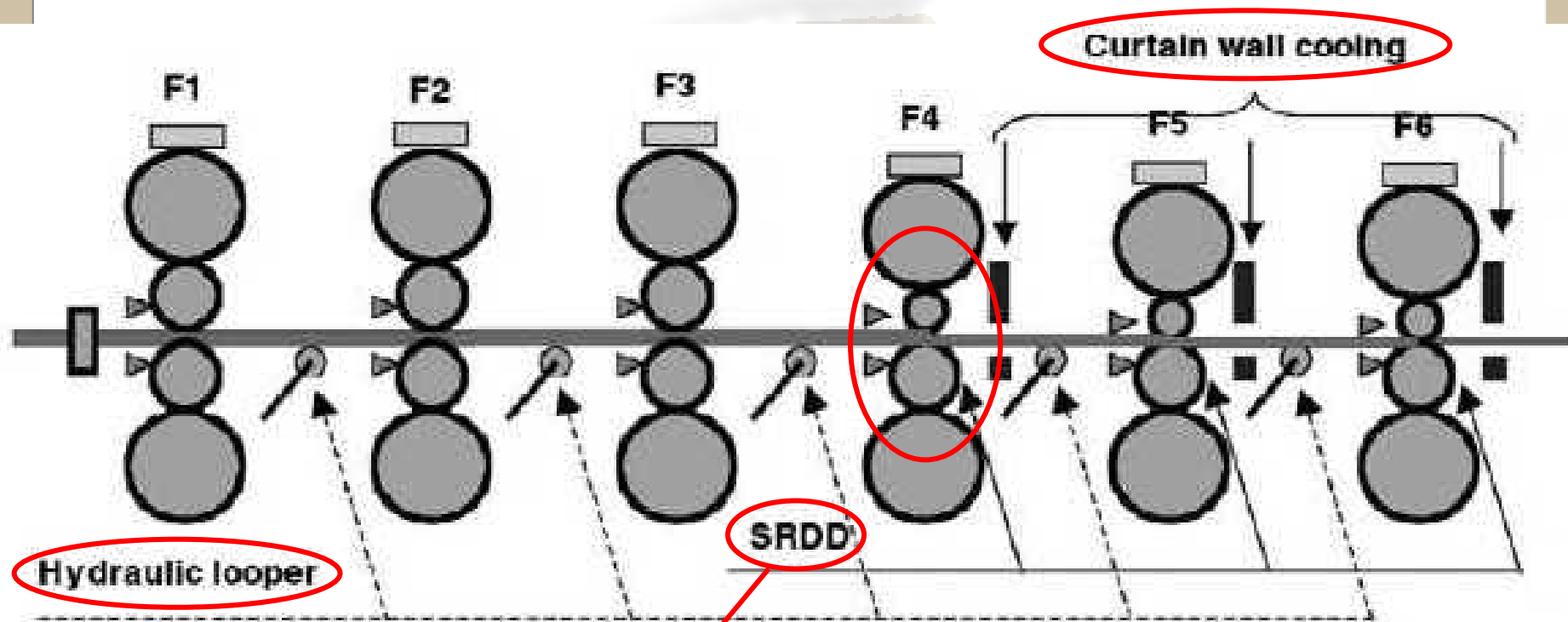
GRÃO ULTRA-FINO: SITUAÇÃO ATUAL

- Aços com grão de tamanho até 1 μm inquestionavelmente apresentam melhor **relação resistência mecânica x tenacidade**.
- Abaixo desse limite a situação se complica: até mesmo a clássica relação de **Hall-Petch** parece tornar-se inválida.
- Uso de grão ultra-fino é questionável do ponto de vista da **conformabilidade** do material:
 - Aumento da **razão elástica** (maior tendência ao chamado efeito mola);
 - Redução nos **alongamentos uniforme e total**.
- Solução: uso de microestruturas com **maior ductilidade**, como bifásica (*dual phase*) ou contendo fina dispersão de precipitados.
- Problema adicional: **crescimento do tamanho de grão** na ZAC pós-soldagem, com a conseqüente perda dos benefícios proporcionados pelos grãos ultra-finos. Solução mais fácil para esse problema: **uniões a frio** (mecânica ou com adesivos).

BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO: O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL - 2000

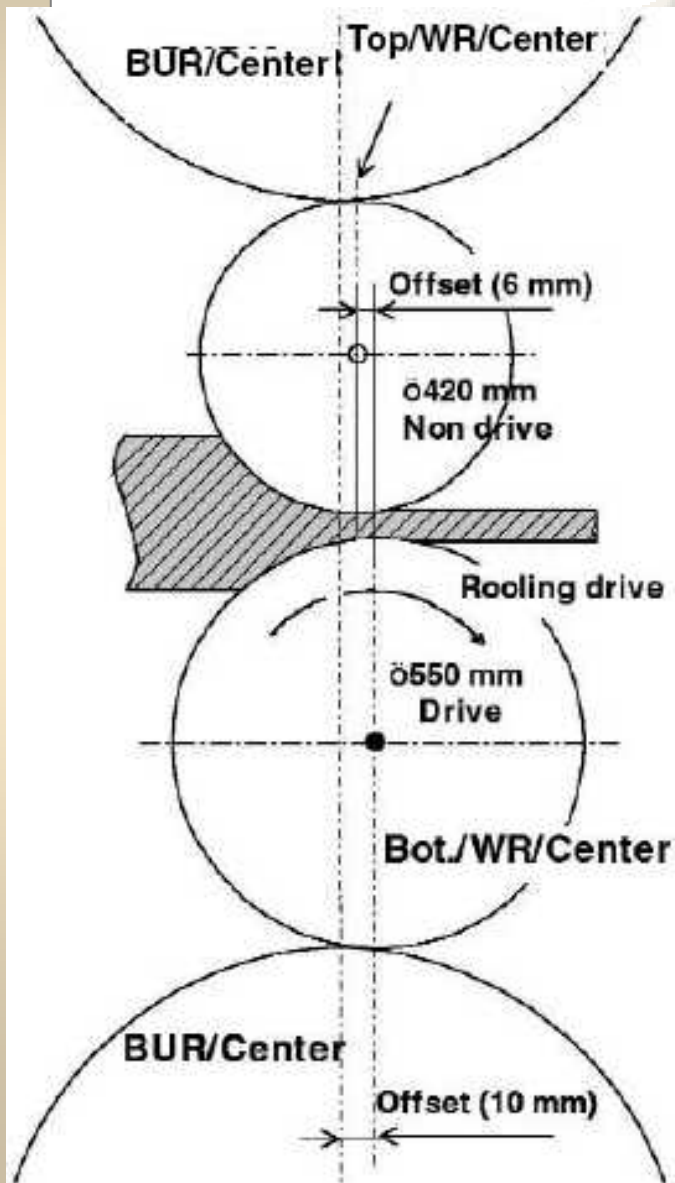


O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL



		Thickness (mm)					
	BAR	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Steel-A (Conventional rolling)	32	50% 16	50% 8.0	50% 4.0	25% 3.0	17% 2.5	20% 2.0
Steel-B (High reduction at latter stands)	32	22% 25	20% 20	20% 16	50% 8.0	50% 4.0	50% 2.0

O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL: REDUÇÃO DAS CARGAS NAS ÚLTIMAS CADEIRAS



SOLUÇÃO PROPOSTA:

- Só o **cilindro de trabalho superior** possui diâmetro reduzido e **não é acionado** pelo motor.
- Cilindro de trabalho inferior possui **diâmetro normal**, aplicando todo o torque necessário para a laminação.
- Há **defasagem entre os centros** dos cilindros de trabalho e entre estes e os cilindros de encosto para evitar imposição de forças horizontais que quebrariam o cilindro de trabalho superior, com menor diâmetro.

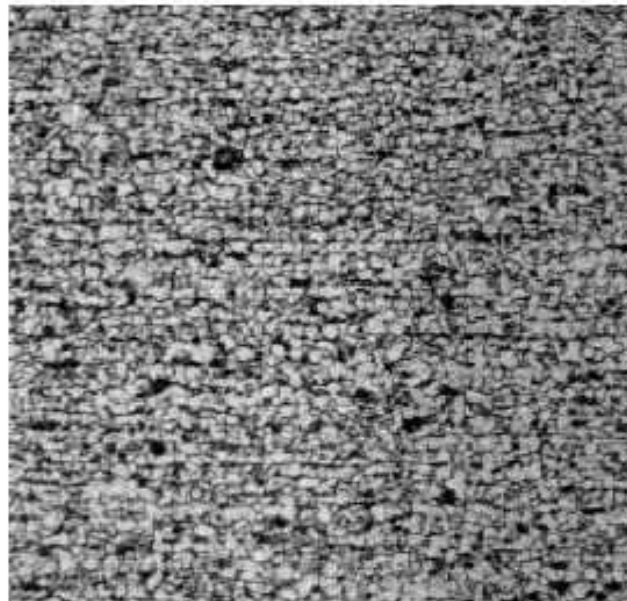
O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Top work roll diameter (mm)	730/660	730/660	730/660	490/420	490/420	490/420
Bottom work roll diameter (mm)	730/660	730/660	730/660	620/550	620/550	620/550
Work roll barrel length (mm)	1,900	1,900	1,900	1,850	1,850	1,850
Backup roll diameter (mm)	1,350/ 1,250	1,350/ 1,250	1,350/ 1,250	1,350/ 1,250	1,350/ 1,250	1,350/ 1,250
Backup roll barrel length (mm)	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
Max. rolling force (kN)	34,300	34,300	34,300	29,400	29,400	29,400
Main drives (kW)	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Main drives (rpm)	200/450	200/450	200/450	200/450	200/450	235/525

NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO

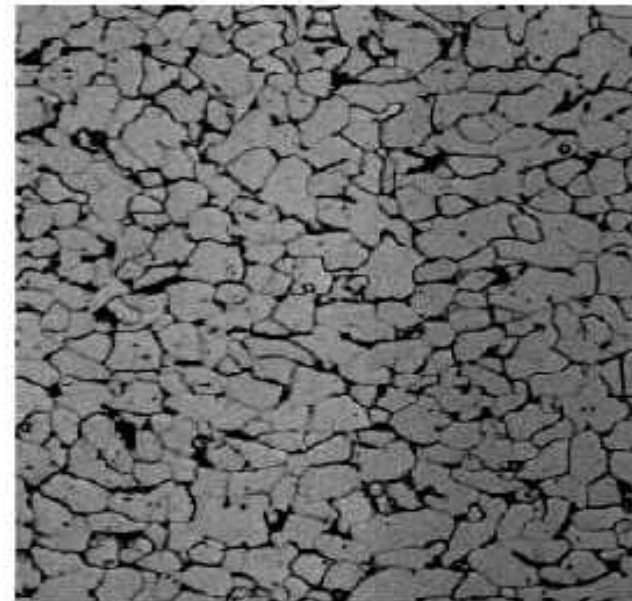
(weight %)	C	Si	Mn
Conventional SM490B	0.16	0.40	1.40
500 MPa ultrafine grained steel	0.16	0.20	0.80
Saving		0.20	0.60

→ Cost down of steel :
10 dollar/ton



a) Ultrafine grained steel

10 μ m

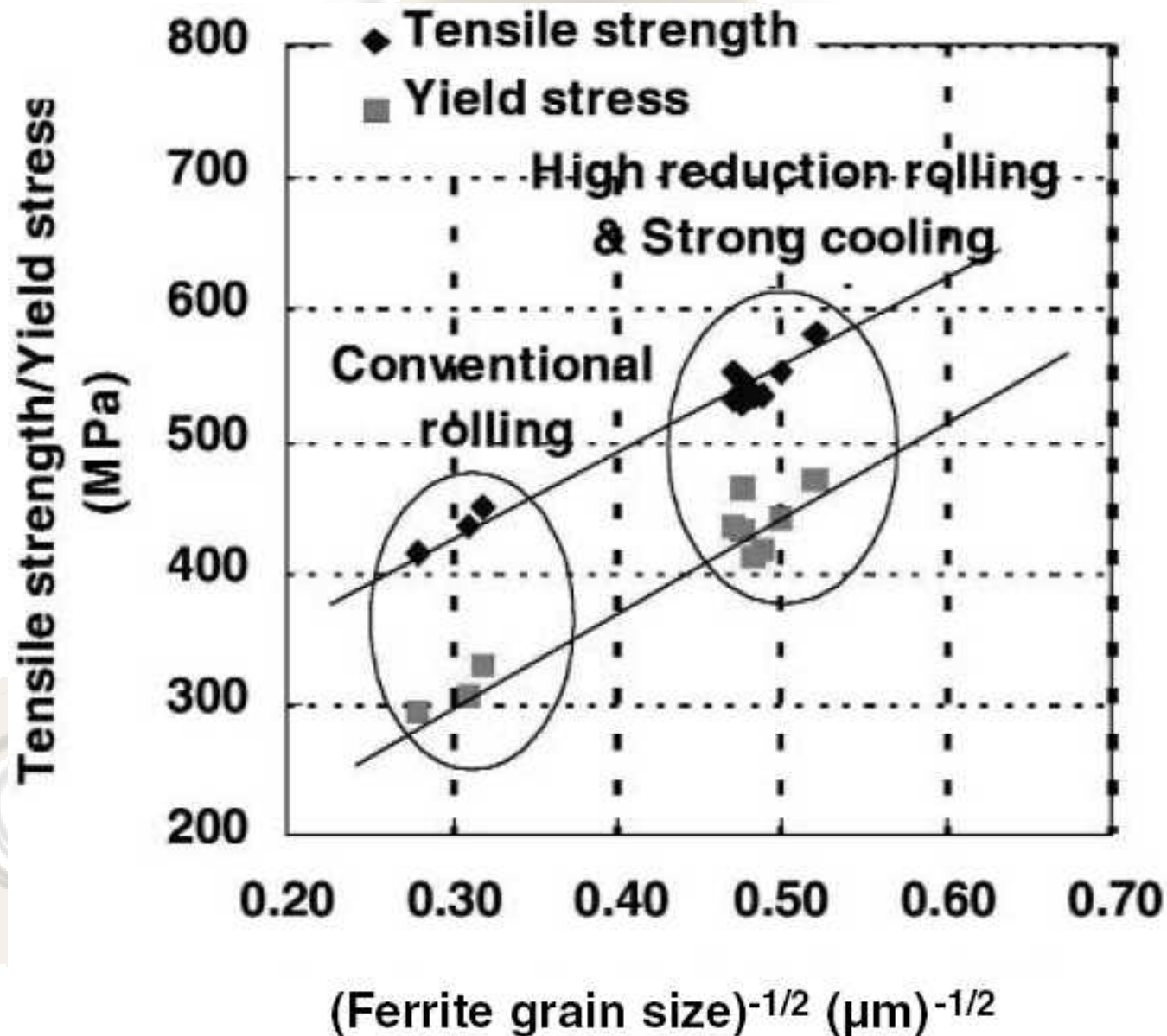


b) Conventional steel.

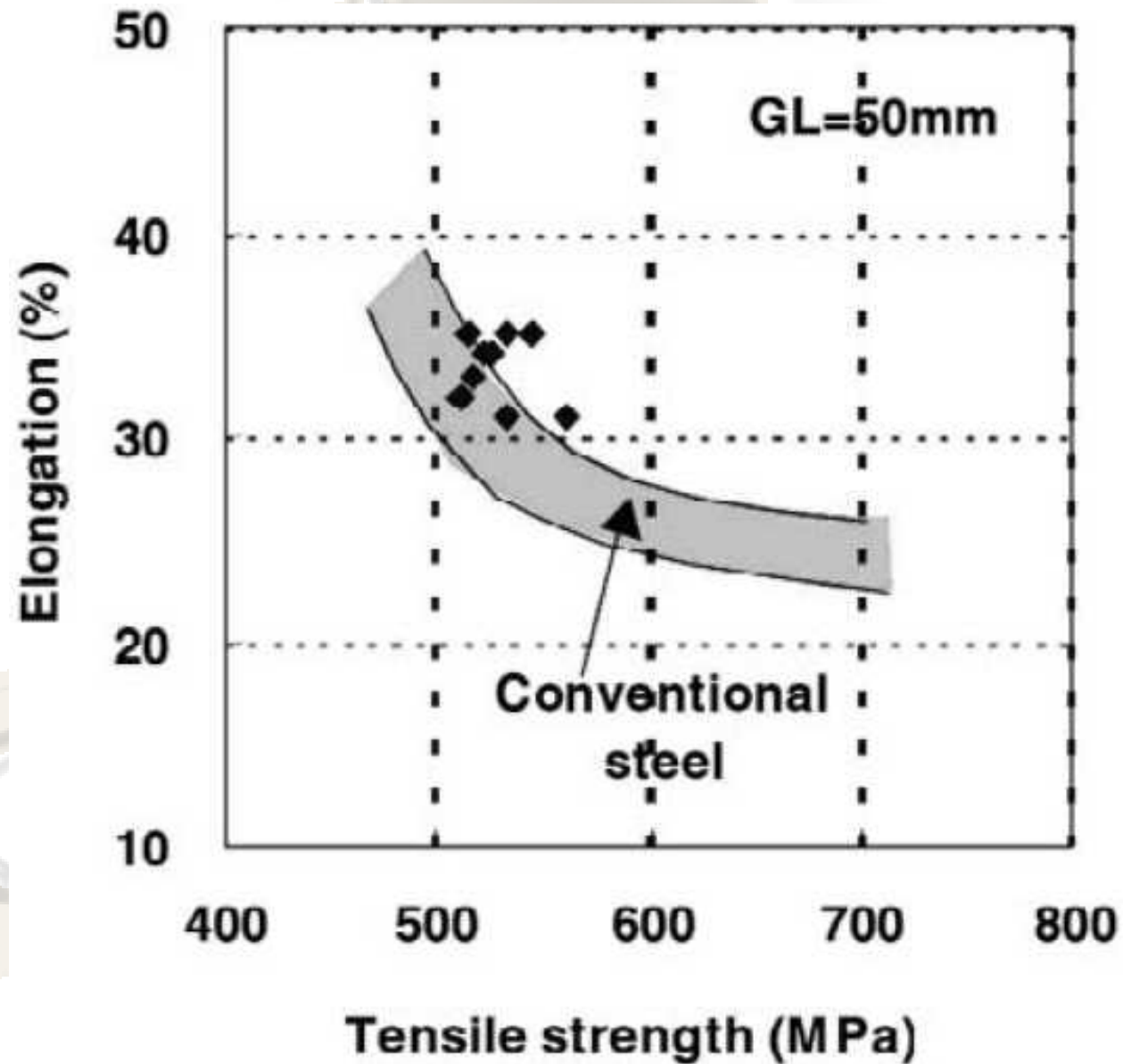
2 ~ 5 μ m

10 ~ 15 μ m

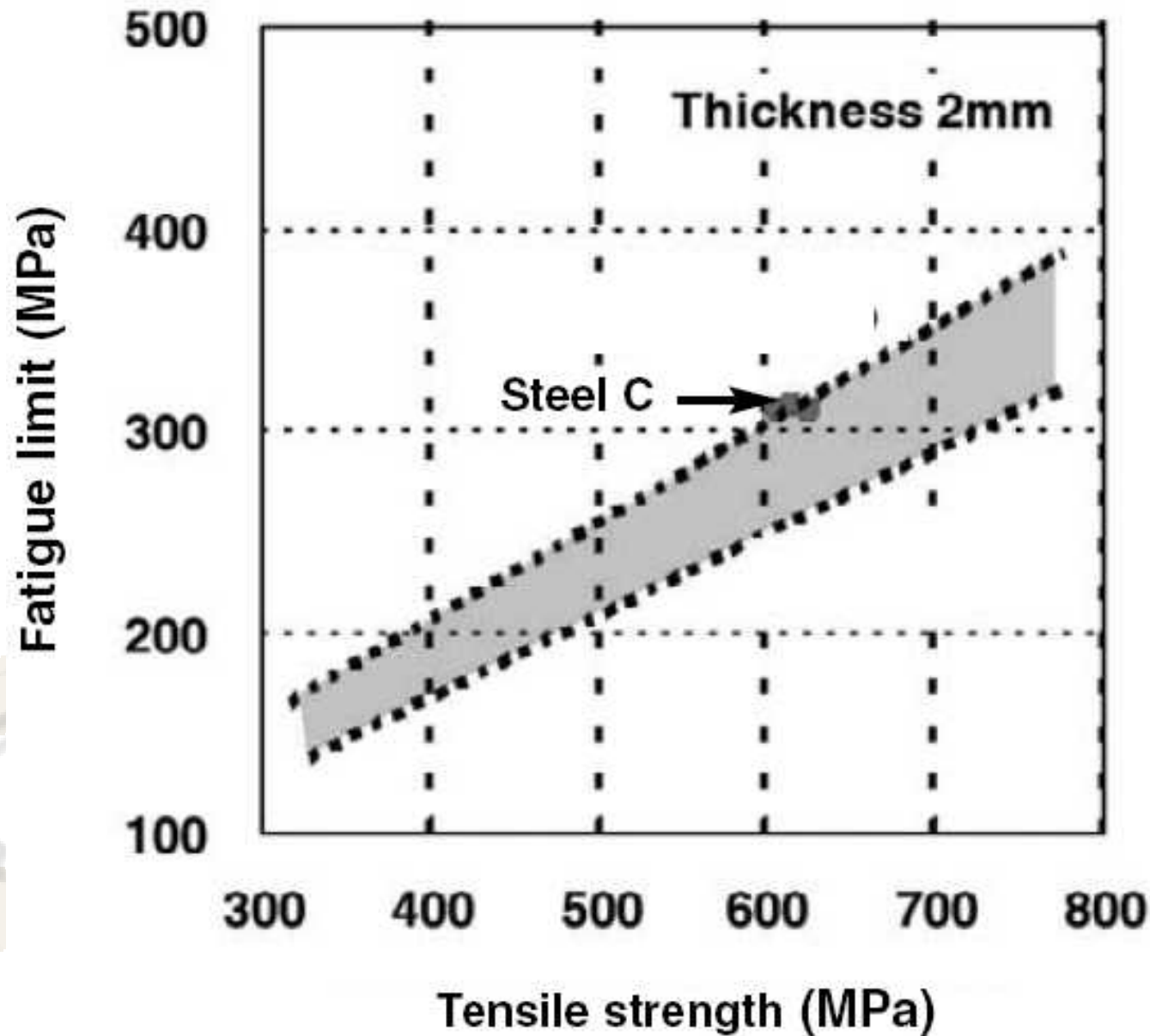
NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



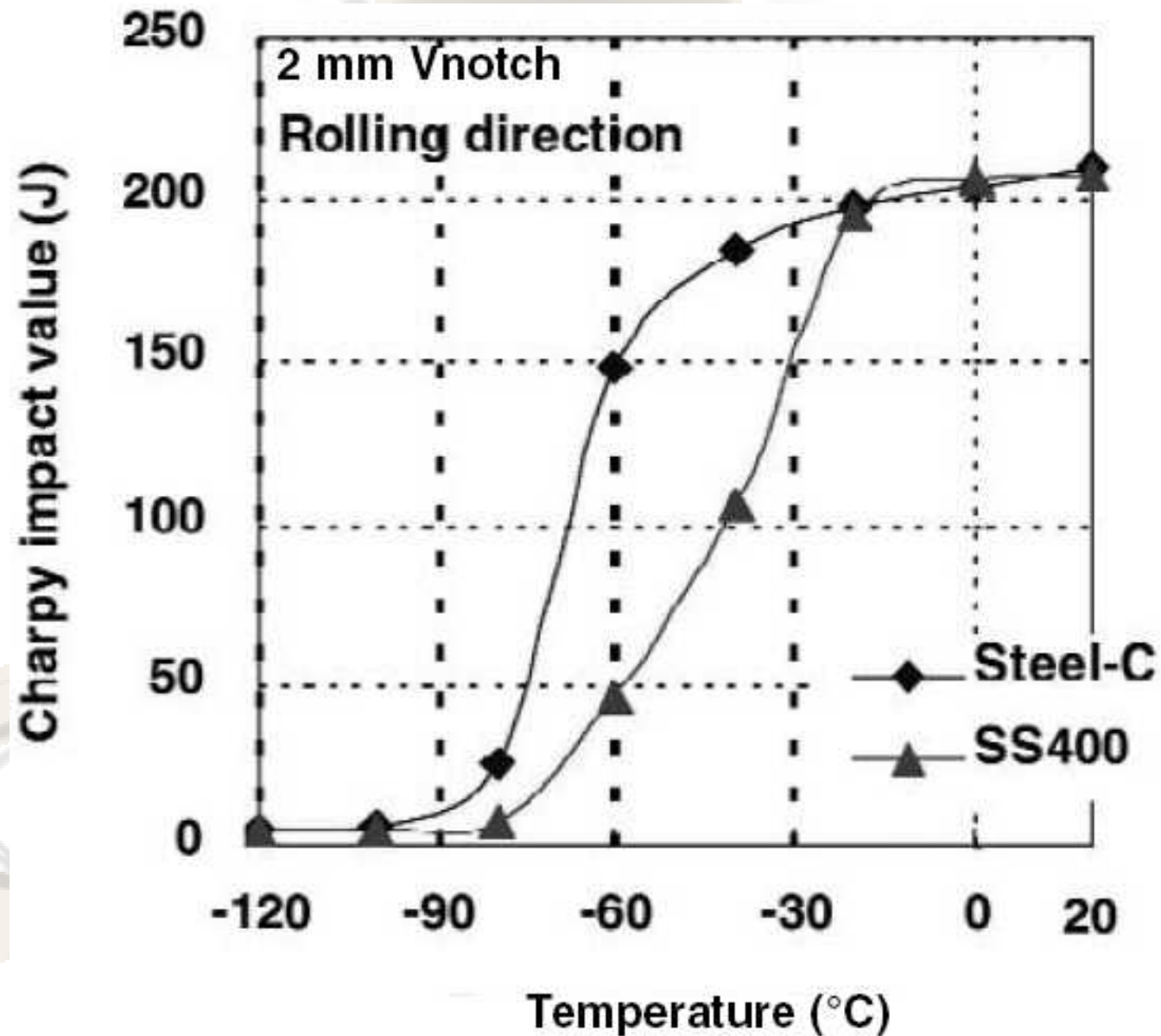
NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



JFE STEEL: SUPER HSLA STEEL

- O interesse pelas microestruturas com grão ultra-fino por parte da JFE Steel (antigas Kawasaki Steel e NKK Steel) decorreu da intenção de se produzir **aços para longarinas** automotivas que aliassem:
 - **Alto alongamento** para conformação de flanges por dobramento;
 - **Alta capacidade de expansão de orifício** (*Hole Expansion*) para execução de orifícios através de puncionamento.
- O **refino do tamanho de grão** melhora a capacidade de expansão de orifício, mas **degrada a ductilidade** (alongamento) do aço, que tem de ser garantida através de outros recursos metalúrgicos.
- Neste caso específico a ductilidade do material foi garantida através da **dispersão de nanoprecipitados** de elementos de micro-liga (NbC e TiC) na microestrutura.

JFE STEEL: SUPER HSLA STEEL

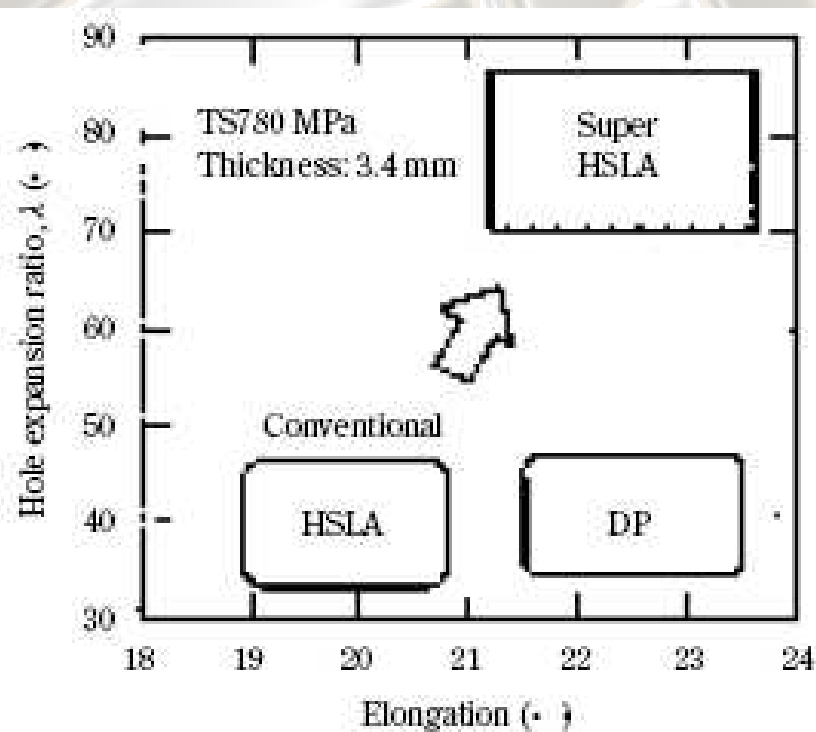
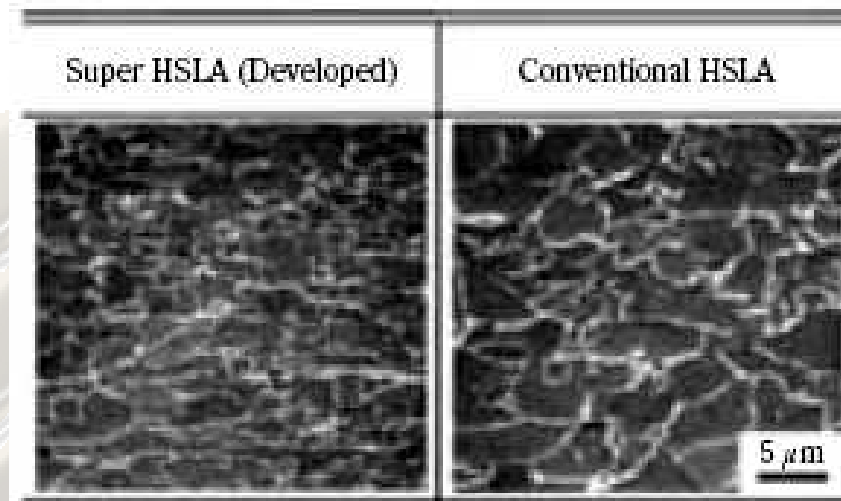
- 0,2 % Ti:
 - Restrição no crescimento de grão durante **reaquecimento**;
 - Pouca restrição à **recristalização** durante laminação a quente;
 - **Austenita refinada** (50 μm) no Trem Acabador do LTQ;
 - Promoção de **recristalização dinâmica** que refina o tamanho de grão.
- **TG: 2 μm** (convencional: 6 ~ 7 μm)
- Resistência à fadiga é vital no caso de aços aplicados em longarinas automotivas.

Grade	Steel type	YS (MPa)	TS (MPa)	El (°)	λ^* (°)	FL** (MPa)
590 MPa	Super HSLA	480	600	31	120	280
	Conventional HSLA	510	600	27	60	250
780 MPa	Super HSLA	690	790	22	80	370
	Conventional HSLA	710	790	20	40	310

* λ : Hole expansion ratio

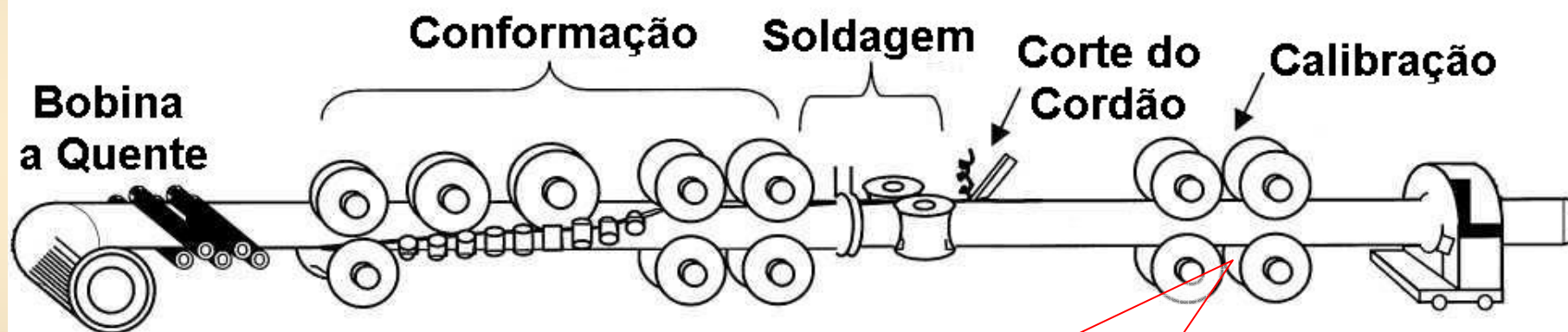
**FL: Fatigue limit in bending mode

JFE STEEL: SUPER HSLA STEEL



JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Tubos com costura** com microestrutura ultra-fina produzida durante um processo especial de conformação a morno do tubo.
- **HISTORY** = *High Speed Tube Welding and Optimum Reducing Technology*.



Etapa de Redução/Estiramento é feita entre **650-900°C** ao invés dos 900-1100°C usuais para se conseguir um ultra refino do tamanho de grão.

JFE STEEL: TUBOS HISTORY

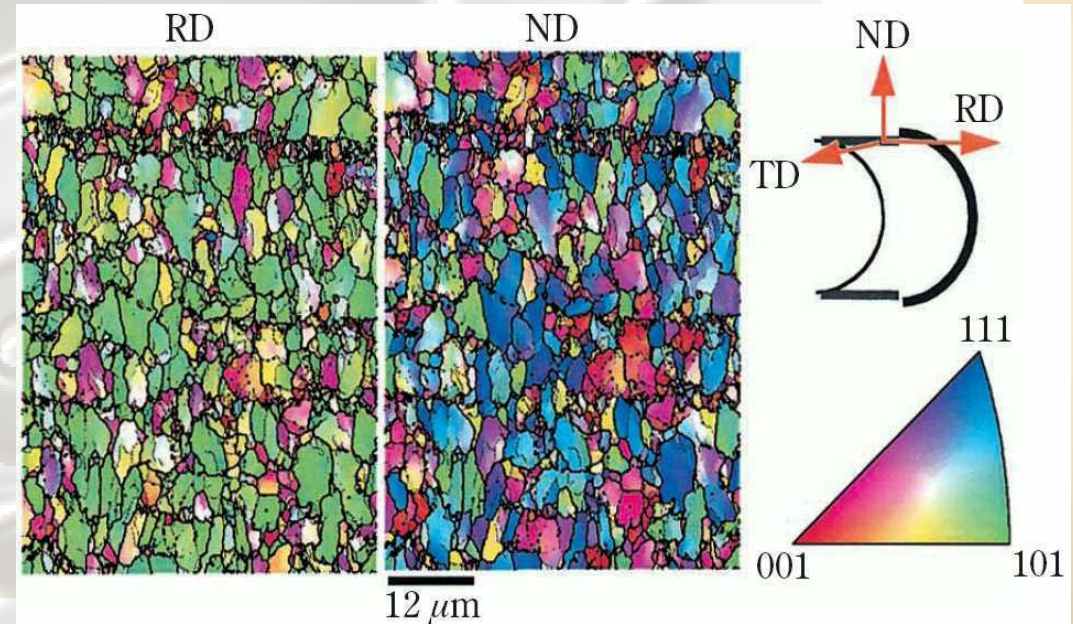
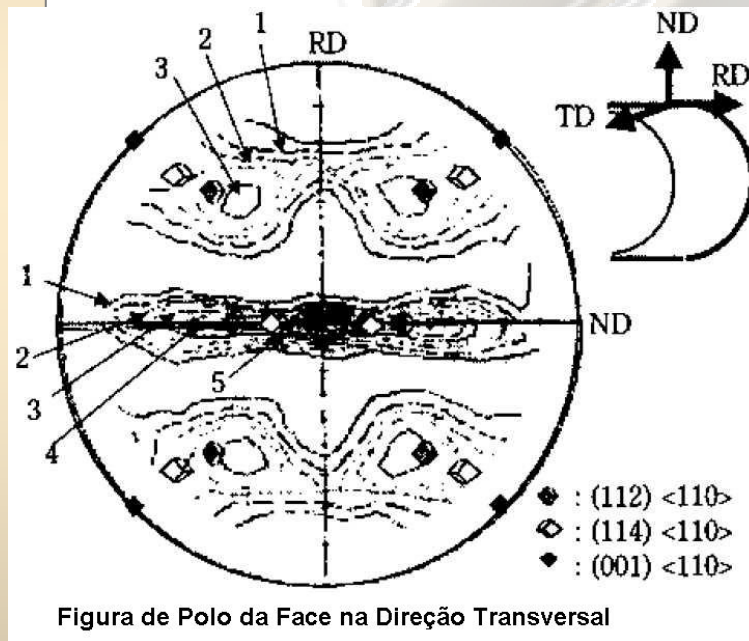
- O alto grau de **deformação a morno** aplicado na chapa durante a conformação do tubo reduz seu tamanho de grão para 1 - 2 μm em função da ocorrência de **recristalização contínua da ferrita**.
- O endurecimento por refino de grão permite a **redução dos teores de elementos de liga**, além de aumento de tenacidade.
- Perda na conformabilidade do material decorrente do refino de grão pode ser compensada por outros mecanismos metalúrgicos:
 - **Fina dispersão** de precipitados;
 - Formação de **textura cristalográfica** que eleva o coeficiente de anisotropia r ;
 - Emprego da **microestrutura bifásica** (80% de ferrita + 20% de martensita)

JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Fina Dispersão de Precipitados:**
 - A conformação mecânica a morno **quebra e dispersa mecanicamente** as lamelas de cementita e perlita;
 - Ou seja, ocorre um processo de **esferoidização dinâmica**, que é muito mais rápido que seu equivalente estático - duração de **apenas alguns segundos** versus **várias horas**.
 - A fina dispersão de carbonetos ao final da fabricação do tubo confere a ele uma **conformabilidade muito superior** que a da bobina a quente que lhe deu origem.

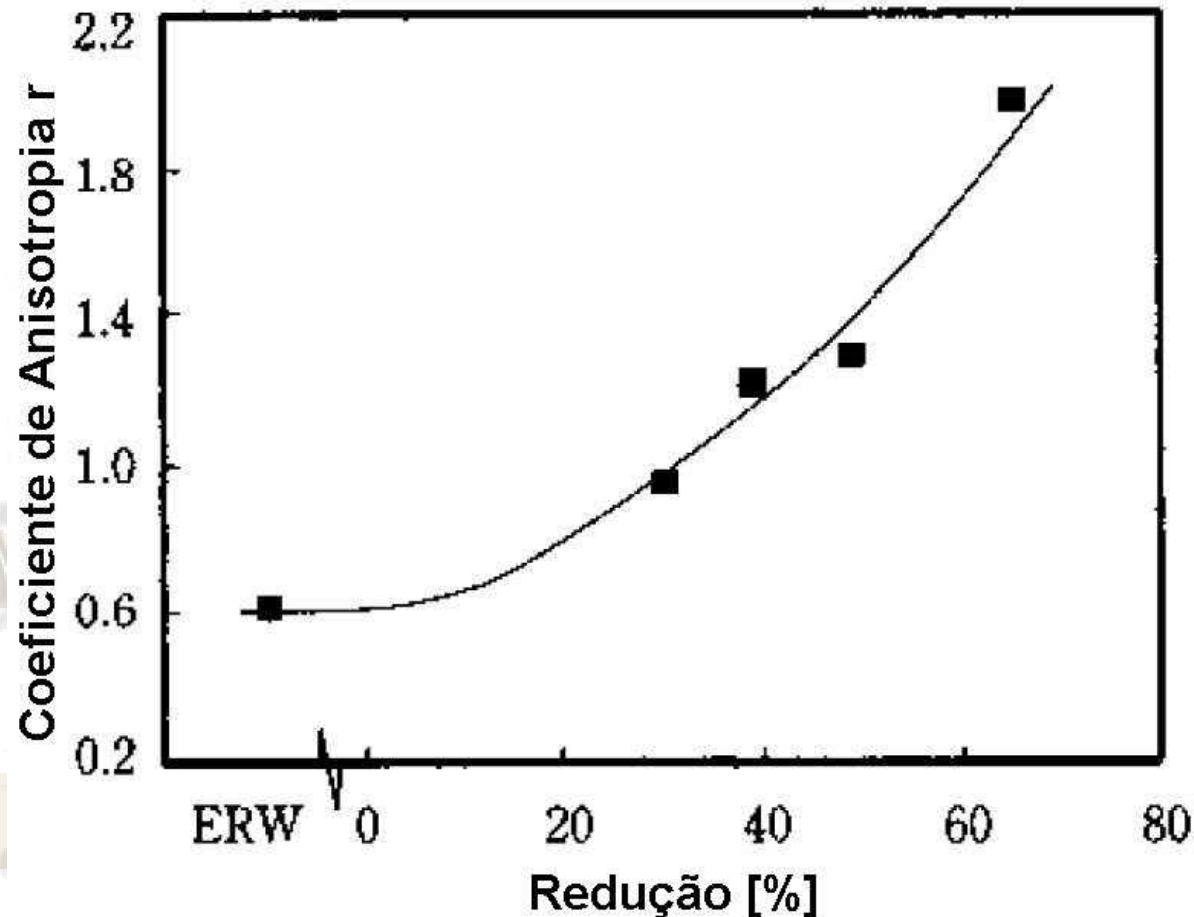
JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Textura Cristalográfica Favorável:**
 - Proporcionada pela **conformação a morno**.
 - Elevação no valor do **coeficiente de anisotropia r**.



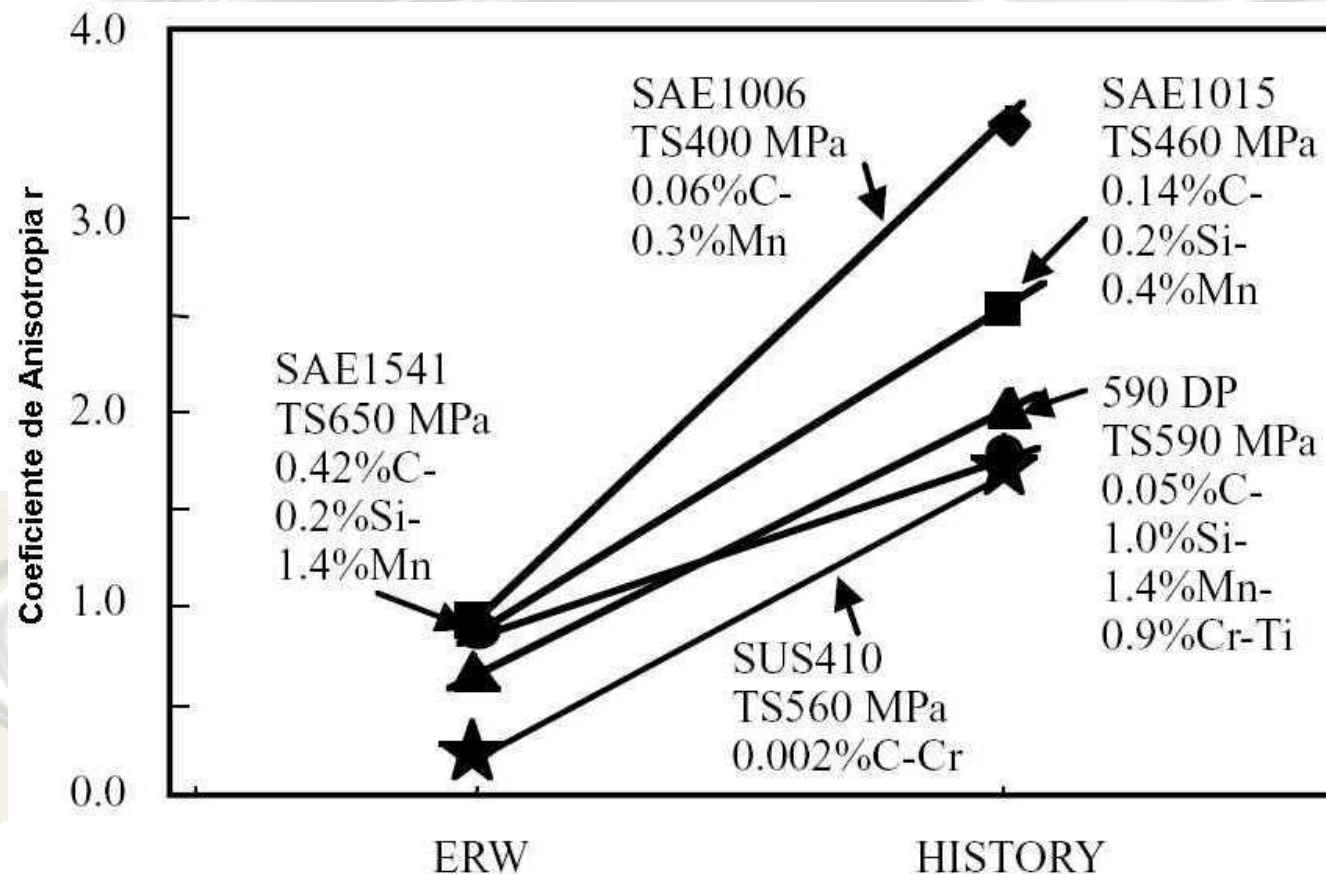
JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Textura Cristalográfica Favorável:**
 - A intensificação do efeito da textura é **proporcional ao grau de deformação** aplicado ao tubo.



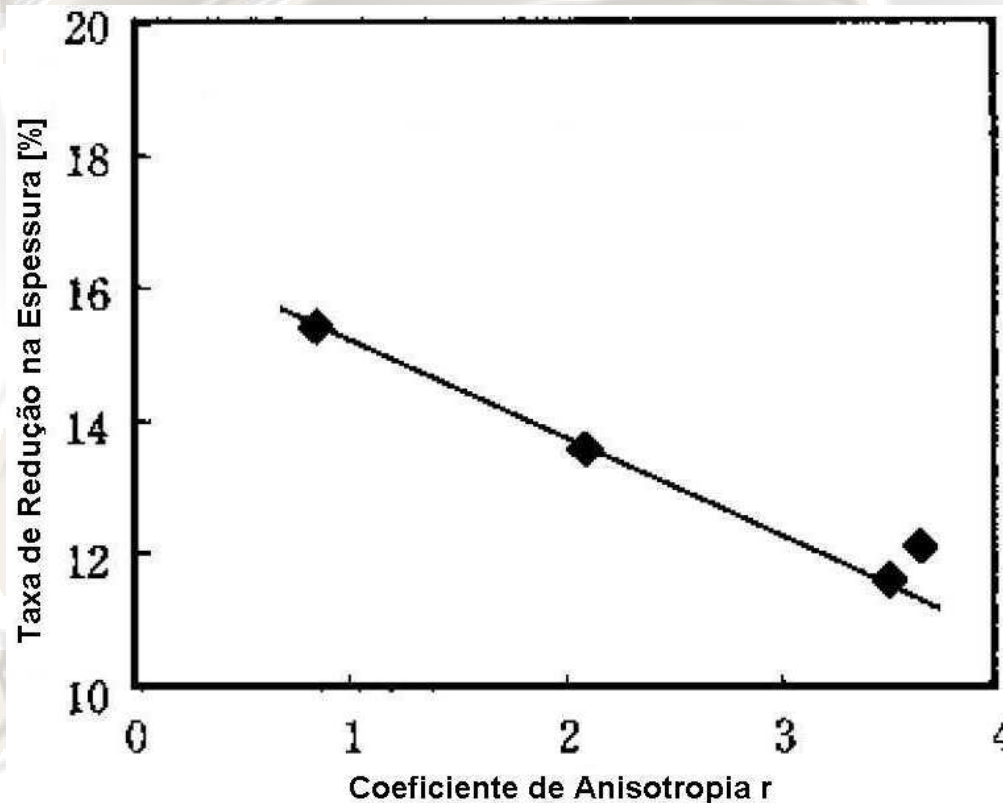
JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Textura Cristalográfica Favorável:**
 - Sua formação **independe do tipo de aço** (ou seja, a textura obtida não é afetada pelos teores de C e N ou pela presença de fases e/ou precipitados específicos na microestrutura...)



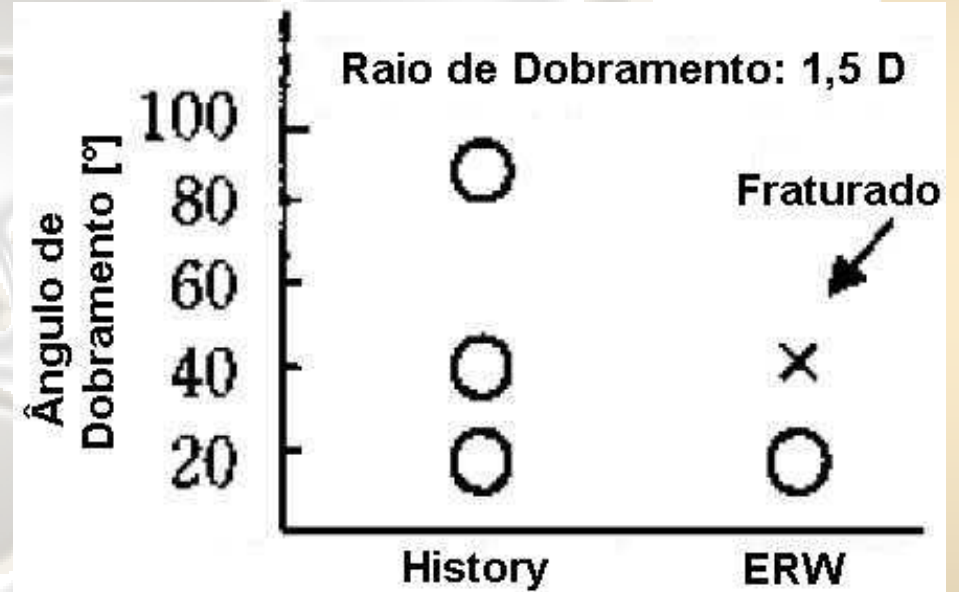
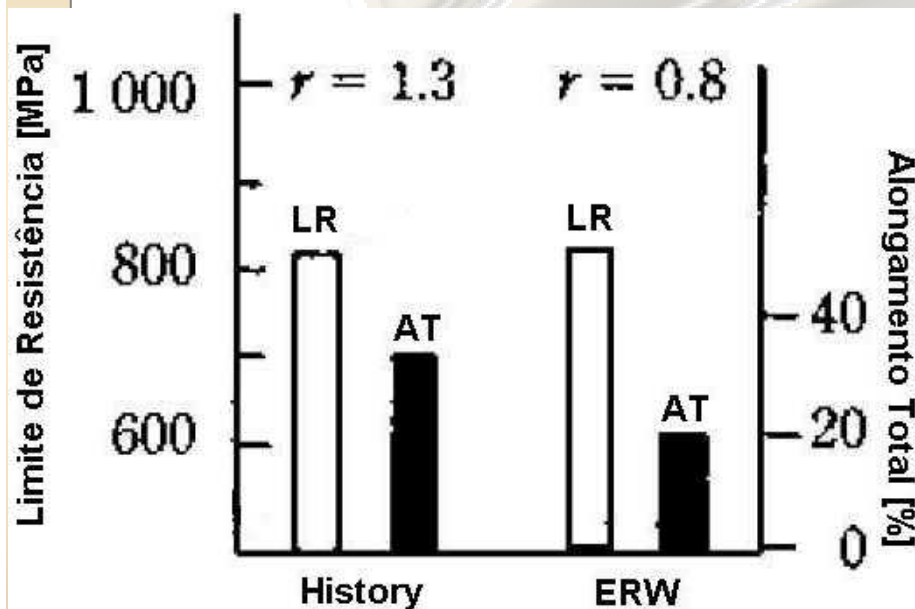
JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- Textura Cristalográfica Favorável:
 - Maiores valores do coeficiente de anisotropia r correspondem a **menores graus de redução na espessura da parede do tubo** quando o usuário conforma o tubo, ou seja: **melhor conformabilidade no cliente.**



JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Textura Cristalográfica Favorável:**
 - Comparação da conformabilidade entre tubos ERW convencionais e os produzidos pelo processo HISTORY:

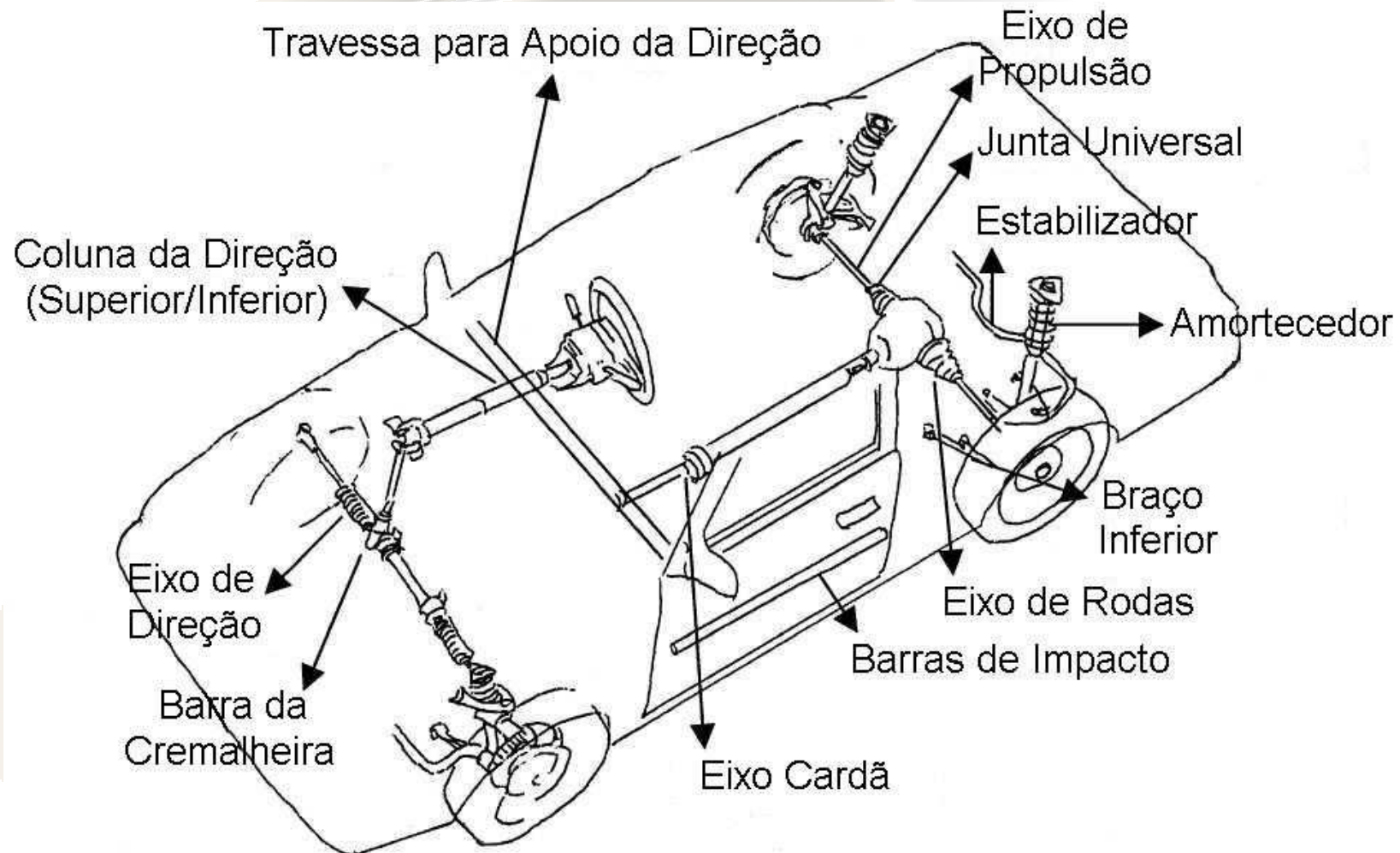


JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- **Tubos com Microestrutura Bifásica:**
 - A chamada **microestrutura bifásica** (*dual phase*), constituída de aproximadamente 80% de ferrita poligonal mais 20% de martensita, pode ser conseguida através de:
 - **Estiramento/redução dos tubos** feito na **região intercrítica** (onde há coexistência de ferrita e austenita remanescente), seguido de
 - Resfriamento sob **taxas de resfriamento suficientemente altas** para a têmpera da austenita.
 - Essa microestrutura comprovadamente apresenta:
 - Baixos valores de **razão elástica**;
 - Alto coeficiente de encruamento **n**.
 - Ou seja, **alta conformabilidade**.

JFE STEEL: TUBOS HISTORY

- Aplicações automotivas típicas: peças **tubulares** com **formato complexo** e **alta resistência mecânica**.



CONCLUSÕES

- Utilização industrial de microestruturas com tamanho de grão ultra-fino (entre 2 e 4 μm) iniciou-se **há mais dez anos**, principalmente na área de chapas grossas navais.
- O refino do tamanho de grão permite conciliar **alta resistência mecânica e tenacidade**, mas tende a prejudicar a **estampabilidade** - uma característica geralmente fundamental para as aplicações automotivas.
- Uma possível solução para esse impasse é a **associação** de tamanho de grão ultra-fino com microestruturas que proporcionem alta estampabilidade (*dual phase* ou contendo dispersões muito finas de precipitados).
- As usinas siderúrgicas já relatam o desenvolvimento de aços com grão ultra-fino específicos para uso automotivo. Contudo, **virtualmente não há nenhuma informação** sobre esse a aplicação prática desses materiais nas indústrias automobilísticas.

MAIORES INFORMAÇÕES

GORNI, A.A., SILVEIRA, J.H.D. & REIS, J.S.S.

“Estudo Avalia o Desenvolvimento de Chapas com Grão Ultra-Fino”

Corte e Conformação de Metais, 3:27, Julho 2007, 78-105

On-line: www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Jul2007.pdf

REFERÊNCIAS SELECIONADAS

- HOWE, A.A.
Ultrafine Grained Steels: Industrial Perspectives
Materials Science and Technology, 16:11, Nov-Dec 2000, 1264-6.
- KURAHASHI, R. e outros.
Development of Industrial Production of Ultrafine Grained Steel in Tandem Hot Strip Mill
La Revue de Métallurgie – CIT, Avr. 2005, 271-83.
- SAKATA, Y. e outros.
Highly Formable Sheet Steels for Automobile through Advanced Microstructure Control Technology
Kawasaki Steel Technical Report, 48, Mar. 2003, 3-8.
- TOYOOKA, T. e outros.
Development of Manufacturing Process “**HISTORY**” for Producing Innovative High Frequency Welded Steel Tubes with Excellent Properties
Kawasaki Steel Technical Report, 47, Dec. 2002, 1-8.

APLICAÇÃO DE AÇOS COM GRÃO ULTRA-FINO NA ÁREA AUTOMOTIVA

GRATO PELA ATENÇÃO!

**I Workshop sobre Aplicação de
Materiais na Área Automobilística**

São Paulo

11 de Dezembro de 2007