

# MICROLIGA EM CHAPAS DE AÇO PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA <sup>1</sup>

Pascoal J. P. Bordignon <sup>2</sup>

## Resumo

Contínuo desenvolvimento na tecnologia dos aços microligados tem ocorrido desde o início de sua utilização pela indústria automobilística, tanto em chapas laminadas a quente quanto nas chapas laminadas a frio e revestidas.

Neste trabalho é apresentado uma síntese da evolução tecnológica dos aços microligados planos para a indústria de veículos, com ênfase em desenvolvimentos mais recentes e na discussão dos diversos tipos de projeto de liga.

## Abstract

There has been continuous progress on the technology of microalloyed steels since they started to be used in the automobile industry, both on hot and cold rolled sheets as well as on coated products.

In this paper it is presented a summary about the technological development on microalloyed flat products for the automobile industry. Special attention is given to recent developments and discussion on different types of alloy designs.

## Introdução

Os aços microligados passaram a ocupar posição de destaque na indústria siderúrgica a partir dos anos 60. Esses aços são assim chamados por receberem pequenas adições isoladas ou combinadas, usualmente < 0.10% de Nb, V ou Ti. Proporcionando aumento de resistência mecânica e, ao mesmo tempo, mantendo em níveis elevados combinações de várias outras propriedades - soldabilidade, tenacidade, conformabilidade, etc. - os aços microligados encontraram grande aplicação na indústria automobilística, principalmente a partir da primeira crise do petróleo, possibilitando, além de segurança, redução no peso dos veículos. Fatores de segurança e redução do peso de veículo permaneceram como as razões principais para utilização dos aços microligados na indústria automobilística durante os anos 70, apesar do desenvolvimento, ainda na década de 60, dos aços livres de intersticiais (Interstitial Free - IF). Posteriormente, a larga utilização de

<sup>1</sup> Contribuição técnica para o 1º Seminário sobre Chapas Metálicas para a Indústria Automobilística, São Paulo - Setembro de 1992.

<sup>2</sup> Membro da ABM, Gerente de Desenvolvimento de Mercado, CEMM São Paulo.

tratamento sob vácuo em aciarias permitiu a produção de aços com extra baixo teor de carbono e viabilizou em escala comercial a produção dos aços IF. Esses aços apresentam elevadíssimos níveis de conformabilidade e baixa resistência mecânica para materiais processados tanto em recozimento em caixa quanto em linhas de recozimento contínuo. Podem também ser produzidos com resistência mecânica elevada, com pequena perda de conformabilidade.

O tipo de aço microligado é selecionado levando em consideração as características finais desejadas para cada aplicação e também, fatores econômicos. As linhas que seguem apresentam a situação atual com relação a disponibilidade dos aços microligados laminados a quente e a frio para a indústria automobilística e discutem os tipos de projetos de liga desenvolvidos.

### **Chapas Laminadas a Quente**

As chapas laminadas a quente tem como aplicações típicas componentes de chassis, rodas, peças estruturais, etc. Aços microligados tradicionais possuem limite de escoamento na faixa de 350-550 MPa, tabela I. Esses aços possuem microestrutura ferrita-pouca perlita e são microligados ao nióbio devido à sua maior efetividade em aumentar a resistência mecânica, figura 1 (1). O titânio foi também utilizado nos aços laminados a quente com requisitos de conformabilidade. No passado, os teores de enxofre eram relativamente elevados, dessulfuração não era prática usual, e o titânio conferia efeito adicional de globalização de sulfetos. Aços modernos possuem baixos teores de enxofre e não utilizam o titânio como microligante principal devido a maior dificuldade de processamento na laminação (2), figura 2 e maior variação de propriedades na bobina em relação aos aços ao nióbio (3), figura 3. Pequenas adições de titânio no entanto, podem conferir resistência mecânica adicional aos aços ao nióbio processados em laminadores de tiras a quente, figura 4 (4). Sendo forte formador de nitreto o titânio fixa o nitrogênio do aço aumentando a eficiência do nióbio (maior solubilidade na austenita por impedir formação de nitretos de nióbio) como endurecedor da ferrita.

Além dos aços ferrita-pouca perlita foram desenvolvidos no Japão aços ferrita-bainita, com teores de manganês mais elevados e processamento com baixas temperaturas de bobinamento (5).

Produtos de tiras a quente com níveis de resistência superiores àqueles mostrados na tabela I foram desenvolvidos nos últimos anos, atingindo limite de escoamento de até 750 MPa (6). Todos os mecanismos de aumento de resistência mecânica são utilizados, figura 5, e alguns exemplos são mostrados na tabela II.

Em aplicações com soldagem elétrica de topo, e.g. rodas, melhor conformabilidade e uniformidade de dureza na junta soldada são obtidas diminuindo-se o índice de segregação de segunda fase ou seja, o teor de manganês. Resultados de desenvolvimento recente de aço de alta resistência (Rp 500 MPa) são mostrados na figura 6 (7).

## **Chapas Laminadas a Frio**

### **. Aços Convencionais**

Chapas de aço microligado convencional laminadas a frio são utilizadas pela indústria automobilística há mais de vinte anos mas, com aplicação limitada a partes que não exigem índices de conformabilidade muito elevado. São aços de baixo carbono (0.04-0.06% C) e baixo manganês (0.40-0.80% Mn) acalmados com alumínio e microligados (0.02-0.04% Nb) atendendo limites de escoamento mínimo, para os graus mais utilizados, de 275 a 375 MPa. O limite de escoamento de 275 MPa pode ser obtido apenas com adição de fósforo (0.07-0.08% P), sem utilização de microligante. Por outro lado, como este elemento prejudica significativamente a soldabilidade adições menores (0.04% P) compensadas por microliga (0.02% Nb) são mais indicadas. Estes aços apresentam microestrutura totalmente recristalizada. Níveis de resistência mecânica mais elevados, Rp 550-950 MPa, são produzidos com recozimento a temperaturas mais baixas - recristalização parcial e, como consequência, a conformabilidade é reduzida.

### **. Aços Livres de Intersticiais (Interstitial Free - IF).**

Os aços IF foram desenvolvidos no final da década de 60 (8) e apresentam níveis de conformabilidade muito superiores aos aços acalmados com alumínio. São assim chamados porque os elementos intersticiais N e C são fixados pelos microligantes Ti e Nb, o que os torna não envelhecíveis. Apesar do desenvolvimento desta família de aços há mais de 20 anos sua produção comercial em grande escala só teve início na década de 80 com desenvolvimentos tecnológicos na fabricação do aço e larga utilização de tratamento de desgaseificação possibilitando a produção de aços com teores de carbono extra baixos. Ao mesmo tempo, a indústria automobilística passou a exigir materiais com características superiores só facilmente atendidas pelos aços IF, especialmente em condições de processamento em linhas de recozimento contínuo, figura 7 (9).

Quanto à composição química, os aços IF podem e são produzidos apenas com Ti, apenas com Nb ou com dupla adição Nb+Ti. Quanto a características finais são produzidos em tipos estampagem profunda, extra profunda, de alta resistência mecânica e com endurecimento após pintura (bake hardenable).

Composições químicas e propriedades mecânicas típicas de alguns aços IF modernos são apresentadas na Tabela III (10-11).

### **. Efeito dos Microaligantes nos Aços IF.**

Conforme mencionado anteriormente os aços IF são produzidos apenas com adição de Ti, apenas com adição de Nb ou com adições combinadas Nb+Ti.

Se microaligado ao Ti os aços IF podem ser processados com temperatura de bobinamento mais baixa (precipitados mais grosseiros) e também com temperatura de recozimento mais baixa (menor temperatura de recristalização) em relação aos aços IF microaligados ao Nb - discussão sobre processamento e sua metalurgia foje ao objetivo do trabalho e está descrita em literatura específica (12, 13, 14). Requisitos de propriedades finais no entanto recomendam a utilização de aços IF ao Nb ou Nb+Ti.

Uma característica importante em aços para estampagem é que a chapa apresente baixos valores para o coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta r_p$ ). Na figura 8, ilustrando a influência de alguns elementos, é claro o maior efeito do Nb (15).

Quanto aos valores de  $\bar{r}$  (coeficiente de anisotropia normal) e alongamento a figura 9 compara aços ao Nb, ao Ti e Nb+Ti (16). Melhores combinações de propriedades são obtidas nos aços NbTi ou Nb. Aços ao Ti para desenvolverem propriedades equivalentes necessitam de grandes adições deste elemento (Ti fixando N + S + C), podendo afetar a qualidade de superfície da chapa devido às inclusões que são formadas.

Além de ductilidade/conformabilidade outras características importantes compreendem resistência à fadiga da junta soldada e, no caso dos aços de alta resistência, "tenacidade" (resistência à fragilização por deformação a frio). A figura 10 compara a resistência à fadiga de juntas soldadas de aço ao Ti e aço Ti+Nb (17). Nos aços ao Ti, a menor resistência à fadiga está associada a granulação grosseira na zona afetada termicamente.

Aços IF de elevada resistência mecânica são produzidos com adição de fósforo, elemento que, por outro lado, tende a segregar e fragiliza o contorno de grão. Adições de boro são comuns nesses aços para aumentar a resistência à fragilização. Boro livre segrega em contorno de grão aumentando a resistência nesta região e diminui a segregação de fósforo. Os aços ao Ti são aqueles que apresentam maior tendência à fragilização, figura 11 (18). Em adição, Ti tende a formar fosfetos diminuindo a efetividade do fósforo em aumentar resistência mecânica, figura 12 (19). Com resistência mecânica mais elevada se inclui os aços com endurecimento após pintura

(bake hardening). Neste caso são produzidos aços ao Nb ou NbTi devido a dificuldade de controle do carbono solúvel nos aços ao Ti.

É importante considerar também a crescente utilização de chapas revestidas pela indústria automobilística e, portanto, as características finais do produto após revestimento. As chapas zincadas são o material utilizado em grande escala e, visando garantir superior resistência à corrosão, está sendo acentuado o consumo de chapas zincadas por imersão em relação às obtidas por zincagem eletrolítica, figura 13 (20). Em zincagem por imersão o produto "Galvannealed" é o de grande utilização nos veículos.

Como o Ti fixa diversos elementos o contorno de grão é muito "limpo" com fácil difusão da camada FeZn (aços Galvannealed) gerando forte tendência à formação de defeitos por "powdering" figura 14 (14). Portanto, os aços IF ao Nb ou NbTi são preferidos para esta aplicação.

O acima exposto resume considerações sobre projetos de liga para os aços IF. Recentemente, a Kawasaki Steel recebeu o prêmio "Ohkouchi", considerado o prêmio Nobel da indústria japonesa, pelo desenvolvimento e produção de um aço IF ao Nb (21). A taxa de produção, na Nippon Steel, dos aços IF Nb+Ti, devido a suas atraentes combinações de propriedades é bem superior a dos aços contendo apenas Ti, figura 15 (9). Finalmente, o quadro da tabela IV resume as vantagens e desvantagens de cada tipo de projeto de liga (14).

A produção comercial desses aços continua crescendo. A figura 16 ilustra dados da Kawasaki Steel (14) do Japão, país onde a tonelagem absoluta atingiu a marca de 2 milhões de toneladas/ano/empresa siderúrgica (9). Na Europa e América do Norte a produção dos aços IF também desenvolve em ritmo acelerado. A figura 17 ilustra os dados de produção da Thyssen Stahl AG (19). Além dos grandes centros siderúrgicos, Japão, Europa e Estados Unidos, produção comercial dos aços IF já foi iniciada na Coreia do Sul e desenvolvimentos prosseguem em outras regiões incluindo o Brasil (22).

## **Conclusão**

A indústria automobilística representa hoje a maior área de aplicação para os aços microligados. Para conferir aumento de resistência mecânica e/ou superior conformabilidade vários tipos de aços, laminados a quente e laminados a frio, foram desenvolvidos durante os últimos 30 anos. A chapa de aço deve reunir outras características importantes, além de resistência mecânica e conformabilidade, que precisam ser levadas em consideração pelo engenheiro de materiais para a seleção mais adequada do tipo de aço microligado a ser empregado.

## Referências

- 1.- J.D. Grozier, "Production of Microalloyed Strip and Plate by Controlled Cooling", Proc. Microalloying 75, Union Carbide Corp.; New York, 1977, p.241.
- 2.- K. Kaup et al., "Optimisation of Hot Rolling Conditions for Improvement and Homogenisation of Material Properties", Stahl und Eisen 104 (1984); no. 20 - p.1017.
- 3.- E.G.Hamburg, "Restricted Yield Strength Variation in High Strength Low Alloy Steels", Proc. HSLA Steels Technology and Applications, ASM - Ohio, 1984, p.531.
- 4.- P.E.Repas, "Laboratory and Production Experience with Cb-Ti Steels for HSLA Hot Rolled Sheet" ibid - p.203.
- 5.- M. Sudo et al., "Niobium Bearing Ferrite-Bainite High Strength Hot Rolled Sheet Steel with Improved Formability", Transactions ISIJ, Vol. 23, 1983, p.303.
- 6.- High Strength Strip in Cars and Trucks, Niobium Information no. 2/86, CBMM, Brazil.
- 7.- N. Kurosawa et al., "Development of Nb Added Hot Rolled High Strength Steel Sheet with Superior Stretch Flangeability in Weld", trabalho no. 803, Encontro no. 122 do ISIJ, Hiroshima, 1991.
- 8.- J. A. Elias, R.F. Hook; "Interstitial Free Steels", Proc. Mechanical Working and Steel Processing IX, AIME, New York - 1970, p.348.
- 9.- H. Takechi; "Recent Developments in the Metallurgical Technology of Continuous Annealing for Cold Rolled and Surface - Coated Sheet Steels", Int. Symposium - Recent Developments in the Annealing of Sheet Steels" - TMS, Cincinnati, 1991.
- 10.- N. Kino et al.; "Production of Nb-Ti Added Ultra Low Carbon Steel for Galvannealed Application"; Proc. Metallurgy of Vacuum Degassed Steel Products - TMS, Warrendale, 1990, p.197.
- 11.- Extra Low Interstitial, Micro-Alloy Steel Sheet, Niobium Information no. 3/87, CBMM, Brazil.
- 12.- Proc. Interstitial Free Steel Sheet: Processing, Fabrication and Properties, CIM, Ottawa - 1991.
- 13.- Proc. Metallurgy of Vacuum Degassed Steel Products - TMS, Warrendale 1990.
- 14.- Round Table Discussion, Metallurgy and Application of Modern IF Grades, VDEh, Duesseldorf - 1990.
- 15.- S. Satoh et al., "Characteristics of Ultra Deep Drawable and Bake Hardenable High Strength Steel Sheet" - Congresso da International Association for Vehicle Design, Genova, 1984.
- 16.- H. Takechi, "Development and Production of Interstitial Free Steel", ibid 14.
- 17.- S. Okada et al., "Development of Cold Rolled Extra Low-C Sheet Steels with High Fatigue Strength at Spot-Welded Joint", ibid 12, p.205.
- 18.- Y. Tokunaga e H. Kato, "Application of Interstitial Free (IF) Steel Sheets to Automobile Part", ibid 13, p.91.
- 19.- W. Bleck, "Development of Cold Rolled Microalloyed Steels at Thyssen Stahl AG", Thyssen Stahl AG Publication, 1991.
- 20.- T. Adaniya, "Trend of Corrosion - Resistant Steels for Automobile Use in Japan", NKK Technical Review no. 63 (1991).
- 21.- Kawasaki Steel Bulletin, vol. 14, no. 3 - 1992.
- 22.- M.C.Prado et al.; "Desenvolvimento de Aços - Interstitial Free (IF) - pela Usiminas", Seminário COLAM-ABM, B. Horizonte, 1991.
- 23.- K. Tahara et al., "Development of Ultra Formable Cold Rolled Sheet Steel" - Encontro do ISIJ no. 122, Hiroshima, 1991.

**Tabela I**

**AÇOS MICROLIGADOS TRADICIONAIS LAMINADOS A QUENTE**

LIMITE ESCOAMENTO Mínimo (MPa)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)		
	C	Mn	Nb
350	0.06	0.40	0.03
380	0.06	0.60	0.03
420	0.06	0.60	0.05
460	0.08	1.10	0.05
550 (*)	0.08	1.25	0.10

(\*) Dependendo da espessura, adições de vanádio são feitas

**Tabela II**

**AÇOS BAINITICOS DE ELEVADA RESISTENCIA MECANICA**

LIMITE ESCOAMENTO Mínimo (MPa)	PRODUÇÃO - USINA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
		C	Si	Mn	Ti	Nb	B	Mo
690	1985-A	0.08	0.25	1.30	0.18	0.05	0.003	-
750	1985-A	0.08	0.25	1.75	0.24	0.05	0.003	0.15
690	1987-B	0.10	0.25	1.95	0.19	0.05	-	-
690	1990-C	0.04	0.25	1.80	0.03	0.06	0.002	0.30

**Tabela III**

**EXEMPLOS DE AÇOS IF**

AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Ti	Nb	Al	B
Super EEP (1)	0,0014	0,17	0,003	0,003	0,02	0,05	0,014	0,05	-
EEP (2)	0,0018	0,09	0,003	NI	0,004	0,008	0,01	0,02	-
EEP - BH	0,0025	0,15	0,01	0,01	NI	-	0,015	0,04	-
Rm 350 BH	0,0025	0,2	0,07	0,01	NI	-	0,015	0,04	-
Rm 400 (2)	0,0032	0,18	0,08	NI	0,25	0,01	0,018	0,04	0,0003

AÇO	PROPRIEDADES MECÂNICAS							
	Rp (MPa)	Rm (MPa)	Al (%)	n	$\bar{\sigma}$	$\sigma_{0.2}$	BH (MPa)	TT (°C)
Super EEP (1)	140	262	54	0,27	2,89	0,44	-	-90
EEP (2)	150	300	51	0,25	2,15	NI	-	NI
EEP - BH	170	290	51	NI	2,3	NI	44	NI
Rm 350 BH	200	360	43	NI	2,2	NI	49	NI
Rm 400 (2)	240	420	39	0,24	1,95	NI	-	-55

(1) Ref. 23  
(2) \* Galvannealed\*

TABELA IV - COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES AÇOS IF

AÇO	AI VALOR - $\bar{T}$	ANISOTROPIA PLANAR	"BH"	QUALIDADE DE DECAPAGEM DE SUPERFÍCIE DA TIRA CHAPA SA. A QUENTE	RESIST. FADIGA SOLDA	
Ti	⊙	△	×	×	○	△
Ti - Nb (Ti > Nb)	⊙	○	×	△	○	○
Ti - Nb (Ti < Nb)	○	○	○	○	△	○
Nb	○	○	⊙	⊙	△	○

←                      →  
 EXCELENTE                      RUIM

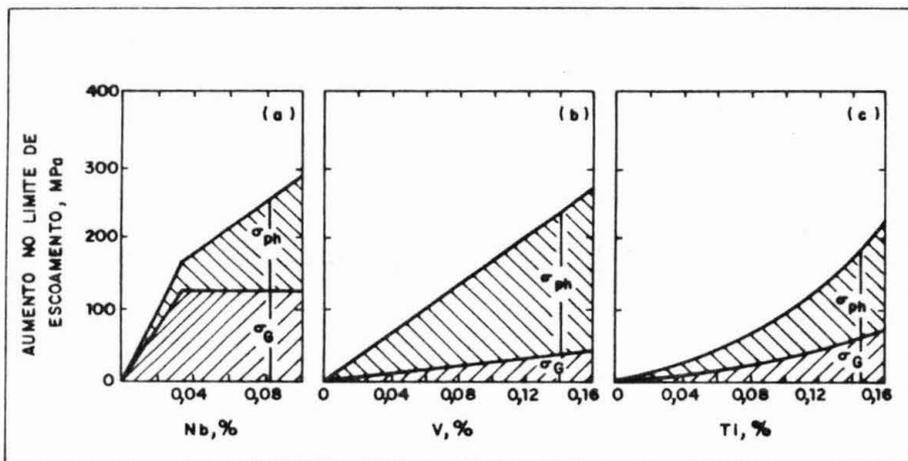


FIG. 1 - RELAÇÃO ENTRE TEOR DE LIGA E AUMENTO NO LIMITE DE ESCOAMENTO POR REFINO DE GRÃO ( $\Delta\sigma_g$ ) E ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO ( $\Delta\sigma_{ph}$ )

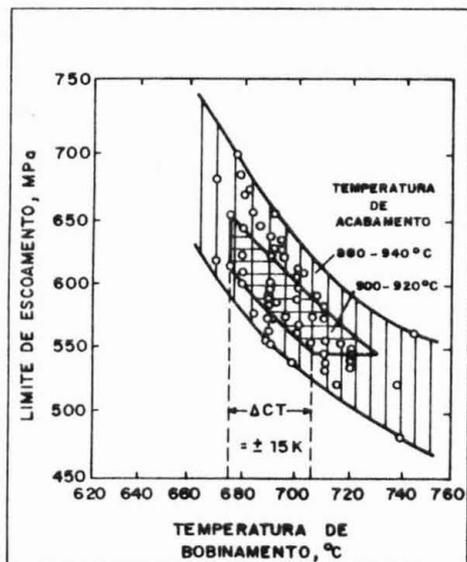


FIG. 2 - EFEITO DA TEMPERATURA DE BOBINAMENTO NO LIMITE DE ESCOAMENTO DE BOBINA A QUENTE DE AÇO AO TI, ESPESSURA 4-6 mm

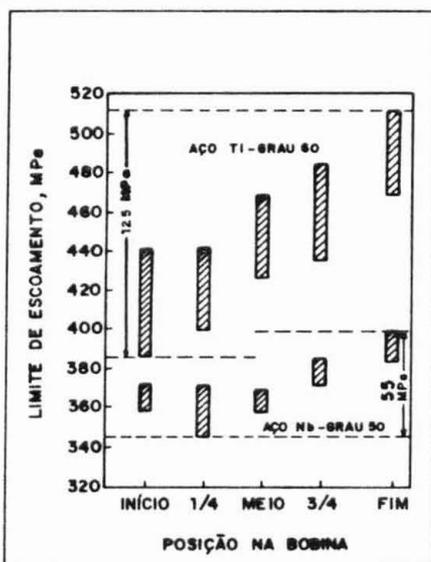


FIG. 3 - VARIAÇÃO NO LIMITE DE ESCOAMENTO DE 6 BOBINAS A QUENTE DE AÇO AO TI E 6 BOBINAS DE AÇO AO Nb

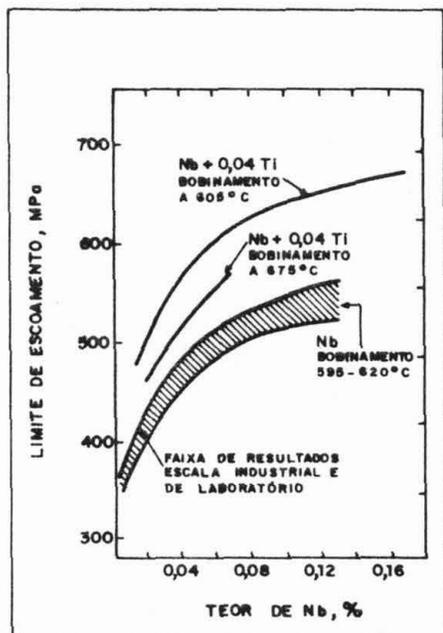


FIG. 4 - EFEITO DO Nb E Nb+Ti EM PRODUTO DE TIRAS A QUENTE

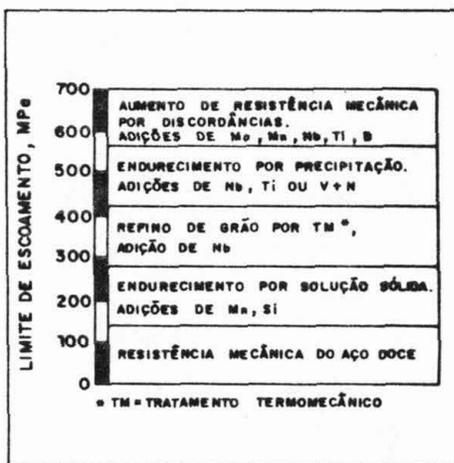


FIG. 5 - CONTRIBUIÇÃO DE VÁRIOS MECANISMOS DE AUMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA ATINGIR 700 MPa DE LIMITE DE ESCOAMENTO EM PRODUTO DE TIRAS A QUENTE

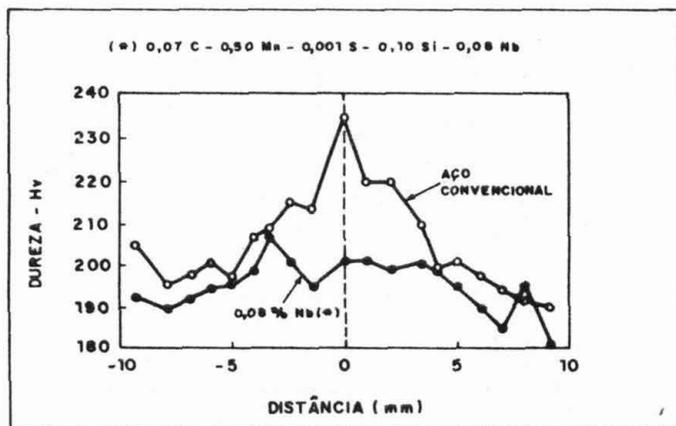


FIG. 6 - DISTRIBUIÇÃO DE DUREZA EM SOLDA ELÉTRICA (DC) DE TOPO

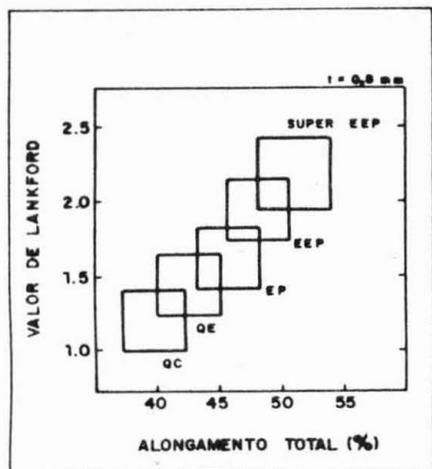


FIG. 7 - AÇOS DE SUPERIOR CONFORMABILIDADE

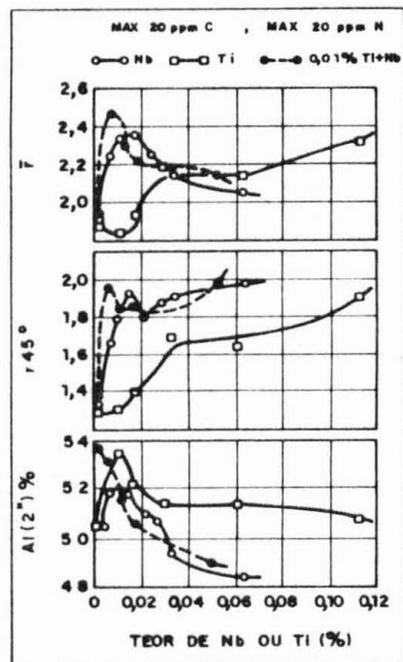


FIG. 9 - EFEITOS DO Nb, Ti e Ti + Nb NA CONFORMABILIDADE DE AÇO EXTRA BAIXO CARBONO

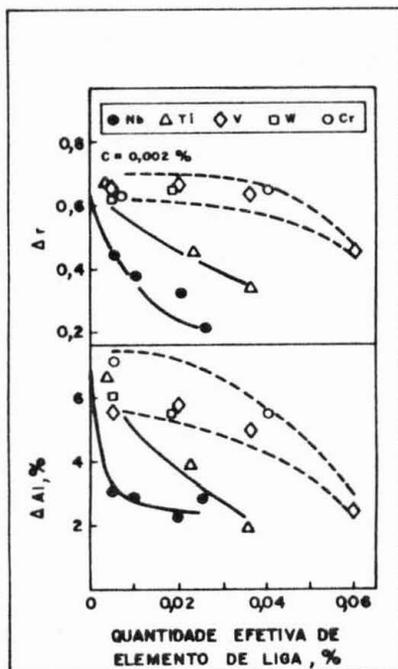


FIG. 8 - INFLUÊNCIA DE ALGUNS ELEMENTOS NOS VALORES DE  $\Delta r$  E  $\Delta Al, \%$

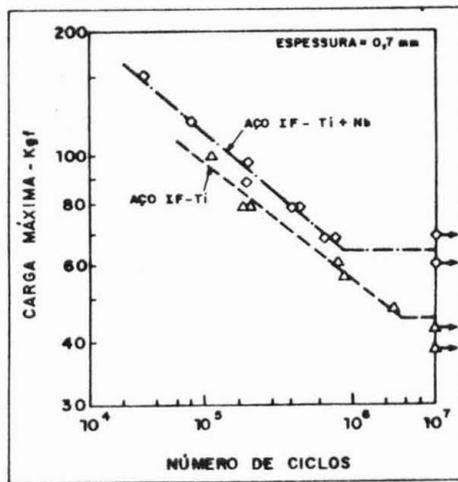


FIG. 10 - RESISTÊNCIA À FADIGA EM SOLDA POR PONTO DE AÇO IF-Ti E AÇO IF-Ti+Nb

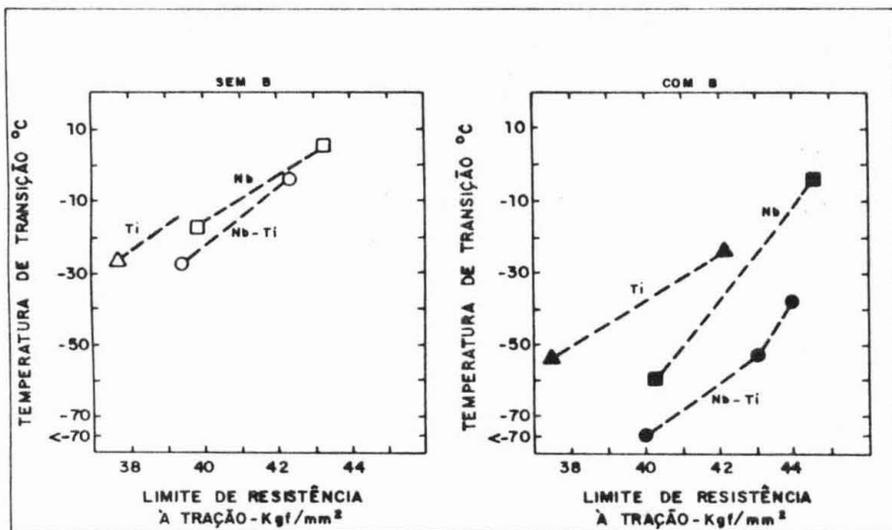


FIG. 11 - TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AÇOS IF Ti, Nb E Nb-Ti COM E SEM ADIÇÃO DE B

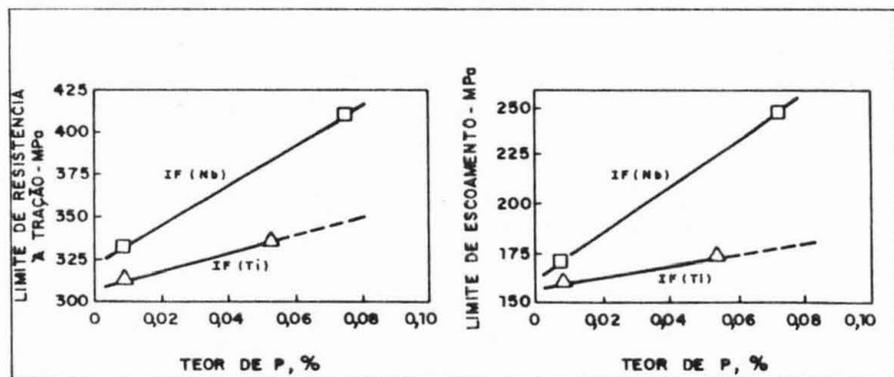


FIG. 12 - EFEITO DO FÓSFORO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE AÇOS IF

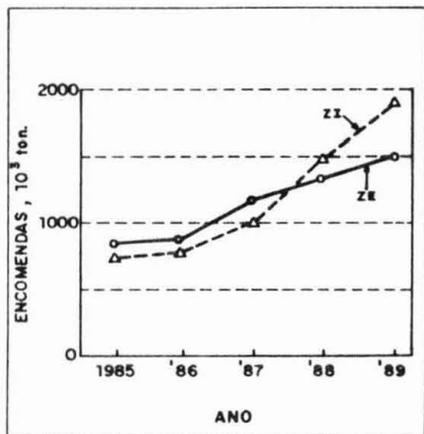


FIG. 13 - MUDANÇA NA QUANTIDADE DE CHAPA DE ZINCAGEM POR IMERSÃO (ZI) E DE ZINCAGEM ELETROLÍTICA (ZE) SOLICITADA PELA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA (JAPÃO)

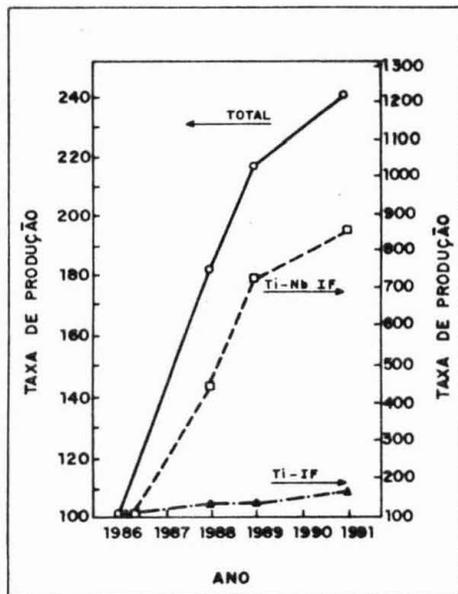


FIG. 15 - TAXA DE PRODUÇÃO DE AÇO IF NA NIPPON STEEL CORP.

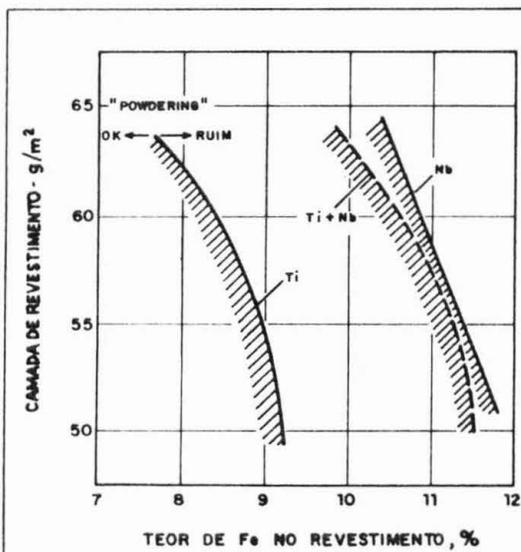
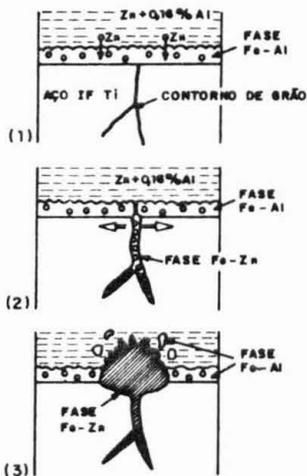


FIG. 14 - TENDÊNCIA AO DEFEITO POR "POWDERING" DOS AÇOS IF Ti; Nb E Nb Ti - "GALVANNEALED"



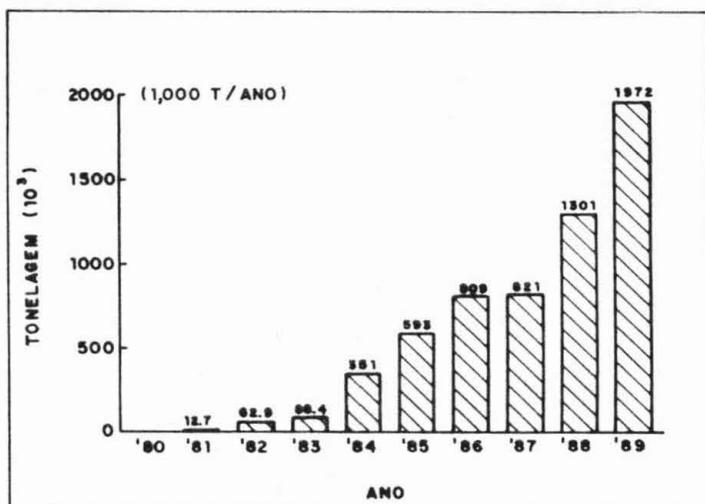


FIG. 16 - DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO DE AÇOS IF PELA KAWASAKI STEEL CORP.

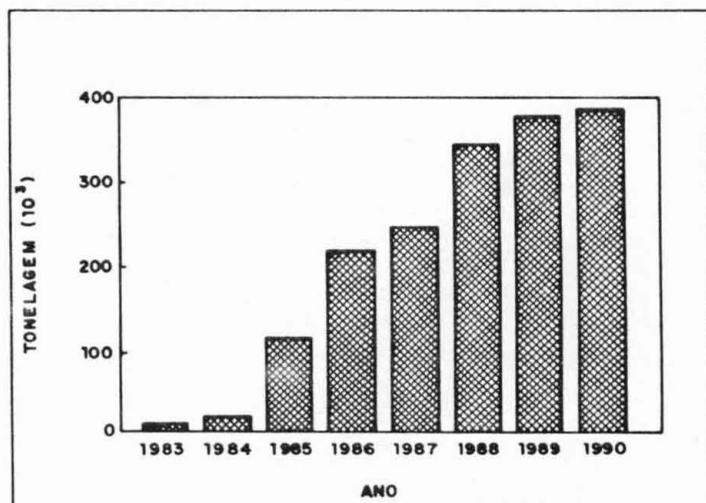


FIG. 17 - DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO DE AÇOS IF NA THYSSEN STAHL AG,

