
Solidificação de aços inoxidáveis

AUSTENITICOS

x

Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos é relativamente boa!!!!!!!!!!!!!!

A ausência de transformação martensítica e sua boa tenacidade implicam na sua insensibilidade à fissuração pelo hidrogênio.

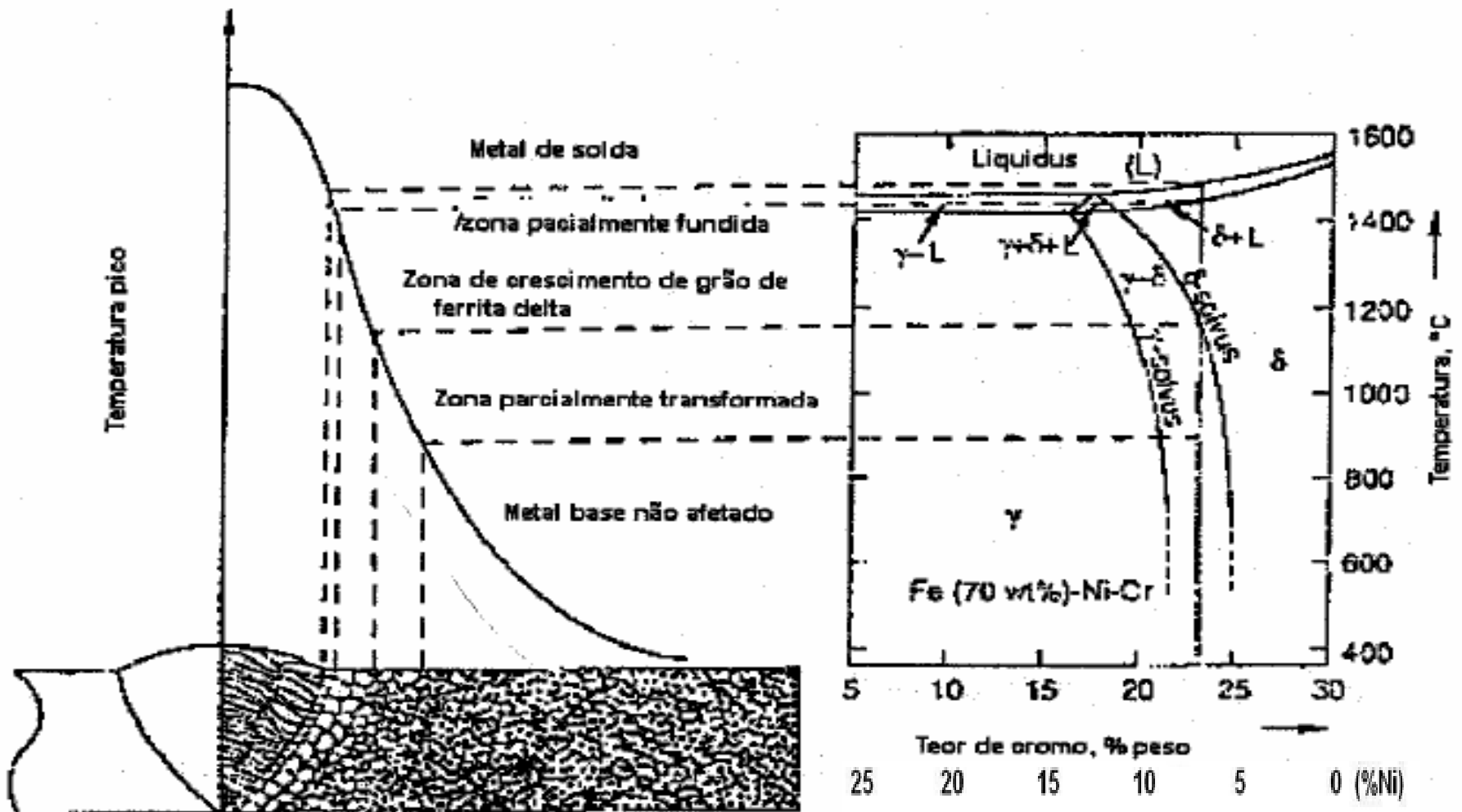
Durante a soldagem pode ocorrer trinca a quente na ZF, liquação na ZTA.

A sensibilidade à formação de porosidades também é baixa e a ZF tem propriedades que se assemelham à do metal de base.

Assim, geralmente fácil se obter soldas adequadas sem pré-aquecimento e que podem ser postas em serviço sem TTPS.

Entretanto, este resultado somente pode ser obtido pela escolha adequada do processo de soldagem e do metal de adição, o que deve ser feito de acordo com os princípios da metalurgia do material, da metalurgia da soldagem destes aços, de sua soldabilidade, dos procedimentos de soldagem realizados e das condições de serviço.

Existe um grande número de tipos de aços inoxidáveis austeníticos, mas as ligas utilizadas são aquelas contendo cerca de 18% de Cr e 10% de Ni. Por isto, a discussão sobre a estrutura destas ligas pode se iniciar pelo diagrama pseudo-binário.



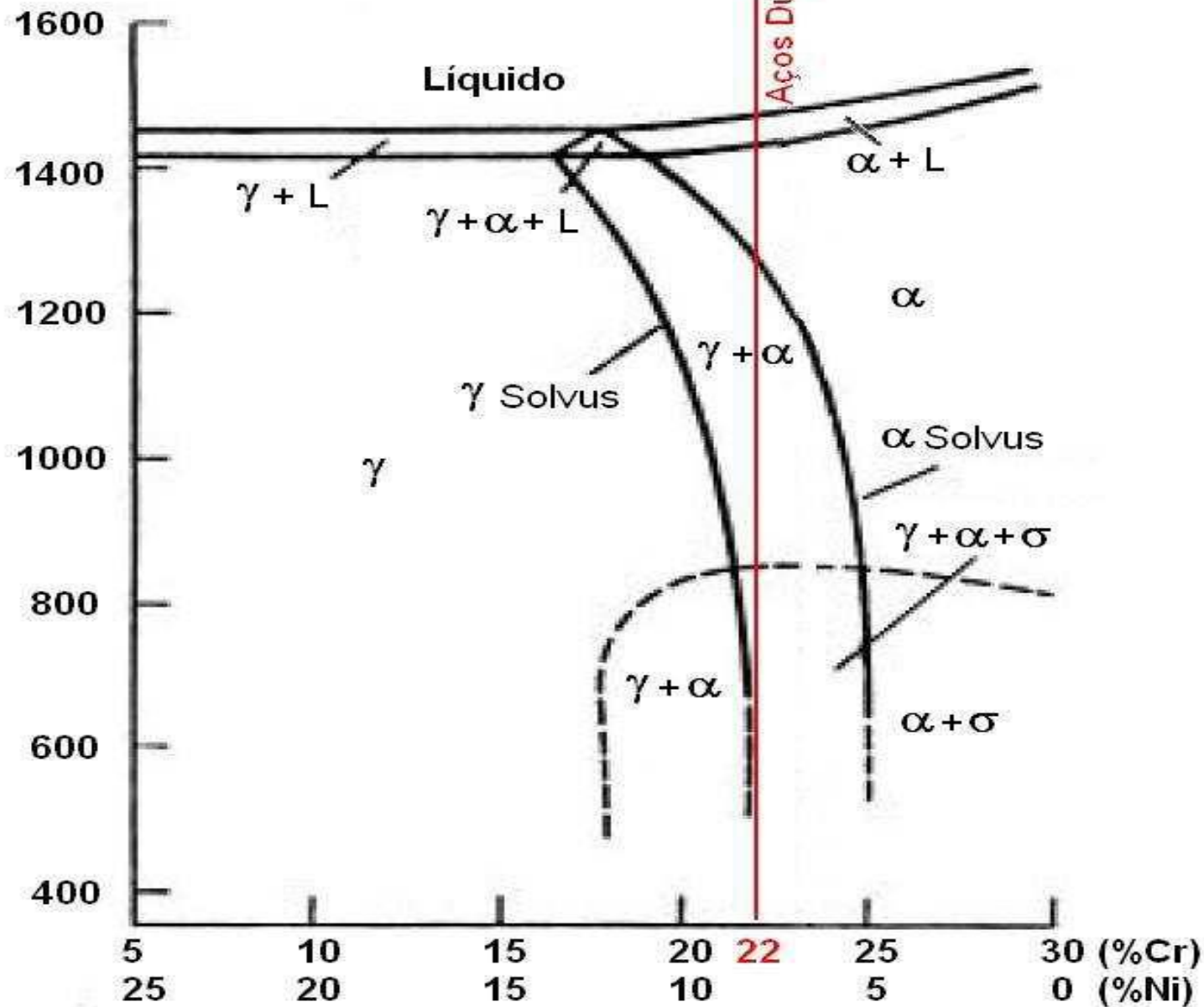
Segundo este diagrama, para teores de Ni inferiores a 1-1,5%, o material se comportaria como um aço completamente ferrítico durante o resfriamento a partir de altas temperaturas.

Acima deste teor, existe uma faixa de temperaturas em que a liga é bifásica (austenita mais ferrita delta), que se amplia com o aumento do teor de Ni.

Finalmente, cerca de 3,5% de Ni, existe um intervalo de temperaturas em que a liga é completamente austenítica, e que se amplia com maiores teores de Ni. Com o aumento na quantidade deste elemento, a temperatura M_s é diminuída, mas até cerca de 7 a 8% de Ni esta temperatura permanece acima da ambiente e o aço é, portanto, do tipo austenítico.

Assim, os aços inoxidáveis austeníticos são, em geral, ligas contendo 18%Cr e teores de Ni superiores a 8%.

Temperatura (°C)



Alterações na quantidade de Cr têm um efeito similar ao já discutido para os outros tipos de aços inoxidáveis.

Um aumento na quantidade deste elemento amplia a faixa de existência da ferrita delta e, conseqüentemente, torna necessário um aumento no teor de Ni para obtenção de uma estrutura austenítica à temperatura ambiente.

Entretanto, um aumento na quantidade de Cr aumenta a estabilidade da austenita em relação ao resfriamento e à deformação plástica, pois causa uma diminuição na temperatura M_s .

Assim, em diversos aços inoxidáveis austeníticos, a austenita existe à temperatura ambiente como uma fase metaestável.

Em particular, em aços do tipo 17%Cr e 7%Ni, a austenita pode se transformar em martensita por deformação a temperatura ambiente ou por tratamento a baixa temperatura.

Estrutura da zona fundida

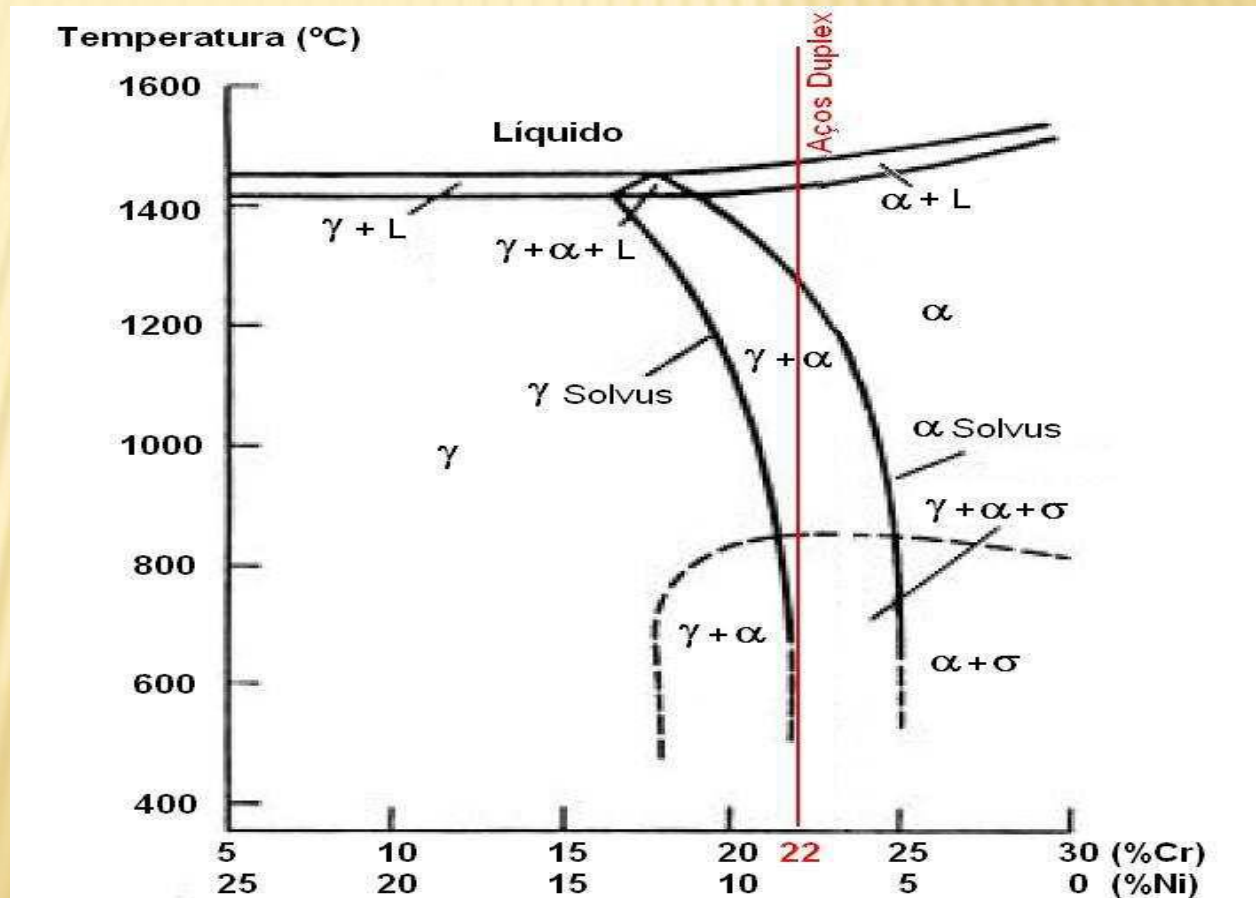
A micro estrutura da solda (ZF) dos aços da série 300 difere da micro-estrutura do metal de base.

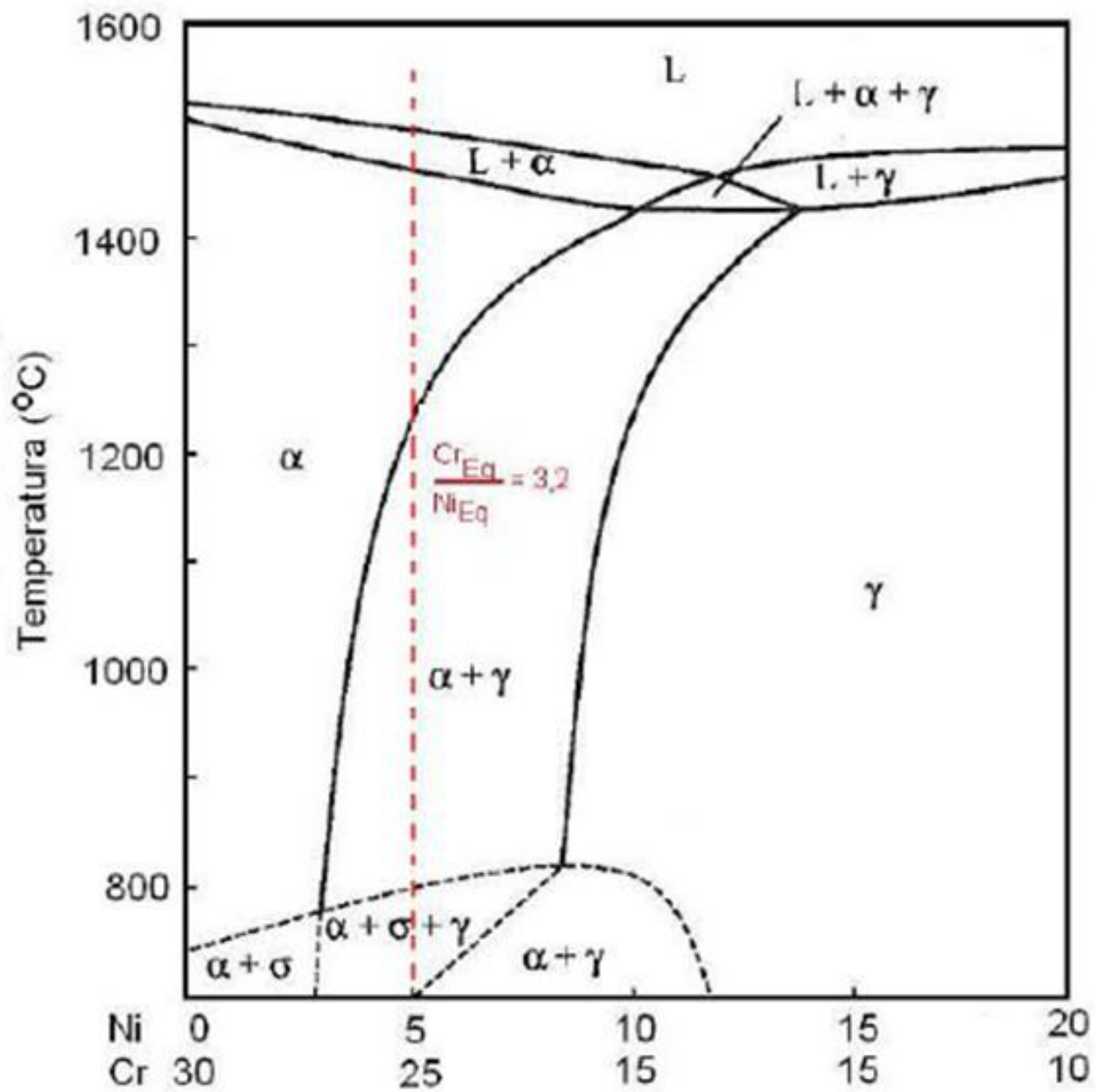
Esta, no caso de um material trabalhado e solubilizado, é, em geral, constituída inteiramente de austenita, enquanto que soldas podem reter quantidades variáveis de ferrita à temperatura ambiente.

Esta estrutura pode ser analisada com o auxílio do diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni para 70% de ferro.

Segundo o diagrama, um líquido pode se solidificar inteiramente como austenita ou inicialmente como **austenita e posteriormente como ferrita** ou inicialmente como **ferrita e depois como austenita** ou ainda inteiramente como ferrita, à medida que a relação Cr/Ni aumenta. Posteriormente, durante o resfriamento parte da ferrita formada durante a solidificação pode se transformar em austenita.

Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%

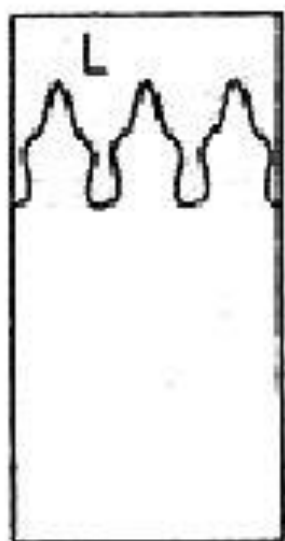




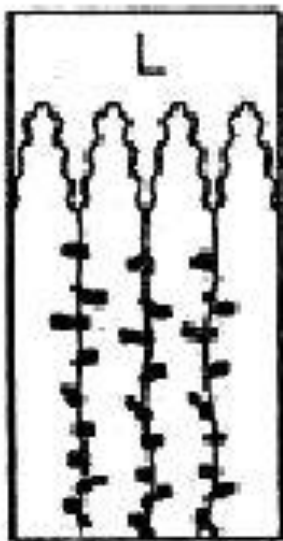
- ✘ **A transformação da ferrita delta em austenita é completa somente se o aço permanecer por um tempo suficientemente longo na faixa de temperaturas na qual a cinética é mais rápida.**
- ✘ **Este não é geralmente o caso de soldas, onde o resfriamento rápido causa a retenção de alguma ferrita até a temperatura ambiente.**

A morfologia e quantidade de ferrita delta irá depender da composição química (Cr/Ni) e da velocidade de resfriamento.

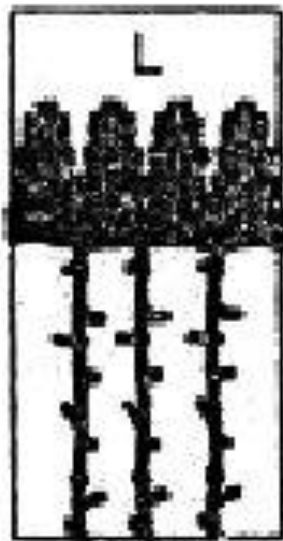
- ✘ Quanto maior esta velocidade, menor deve ser a extensão desta transformação.
- ✘ A seguinte figura mostra algumas morfologias possíveis da ferrita delta em função da relação Cr/Ni.



Austenita



Ferrita Eutetica



Ferrita em Espinha

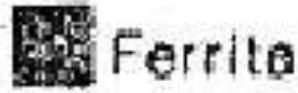


Ferrita Laminar



Austenita de Widmanstätten

—→
Aumento da relação Cr/Ni



Exemplos de morfologias da ferrita delta na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos.

Soldagem dos aços austeníticos

Modos de solidificação

Cr_{Eq}/Ni_{Eq}

A - 1,2

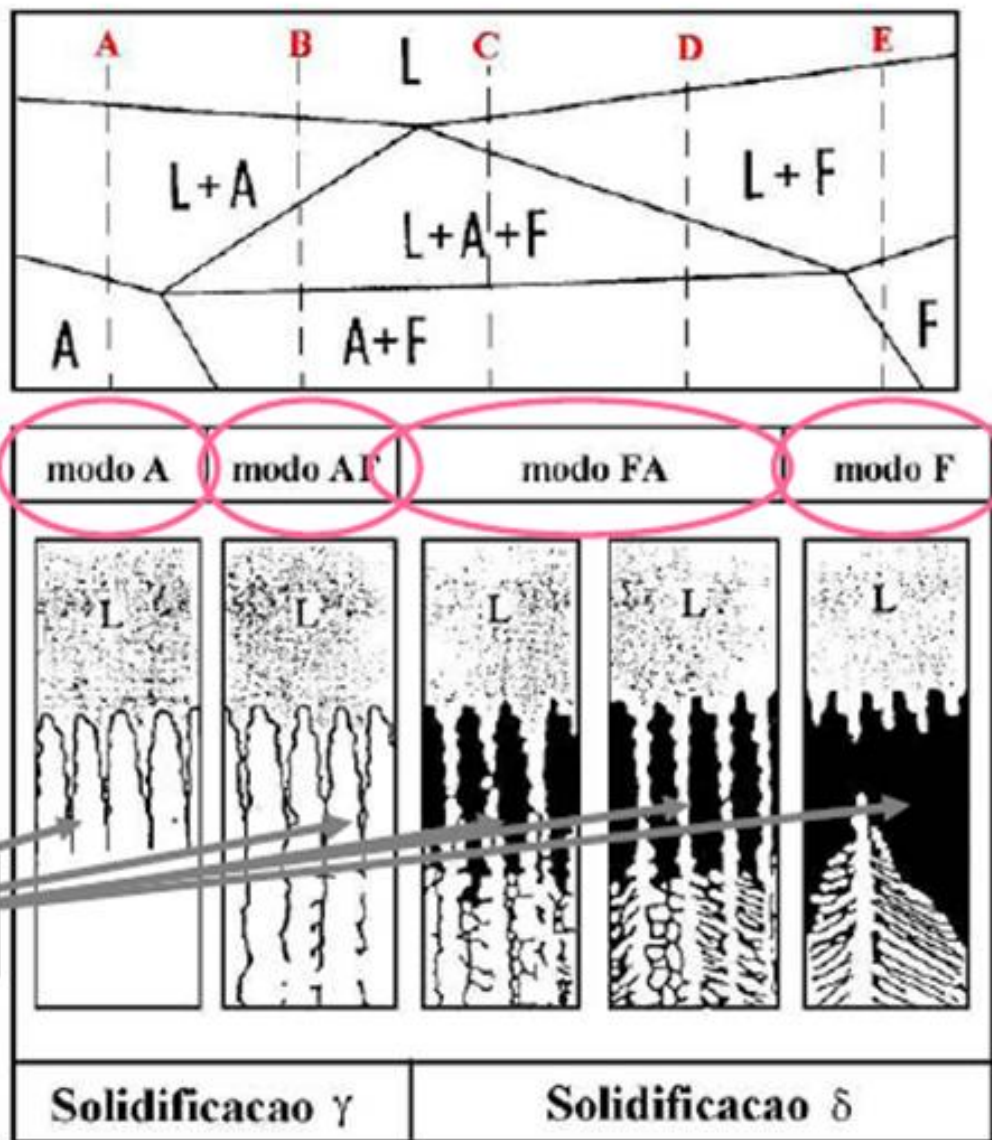
B - 1,3

C - 1,4

D - 1,6

E - 2,2

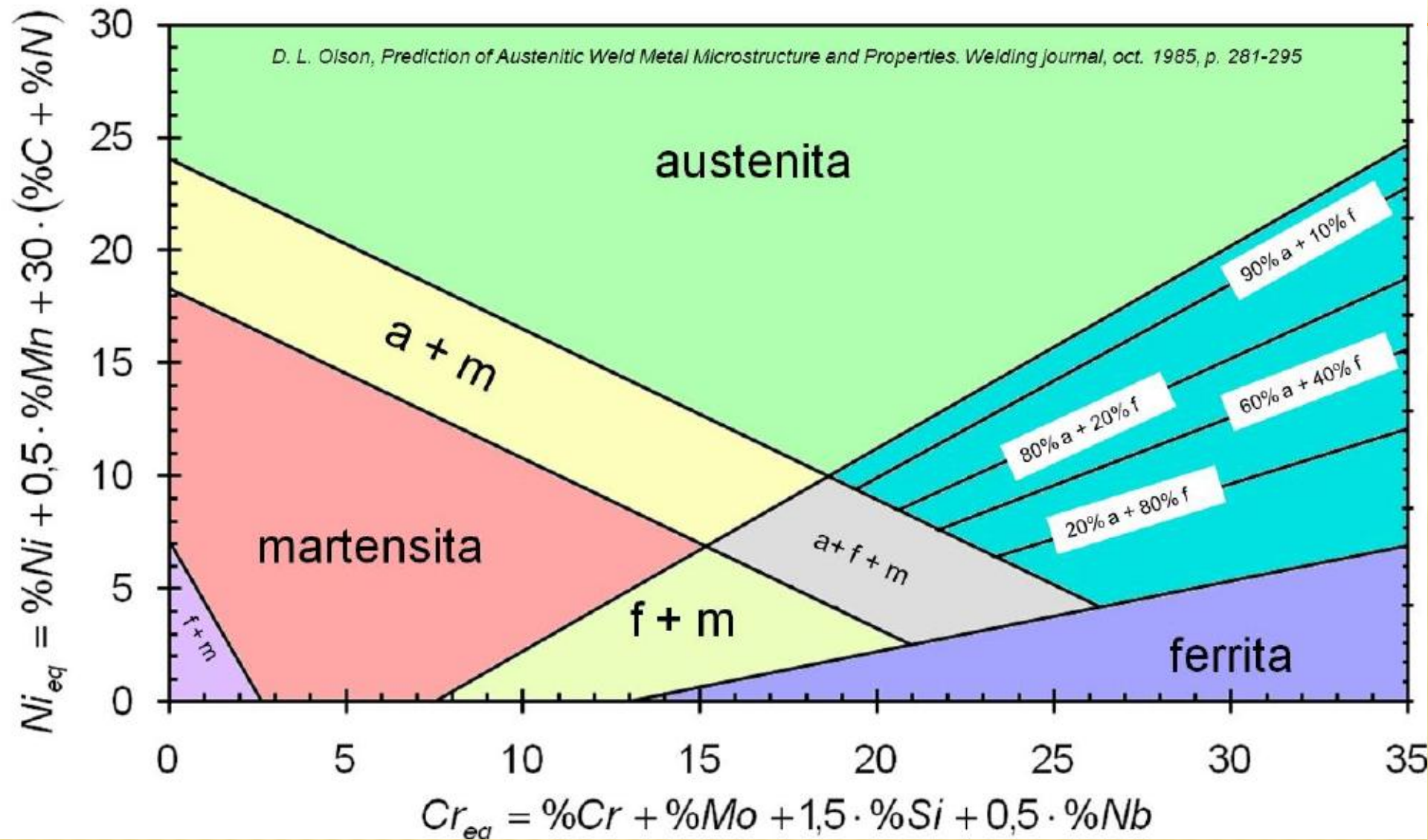
Aumento
da relação
Cr/Ni



Ferrita + austenita de
Widmanstätten

- ✘ **Algumas características das soldas (ZF) dos aços inoxidáveis austeníticos resultam desta estrutura.**
- ✘ **Ela é predominante austenítica, onde a ferrita delta é considerada, em geral, um constituinte desejável na zona fundida devido ao seu efeito favorável na resistência à fissuração na solidificação.**
- ✘ Por outro lado, a sua quantidade deve ser controlada em aplicações em que a junta deva apresentar uma boa resistência à corrosão, em que seja necessária uma alta tenacidade da solda a baixas temperaturas e, finalmente, em que a peça deva ser completamente não magnética (a ferrita delta é uma fase ferromagnética).
- ✘ **Em aços comerciais, a estrutura da solda não depende somente da velocidade de resfriamento e da relação do Cr/Ni, pois outros elementos, que afetam a estabilidade das fases, podem estar presentes.**

- ✘ Entretanto, de uma forma geral, estes elementos podem ser divididos em formadores de ferrita (Cr, Mo, Si, Nb e Al) e em formadores de austenita (Ni, C, N e Mn).
- ✘ O efeito relativo destes elementos para a estabilização de uma fase ou outra pode ser expresso em termos de expressões equivalentes de C_{req} ou N_{req} e a sua influência combinada pode ser resumida em diagramas constitucionais.
- ✘ *Destes, o mais conhecido e utilizado até hoje, é o levantado por Schaeffler na década de 40.*



.....Solidificação de aços inoxidáveis.....

- **O metal de solda dos aços inoxidáveis austeníticos geralmente tem estrutura dúplex de austenita e ferrita delta.**
- **Tem sido demonstrado que um conteúdo de 4% de ferrita delta pode prever a fissuração a quente, sendo que ainda com 5% de ferrita delta o metal de solda pode apresentar fissuração a quente.**

A literatura especializada mostra que ainda não esta totalmente resolvido o problema da fissuração a quente, alem de que a quantidade de ferrita delta não é o único parâmetro que deve de ser controlado.

- ✘ **Schaeffler** permite a predição da micro-estrutura da zona fundida quando a sua composição química é conhecida e não é restrito aos aços inoxidáveis austeníticos, podendo ser usado também para aços ferríticos e martensíticos.

Baseado neste diagrama, Seférian propôs a fórmula abaixo para a previsão da quantidade ferrita delta na zona fundida de uma solda cuja composição caísse na região de coexistência da ferrita e austenita:

$$\% \delta = 3 (\text{Cr}_{\text{eq}} - 0,93 \text{Ni}_{\text{eq}} - 6,7)$$

- ✘ Deve-se observar que os diagramas de Schaeffler ou de DeLong não levam em consideração a velocidade de resfriamento ➡.
- ✘ Assim, estes diagramas fornecem apenas o valor estimado da quantidade de ferrita na solda.
- ✘ *Entretanto, na soldagem com eletrodos revestidos, as diferenças devido à velocidade de resfriamento podem ser ignoradas para a maioria das soldas.*
- ✘ **A quantidade de ferrita delta presente na ZF à temperatura ambiente pode também ser medida diretamente em amostras metalográficas ou, indiretamente, por difração de raios X ou pela medida de propriedades magnéticas da solda.**
- ✘ Procedimentos baseados nesta última técnica são, em geral, os mais aceitos; o *Ferrite Number* mostrado no diagrama de DeLong é obtido por um método magnético.

Diagrama de Schaeffler

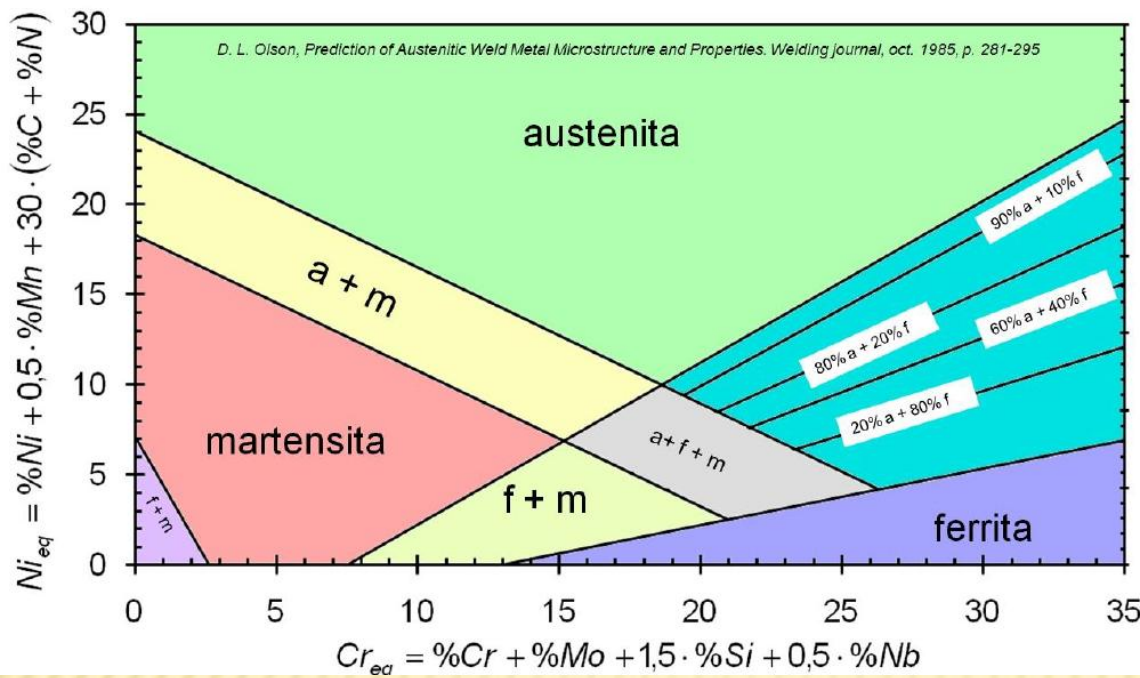
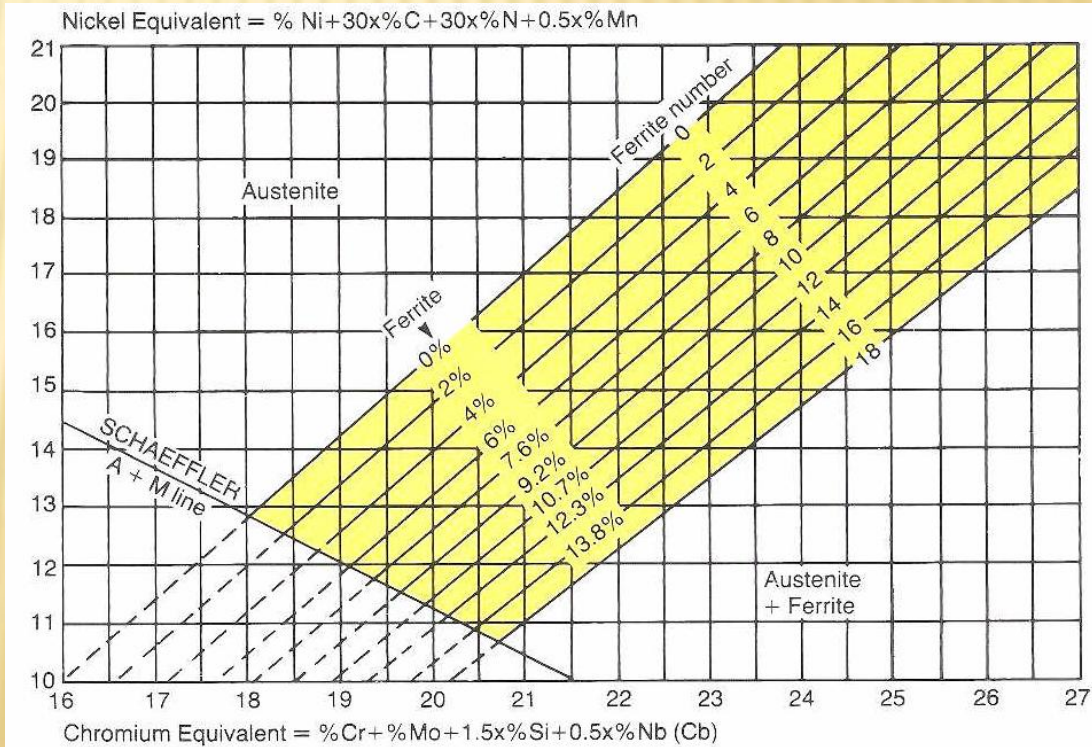
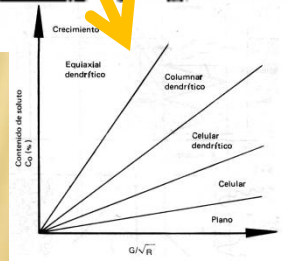
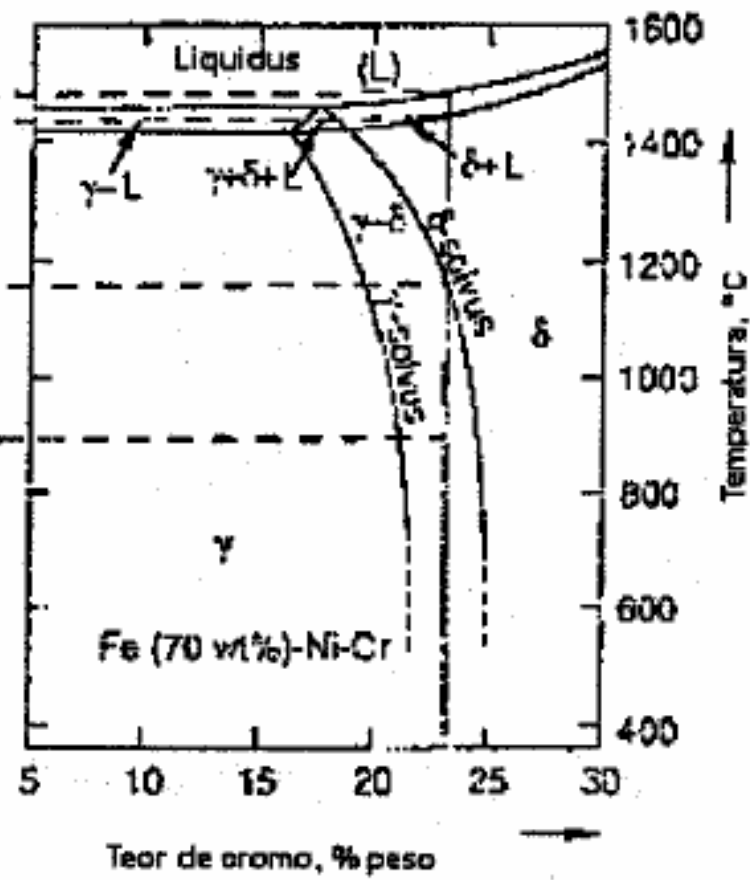
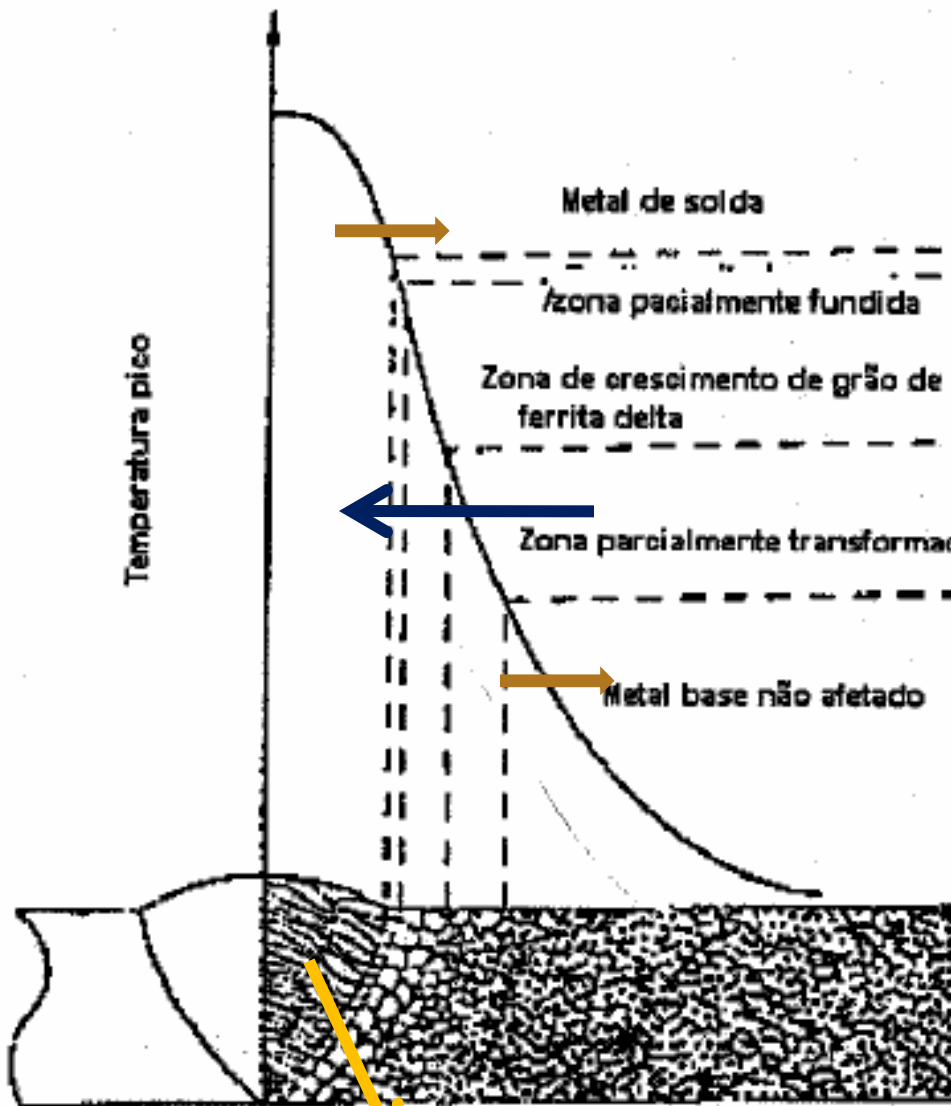
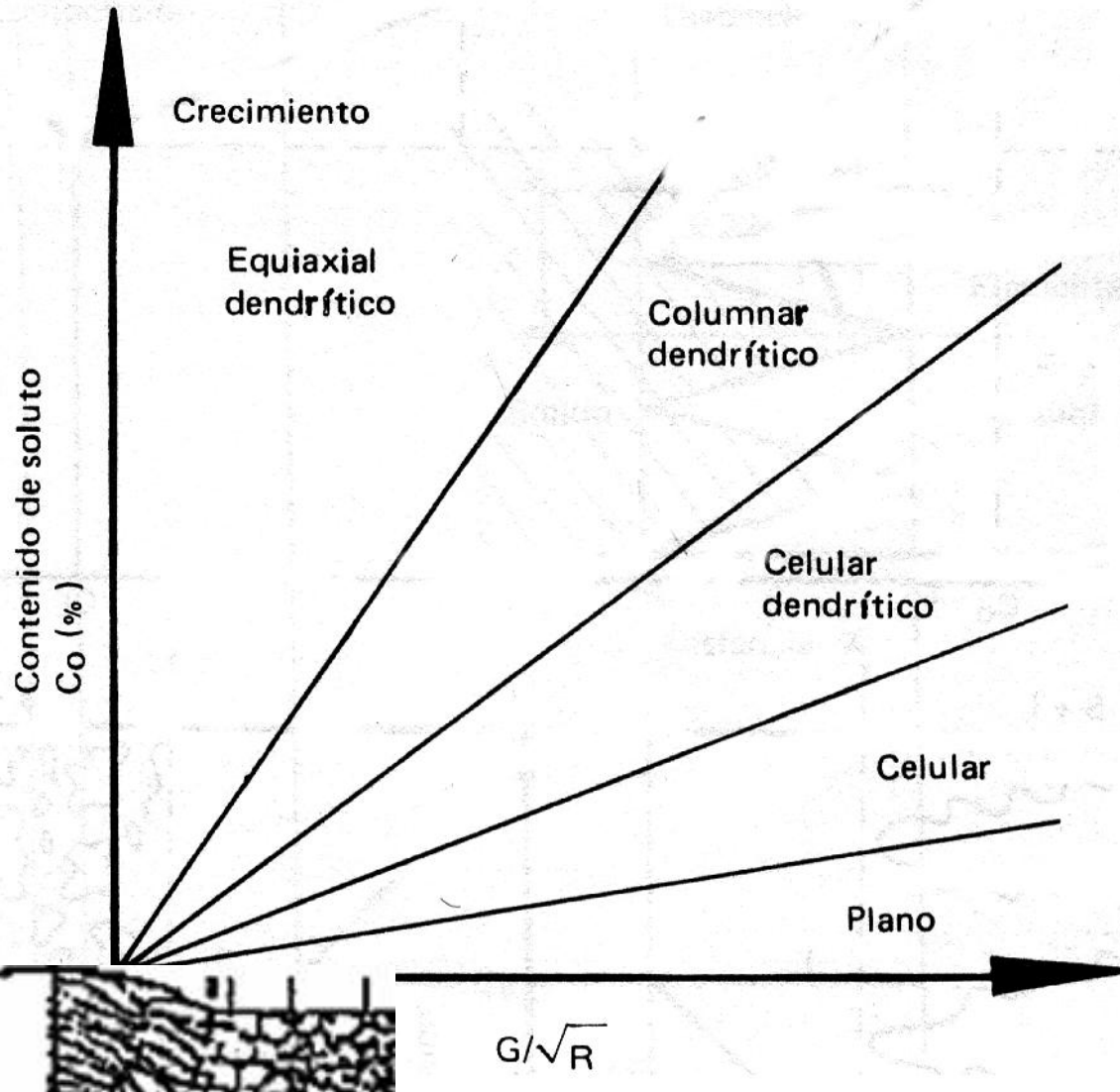


Diagrama de DeLong

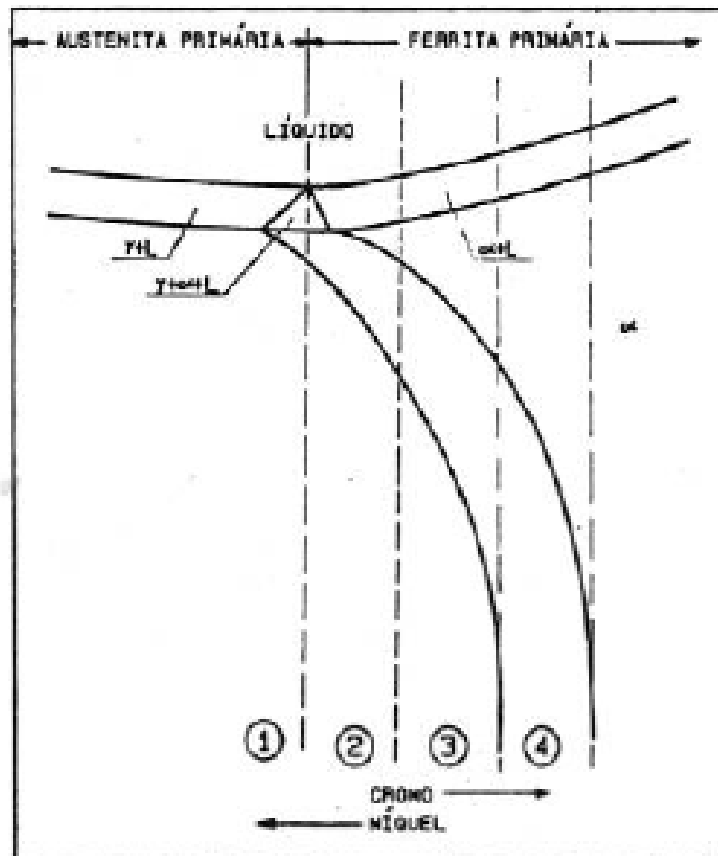






Soldagem dos aços austeníticos

Diagrama Pseudo Binário Fe-Cr-Ni

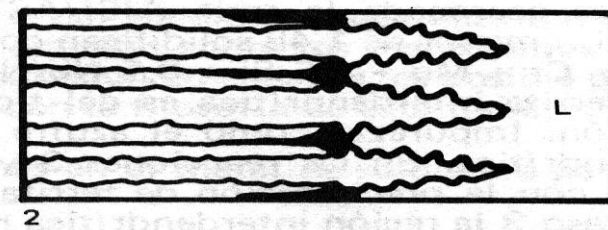
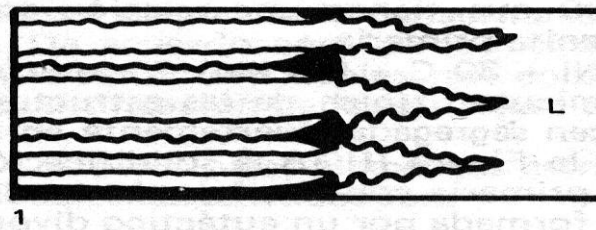


- 1 - Austenita + Ferrita Eutética
- 2 - Ferrita Vermicular + Austenita
- 3 - Ferrita Acicular + Austenita
- 4 - Austenita de Widmanstatten + Ferrita

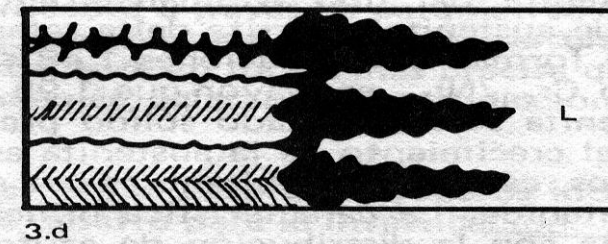
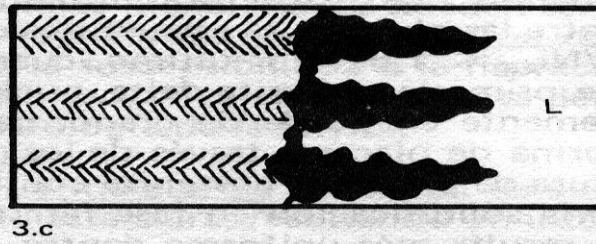
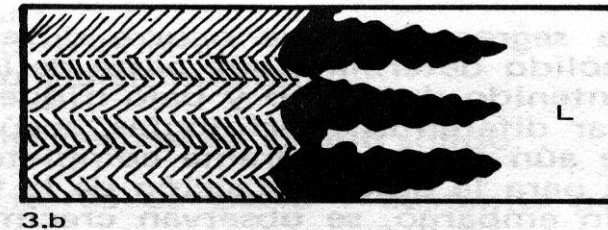
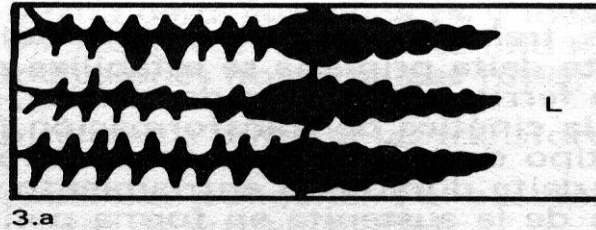
- × **Em aços austeníticos Cr-Ni contendo ferrita, e exposto a temperaturas entre cerca de 600°C e 350°C por um período de tempo pode resultar na transformação parcial da ferrita em fase sigma.**
- × Esta transformação pode causar uma pequena fragilização em aços tipo 18%Cr-10%Ni contendo até 10% de ferrita.
- × *Entretanto, aços deste tipo com maior quantidade de ferrita ou aços com maior teor de cromo (por exemplo, do tipo 25%Cr-20%Ni) podem sofrer uma substancial perda de ductilidade e perda de resistência à corrosão.*

Esquemas de estruturas de solidificação de aços inoxidáveis

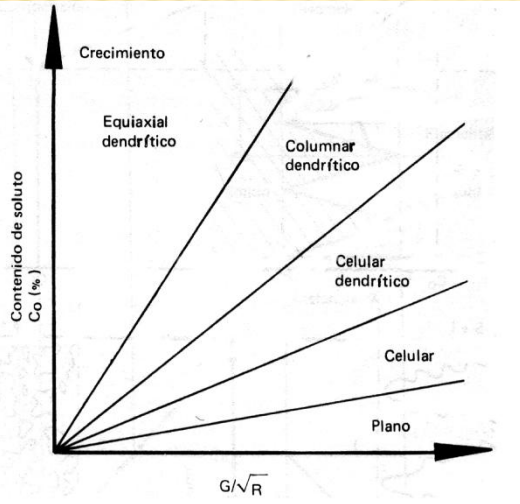
Esquemas de estruturas de solidificação de aços inoxidáveis



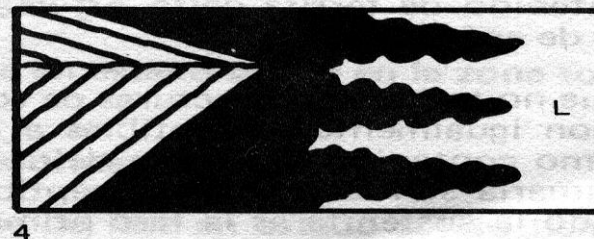
Nos casos 1 e 2 a primeira fase em precipitar é austenita, onde observa-se que seu crescimento é em forma dendrítica.



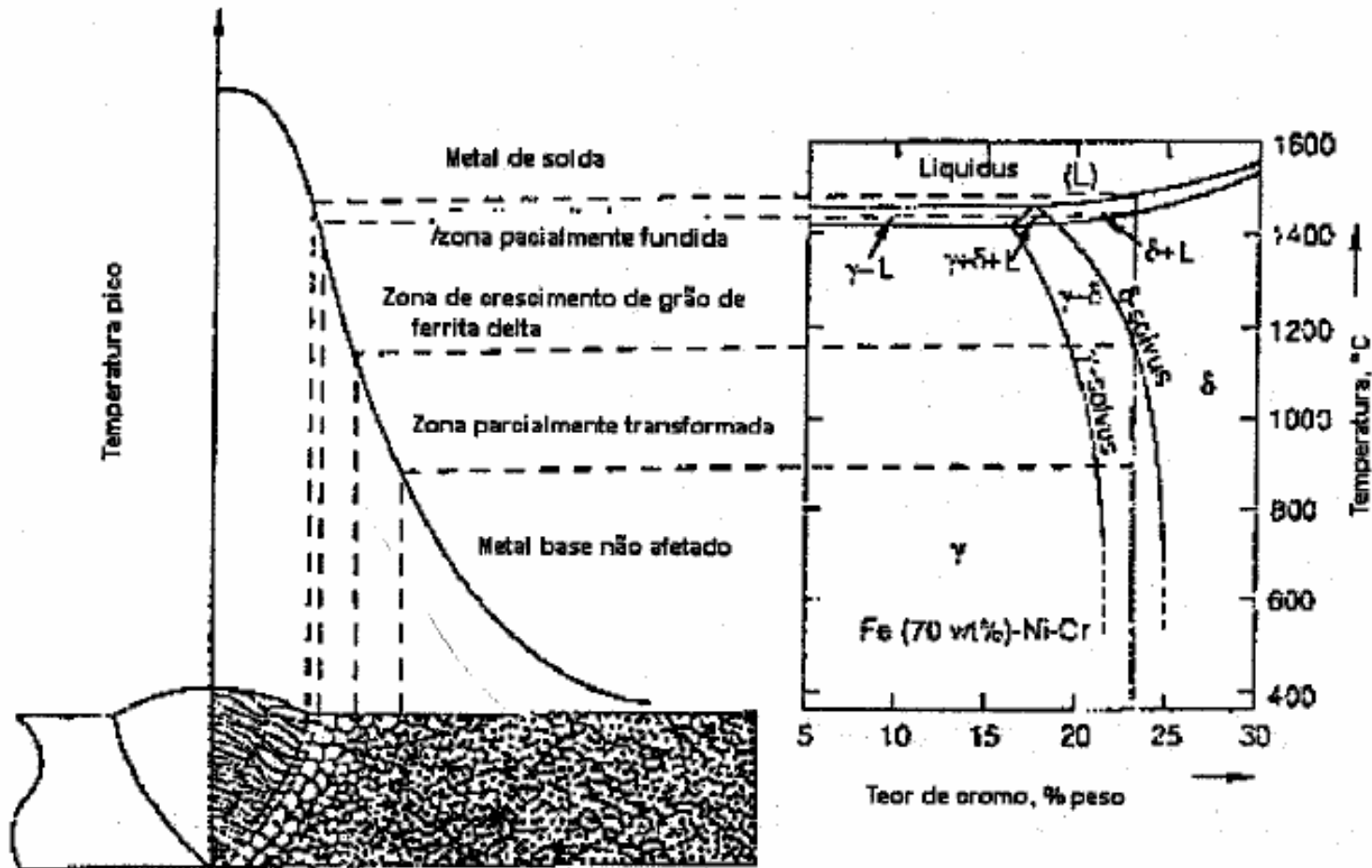
Nas estruturas de solidificação 3 e 4 da figura a solidificação começa com a precipitação da ferrita delta primária com morfologia dendrítica.



- 1.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma s + \delta$
- 2.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma s$
- 3.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \delta + \gamma s + \gamma$
- 4.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma s$

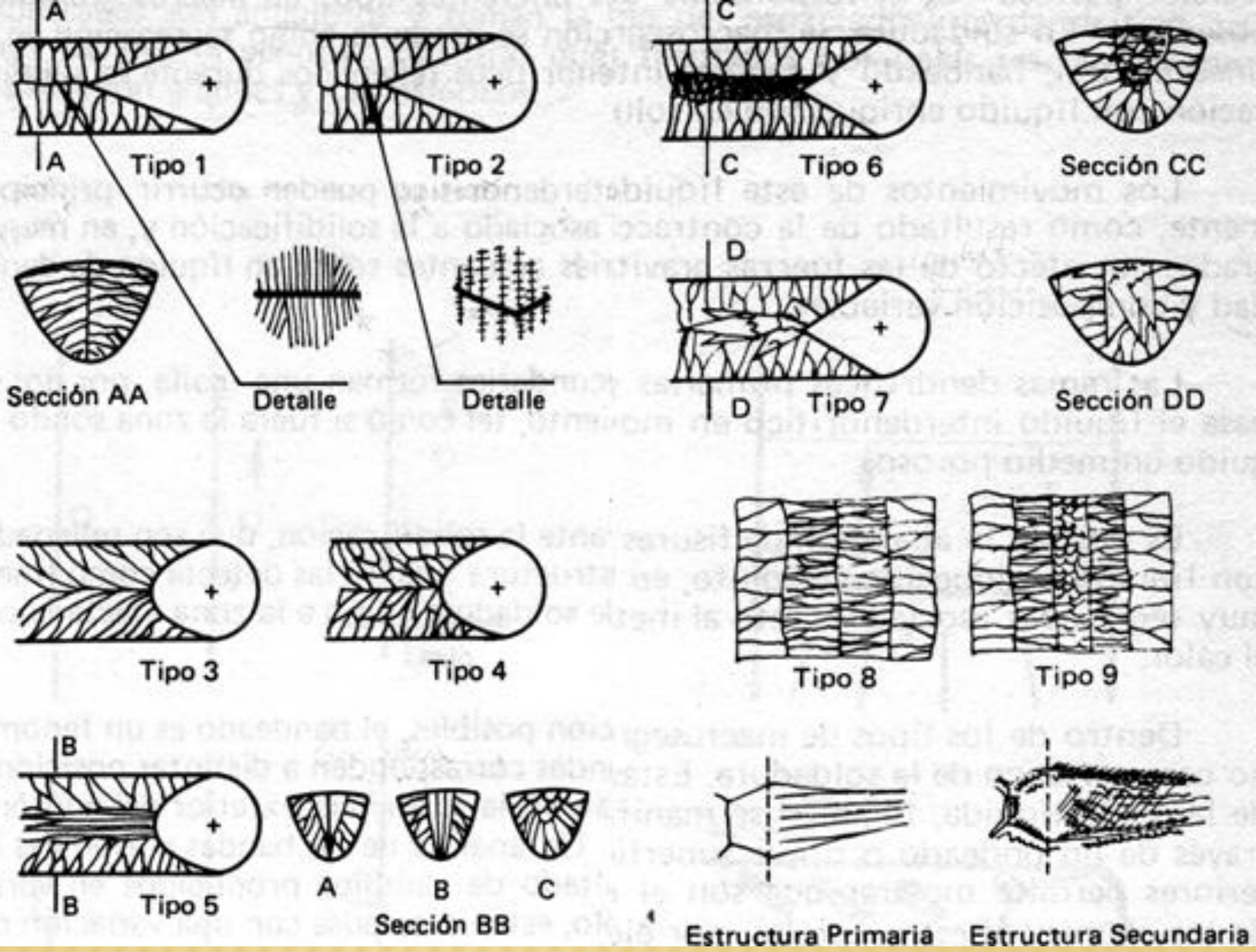


CONSIDERAÇÃO A VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO DURANTE A SOLDAGEM



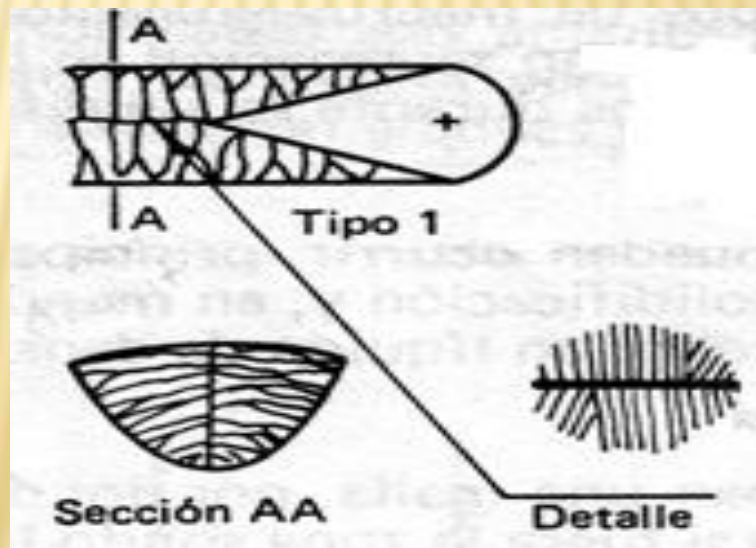
$$E \text{ (elect)} = \frac{UI}{V}$$

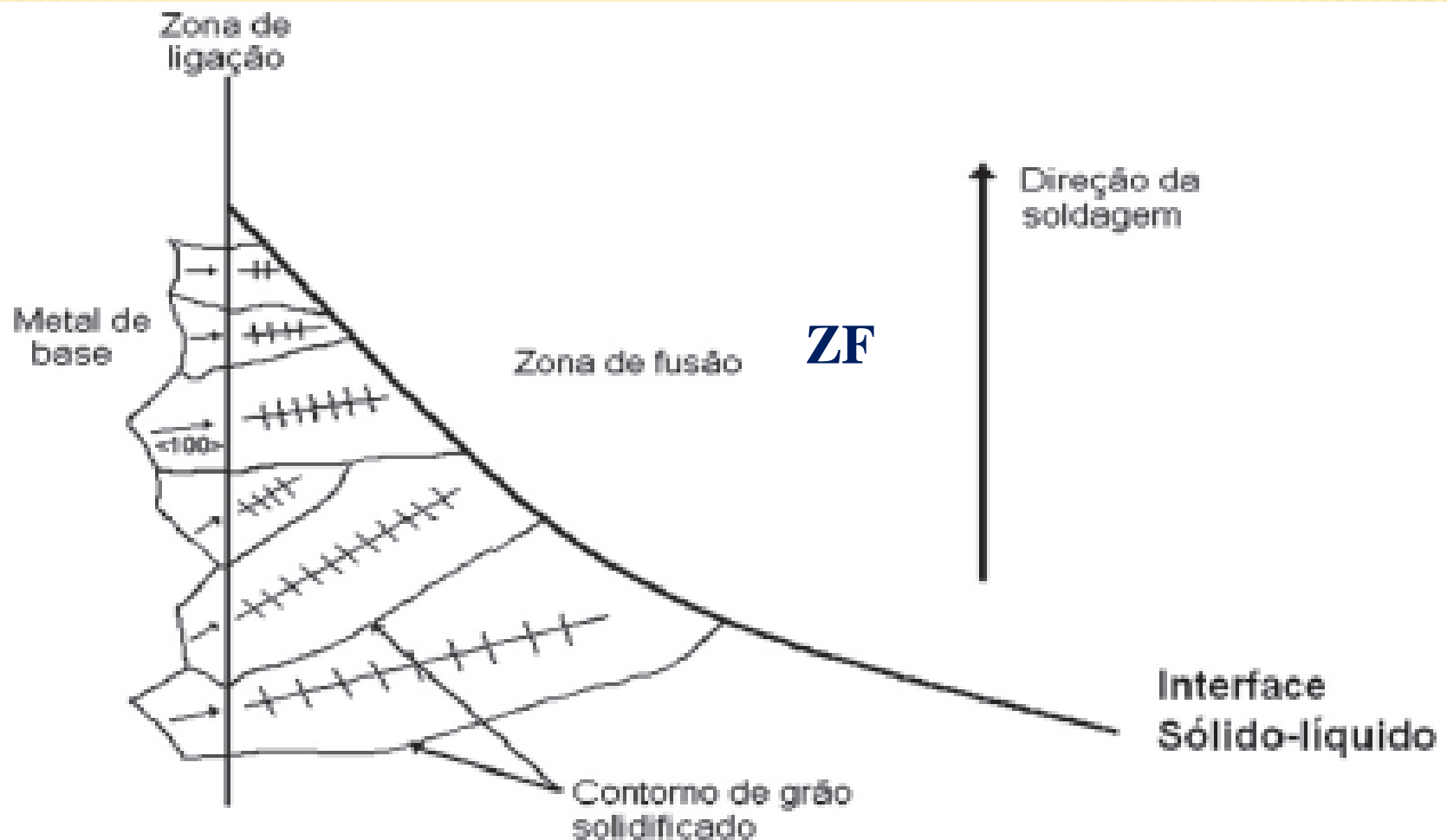
I=Corrente; V=Tensão; V= velocidade de soldagem



Esquemas das estruturas de solidificação em função do procedimento de soldagem.

- ✘ **Estrutura tipo 1: estrutura colunar**: os grãos colunares crescem até o centro do cordão, determinando uma linha de encontro definido; apresenta-se a velocidades de soldagem elevadas.
- ✘ A formação dos grãos é epitaxial, a partir dos grãos do metal de base e, devido ao crescimento competitivo, se produz uma seleção pela qual chegam ao centro do cordão aqueles que sua direção de crescimento cristalino mais favorável coincida com a extração calórica.
- ✘ A velocidade de crescimento e o gradiente térmico condicionam, junto com a composição do material, o grau da instabilidade da interface S-L e, conseqüentemente, o tipo de subestrutura resultante.
- ✘ Em geral, para ligas de uso industrial, a subestrutura obtida é celular dendrítica.

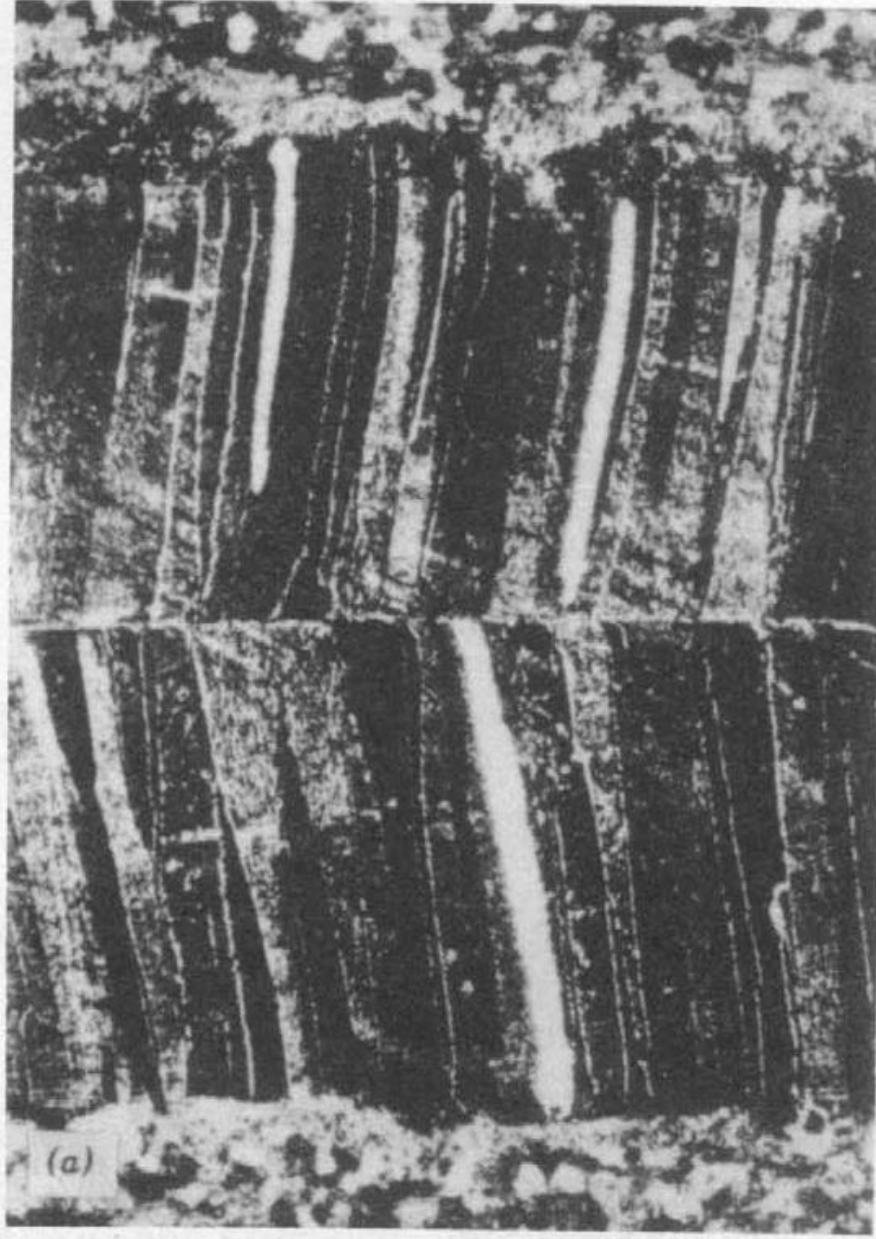




Representação esquemática do crescimento epitaxial e crescimento competitivo dos grãos da ZF

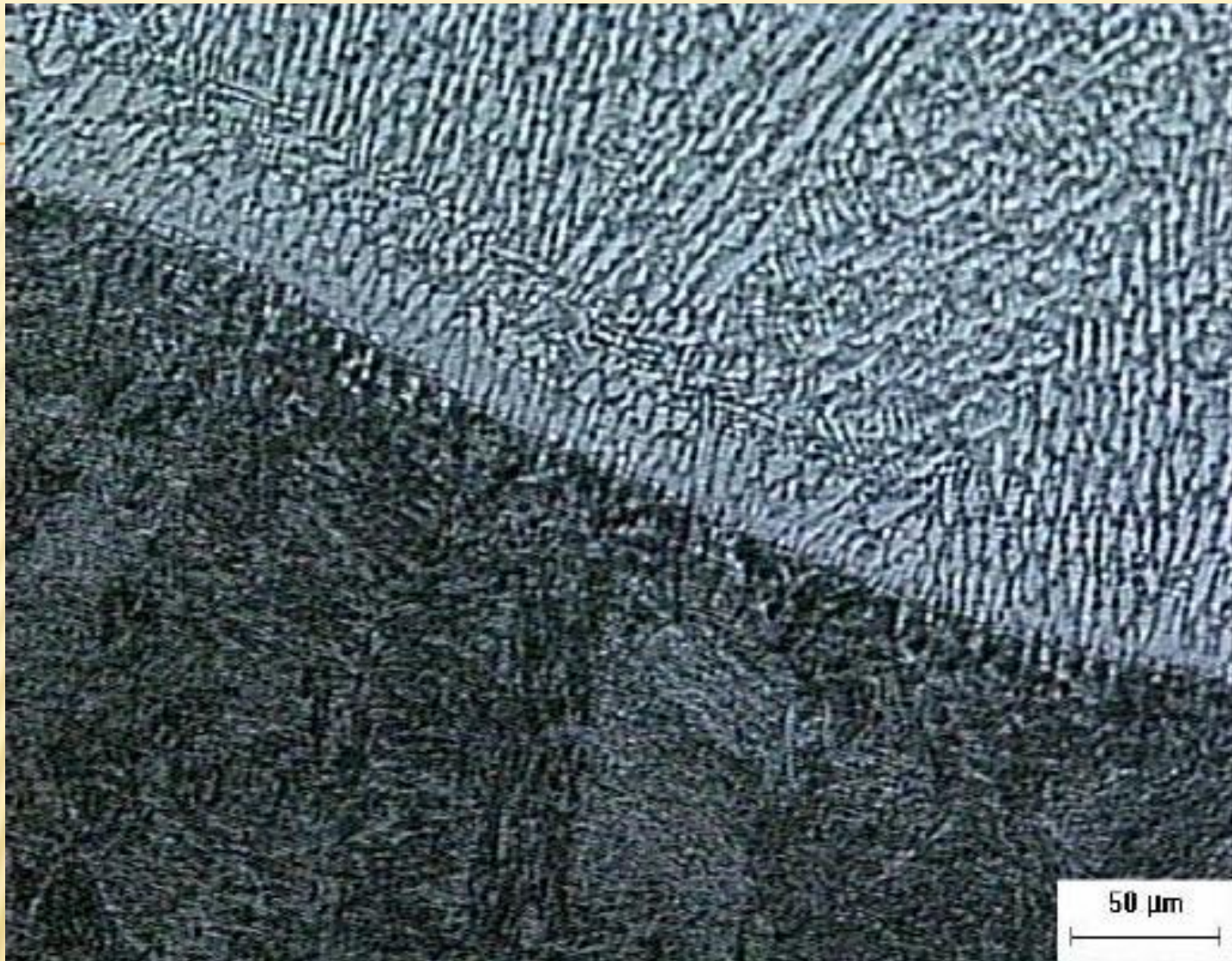


Crescimento epitaxial na linha de fusão de uma solda sobre chapa no aço maraging 18-Ni-250 (magnificação X250). De Savage (6).

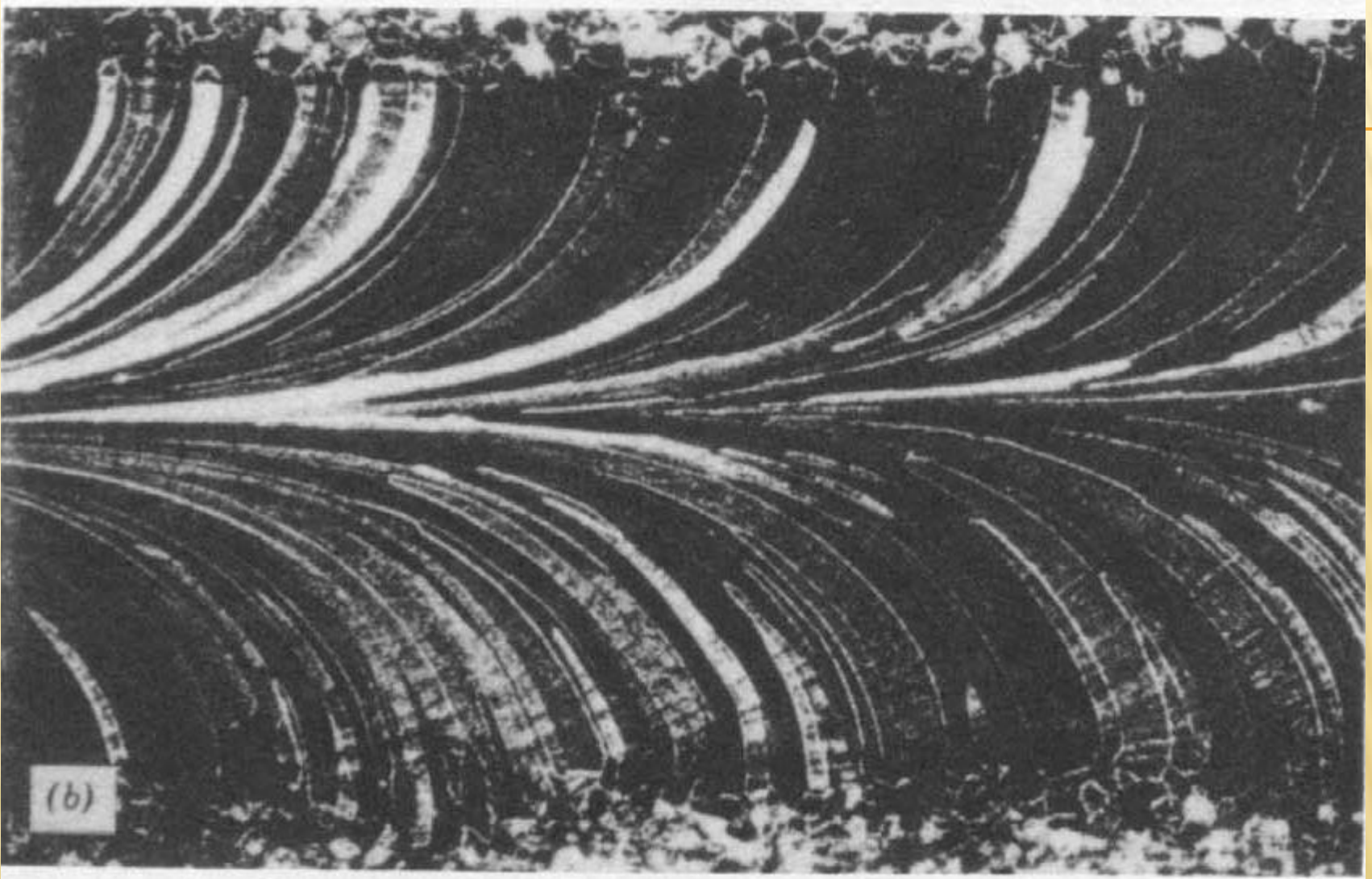


Estrutura dos grãos de uma solda GTA em alumínio de alta pureza (99.96%): (a) *velocidade de soldagem = 125 cm/min*

De Nakagawa et al. (13).



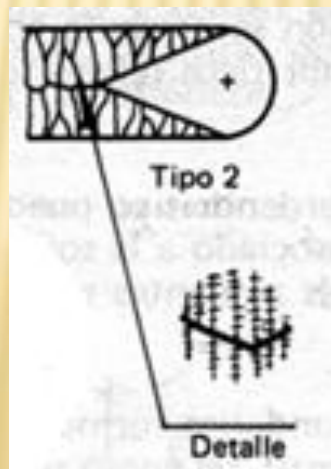
Microestrutura do revestimento [ZF + ZTA] sem tratamento térmico – Liga Inconel 718.



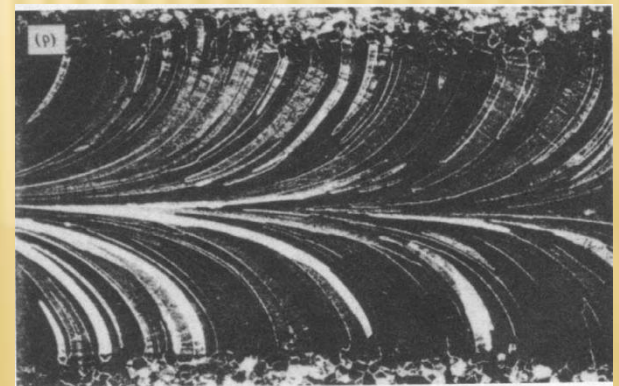
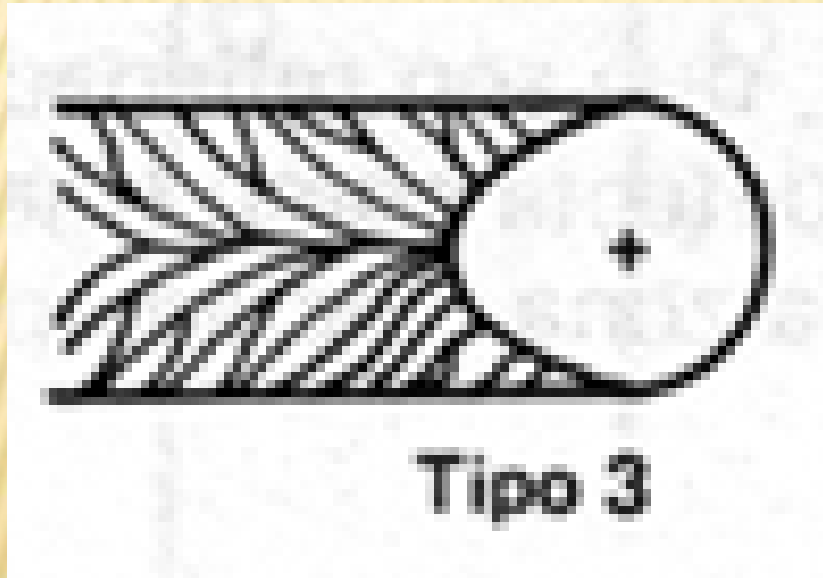
Estrutura dos grãos de uma solda GTA em alumínio de alta pureza (99.96%):
(b) velocidade de soldagem = 25 cm/min.

De Nakagawa et al. (13).

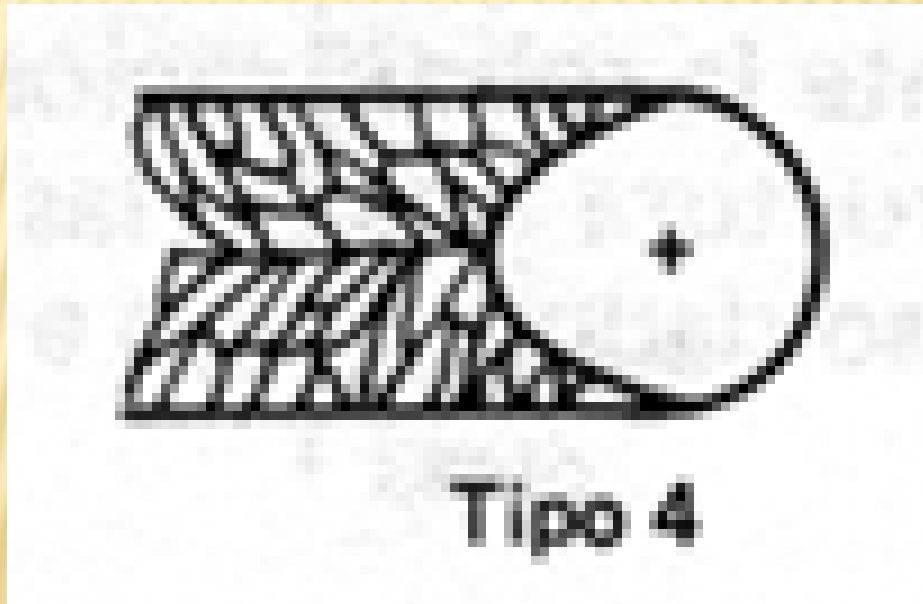
- ✘ **Estrutura tipo 2: estrutura colunar competitiva**: Se diferencia do tipo 1 em que a linha central apresenta uma forma irregular, que pode ser vista em detalhe no esquema da figura.
- ✘ Aparece nos aços com elevado teor de carbono e para velocidades elevadas de soldagem.
- ✘ A transição entre estas duas estruturas é gradual, existindo casos em que ambas coexistem. Por sobre uma certa composição e para uma dada velocidade de soldagem, em geral elevada, se produz um crescimento preferencial de certas dendritas.
- ✘ Si o gradiente térmico tende a zero a estrutura resultante, do tipo 2, pode ser interpretada como composta por superdendritas.



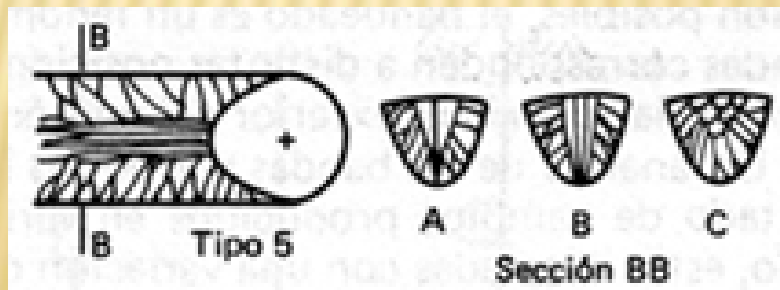
- ✘ Estrutura tipo 3: Em este caso, os grãos colunares não determinam uma linha central definida. Em geral aparece a baixas velocidades de soldagem, ou seja, o caso de poças elípticas.
- ✘ Sua origem e desenvolvimento pode ser explicado segundo o mecanismo explicitado para o caso da estrutura tipo 1.
- ✘ Os grãos crescem em forma normal à interface S-L e na direção do máximo gradiente vai mudando de ponto a ponto.



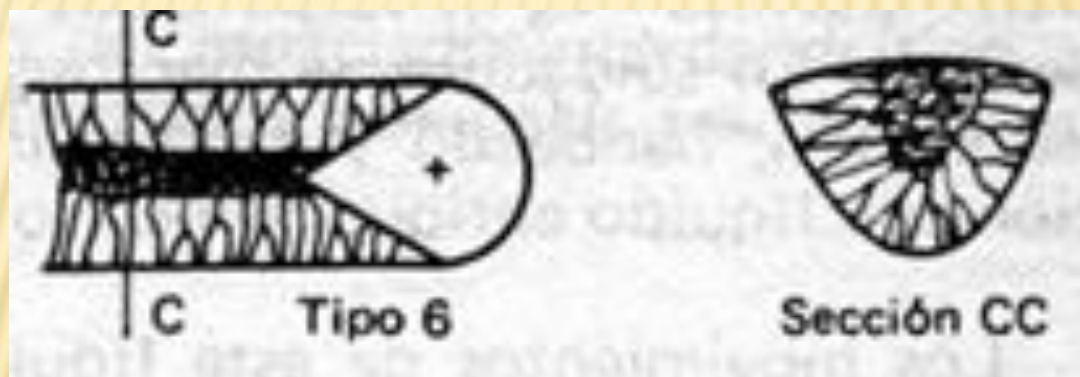
- ✘ **Estrutura tipo 4: estrutura “spray”** : A característica típica desta estrutura é que começa a crescer epitaxialmente, a partir do metal de base, logo muitos grãos são bloqueados pela presença de *núcleos* que flutuam no meio líquido.
- ✘ Numerosos trabalhos tem confirmado que nem todos os grãos colunares tem origem no molde ou no metal de base.



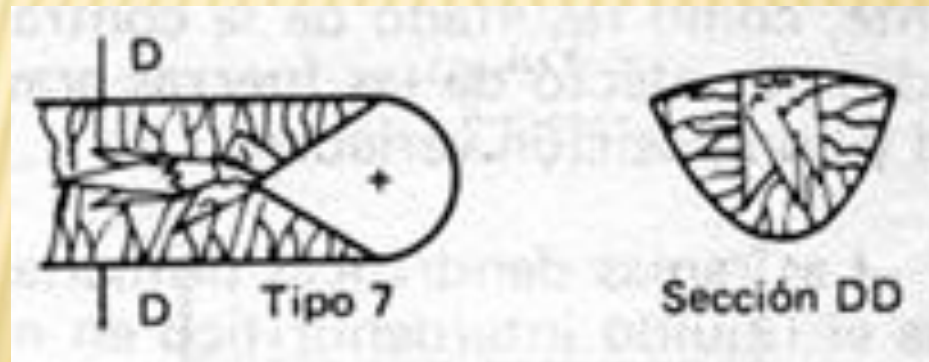
- ✘ **Estrutura tipo 5: estrutura axial:** Este tipo de estrutura se caracteriza por apresentar um conjunto de grãos que crescem seguindo a direção de soldagem na linha central, detendo os colunares.
- ✘ Aparece em cordões com poças elípticas, isto é, a baixas velocidades de soldagem. Neste caso a direção de máximo gradiente térmico coincide com o eixo do cordão.
- ✘ Os grãos colunares que chegam até a zona central possuem orientações pouco favoráveis, sendo promovido o crescimento de uns poucos grãos, orientados paralelamente na direção do máximo gradiente.
- ✘ Num corte transversal estes grãos tem a geometria equiaxial. Para certos valores dos parâmetros de soldagem aparecem grãos centrais. A geometria da junta também é importante: um ângulo grande (120°) os elimina.
- ✘ Os cristais podem crescer em forma divergente a partir de um ponto da zona inferior do cordão, ou desenvolver-se paralelamente entre si. A presença destes grãos em soldagem de aços favorece o aparecimento de trincas.



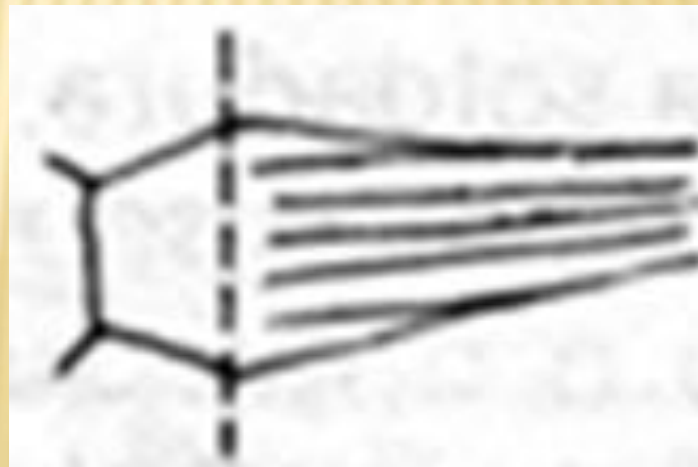
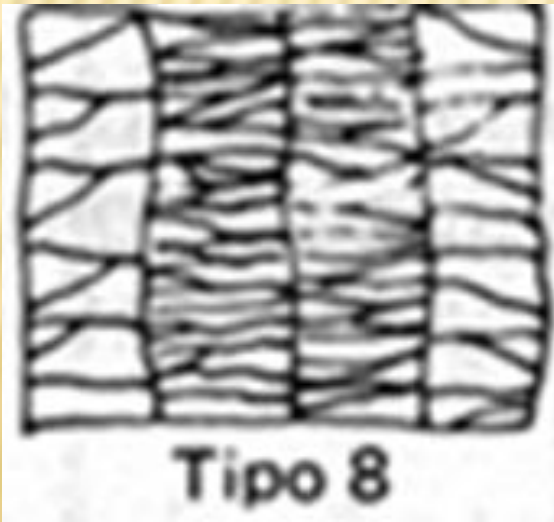
- ✘ **Estrutura tipo 6: estrutura equiaxial**: Se apresenta para elevadas velocidades de soldagem, seja para aços como para ligas de alumínio. O origem destes grãos é a nucleação heterogênea na interface líquido-gás.



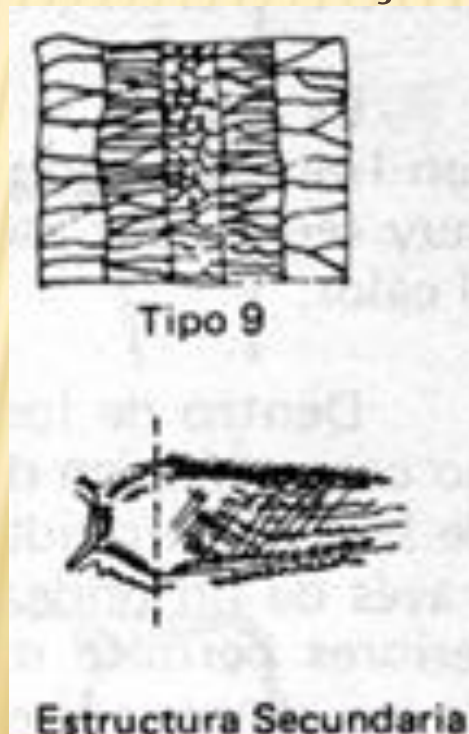
- ✘ **Estrutura tipo 7: estrutura dendrítica maclada**: Aparece em soldagem e em lingotes de colada semicontinua de ligas de alumínio.
- ✘ Esta composta por grãos laminares, quase paralelos, que crescem com origem comum, dando lugar à formação de colônias de forma cônica ou piramidal.
- ✘ As lamelas tem espessuras da ordem dos 100 μm e até vários centímetros de comprimento; estão formadas por cristais com orientação de macla.
- ✘ As dendritas macladas aparecem com elevadas velocidades de crescimento e concentrações críticas de soluto, especialmente Ti.



- ✘ **Estrutura tipo 8: estrutura de grãos colunares finos e grosseiros:**
Encontra-se na soldagem por eletroescória e sua origem não tem sido totalmente aclarada.
- ✘ Sua aparência de grãos grosseiros e finos é o resultado de uma precipitação principalmente de ferrita em determinados lugares. Perto da linha de fusão, precipita, com preferência, nos contornos de grão primário, austenita, contornando grãos grosseiros.
- ✘ Na zona do centro do cordão, a ferrita nuclea em lugares que coincidem com as zonas microsegregadas originadas durante a solidificação.



- ✘ Estrutura tipo 9: estrutura de grãos colunares finos e grosseiros com zona central equiaxial: Típicos do processo de eletroescória com a presença de uma zona central equiaxial de 0,4 a 0,8 cm, em especial em aços com mais de 0,3% de carbono, soldados com elevadas correntes.
- ✘ Os mecanismos possíveis para explicar seu origem são os de multiplicação cristalina e nucleação heterogênea.



✘ **Resumo**, do análises das macroestruturas pode-se concluir:

✘ Os prováveis mecanismos que originam as microestruturas observadas no metal depositado por soldagem por fusão são:

◆ Transformação líquido-sólido.

✘ crescimento epitaxial

✘ crescimento competitivo

✘ instabilidade da interface S-L, sobre-resfriamento constitucional

✘ nucleação heterogênea

✘ multiplicação cristalina

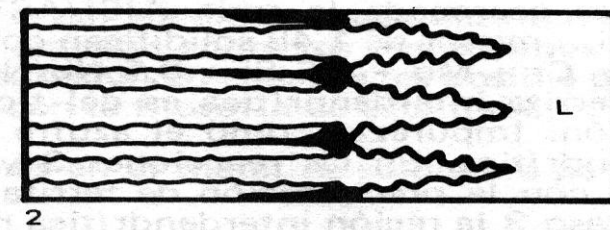
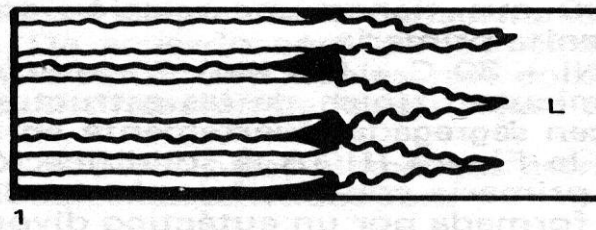
✘ transformação peritética. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (aços).

◆ Transformação sólido-sólido (aços).

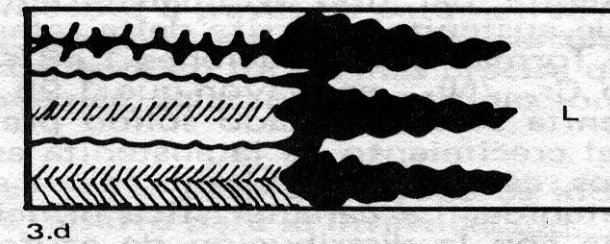
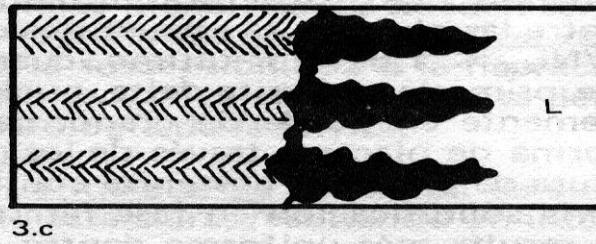
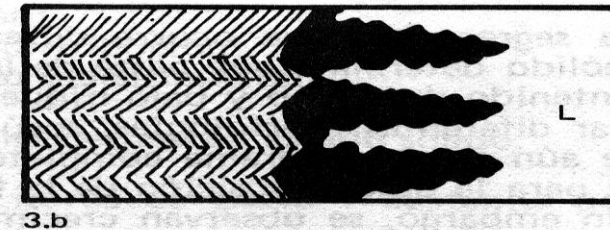
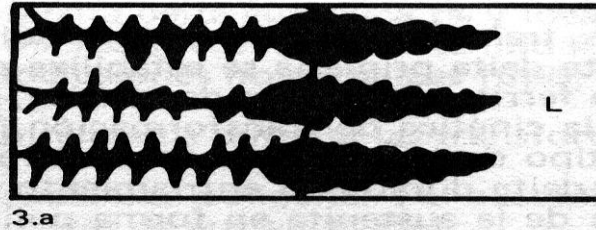
✘ nucleação e crescimento da ferrita.

Voltando.....

Esquemas de estruturas de solidificação de aços inoxidáveis

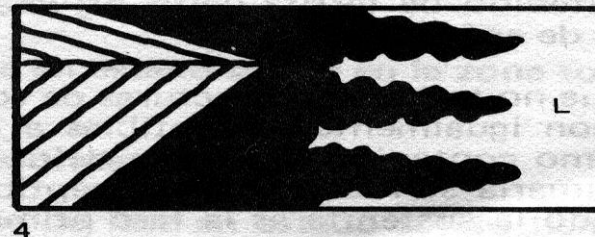


Nos casos 1 e 2 a primeira fase em precipitar é austenita, onde observa-se que seu crescimento é em forma dendrítica.



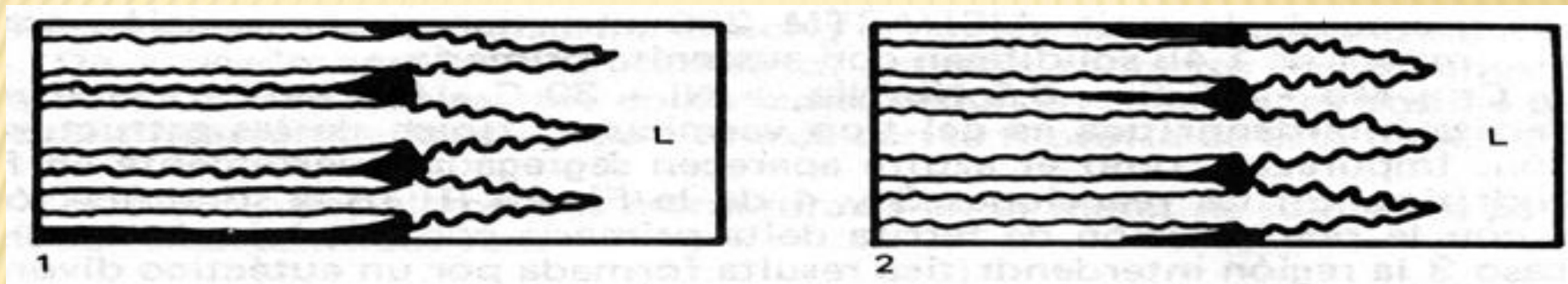
Nas estruturas de solidificação 3 e 4 da figura a solidificação começa com a precipitação da ferrita delta primária com morfologia dendrítica.

- 1.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma_s + \delta$
- 2.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma_s$
- 3.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \delta + \gamma_s + \gamma$
- 4.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma_s$



- ✘ Quando solidifica um aço inoxidável austenítico a primeira fase em ser formada pode ser a austenita ou ferrita delta.
- ✘ Muitos dos aços inoxidáveis de tipo comercial tem composição química, em que a presença de ambas reações tem importância prática.
- ✘ Nos casos 1 e 2 a primeira fase em precipitar é austenita, onde observa-se que seu crescimento é em forma dendrítica.

Em ambos casos precipita, no espaçamento interdendrítico um eutético formado por austenita e ferrita delta.



A ferrita delta interdendrítica pode transformar-se em forma parcial ou total em austenita secundária durante o resfriamento, gerando uma estrutura dúplex ou totalmente austenítica no metal de solda (casos 1 e 2 da figura).

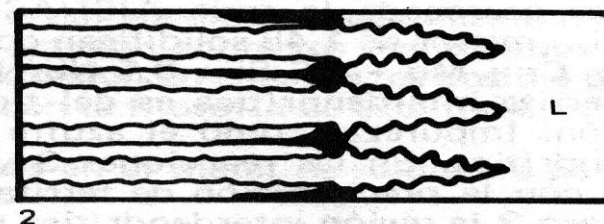
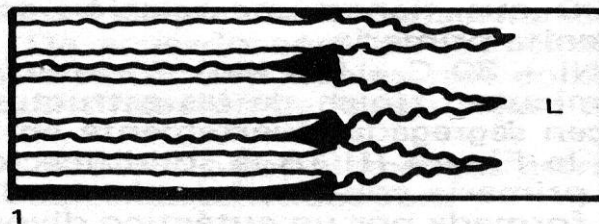
-
- ✘ Nos aços da serie AISI/ASTM que tem uma relação entre o cromo equivalente e níquel equivalente menor que 1,48 ($\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}} < 1,48$) solidificam em austenita primaria.
 - ✘ Sendo o Cr_{eq} . determinado por: $\text{Cr} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + \% 0,5 \text{ Nb}$; e o Ni_{eq} . $\text{Ni} = \% \text{Ni} + 30\% \text{C} + 0,5 \% \text{Mn}$.
 - ✘ A morfologia da ferrita interdendrítica é do tipo vermicular, típica das estruturas de fundição. Impurezas como o enxofre aparecem segregadas fortemente na forma interdendrítica.

Nas estruturas de solidificação 3 e 4 da figura a solidificação começa com a precipitação da ferrita delta primária com morfologia dendrítica.

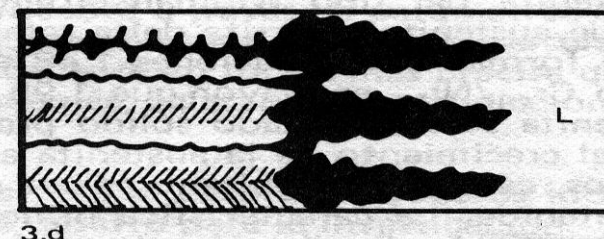
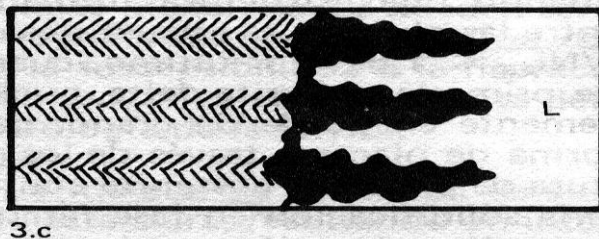
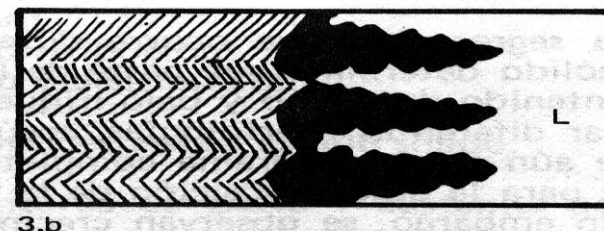
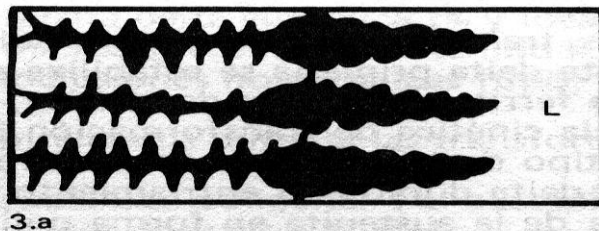
No caso 3 a região interdendrítica é formada por um eutético separado, composto por austenita e ferrita delta.

Durante o resfriamento posterior, a austenita do eutético cresce consumindo parte da ferrita eutética e da ferrita primária por meio da transformação de fases no estado sólido, controlada pela velocidade de resfriamento.

Esquemas de estruturas de solidificação de aços inoxidáveis

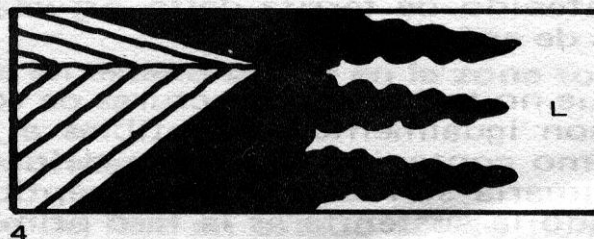


Nos casos 1 e 2 a primeira fase em precipitar é austenita, onde observa-se que seu crescimento é em forma dendrítica.



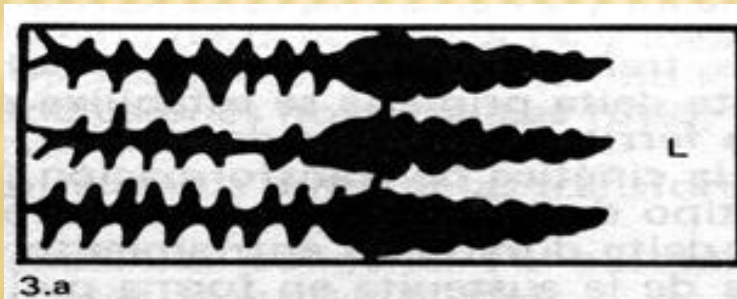
Nas estruturas de solidificação 3 e 4 da figura a solidificação começa com a precipitação da ferrita delta primária com morfologia dendrítica.

- 1.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma s + \delta$
- 2.- $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \gamma + \gamma s$
- 3.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + (\gamma e + \delta e) \rightarrow \delta + \gamma s + \gamma$
- 4.- $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma s$



4

- ✘ A segregação que ocorrem durante as transformações líquido-líquido e sólido-sólido determina que parte da ferrita delta primária se estabiliza pelo sua elevado teor de cromo e baixo teor de níquel.
- ✘ A ferrita delta, interdendrítica, pode apresentar diferentes morfologias, segundo seja a cinética de transformação.
- ✘ Na figura 3a observa-se que o crescimento da austenita em forma poligonal, a que é controlada por difusão, onde a ferrita delta retida aparece com morfologia vermicular situada nos eixos das ramas dendríticas, neste caso, a estrutura dúplex formada, pode ser confundida com uma estrutura de solidificação.



Os esquemas da figura 3 b, c e d mostram precipitações de austenita do tipo Wismanstatten, gerando uma estrutura formada por placas de austenita e ferrita delta retida entre as placas.



As estruturas do caso 3 se formam para relações

$$1,48 \leq \text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}} \leq 1,95$$

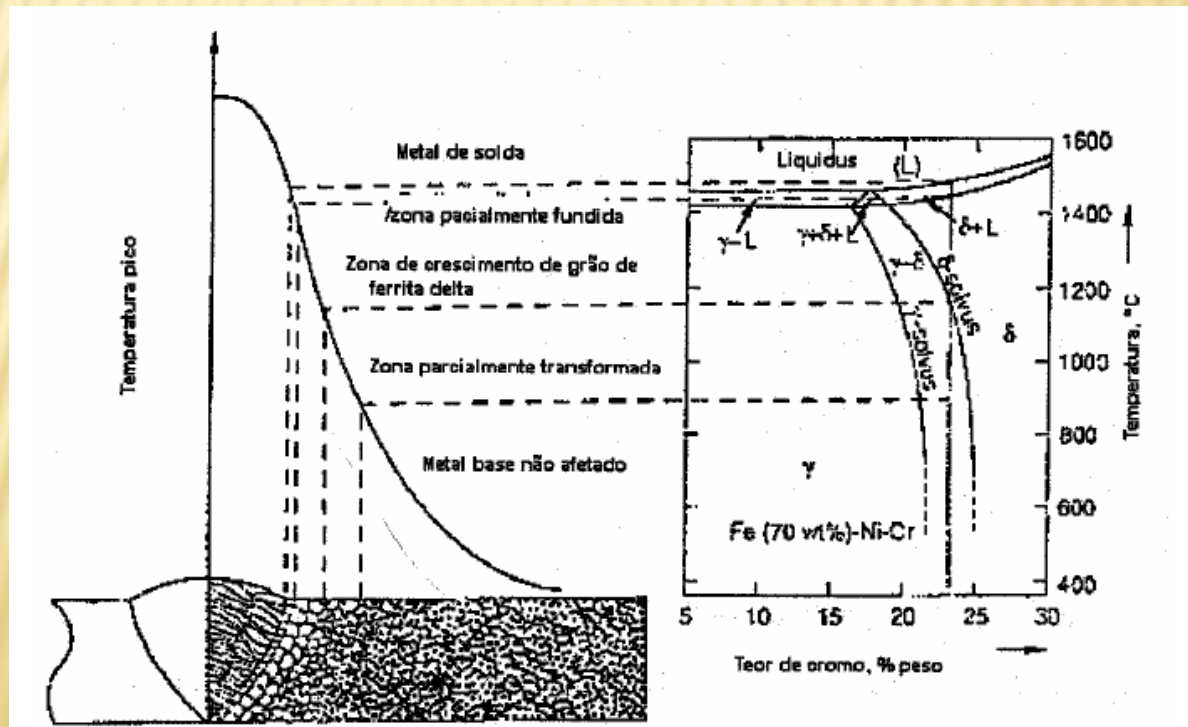
- ✘ Por último, quando a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} é maior que 1,95, a fase primária é ferrita delta, nucleando na austenita só no estado sólido preferentemente nos contornos de grão, geralmente o crescimento da austenita é em forma de placas através dos grãos primários, como mostra o caso 4 da figura.



- ✘ O resultado é uma estrutura de placas de austenita com ferrita delta retida. A característica principal da solidificação em fase ferrítica se relaciona com a distribuição do enxofre, que resulta mais uniforme dentro dos grãos primários.

As relações de Cr_{eq}/Ni_{eq} que delimitam a aparição dos diferentes tipos de morfologias da ferrita, associados com as diferentes formas de solidificação, podem ser modificados em função da velocidade de resfriamento.

O clássico diagrama de Scheffler-Delong, que considera só o efeito da composição sobre o conteúdo de ferrita delta, é válida só para uma determinada faixa de velocidades de resfriamento.



- ✘ Temos que não em todas as estruturas de solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos pode ocorrer fissuração a quente, ainda que tenham o mesmo conteúdo de ferrita delta.
- ✘ As estruturas menos suscetíveis são aquelas em que a ferrita delta é a fase primária.
- ✘ No caso em que a estrutura austenítica na fase primária o enxofre apresenta-se altamente segregado, aumentando a tendência à fissuração a quente.
- ✘ Sendo que quando o conteúdo de P + S é menor que 0,01% não se produz fissuras a quente, seja estrutura primária de ferrita ou austenita na solda.

No diagrama Schaeffler-Delong a linha que realmente separa o campo dos metais de solda suscetíveis de trincas a quente não coincide com um valor fixo de ferrita delta (por exemplo 4%), aumentando seu teor na medida que aumentam os valores de níquel e cromo equivalente.

-
- ✘ Para evitar a trinca a quente nos procedimentos de soldagem se especifica o teor de ferrita delta admissível, indicando sua provável presença através do diagrama de Schaeffler-Delong ou por meios magnéticos ou metalográficos.

Diagrama de Schaeffler

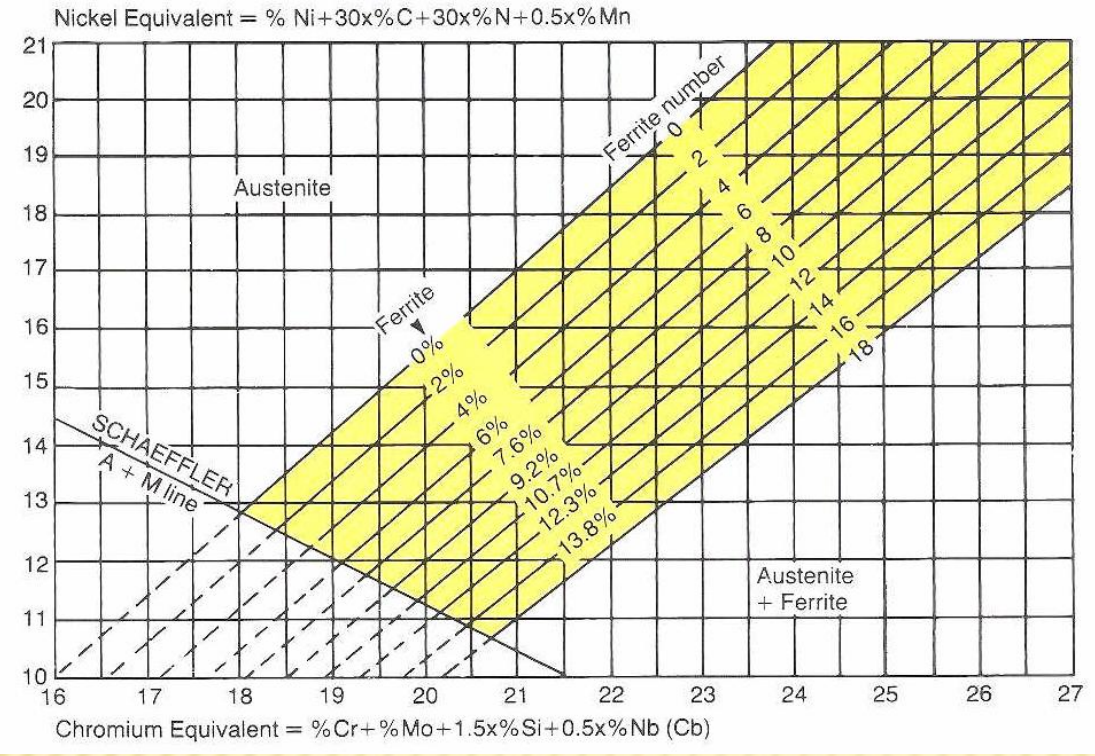
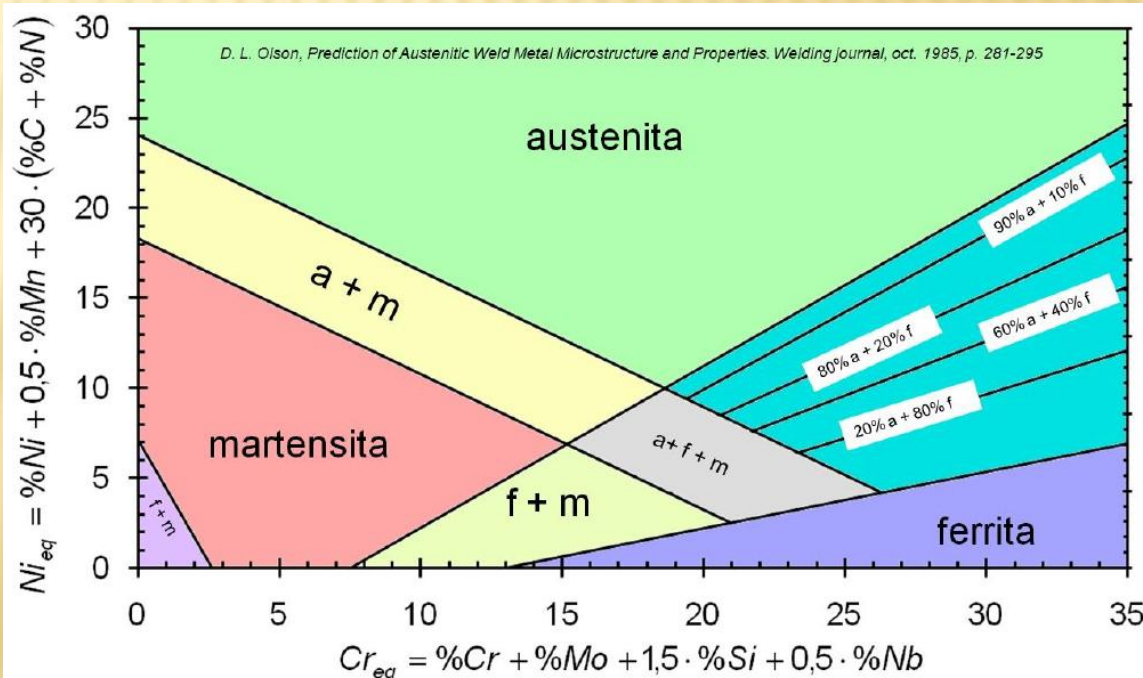


Diagrama de DeLong



- ✘ Principais elementos estruturais presentes no metal de solda de aços autênticos:
-

- ✘ → **originados durante a solidificação**

- ✘ austenita primária (%)
- ✘ ferrita delta primária (% e localização)
- ✘ ferrita delta eutética (% e localização)
- ✘ microsegregação (conteúdo de P + S e distribuição)
- ✘ inclusões não metálicas (tipo, tamanho e distribuição).

- ✘

- ✘ → **Originados durante as transformações de fase em estado sólido**

- ✘ austenita poligonal (% de austenita em contorno de grão + austenita poligonal)
- ✘ placas de austenita (%)
- ✘ ferrita delta globular (% e localização)

Temperatura (°C)

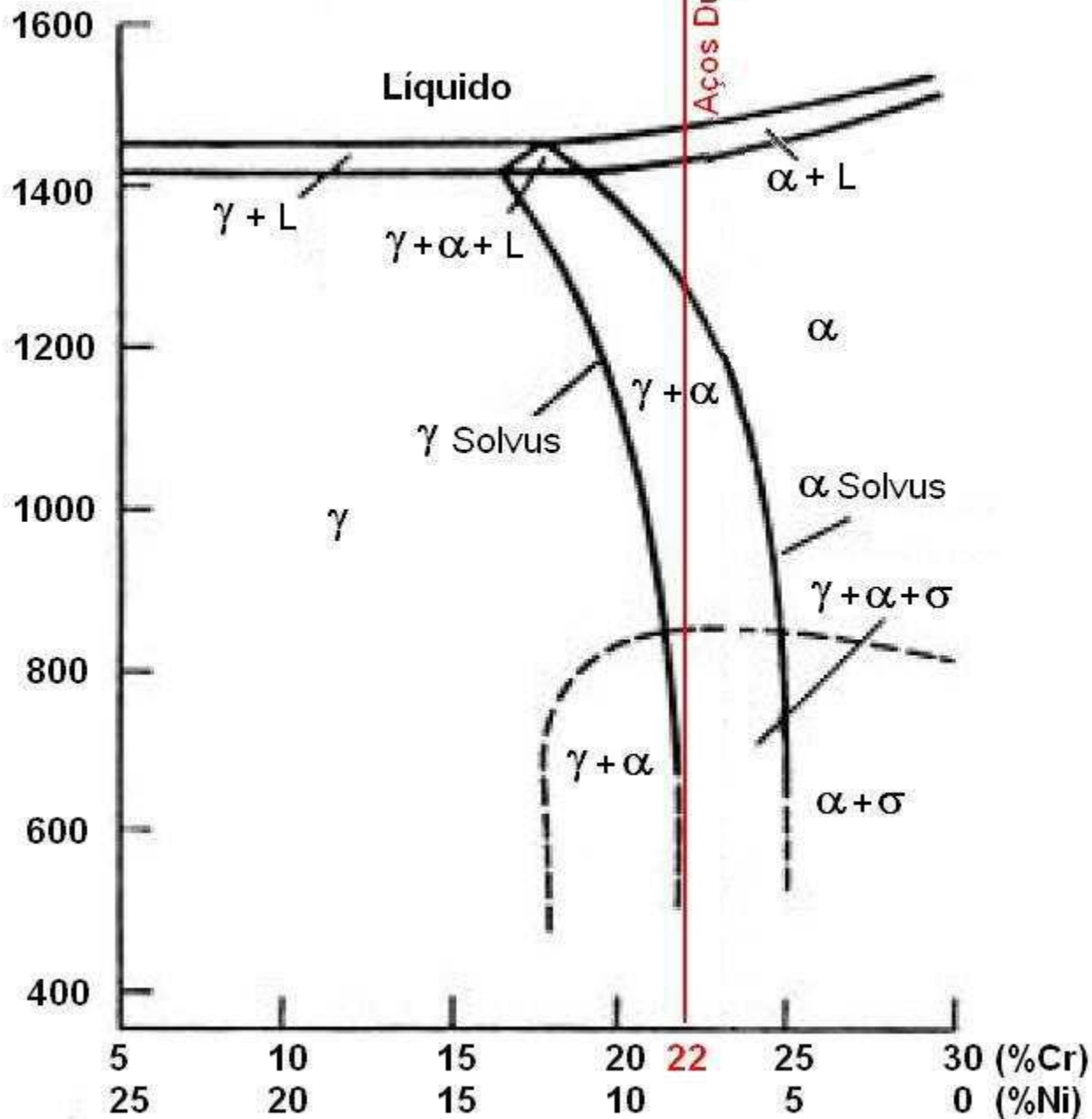
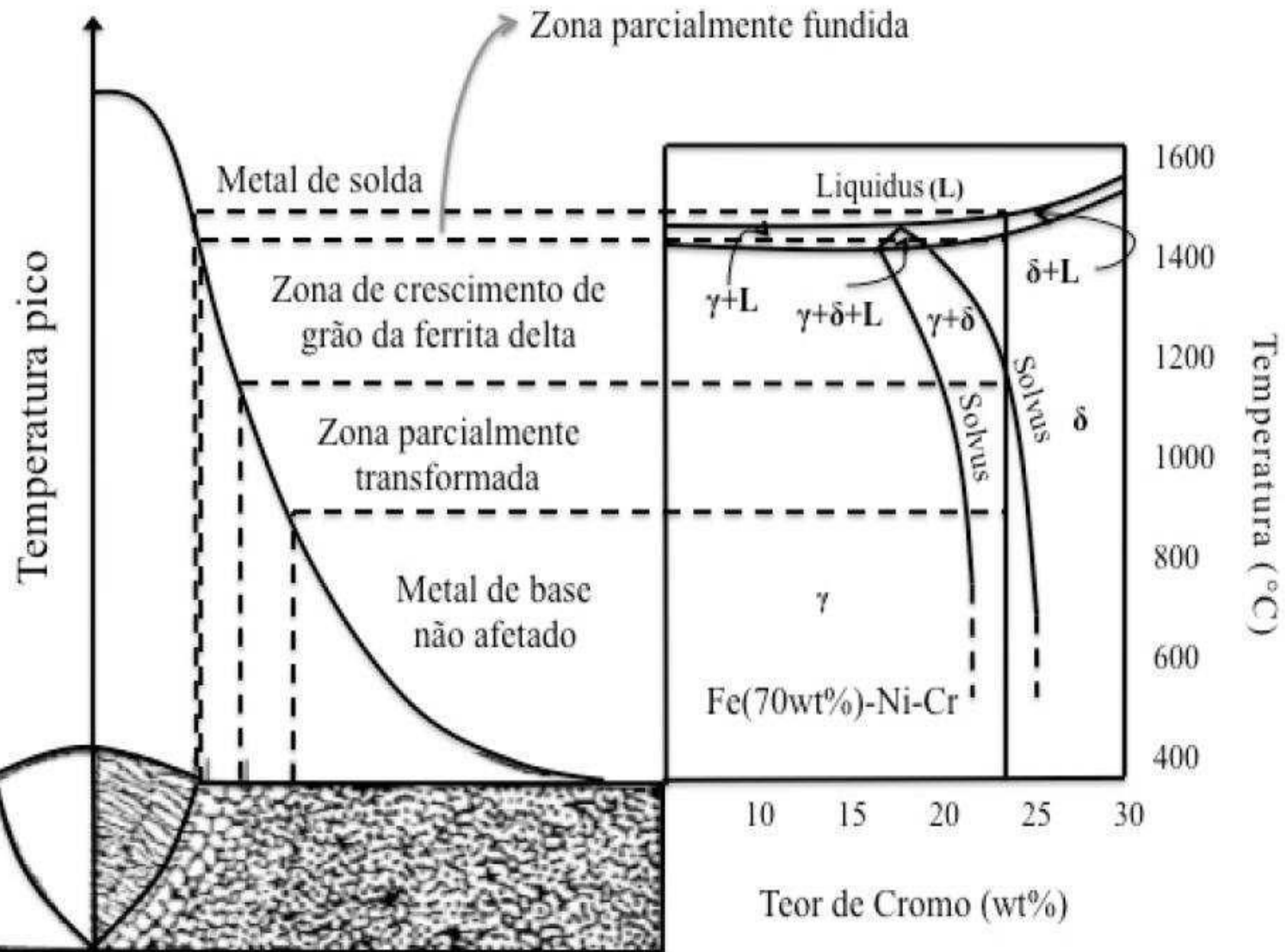


Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%

Diagrama esquemático que define as diferentes zonas da junta soldada de acordo com a distribuição de temperatura devido ao aporte térmico para um aço duplex.



Formação de trincas de solidificação

- ✘ Os fatores que influenciam a formação de trincas de solidificação em soldas de aços inoxidáveis austeníticos Cr-Ní são basicamente os mesmos que afetam outros aços e ligas, isto é, a estrutura de solidificação e o **nível de impurezas**.
- ✘ De uma maneira geral, as soldas destes aços podem se solidificar com uma estrutura completamente austenítica, ferrítica ou como uma mistura destas duas fases.
- ✘ As soldas que contêm alguma ferrita à temperatura ambiente (e possivelmente uma quantidade maior durante a solidificação) apresentam uma resistência adequada à fissuração para a maioria das aplicações, enquanto que soldas completamente austeníticas são muito sensíveis.

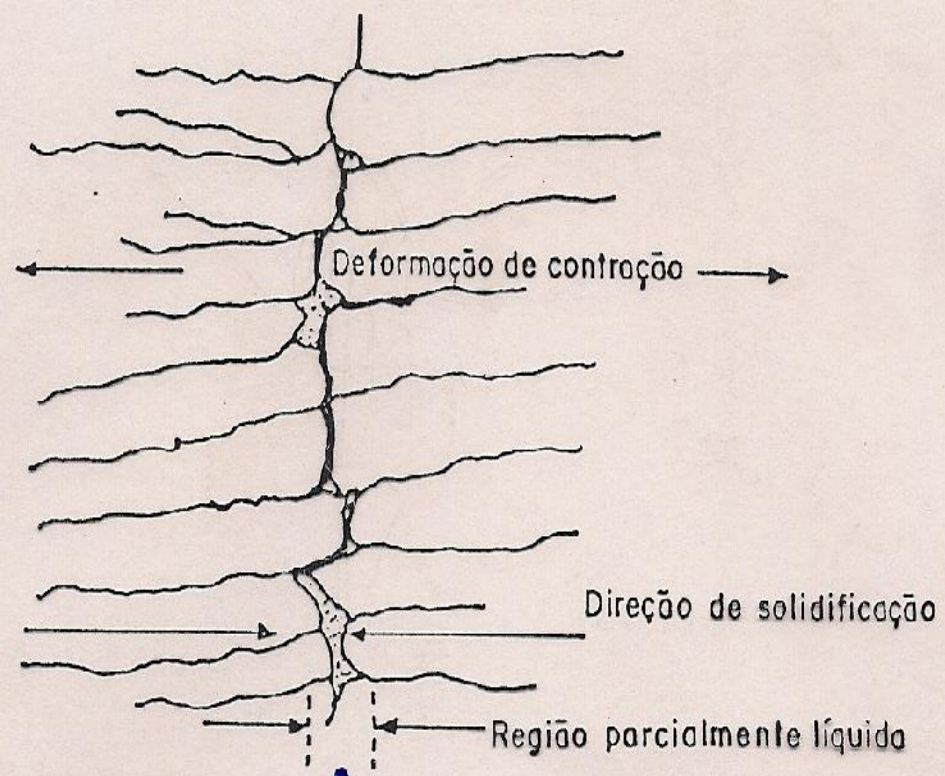
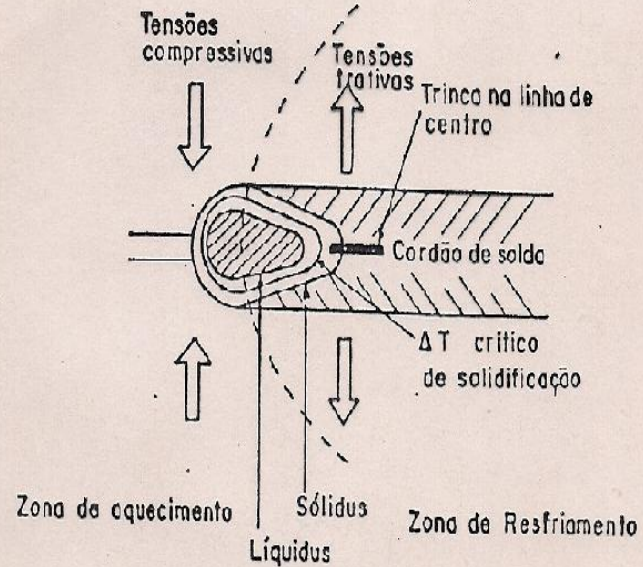
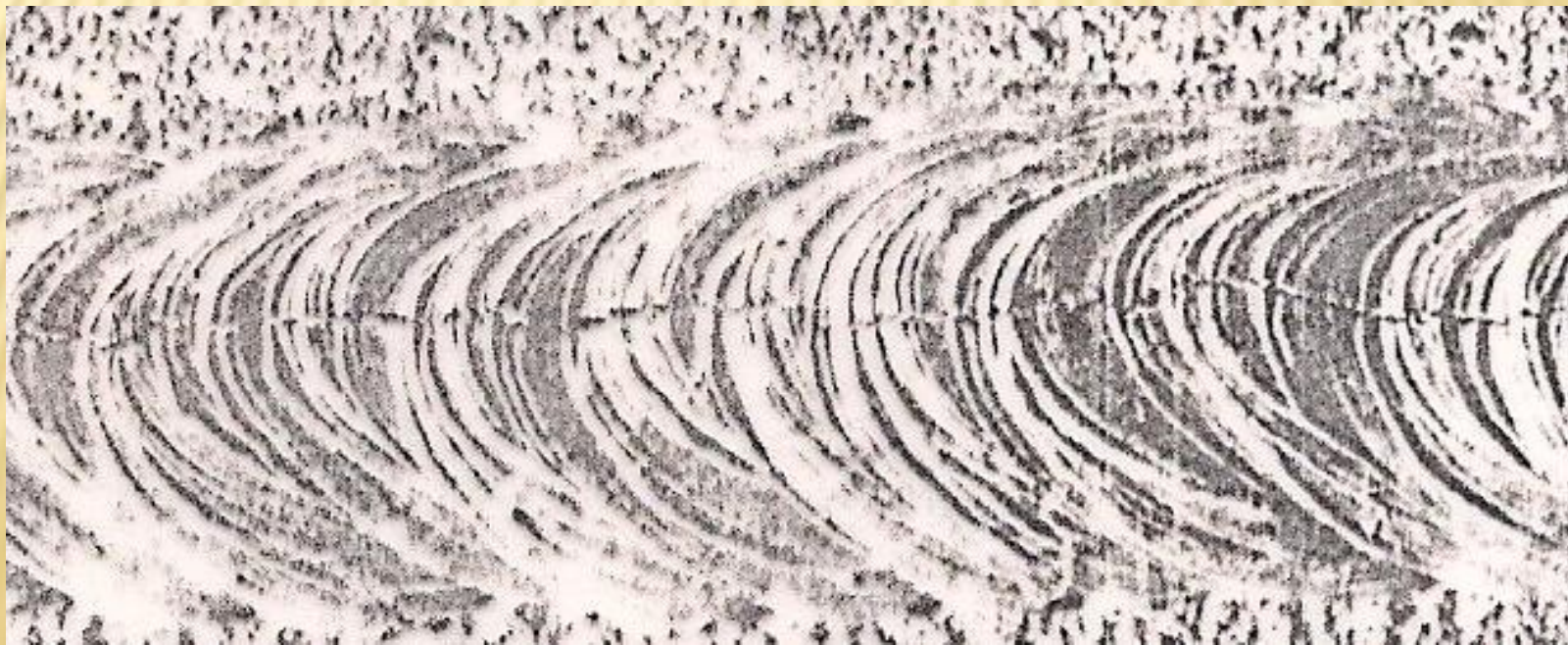


Figura IV.2L. Esquema ilustrando a formação de trincas de solidificação longitudinal ao cordão.



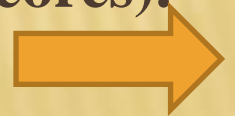
- ✘ A quantidade de ferrita necessária, para garantir imunidade à fissuração depende do nível de restrição da junta e da quantidade e tipo dos elementos de liga e impurezas presentes na zona fundida.
- ✘ Em condições usuais de soldagem, para aços do tipo 18%Cr - 10%Ni e 24%Cr-12%Ni, esta quantidade mínima de ferrita está entre 1 a 8% e os consumíveis de soldagem são, em geral, formulados para fornecerem um depósito contendo alguma ferrita.

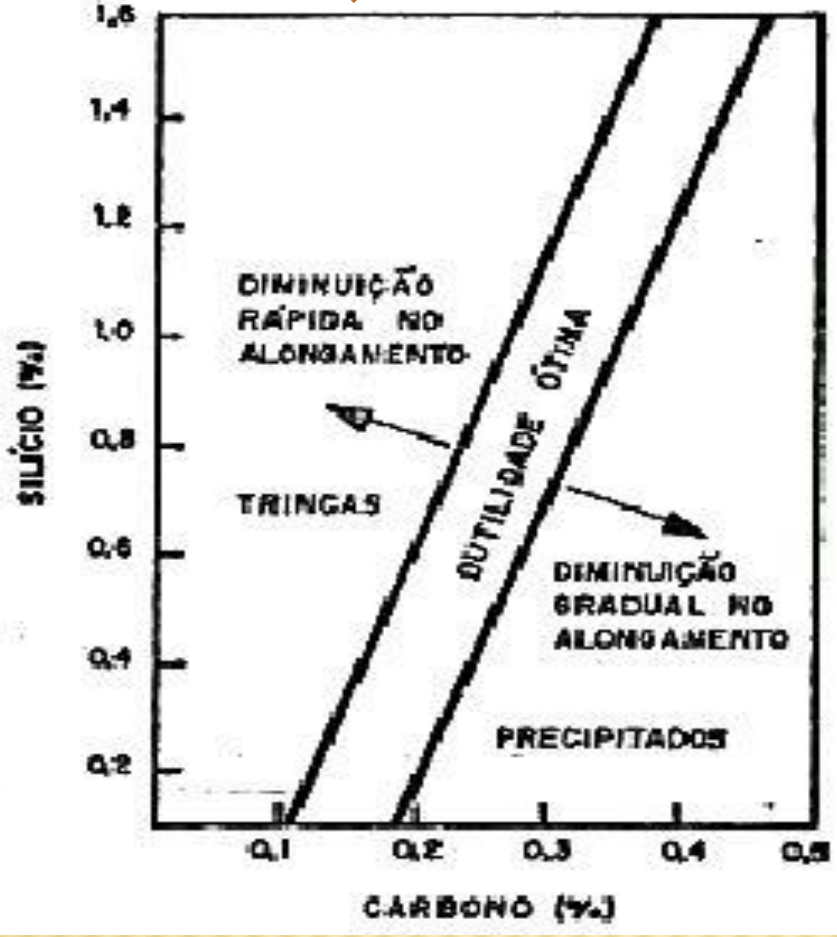
- ✘ **Algumas das causas mais prováveis para explicar o efeito da ferrita na sensibilidade à formação de trincas na solidificação:**
- ✘ **a) a maior solubilidade de impurezas prejudiciais (S e P) na ferrita causa uma menor segregação destes elementos quando a solidificação ocorre inicialmente como ferrita.**
- ✘ **b) os contornos austenita-ferrita apresentam menor molhabilidade por filmes líquidos do que contornos ferrita-ferrita ou austenita-austenita;**
- ✘ **c) os contornos austenita-ferrita são muito sinuosos, o que dificulta a propagação das trincas;**
- ✘ **d) a presença da ferrita resulta em uma maior quantidade de superfícies internas devido às interfaces austenita-ferrita. Este aumento de superfície dispersa as impurezas que tendem a segregar nos contornos.**

- ✘ **Na ZF de estrutura completamente austenítica, como as obtidas em aços resistentes ao calor do tipo 25%Cr-20%Ni, podem ser formadas micro-trincas intergranulares que podem ser observadas em micrografias ou por seu efeito de reduzir a ductilidade e a resistência mecânica.**
- ✘ **Alternativamente, fissuras intergranulares grosseiras podem ser formadas e serem detectadas por inspeção com líquidos penetrantes, quando atingem a superfície.**
- ✘ **Os efeitos combinados do manganês e enxofre são similares àqueles observados nos aços carbonos e de baixa liga, relação Mn/S deve exceder um certo valor (no caso de soldas completamente austeníticas, em torno de 35) para evitar a fissuração.**

- ✘ Normalmente, o teor de enxofre no eletrodo é restrito a um máximo de 0,02%, sendo que a diluição do metal de base e a contaminação do revestimento podem aumentar o teor final de enxofre na zona fundida.
- ✘ Sucata ????????????????
- ✘ O fósforo tem um efeito similar ao do enxofre e promove ativamente a fissuração quando presente com um teor superior a 0,025% em soldas completamente austeníticas. O teor deste elemento deve ser severamente limitado para se evitar a fissuração destas soldas.

- × O silício é considerado um elemento indesejável em termos da sensibilidade à fissuração e seu teor precisa, normalmente, ser controlado.
- × Quando inferior a cerca de 0,3%, o metal líquido é muito viscoso e pode apresentar inclusões de escória.
- × Entretanto, para teores acima de 0,7%, o risco de fissuração aumenta e a excessiva fluidez da poça de fusão pode reduzir a penetração na soldagem TIG.
- × Em aços austeníticos resistentes ao calor, o silício pode estar presente em maiores teores. Contudo, o efeito prejudicial do silício parece ser bem contrabalançado pela otimização do teor de carbono (também presente nestes aços em maiores teores).





Como se observa, as melhores características da solda são obtidas para a seguinte relação entre os teores de carbono e silício:

$$1 < \frac{\%C}{(\%Si + 0,8)} < 6$$

- ✘ Este requerimento não pode ser obtido em depósitos de aços resistentes ao calor que contenham baixo teor de carbono.
- ✘ Neste caso, necessita-se entre 4 e 6% de manganês e 0,1 a 0,15% de nitrogênio para melhorar a resistência à fissuração.
- ✘ A fissuração devido ao silício pode ser um sério problema na soldagem de peças fundidas resistentes ao calor, onde o silício é adicionado para melhorar a facilidade de fabricação e em aços tipo 15%Cr-35%Ni-2%Si, onde este elemento é colocado para aumentar a resistência à formação de carepa.
- ✘ Em ambos os casos, a utilização de um metal de adição de baixo teor de silício e o controle da diluição pode ser importante durante a soldagem.

- ✘ Nióbio é uma adição comum em soldas do tipo 18%Cr-10%Ni, geralmente em teores de 1% ou menos. Este elemento forma um constituente intergranular de baixo ponto de fusão que pode ser observado em amostras metalográficas.
- ✘ O Nb em % elevado participa da sensibilidade à fissuração em soldas austeníticas e deve ter um efeito semelhante em soldas com estrutura bifásica, exigindo, uma maior quantidade de ferrita para controlar a fissuração.
- ✘ Cobre, zircônio e tântalo também parecem aumentar a fissuração.
- ✘ Por outro lado, o molibdênio tende a tornar o depósito mais resistente à fissuração e liga 18%Cr-12%Ni-3%Mo pode ser usada para a união de metais de soldagem difícil.
- ✘ E a trinca de liquação, o Mo segrega????????????????

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ✘ Modenesi P., Marques P., Dos Santos D. Curso de Metalurgia da Soldagem. UFMG. 1992.
- ✘ Bussinger E.R. Soldagem dos Aços Inoxidáveis. Edição Petrobras.
- ✘ Solari M.J.^a Metalurgia del Metal de Soldadura. CONEA – Comisión Nacional de Energia Atomica de Argentina. 1981
- ✘ Folkhard E. Welding Metallurgy os Stainless Steels. N.Y.