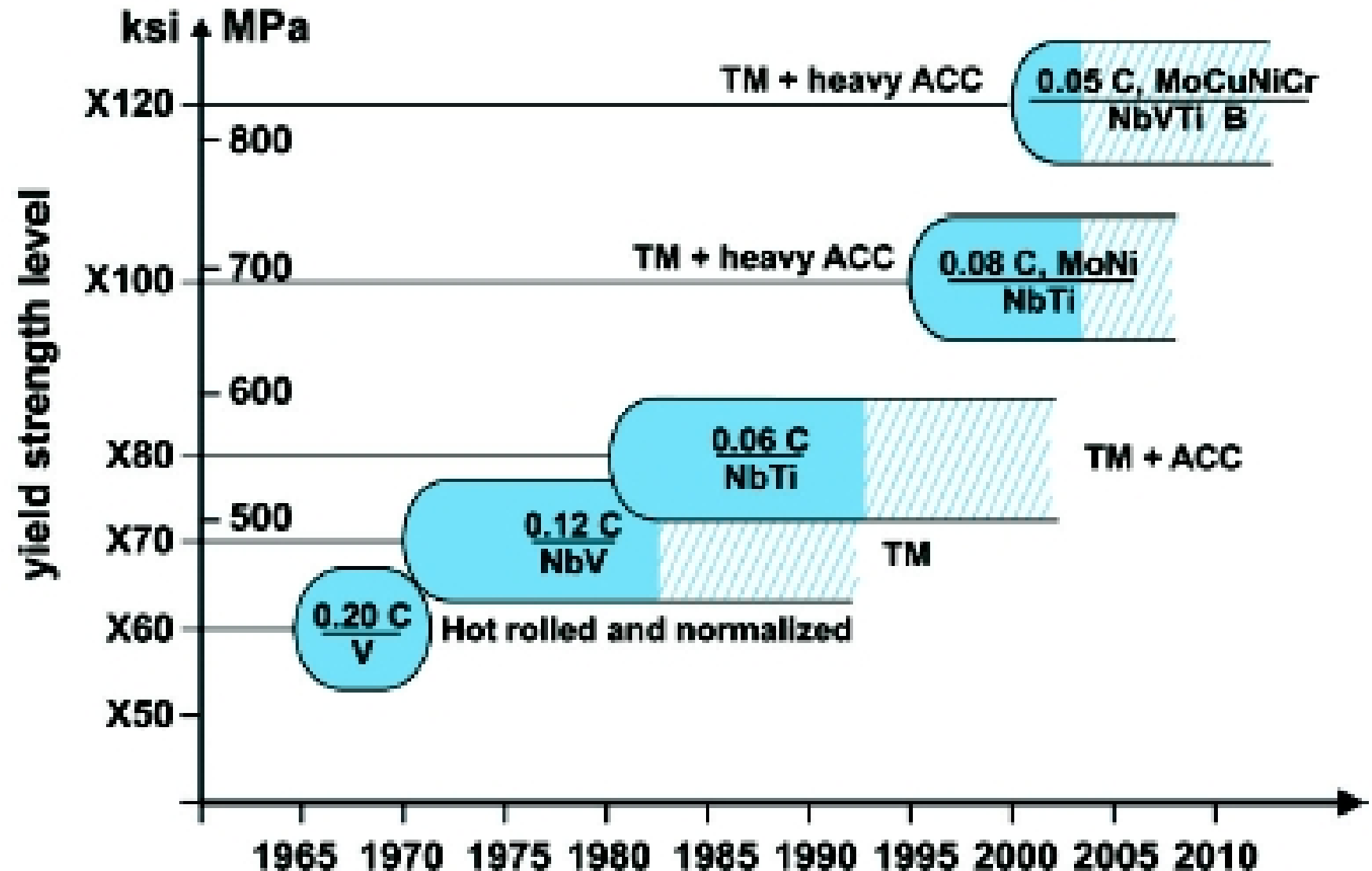


PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE AÇOS PLANOS COM GRÃO ULTRA-FINO ATRAVÉS DE LAMINAÇÃO A QUENTE

Antonio Augusto Gorni

II Simpósio sobre Aços:
Novas Ligas Estruturais para a
Indústria Automobilística
São Paulo, 15 de Maio de 2007

REFINO DE GRÃO NA PRÁTICA: AÇO PARA TUBOS DE GRANDE DIÂMETRO



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 transformação que eleva **tanto a resistência mecânica como a tenacidade**.
- O tratamento termomecânico de aços microligados tornou-se a principal abordagem adotada para se alcançar esse objetivo, 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;
 - Perda de **produtividade**.

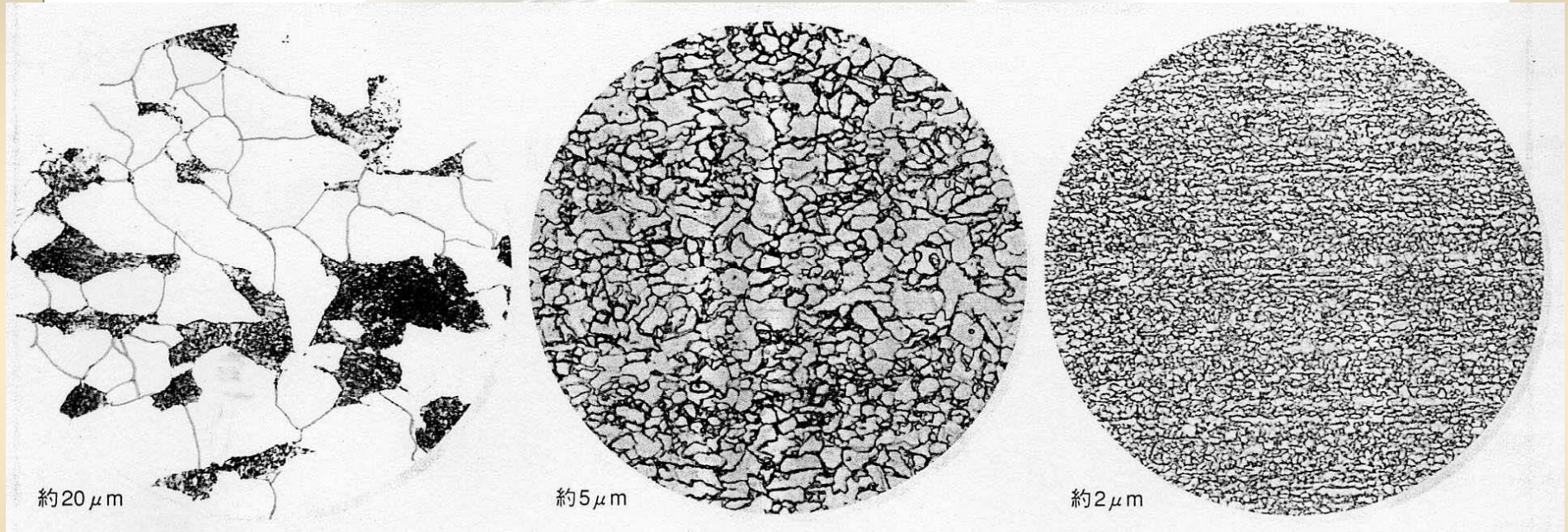
REFINO DE GRÃO: PERSPECTIVA INDUSTRIAL

- Essa abordagem permite obter produtos planos de aço laminados a quente com tamanho de grão com tamanho mínimo de **4 a 6 μm** .
- É desejável **grãos ainda mais finos** nesse tipo de produto, permitindo aumento de resistência mecânica e tenacidade com menores teores de elementos de liga.
- Esta tendência é questionável do ponto de vista da conformabilidade do material já que, até o momento, tem-se verificado que o refino do tamanho de grão dentro dessa faixa até 1 μm tem provocado:
 - Aumento da **razão elástica** (maior tendência ao chamado efeito mola);
 - Redução nos **alongamentos uniforme e total**;
 - **Perda** das características especiais nas **regiões soldadas**, onde a microestrutura é redefinida e se perde o efeito promovido pelo tratamento termomecânico.

PESQUISA EM TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS

Ano	1970	1980	1990	2000
<u>Processos</u> <u>Termo-</u> <u>Mecânicos</u>	Laminação Controlada	Laminação Intercrítica		P&D sobre Aço com TG Ultra-Fino
		SHT	OLAC	TMCP
	Laminação sob Baixa Temperatura	Laminação sob Baixa Temperatura de Reaquecimento	Resfriamento Acelerado	Têmpera Direta
			Modelamento Matemático da Laminação a Quente	
<u>Mecanismos de</u> <u>Endurecimento</u>	Refino de Grão Endurecimento por Precipitação	Endurecimento por Encruamento	Endurecimento por Martensita ou Bainita Endurecimento por Transformação	Endurecimento por Ultra-Refino de Grão
<u>Normas</u>			ASTM A841 (Aço Resf. Acel.)	JIS-SN (Constr. Civil)

PESQUISA EM TRATAMENTOS TERMOMECAÂNICOS



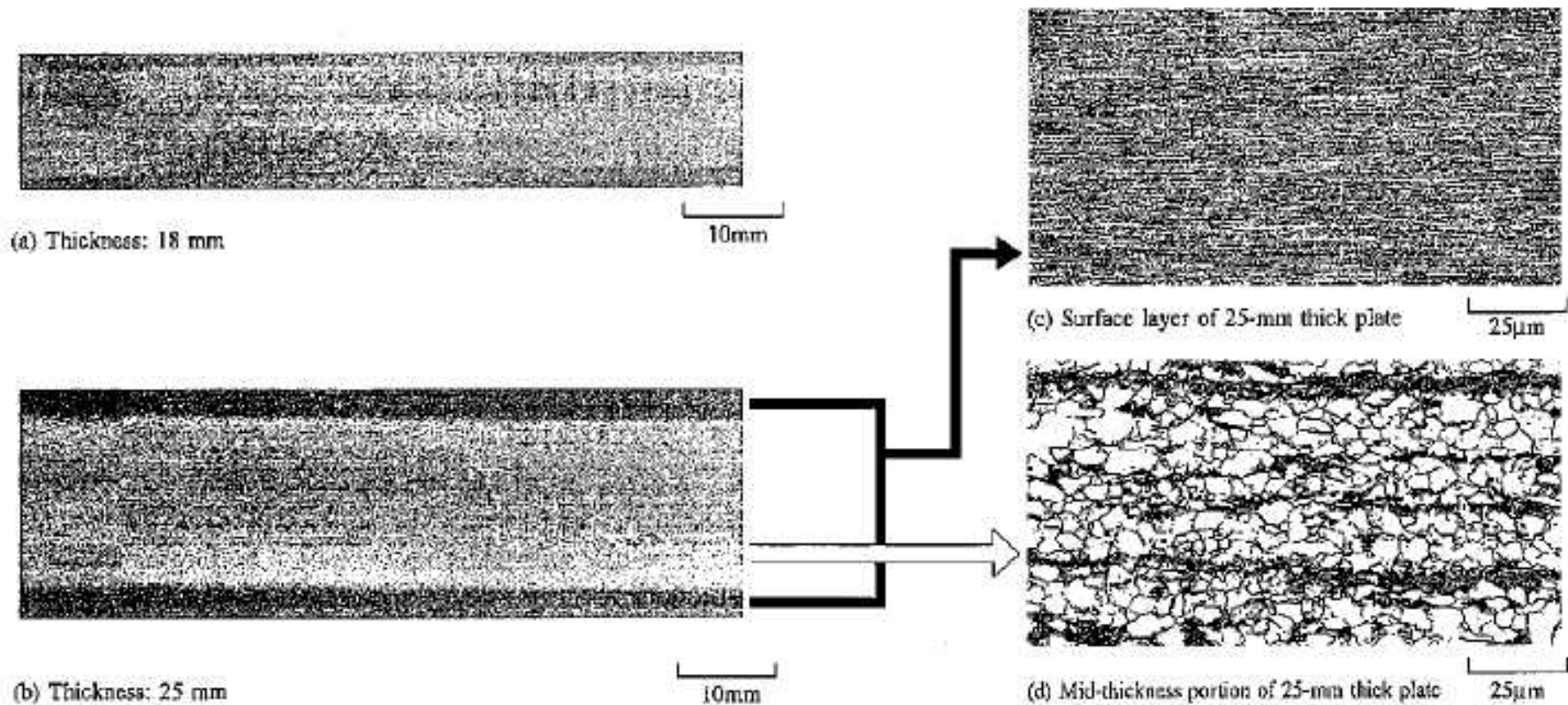
Convencional

TM

Grão Ultra-Fino

PRIMEIRA APLICAÇÃO INDUSTRIAL DE GRÃOS ULTRA-FINOS: *HIAREST PLATE*, 1995

- Por volta de 1995 a Nippon Steel anunciou o lançamento da chapa grossa *Hiarest* (**H**igh **A**rrest), que apresentava camadas superficiais superior/inferior constituída de grãos ultra-finos ($TG \cong 2 \mu m$):



HIAREST PLATE: PERFIL MICROESTRUTURAL

Table 1 Typical chemical composition of HIAREST (mass%)

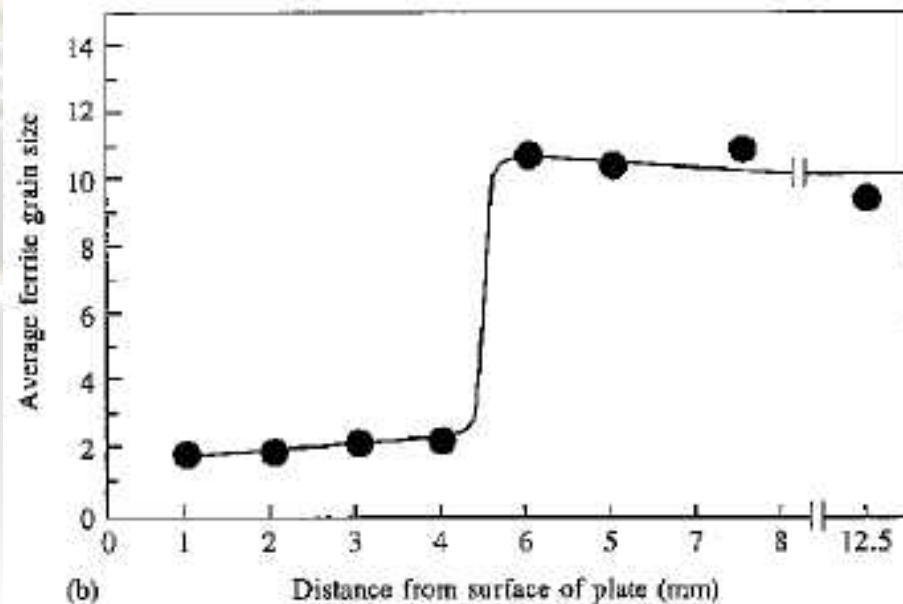
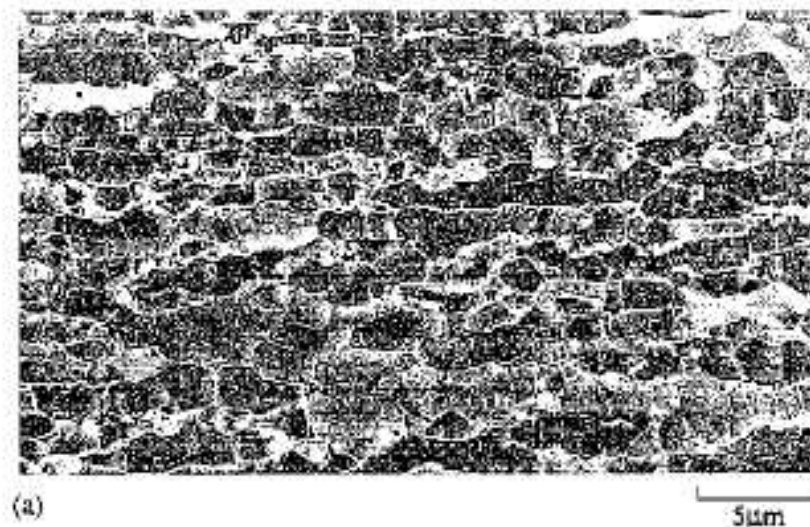
C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.13	0.20	1.27	0.007	0.002	0.34

Table 2 Typical tensile properties of HIAREST (full-thickness specimens)

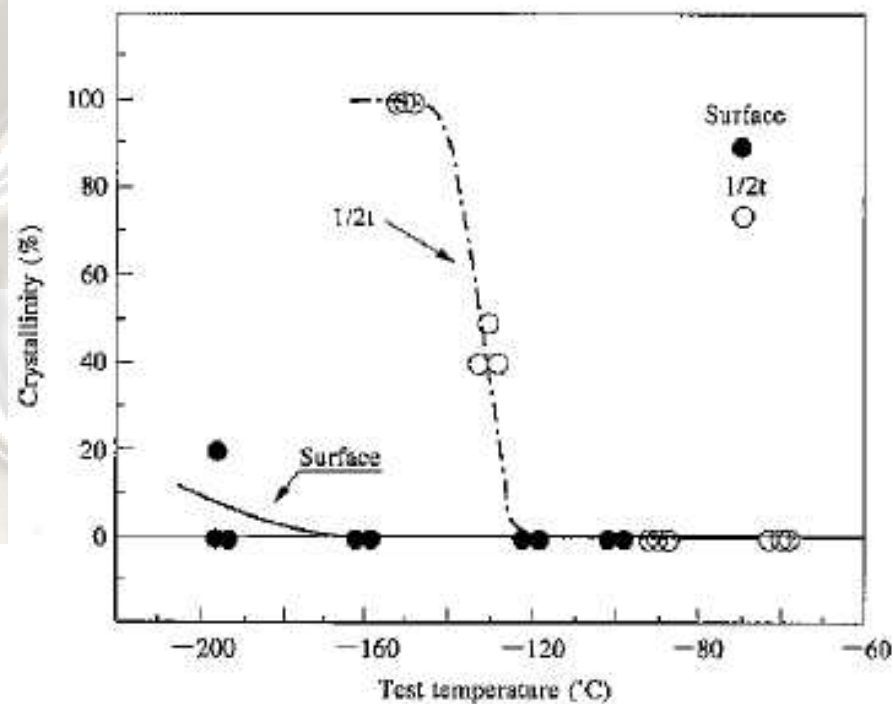
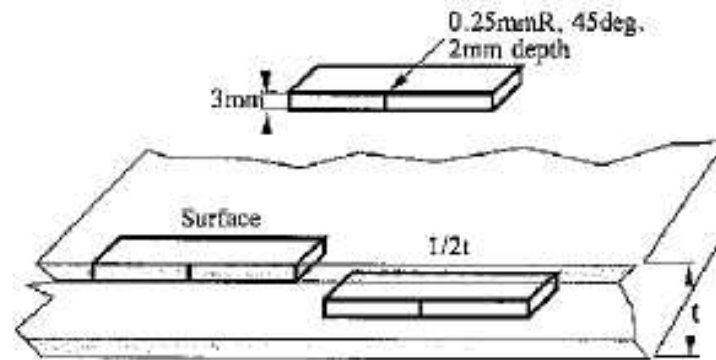
Thickness	Yield point	Tensile strength	Elongation
18mm	451MPa	503MPa	18%
25mm	431MPa	526MPa	23%

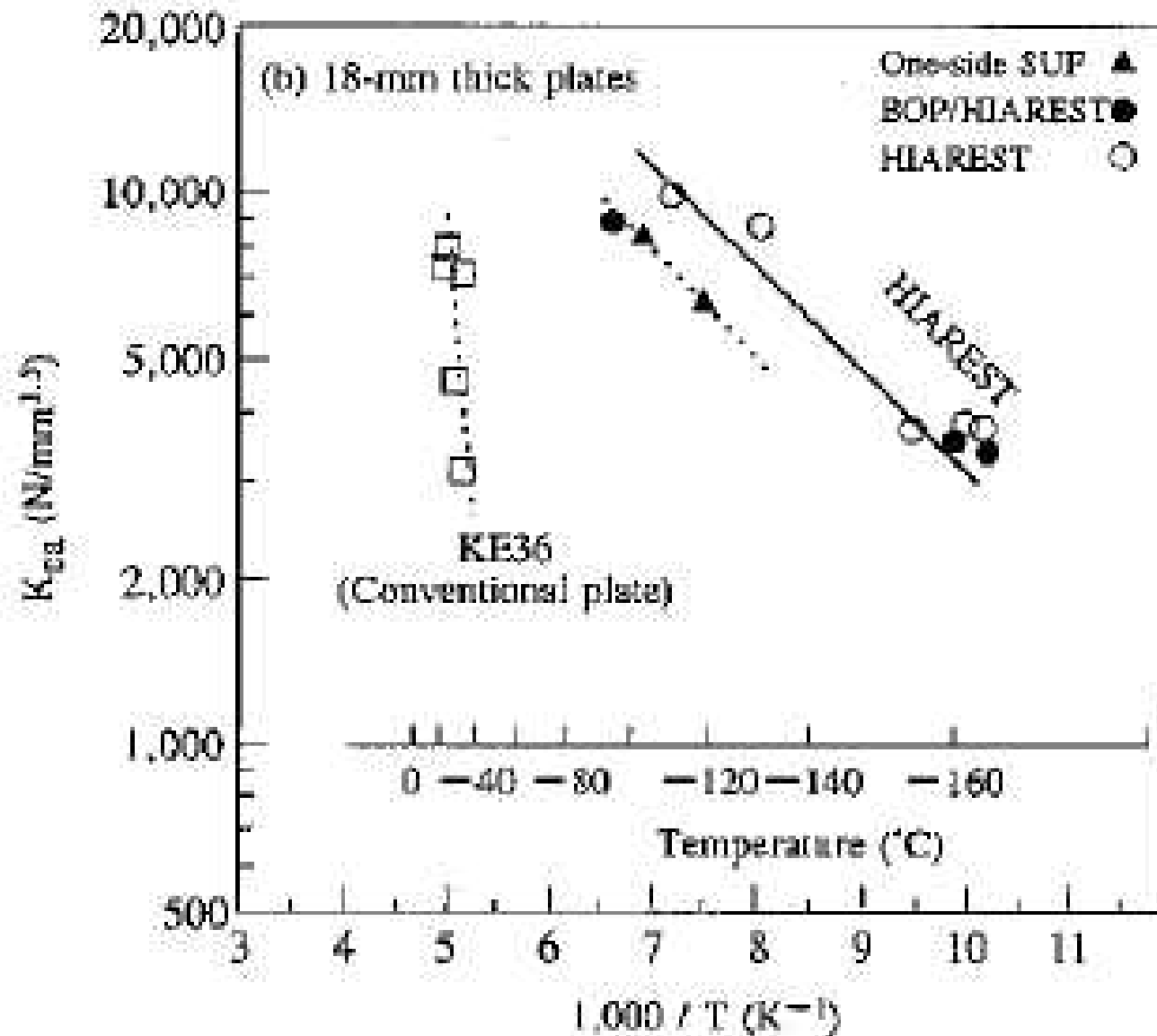
Specimen size: 200 mm GL × 25 mm width

Equivalente ao Grau Naval
EH 36

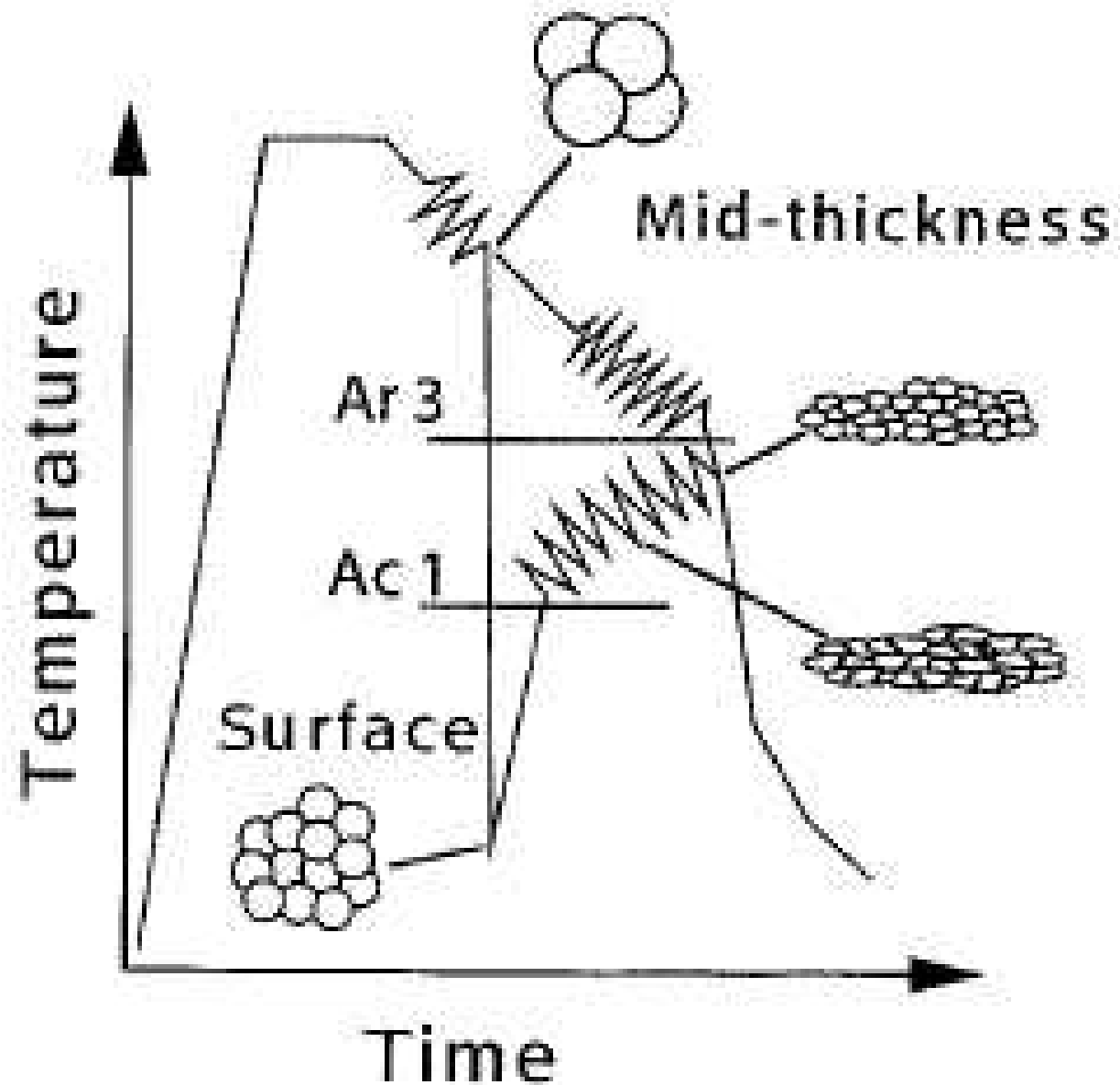


HIAREST PLATE: TENACIDADE PELE x NÚCLEO





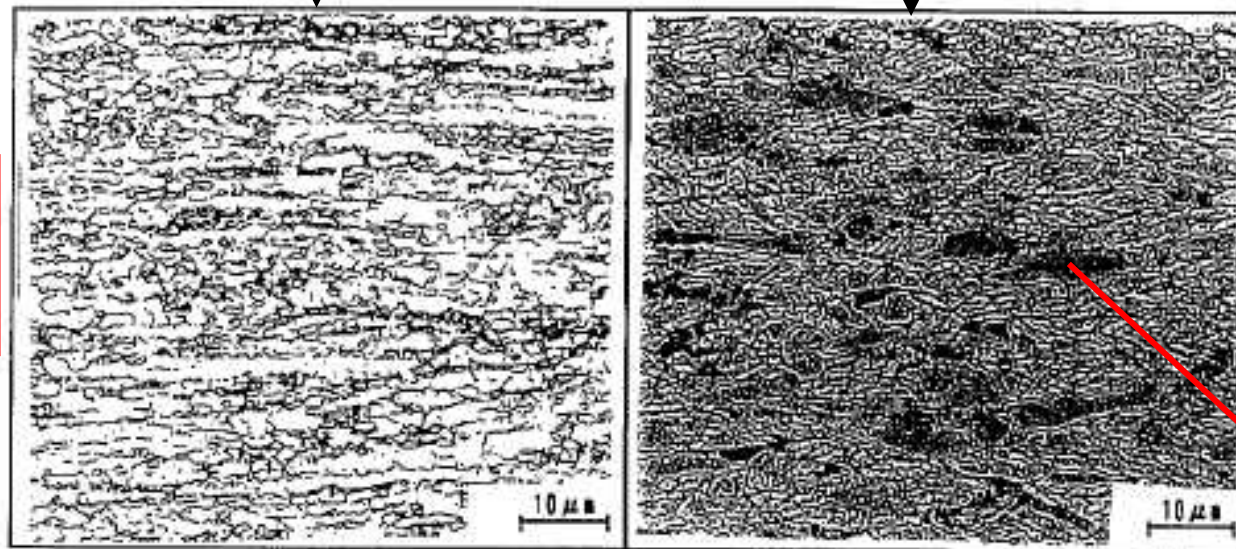
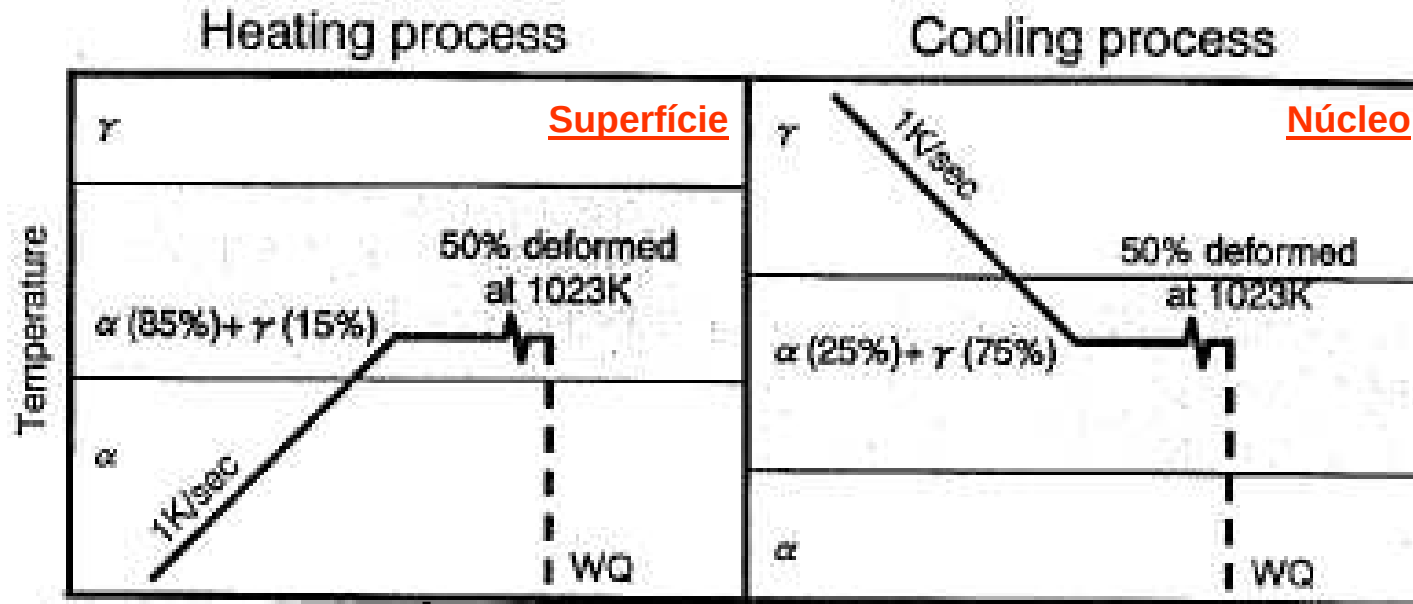
HIAREST PLATE: PROCESSO DE LAMINAÇÃO



HIAREST PLATE: DETALHES DA LAMINAÇÃO

- Diferentes **evoluções de temperatura** na mesma chapa:
 - Núcleo: resfriamento similar ao convencional;
 - Superfície:
 - **Brusco resfriamento** abaixo de A_{r1} ;
 - **Recalescência** até temperatura entre A_{c1} e A_{c3} .
- Mecanismos para formação de grão ultra-fino:
 - **Deformação de ferrita** durante a recalescência, que subsequenteiramente passa ainda por recuperação e recristalização;
 - **Transformação** da austenita sob recalescência em ferrita;
 - **Deformação progressiva** da austenita durante a recalescência, que se transforma em ferrita ultra-fina em bandas de deformação ou de forma dinâmica;
 - **Precipitação** de cementita refinada, que imobiliza os contornos de grão e impede o crescimento dos grãos ultra-finos de ferrita.

HIAREST PLATE: PROCESSO DE LAMINAÇÃO



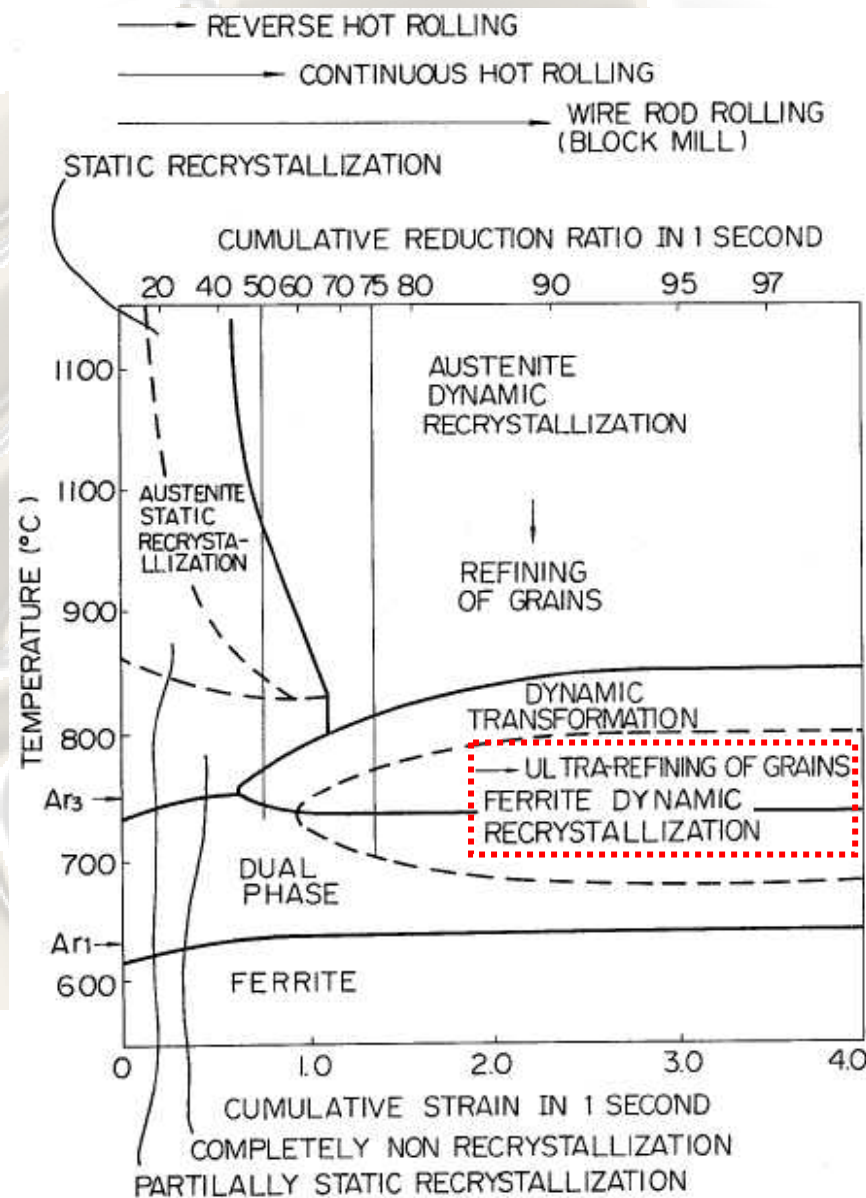
Grãos ultra-finos
restaurados,
2 μm

Sem γ alongada

Grãos típicos
de laminação
intercrítica,
4 ~6 μm

γ alongada

BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO: U.S. PATENT 4,466,842 - NIPPON STEEL - 1984



Aço com
0,15%C 1,00% Mn

BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO: U.S. PATENT 4,466,842 - NIPPON STEEL - 1984

Steel Nos.	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Al (%)	N (%)	Ar ₁ (°C.)	Ar ₃ (°C.)
1	0.07	0.02	1.02	0.019	0.0043	675	774
2	0.12	0.47	1.01	0.020	0.0020	658	789

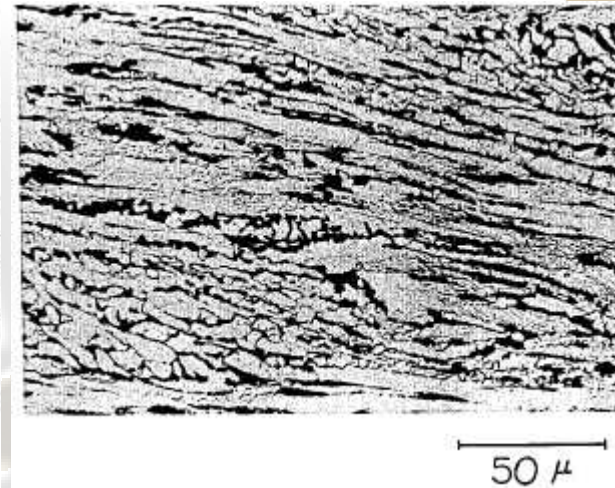
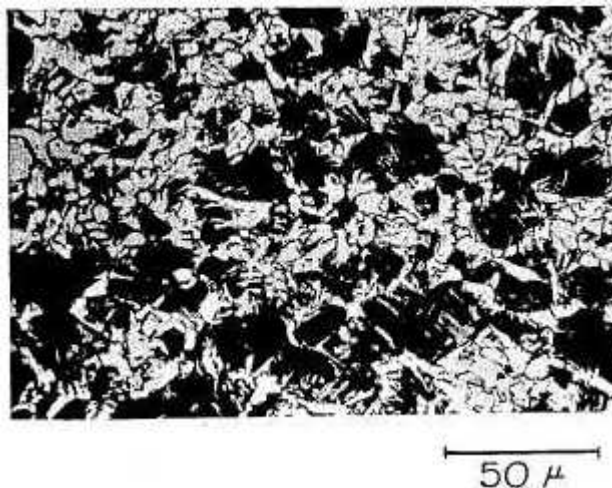
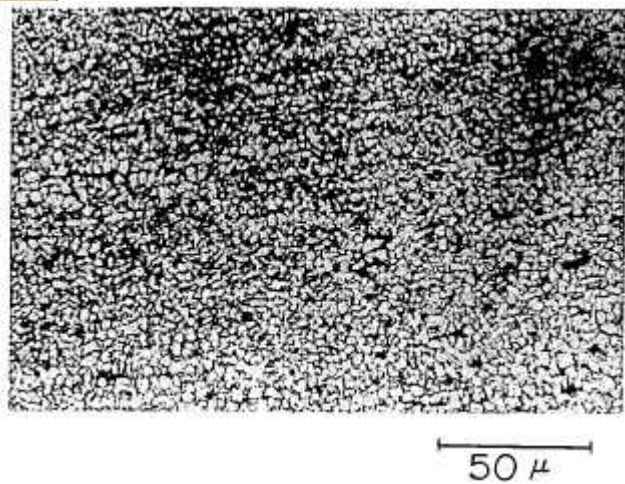
$h_{\text{placa}} = 200 \text{ mm}$
 Lingotamento Contínuo
 $T_{\text{Reaq}} = 1100^{\circ}\text{C}$
 $h_{\text{Esb}} = 50 \text{ mm}$

Finishing Pass Schedule	Pass	Sheet Thickness after Pass (mm)	Time Between Passes	Reduction Ratio within One Second (%)
A Invention	1	30		
			2.00	
	2	22		
			1.46	
	3	17		
			1.13	
	4	12		
				0.90
	5	8		
				0.53
	6	5		
				58
B Comparative Example	1	30		
			3.00	
	2	20		
			2.00	
	3	12		
			1.35	
	4	7		
				0.90
	5	5.7		
				0.50
	6	5.0		
				27

BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO: U.S. PATENT 4,466,842 - NIPPON STEEL - 1984

Steel Nos.	Test Nos.	Process Conditions				Structure (vertical to sheet plane)		Tensile Properties (JIS 13B)			Ductility (Charpy) Transition Temperature (3 mm subsize specimen) (°C.)
		Rolling Pass Schedule	Finishing Temperature (°C.)	Estimated Cooling Rate (700→600° C.) (°C./s)	Coiling Temperature (°C.)	Average Quantity of Ferrite (%)	Average Grain Diameter of Ferrite Crystals (μ)	0.2% Proof Stress (kg/mm ²)	Tensile Stress (kg/mm ²)	Elongation (%)	
1	1	A	850	25	510	80	4	48	58	30	—
	2	A	820	40	250	85	3	47	68	21	—
	3	A	810	8	530	90	3.5	43	62	25	—
	4	A	760	33	390	95	2.2	61	65	20	—160
	5 (Comparative Example)	A	910	25	500	40	10	61	73	10	—20
	6 (Comparative Example)	A	650	8	540	96	6	46	53	15	—70
	7 (Comparative Example)	B	810	40	250	60	8	45	58	13	—80
2	8	A	820	40	250	85	3	47	71	20	—
	9	A	810	10	520	90	3.5	48	61	32	—
	10	A	730	35	390	98	1.4	71	73	23	—
	11 (Comparative Example)	B	820	40	250	50	7	42	55	12	—

BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO: *U.S. PATENT 4,466,842 - NIPPON STEEL - 1984*

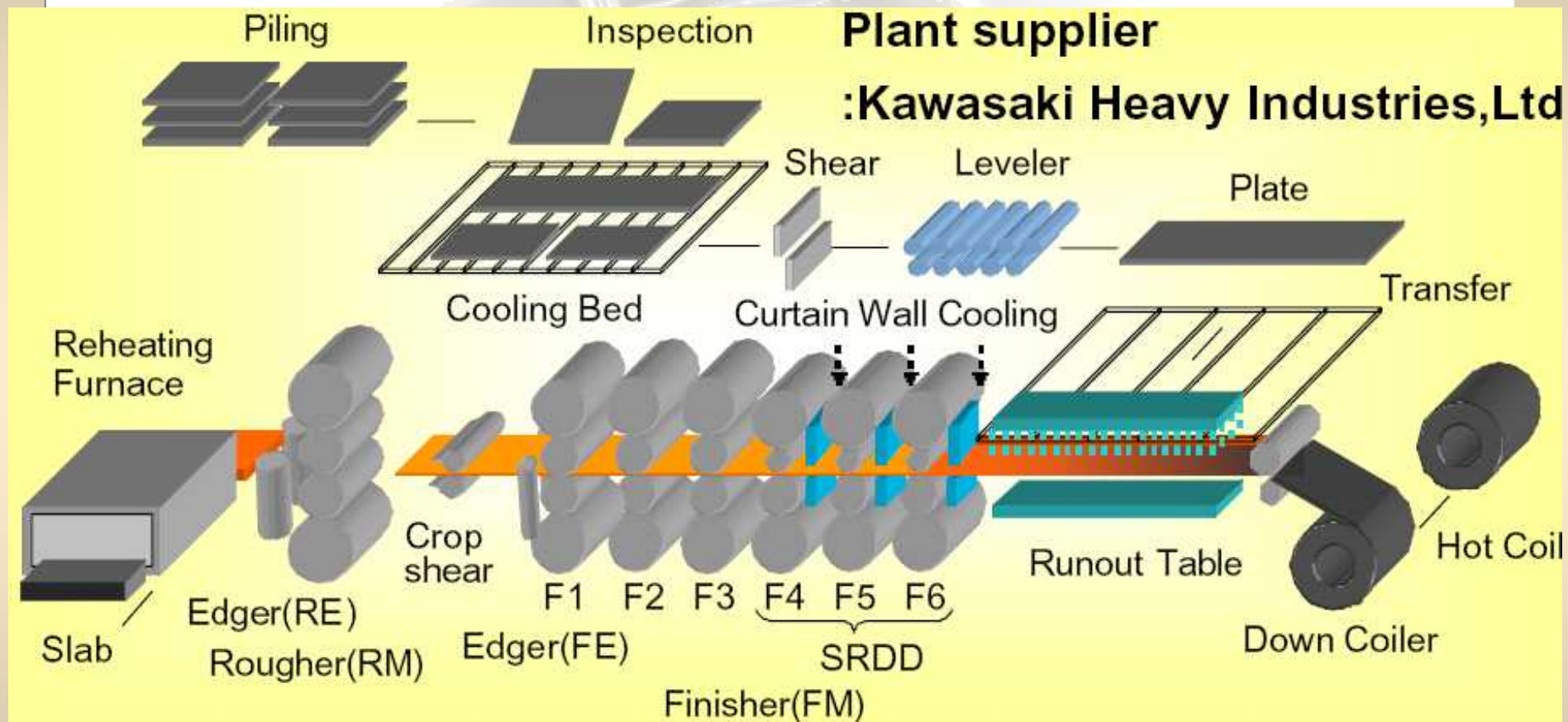


$\epsilon_f = 58\%/1 \text{ seg}$
 $T_{ac} = 760^\circ\text{C}$
 $V_{resf} = 33^\circ\text{C/s}$
 $T_{bob} = 390^\circ\text{C}$
 $F_{vol} \alpha = 95\%$
 $TG = 2,2 \mu\text{m}$
 $LE = 610 \text{ MPa}$
 $LR = 650 \text{ MPa}$
 $RE = 0,94$
 $AT = 20\%$
 $TTDF = -160^\circ\text{C}$

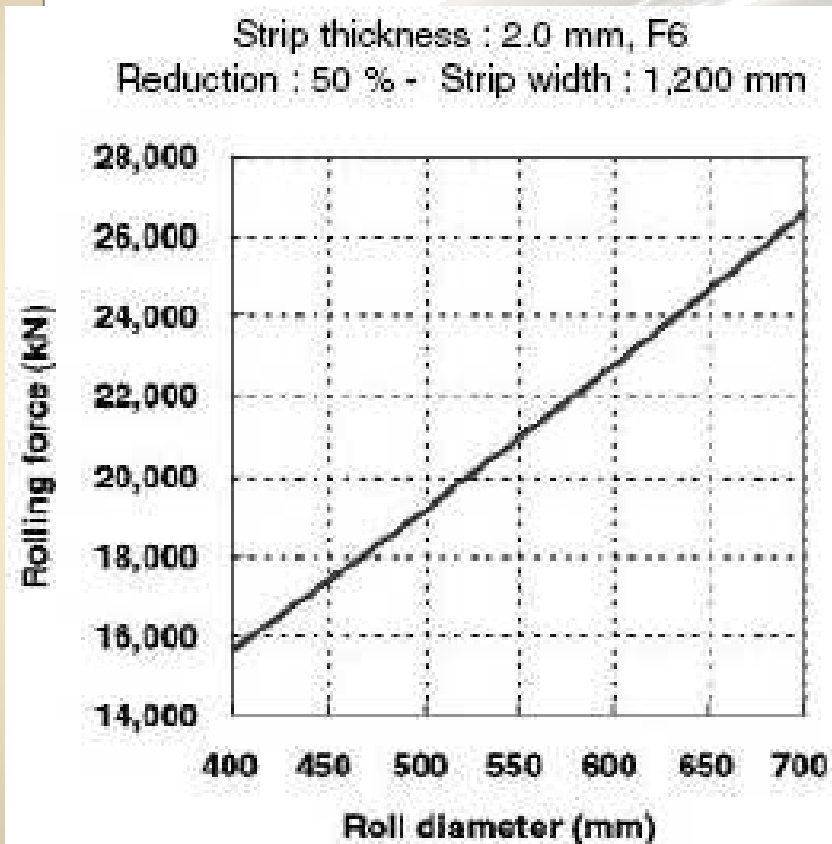
$\epsilon_f = 58\%/1 \text{ seg}$
 $T_{ac} = 910^\circ\text{C}$
 $V_{resf} = 25^\circ\text{C/s}$
 $T_{bob} = 500^\circ\text{C}$
 $F_{vol} \alpha = 40\%$
 $TG = 10,0 \mu\text{m}$
 $LE = 610 \text{ MPa}$
 $LR = 730 \text{ MPa}$
 $RE = 0,84$
 $AT = 10\%$
 $TTDF = -20^\circ\text{C}$

$\epsilon_f = 58\%/1 \text{ seg}$
 $T_{ac} = 650^\circ\text{C}$
 $V_{resf} = 8^\circ\text{C/s}$
 $T_{bob} = 540^\circ\text{C}$
 $F_{vol} \alpha = 96\%$
 $TG = 6,0 \mu\text{m}$
 $LE = 460 \text{ MPa}$
 $LR = 530 \text{ MPa}$
 $RE = 0,87$
 $AT = 15\%$
 $TTDF = -70^\circ\text{C}$

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

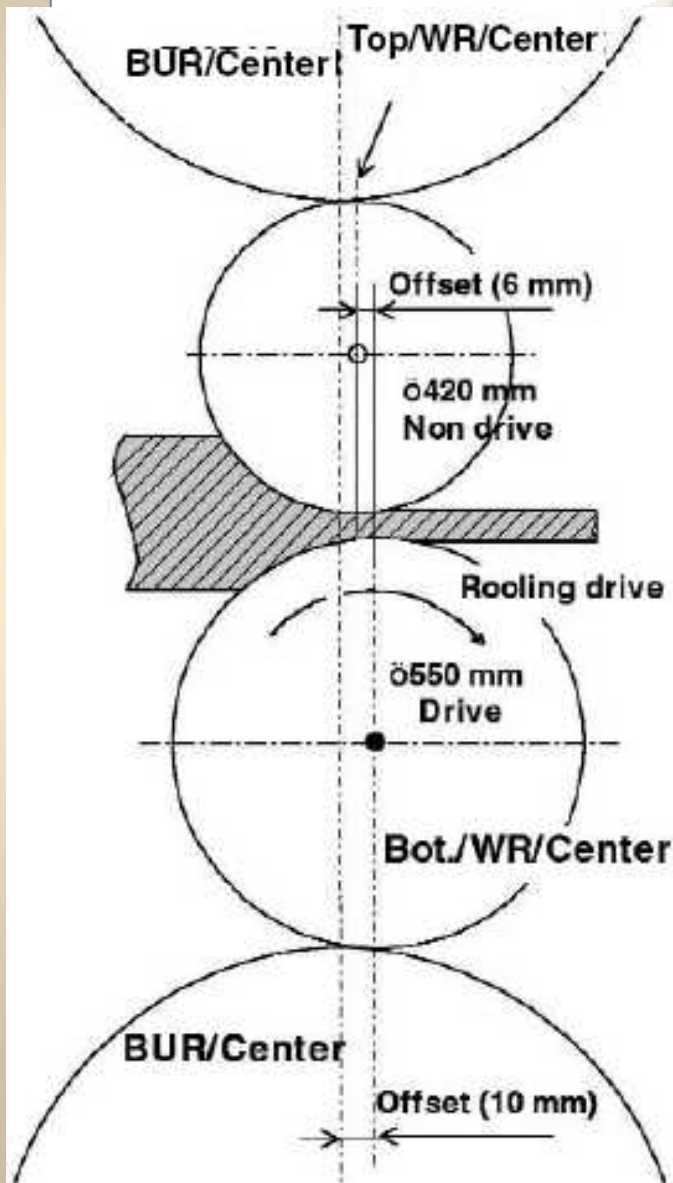


O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL: REDUÇÃO DAS CARGAS NAS ÚLTIMAS CADEIRAS



- A partir da F4 a deformação mínima por passe é de 40% sob temperaturas abaixo de 800°C. As **cargas de laminação** assim geradas são muito altas.
- Altas cargas, além de exigirem superdimensionamento da cadeira, dificultam o controle da **planicidade** do material.
- A **redução do diâmetro do cilindro de trabalho** permite redução da carga, mas não do torque.
- O torque envolvido **inviabiliza o uso** de ambos os cilindros de trabalho com diâmetros reduzidos.

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

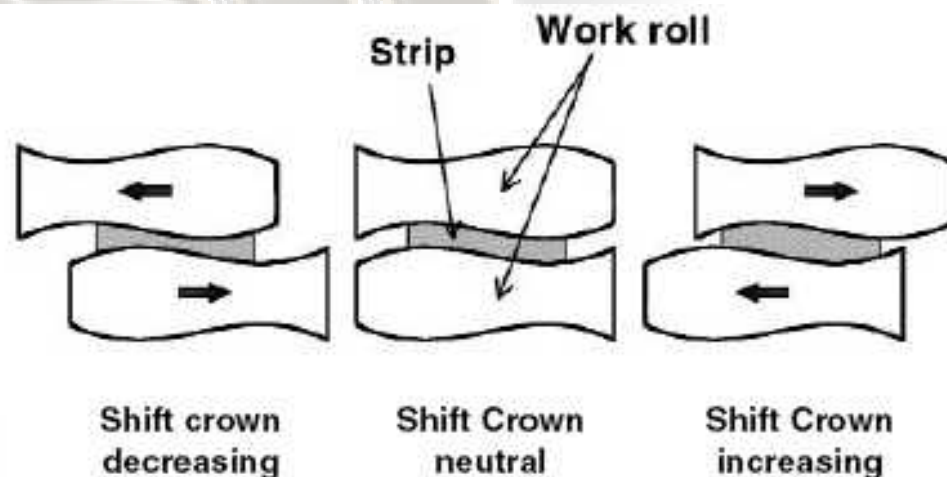
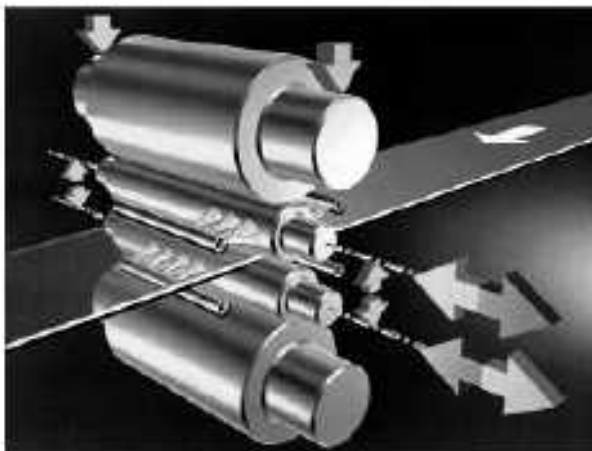


SOLUÇÃO PROPOSTA:

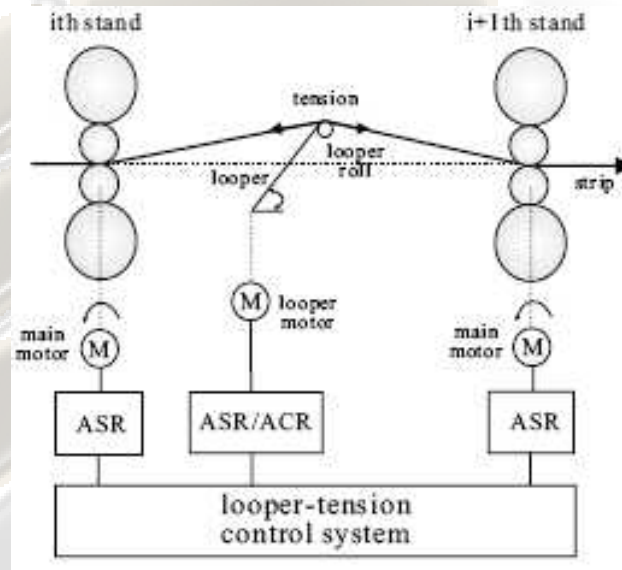
- Só o **cilindro de trabalho superior** possui diâmetro reduzido e **não é acionado** pelo motor.
- Cilindro de trabalho inferior possui **diâmetro normal**, aplicando todo o torque necessário para a laminação.
- Há **defasagem entre os centros** dos cilindros de trabalho e entre estes e os cilindros 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: OUTRAS CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS

- **Controle Extra de Temperatura** nas Últimas Cadeiras:
 - Cortina de água nas saídas das cadeiras F4, F5 e F6 para neutralizar o forte aquecimento adiabático decorrente das fortes deformações aplicadas ($\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$).
 - Transferência de calor requerida: $15.000 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$
- Sistema especial de **roll shift** (CVC) levando em conta as diferentes evoluções de coroa térmica entre cilindros de trabalho com diferentes diâmetros.



O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL: OUTRAS CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS

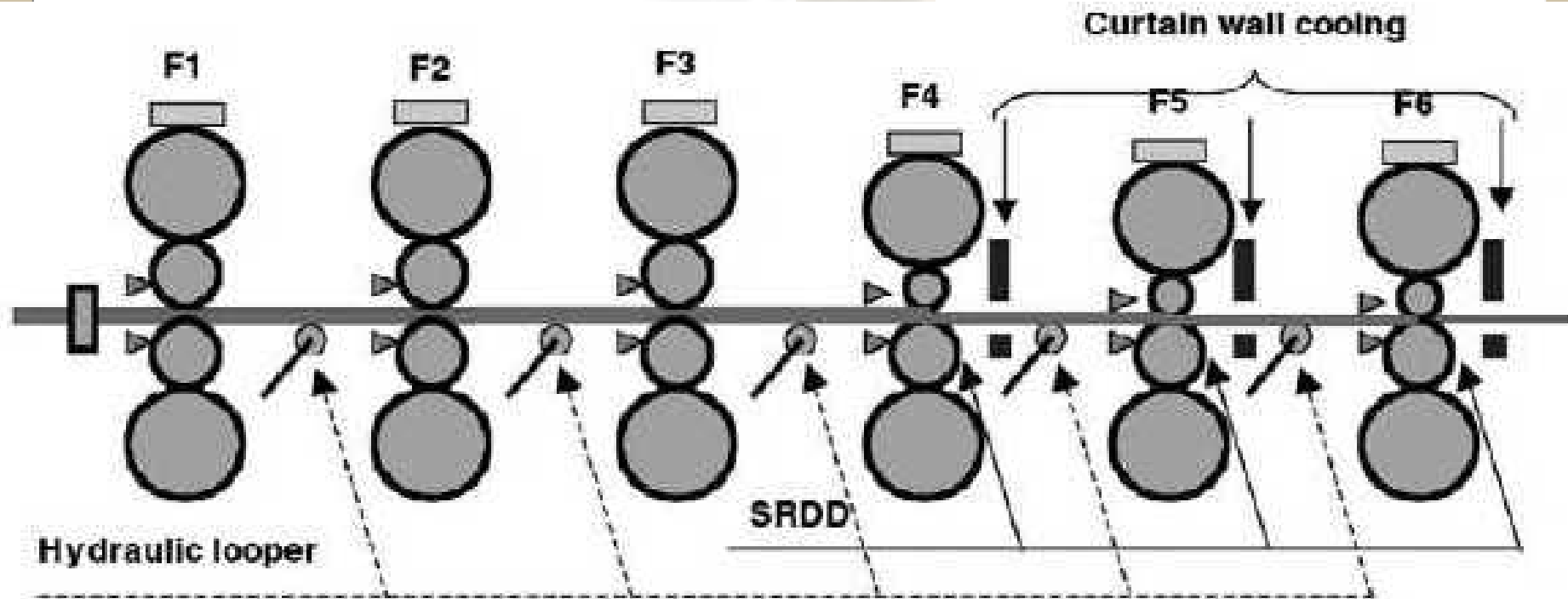


- Como se sabe, num trem de laminadores é fundamental que seja mantido o **fluxo de massa**. Ou seja, a massa de metal que sai de uma cadeira deve ser a mesma que entra na cadeira seguinte.
- O **intenso resfriamento** aplicado na tira na saída das cadeiras F4 e F5 perturba o fluxo de massa, podendo causar perturbações na laminação que podem até mesmo sucatar o laminado.
- Solução: uso de **loopers** (extensores) de tiras com baixa inércia, acionados hidraulicamente.

O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL: OUTRAS CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS

- O **atrito entre as cadeiras** precisa ser controlado de forma a viabilizar as fortes reduções aplicadas nas últimas cadeiras, mas sem provocar **desgastes excessivos** nos cilindros de trabalho ou **altas cargas** de laminação.
- Uso de cilindros de trabalho de **aço ferramenta ao Co** leva à formação de “picos” de finos carbonetos de cobalto na superfície do cilindro, aumentando sua rugosidade e garantindo um coeficiente de fricção superior a 0,3, evitando patinação da tira.
- Em determinados casos é necessário reduzir o coeficiente de fricção. Usa-se aqui **lubrificante sólido dissolvido em graxa**. Estão sendo feitas experiências com sucata de aciaria e alto-forno como agente lubrificante na laminação de bobinas a quente de aços com grão ultra-fino.

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

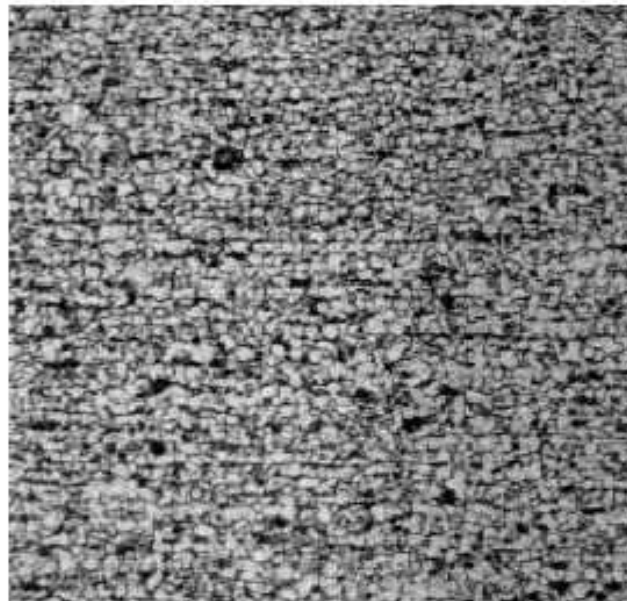
O NOVO L.T.Q. DA NAKAYAMA STEEL

	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

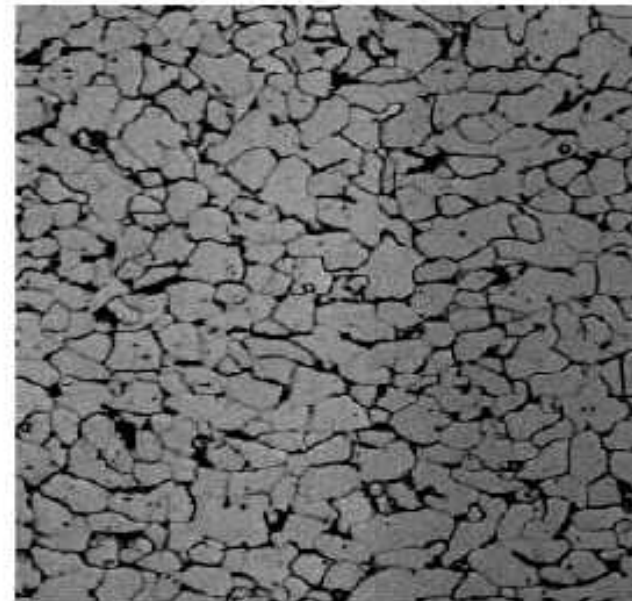
(weight %)	C	Si	Mn
Conventional SM490B	0.16	0.40	1.40
500 MPa ultrafine grained steel	0.16	0.20	0.80
Saving		0.20	0.60

→ Cost down of steel :
10 dollar/ton



a) Ultrafine grained steel

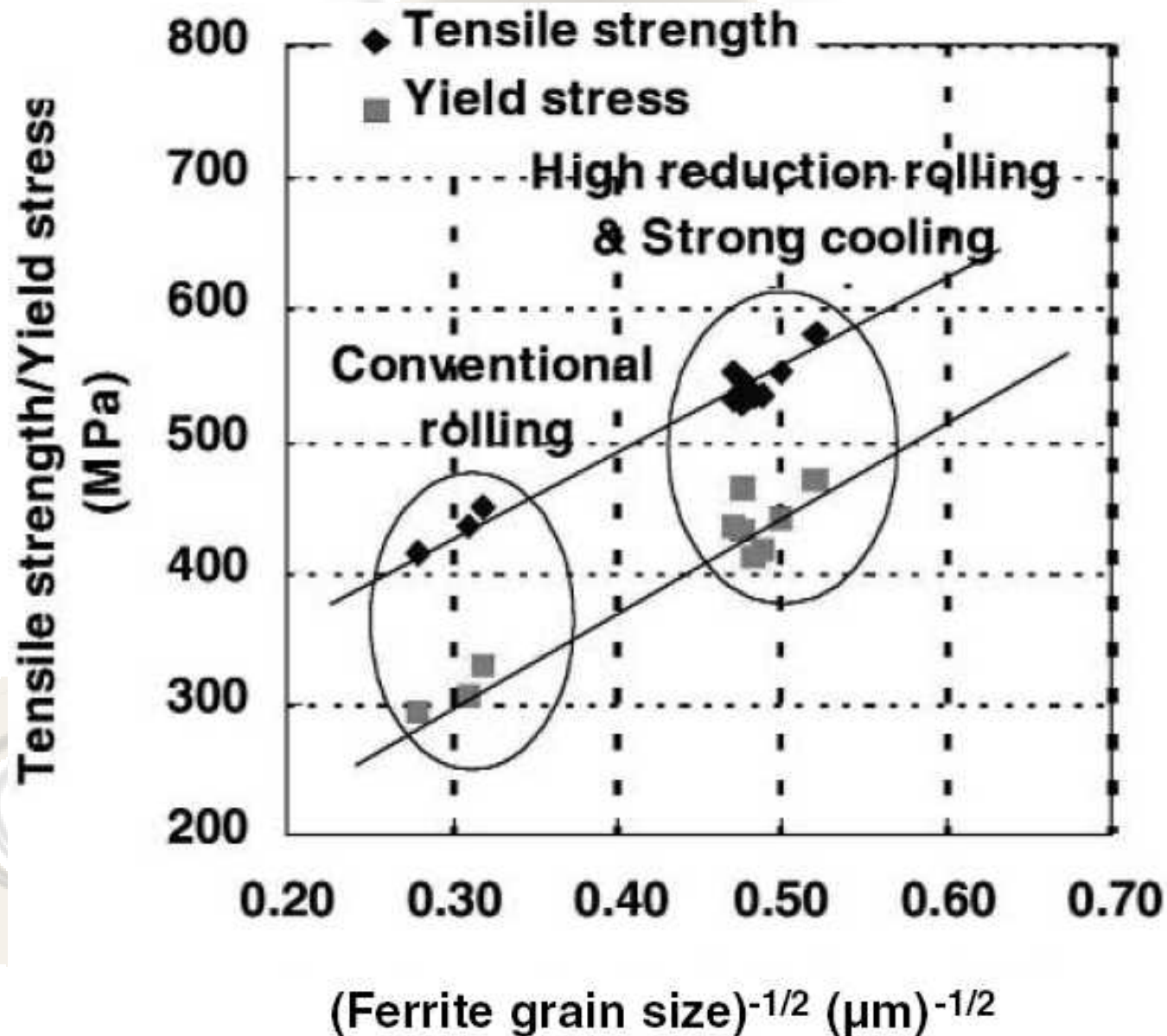
2 ~ 5 μm



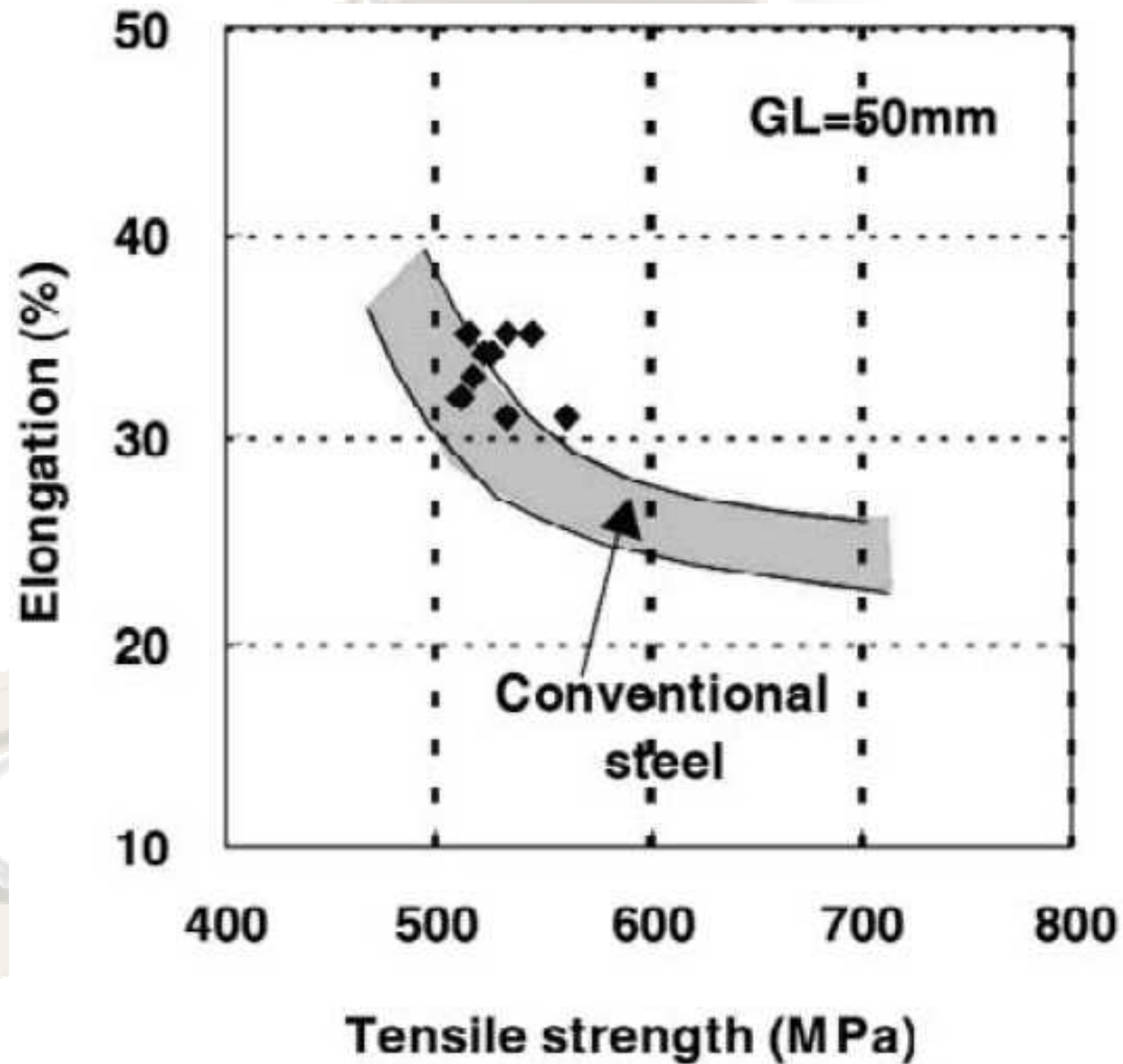
b) Conventional steel.

10 ~ 15 μm

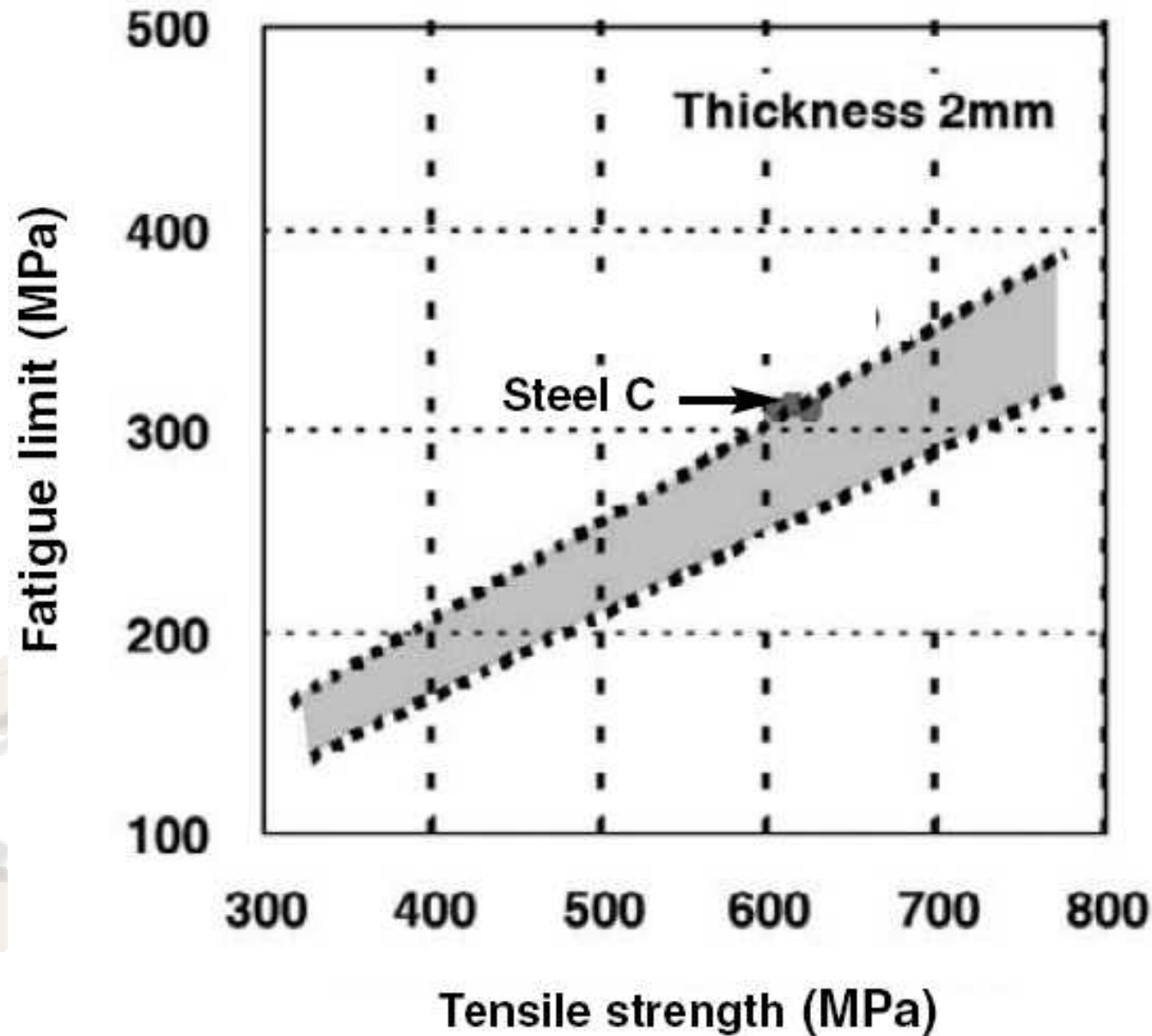
NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



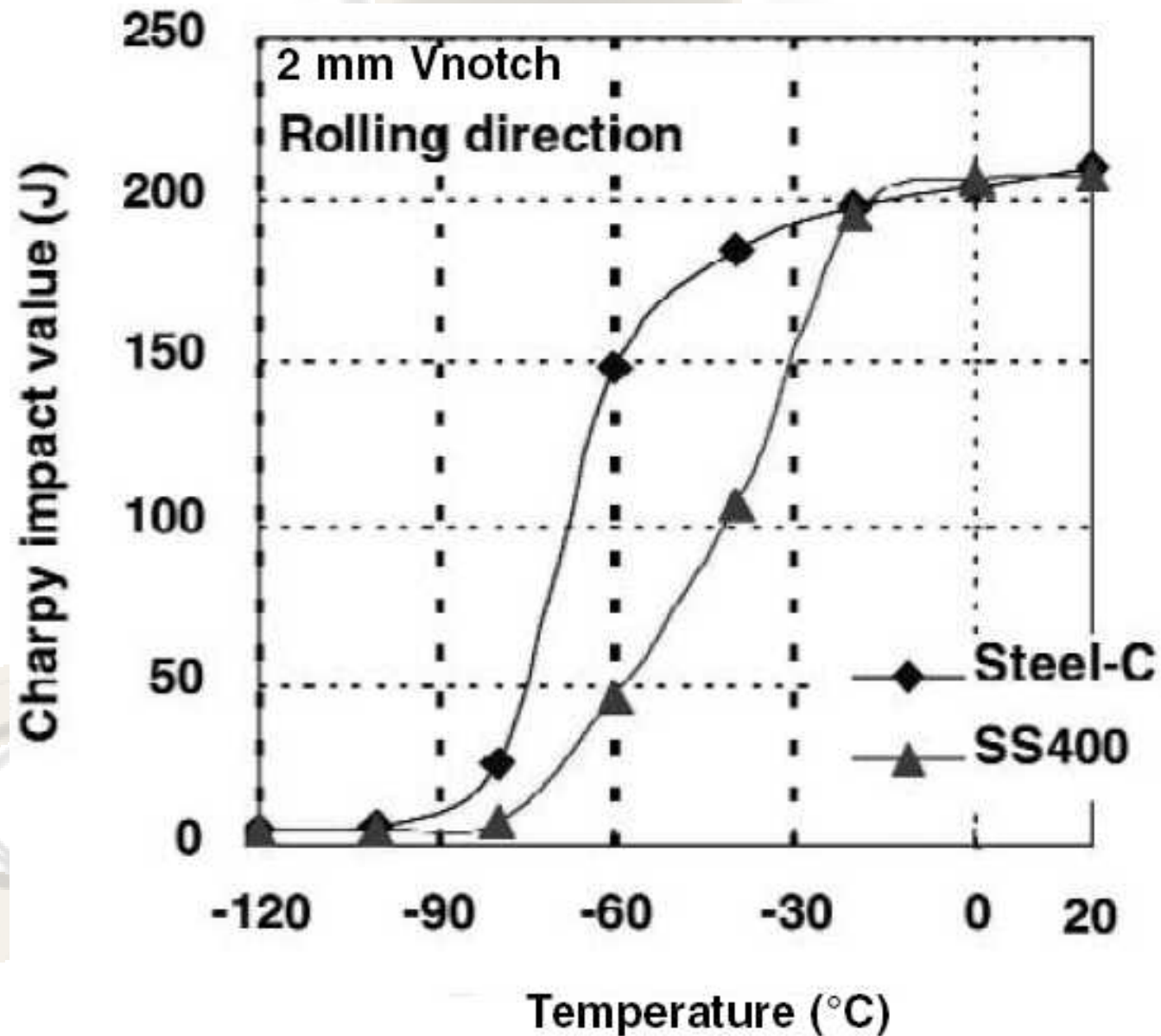
NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



NAKAYAMA: BOBINAS A QUENTE COM GRÃO ULTRA-FINO



JFE STEEL: SUPER HSLA STEEL

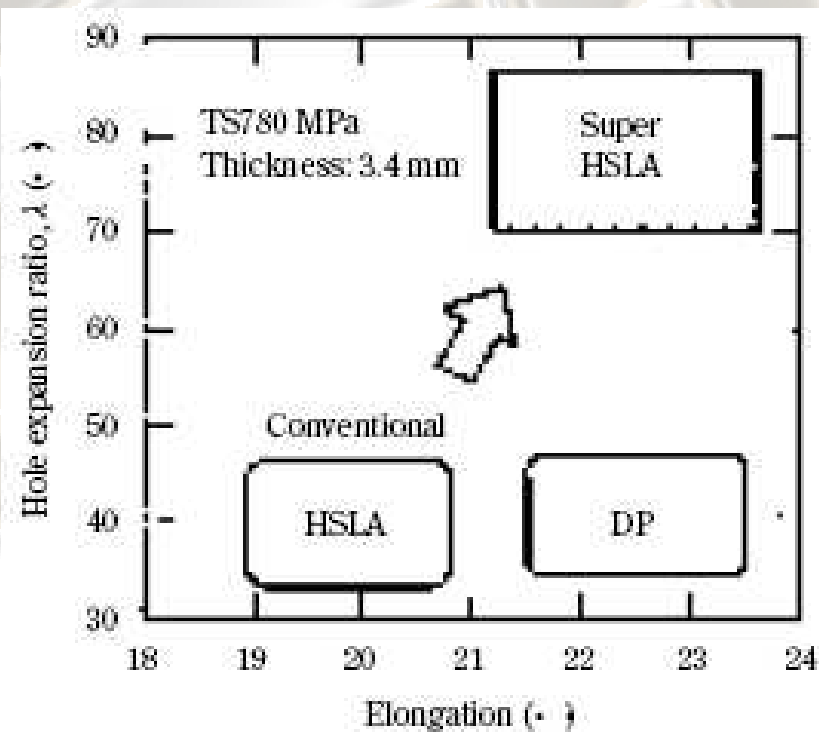
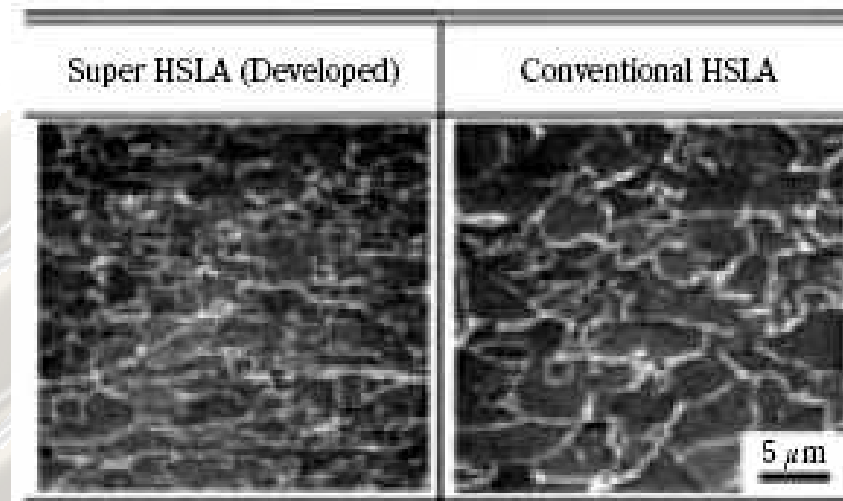
- 0,2 % Ti:
 - Restrição no crescimento de grão durante **reaquecimento**;
 - Pouca restrição à **recristalização** durante laminação a quente;
 - **Austenita refinada** (50 μm) nos passes finais do LTQ.
- **TG: 2 μm** (convencional: 6 ~ 7 μm)
- Grão ultra-fino favorece capacidade de **expansão de orifício** (*hole expansion*) na conformação de 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



CONCLUSÕES

- Utilização industrial de microestruturas com tamanhos de grão entre 2 e 4 μm **há mais dez anos** já se mostrou viável do ponto de vista industrial, ao menos em usinas avançadas tecnologicamente.
- Exemplos (a princípio) já comerciais:
 - Nippon Steel (CG *Hiarest*);
 - Nakayama Steel (bobinas a quente);
 - Kawasaki Steel (bobinas a quente).
- Tentativas já registradas (bobinas a quente):
 - Thyssen Krupp (aço HTP);
 - Posco;
 - Bao Steel.
- Mas ainda não se dispõe de informações plenas sobre a **aplicação prática** desse material e uma comparação efetiva com os produtos convencionais. Segundo informações verbais, atualmente a aplicação real de BQs de aço com grãos ultra-finos seria **nula** ou, na melhor das hipóteses, **extremamente restrita**.



PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE AÇOS PLANOS COM GRÃO ULTRA-FINO ATRAVÉS DE LAMINAÇÃO A QUENTE

GRATO PELA ATENÇÃO!

II Simpósio sobre Aços:
Novas Ligas Estruturais para a
Indústria Automobilística
São Paulo, 15 de Maio de 2007