

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Conceito de Soldabilidade

Previsão da soldabilidade

**Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng.
LABATS DEMEC UFPR**

Soldagem de Aços Inoxidáveis

A “American Welding – AWS” define Soldabilidade como a capacidade de um material de ser unido por soldagem nas condições de fabricação especificadas por uma estrutura projetada de forma adequada e para se comportar adequadamente em serviço.

Uma definição prática, seria: “Soldabilidade é a facilidade relativa com que uma solda é realizada de forma satisfatória, e que resulte em uma união (revestimento) de qualidade”, de acordo a um procedimento previamente estabelecido.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas, certamente, algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras.

Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação a que esta se destina.

Assim, para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o **processo** e **procedimento de soldagem e a sua aplicação**.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Assim, é importante conhecer bem o material sendo soldado, o projeto da solda e da estrutura e os requerimentos de serviço (cargas, ambiente, etc.).

Baseado nestas suposições, é necessário, então, avaliar a própria junta soldada.

Idealmente uma junta deveria apresentar resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga e à corrosão ao longo da solda e similares às propriedades do material base.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Nos aços inoxidáveis a soldabilidade além de garantir resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga e à corrosão, deve produzir uma soldagem não prejudicando a integridade da região soldada.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Aços inoxidáveis são basicamente ligas FeCr e FeCrNi, contendo elementos tais como: C, N, Mo, Mn, Nb, Ti, etc. Sendo sua classificação baseada na sua microestrutura, resultante do balanço de elementos de liga e dos tratamentos térmicos aplicados, isto é:

Aços inoxidáveis Ferríticos

Aços Inoxidáveis Martensíticos

Aços Inoxidáveis Austeníticos

Aços Inoxidáveis Duplex e SuperDuplex

Aços Inoxidáveis especiais (super, precipitados, controlados, etc.)

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Os três processos mais utilizados para a soldagem dos aços inoxidáveis são: SMAW [ER], GTAW [TIG] e GMAW [MIGMAG], embora vários outros sejam utilizados, por ex: arco submerso, plasma, laser.

O processo com eletrodo revestido é utilizado em serviços em geral, particularmente no campo e em diferentes posições.

O processo TIG é bastante utilizado na soldagem de peças de aço inoxidável de pouca espessura, ou somente no passe de raiz.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

O processo MIGMAG é utilizado para juntas mais espessas, sendo um processo de maior produtividade. Transferência spray (com misturas $\text{Ar}2\%\text{O}_2$ ou $5\%\text{O}_2$) e por curto circuito (com misturas ArCO_2 e ArHeCO_2) podem ser usadas. Arames tubulares para a soldagem dos inoxidáveis também são utilizados.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Um aspecto fundamental na soldagem de aços inoxidáveis é a necessidade de limpeza de modo a minimizar contaminações que deteriorem a sua resistência à corrosão.

Cuidados com a forma do cordão também são muito importantes, uma vez que irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão.

Adicionalmente, as diferenças de propriedades físicas entre os aços ao carbono e os inoxidáveis, implicam em diferenças nos procedimentos de soldagem.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

As principais diferenças são:

- Menor temperatura de fusão;
- Menor condutividade térmica;
- Maior coeficiente de expansão térmica;
- Maior resistência elétrica.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Soldagem dos aços Inoxidáveis Austeníticos

Todos os aços austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos aços com adição de enxofre (usinagem).

Os aços austeníticos tem coeficiente de expansão térmica $>45\%$, maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços ferríticos, martensíticos e aos aços ao carbono.

Nos aços com teor de carbono superior a $0,06\%$, carbonetos podem ser precipitados com contornos de grão na ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Para chapas finas, dispositivos de fixação e um ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade.

Dependendo de sua composição química (maior quantidade de elementos gamagêneos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenitica.

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Para minimizar esses problemas recomenda-se soldar estes aços com uma maior velocidade de soldagem.

Devido à menor temperatura de fusão e sua menor condução de calor, a corrente de soldagem é usualmente menor que a utilizada nos aços ao carbono.

O maior coeficiente de expansão térmica torna maior a tendência à deformação na soldagem destes aços e levam à necessidade da adoção de técnicas para sua redução.

Principalmente na soldagem de materiais dissimilares – **aço inoxidável austenítico com aço ao carbono.**

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Nestas condições, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é minimizado pela reação de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítico na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente.

Nos casos em que a seleção de um consumível deste tipo não seja possível, eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser utilizados, junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda, isso leva em consideração a possível utilização de preaquecimento.

Soldagem dos aços inoxidáveis Ferríticos

Estes aços tem coeficiente de expansão térmica similar aos aços ao carbono, tendo, portanto, menor tendência à distorção.

Apresentam, contudo, sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão da região da solda devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira, à precipitação de carbonetos e nitretos e à formação de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita.

Estes problemas limitam, para a maioria dos aços ferríticos, a utilização da soldagem para aplicações de pequena responsabilidade. Nestes casos, para algumas aplicações, pode-se utilizar metal de adição austenítico para restringir estes problemas à ZTA da solda.

Soldagem dos aços inoxidáveis Ferríticos

Novos tipos de aços inoxidáveis ferríticos com extra baixo teor de elementos intersticiais ($C+N < 0,03\%$) e adições de Nb e/ou Ti (elementos que se ligam fortemente aos elementos intersticiais reduzindo a sua influência negativa durante a soldagem).

Estes aços apresentam um comportamento melhor para a soldagem e têm sido utilizados em aplicações que envolvem soldagem como em tubulações, trocadores de calor e sistemas de escapamento de automóveis.

Soldabilidade de aços Martensíticos

Aços inoxidáveis martensíticos de baixo teor de carbono podem ser soldados sem maiores problemas.

Aços com teor de carbono $> 0,15\%$ tendem a ser temperáveis ao ar e, assim, é necessário o uso de pré-aquecimento e, frequentemente, de pós-aquecimento para a sua soldagem. A temperatura varia usualmente entre 230 e 290°C.

O Pós- aquecimento deve ser feito imediatamente após a soldagem, entre 650 e 760°C, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente (pela presença de hidrogênio).

Quando o pré-aquecimento for impossível, metal de adição inoxidável austenítico pode ser usado.

Aços Inoxidáveis Duplex

Estes aços tendem a ser facilmente soldáveis desde que cuidados necessários sejam tomados.

Em particular, um resfriamento muito rápido potencializa a formação de um teor muito elevado de ferrita e a precipitação de nitretos de cromo na ZTA e ZF, o que prejudica a tenacidade e a resistência à corrosão da solda.

Por outro lado, um resfriamento muito lento e a manutenção por tempos longos a temperaturas entre cerca de 1000 e 600°C pode levar a precipitação de compostos intermetálicos que também prejudicam as propriedades mecânicas e químicas da solda.

Aços Inoxidáveis Duplex

Assim, o controle da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento é muito importante para estes materiais. Para reduzir a quantidade de ferrita na ZF, o uso de uma mistura Ar-N₂ como gás de proteção é comum.

Metal de adição de aço inoxidável (principalmente austenítico) é comumente usado na soldagem de outros tipos de aços, na união de aços inoxidáveis com outros aços e na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão ou contra diversos tipos de desgaste.

PREVISÃO DA ESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA

Para a previsão da microestrutura da solda e da possibilidade de ocorrência de problemas, diagramas constitucionais empíricos são muito utilizados.

Destes, o mais conhecido é o Diagrama de Schaeffler, existindo, contudo, diversos outros (Diagrama de DeLong, do WRC 1992, etc.).

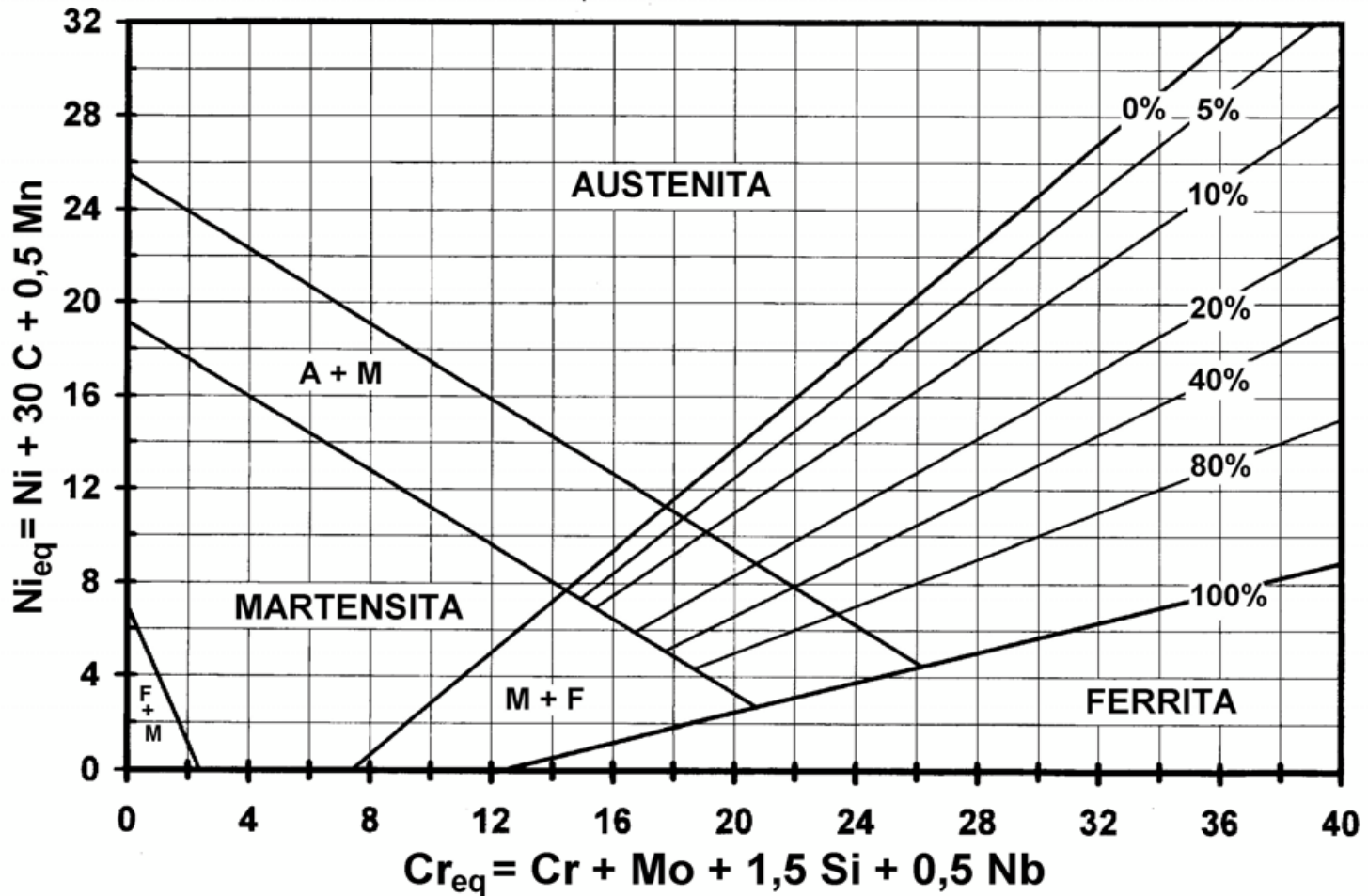
Estes diagramas permitem prever a microestrutura da solda a partir de sua composição química, expressa em termos de cromo equivalentes (**Creq**) e de níquel equivalente (**Nieq**).

PREVISÃO DA ESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5 Nb$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0,5 Mn$$

Diagrama de Schaeffler

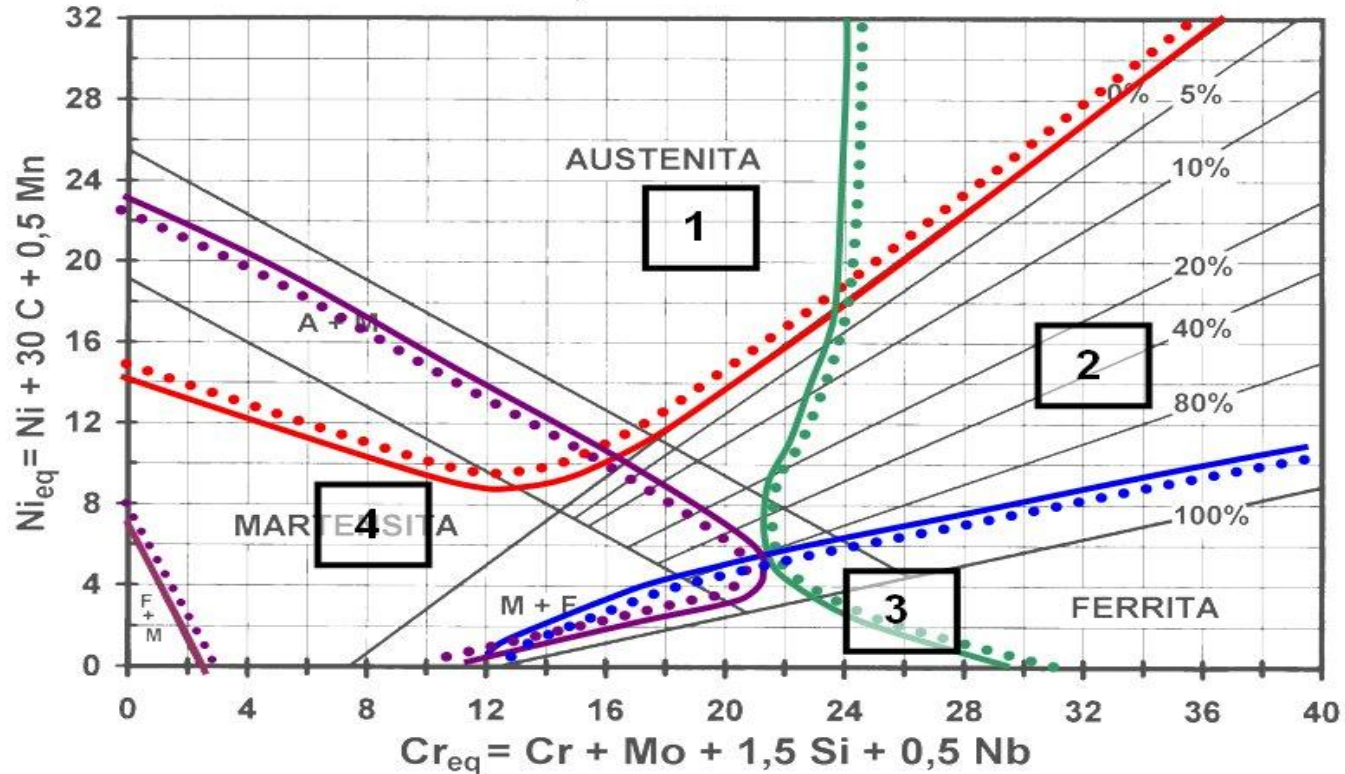


O diagrama de Schaeffler indica áreas típicas de problemas na soldagem de aços inoxidáveis.

De forma resumida, estes problemas são:



Diagrama de Schaeffler

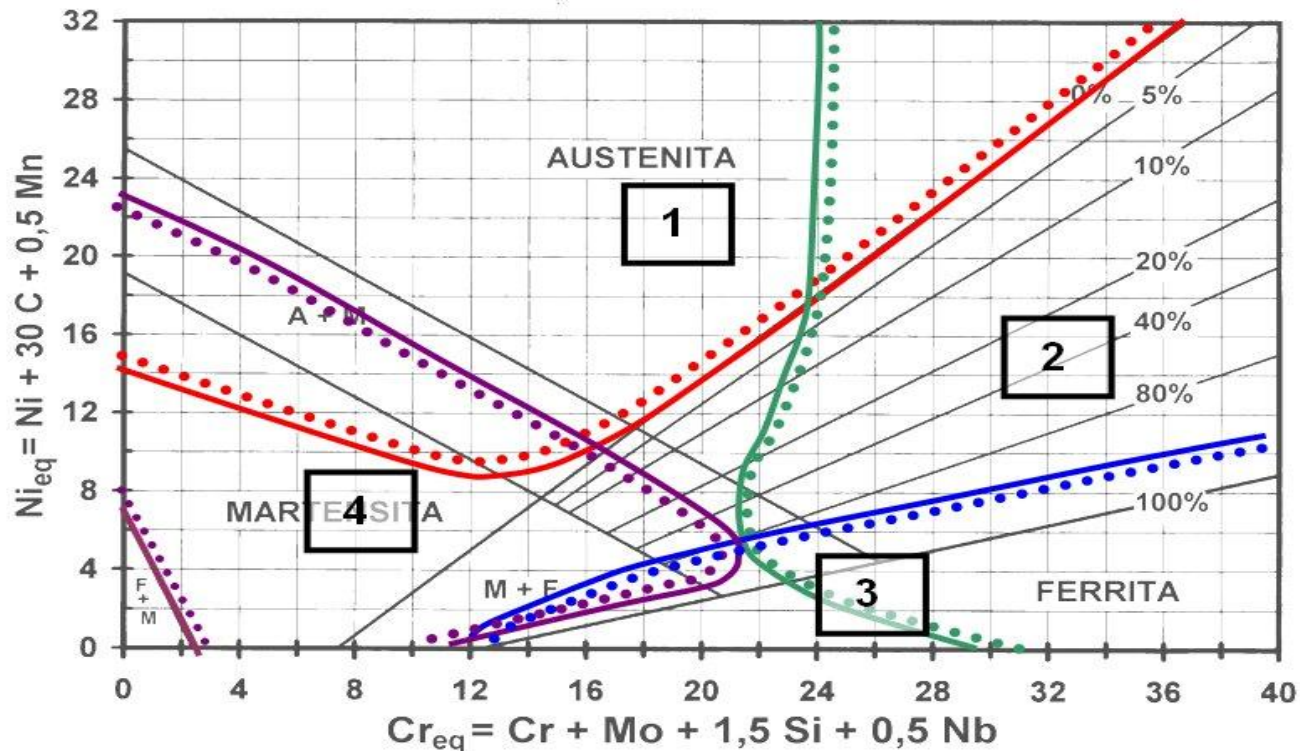


- (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C;
- (2) Fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C;
- (3) Fragilização por crescimento de grão; e
- (4) Fragilização e fissuração por formação de martensita.

Diagrama de Schaeffler

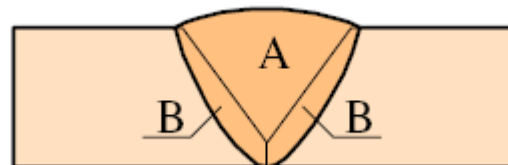
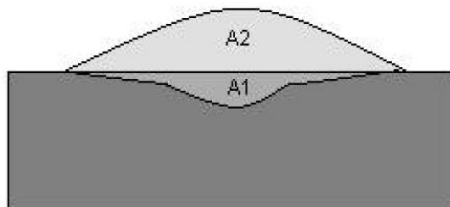
Pode-se observar, na parte central, na região de coexistência da ferrita e austenita, uma pequena área triangular que não é atingida por nenhum dos problemas indicados.

De uma forma geral, os consumíveis de aço inoxidáveis austeníticos são projetados para, após **diluição** com o metal base, fornecer uma solda cuja composição química caia nesta região.



Diluição na Soldagem

Processo	Diluição [%]	Observações
Brasagem	0	Neste processo não funde o metal de base
Oxigas	1-5	Com material de aporte
Eletroescória	5	
Eletrodo revestido	30	Primeira passada em junta a topo com chanfro
Eletrodo revestido	10-20	Passadas seguintes
Arco submerso	60	
Resistência	100	Não tem material de aporte
MIG	20-40	
TIG	20-30	



$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2}$$

Diagrama de Schaeffler

Como um exemplo, suponha-se que um aço inoxidável ferrítico ABNT430 (0,03%C, 0,9%Mn, 0,4%Si e 17,3%Cr) tenha sido soldado com um eletrodo AWS E309 (0,06%C, 0,7%Mn, 0,7%Si, 22,1%Cr e 12,5%Ni). Os valores dos equivalentes de Cr e Ni seriam:

Metal base: $C_{req} = 17,9$ e $Ni_{eq} = 1,4$

Metal de adição: $C_{req} = 23,2$ e $Ni_{eq} = 14,7$

A seguinte figura mostra, no diagrama, os pontos deste exemplo correspondentes ao metal base, metal de adição e ao metal de solda para uma diluição de 30%. Neste caso, a solda teria cerca de 15% de ferrita δ em sua estrutura.

Diagrama de Schaeffler

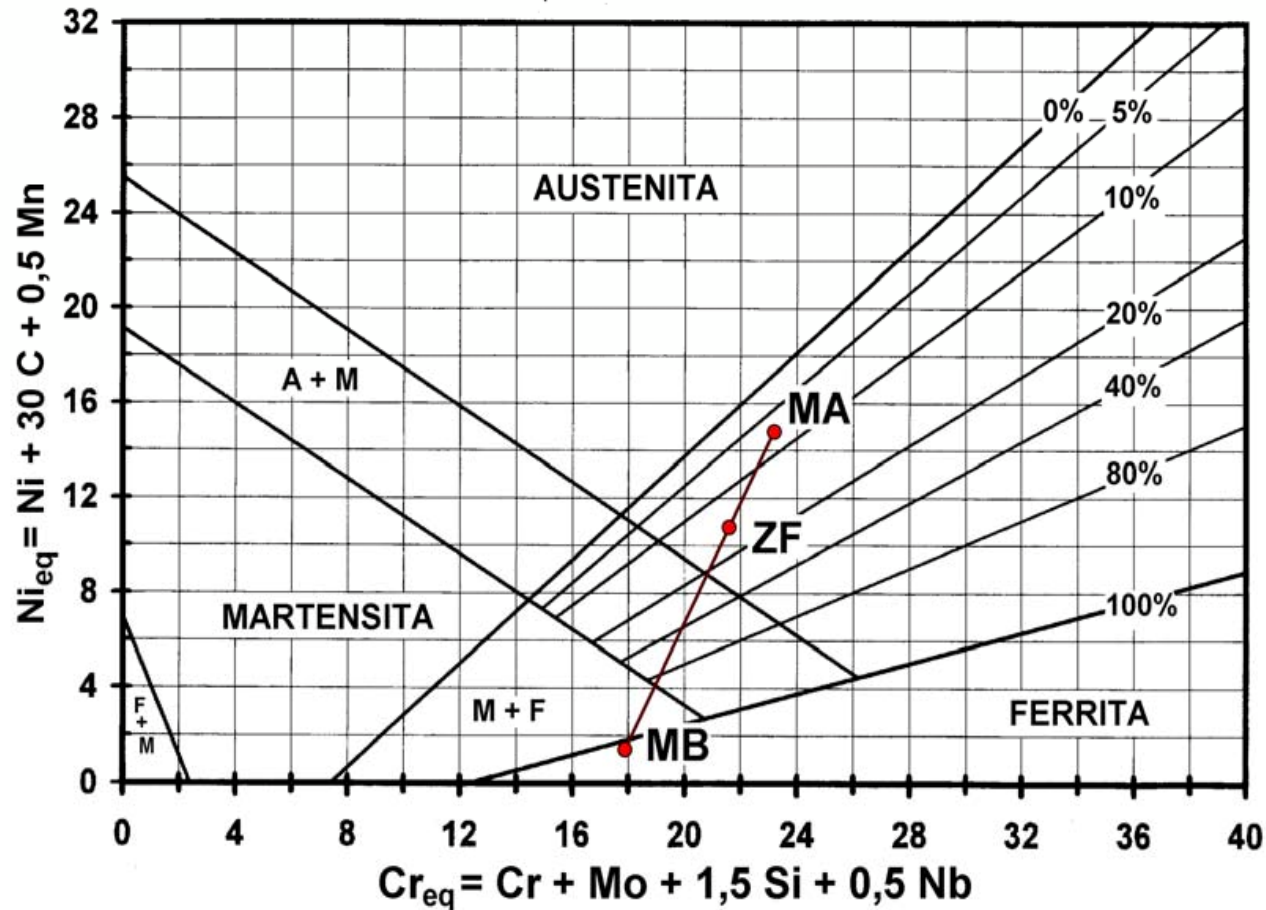
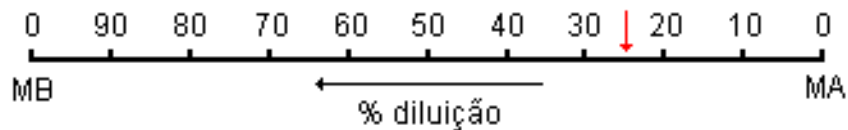


Diagrama de Schaeffler mostrando os pontos correspondentes ao metal base (MB), metal de adição (MA) e a solda (ZF) para uma diluição de 30%.



Diagramas

Como a composição química tem uma grande influência na microestrutura da solda, foram desenvolvidas várias relações empíricas e diagramas que preveem a microestrutura a ser formada.

Autor	Ano	Cromo equivalente [%]	Níquel Equivalente [%]
Schaeffler	1949	$\text{Cr} + \text{Mo} + 1,5\text{Si} + 0,5 \text{ Nb}$	$\text{Ni} + 0,5\text{Mn} +$
DeLong <i>et al.</i>	1956	$\text{Cr} + \text{Mo} + 1,5\text{Si} + 0,5 \text{ Nb}$	$\text{Ni} + 0,5\text{Mn} + + 30\text{N}$
Hull	1973	$\text{Cr} + 1,21\text{Mo} + 0,48\text{Si} + 0,14\text{Nb} + 2,27\text{V} + 0,72\text{W} + 2,20\text{Ti} + 0,21\text{Ta} + 2,48\text{Al}$	$\text{Ni} + (0,11\text{Mn} - 0,0086\text{Mn}^2) + 14,2\text{N} + 0,41\text{Co} + 0,44\text{Cu}$
Hammar e Svensson	1979	$\text{Cr} + 1,37\text{Mo} + 1,5\text{Si} + 2\text{Nb} + 3\text{Ti}$	$\text{Ni} + 0,31\text{Mn} + + 14,2\text{N} + \text{Cu}$
Siewert <i>et al.</i> WRC	1992	$\text{Cr} + \text{Mo} + 0,7\text{Nb}$	$\text{Ni} + + 20\text{N} + 0,25\text{Cu}$

De tal forma o conhecimento da quantidade de Creq e de Níeq é necessário para se prever as fases presentes.

Presença de nitrogênio na soldagem

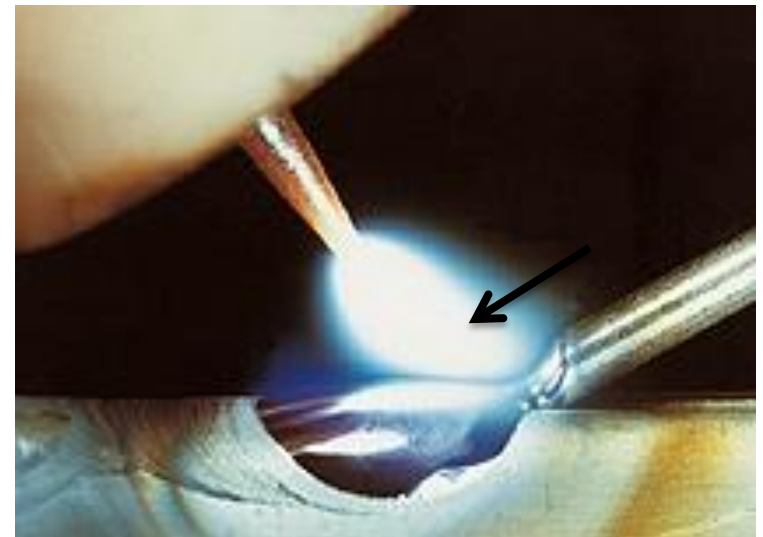
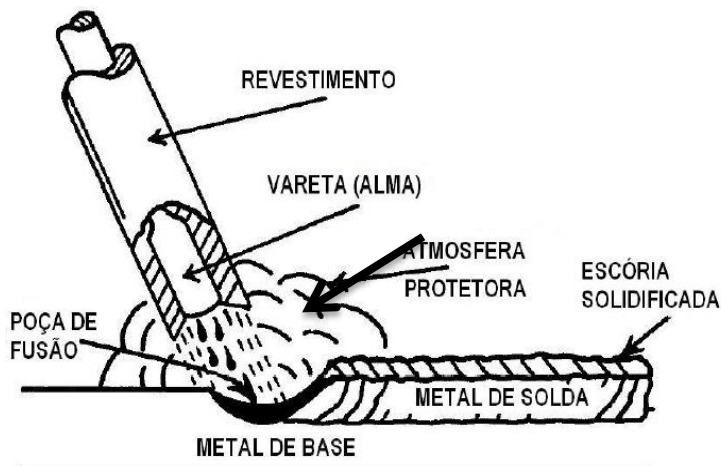
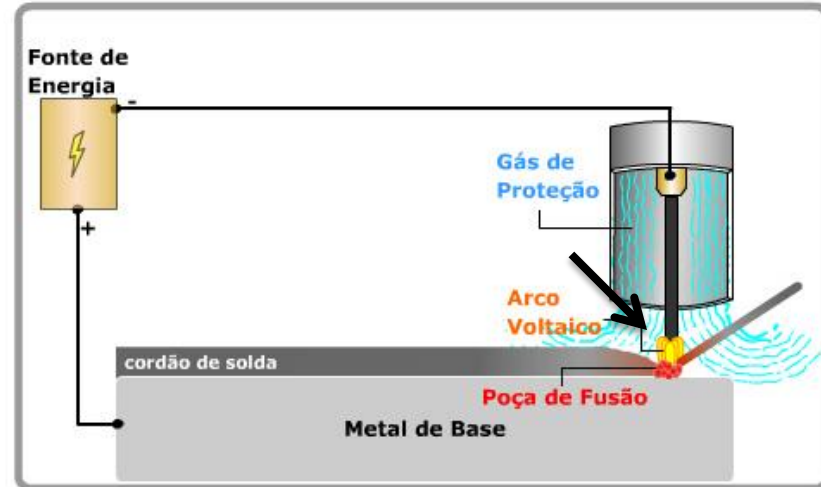
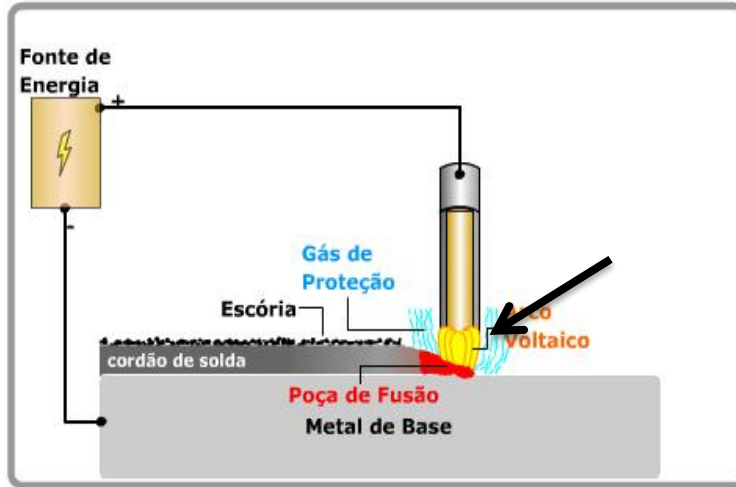
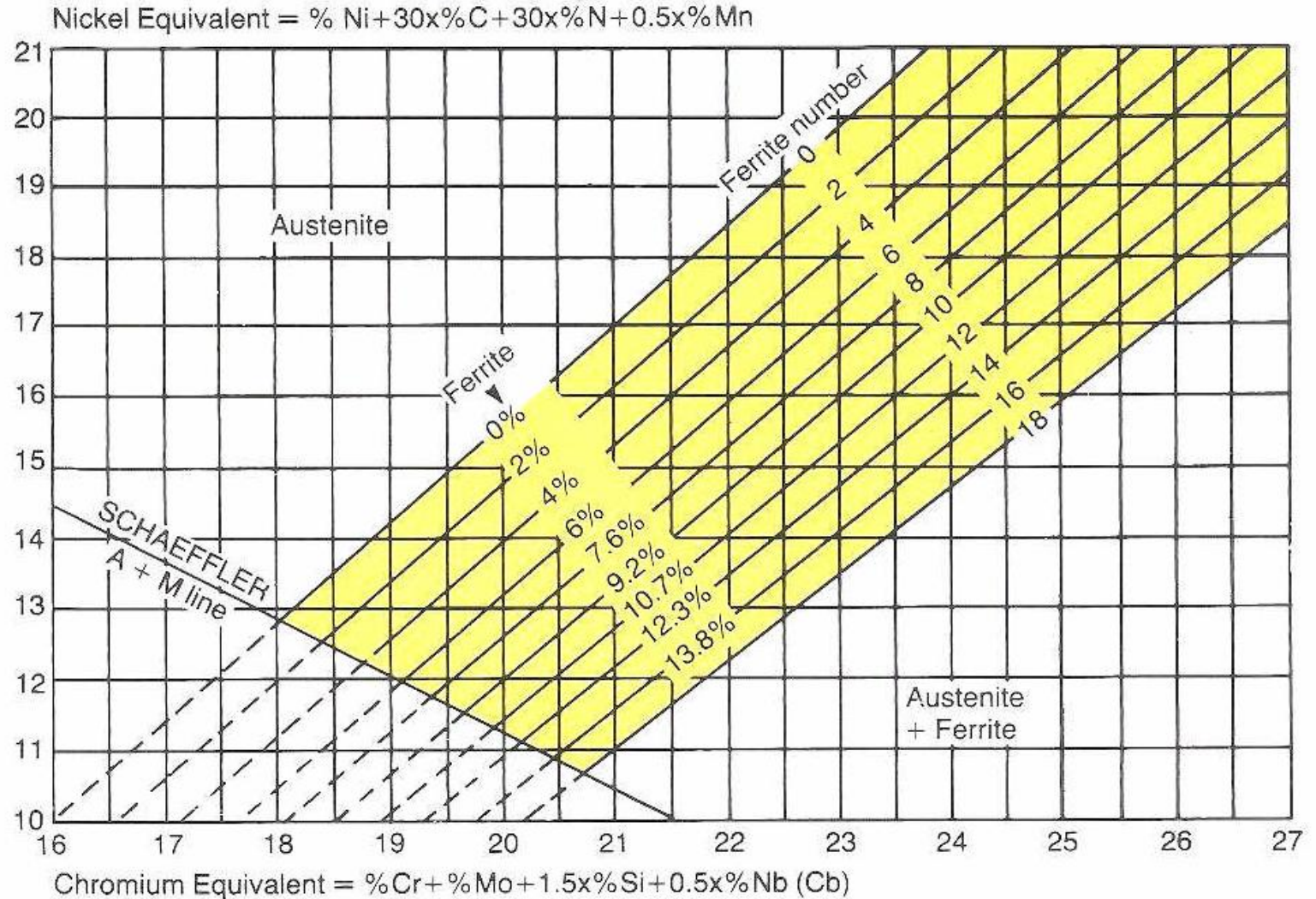


Diagrama de DeLong



Diagramas

Uma outra relação entre o comportamento de solidificação e o fator de composição, em termos de Cr_{eq}/Ni_{eq} , foi estabelecido por **Suutala e Moio** utilizando os seguintes coeficientes:

$$Ni_{eq} = Ni + 0,3Mn + 22C + 14,2N + Cu; e$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1,37Mo + 1,5Si + 2Nb + 3Ti.$$

Diagrama WRC-1992

Permite prever a estrutura da poça de solidificação que utiliza os cálculos de Cr_{eq} e Ni_{eq} .

Ainda neste diagrama observa-se 4 formas de solidificação:

A = austenita como fase primária e monofásica,

F= ferrita como fase primária e monofásica, AF= Austenita primária e um eutético de austenita e ferrita no espaço interdendrítico,

FA= Ferrita primária e um eutético de austenita e ferrita no espaço interdendrítico.

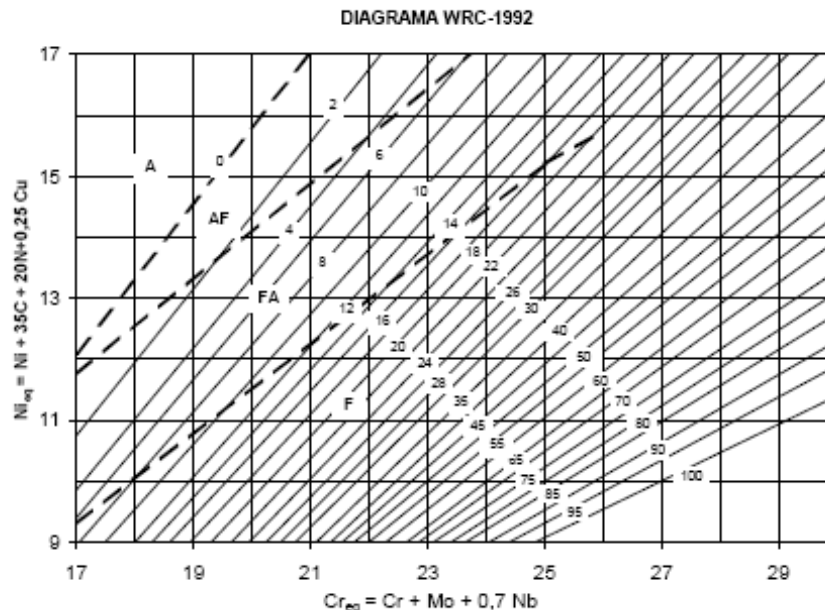
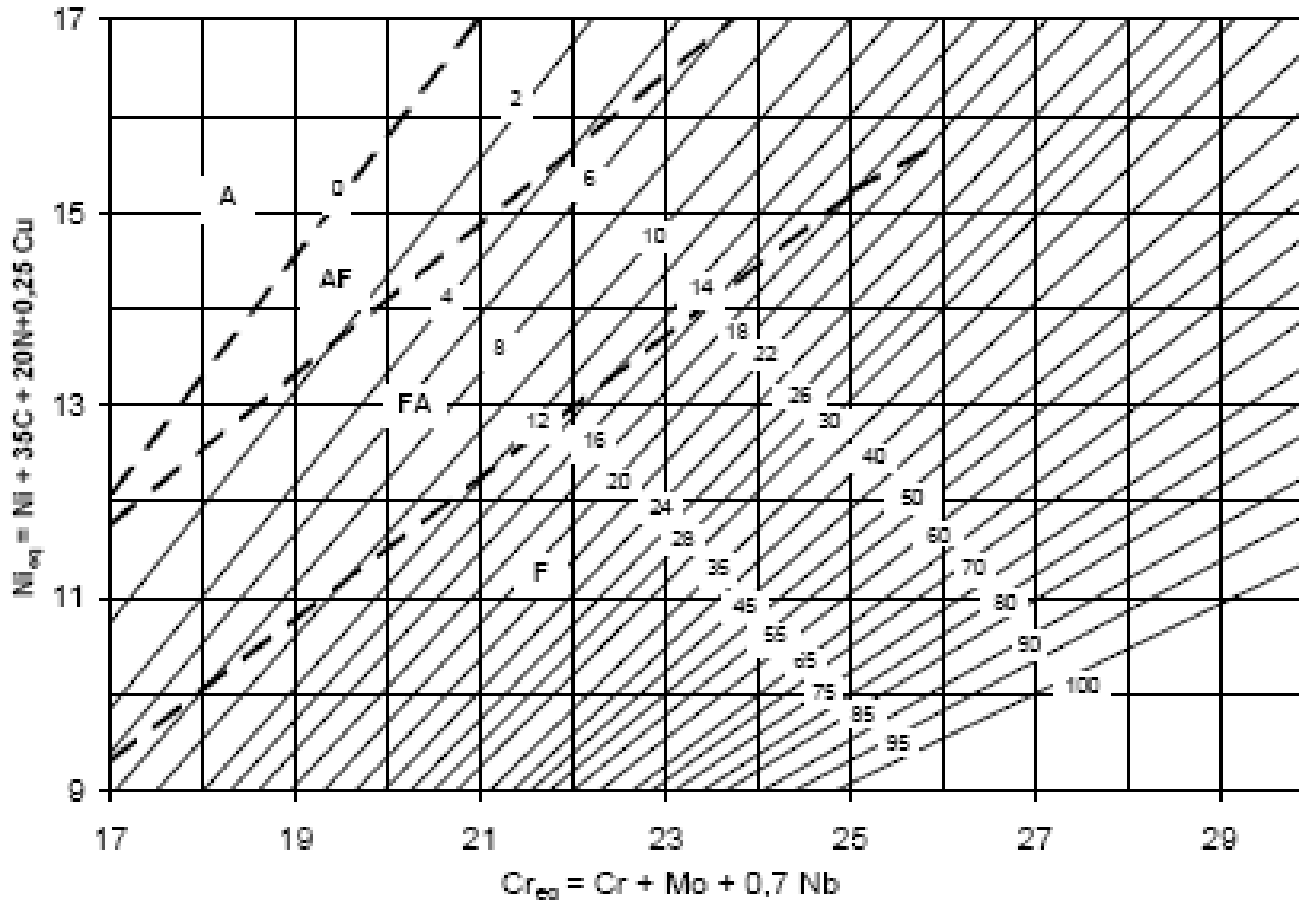


Diagrama WRC-1992

DIAGRAMA WRC-1992



$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7 Nb$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0,25 Cu$$

Diagrama WRC-1992

Finalmente, o efeito do cobalto não é considerado pelos diagramas de Schaeffler e WRC.

No entanto o cobalto é um importante elemento para a resistência à cavitação. Assim desenvolveu-se, a partir do diagrama de Schaeffler, o diagrama de Hull que inclui o cobalto e o manganês.

$$\mathbf{Nieq} = \mathbf{Ni} + (0,11\mathbf{Mn} - 0,0086\mathbf{Mn}^2) + + 14,2\mathbf{N} + 0,41\mathbf{Co} + 0,44\mathbf{Cu}$$

$$\mathbf{Creq} = \mathbf{Cr} + 1,21\mathbf{Mo} + 0,48\mathbf{Si} + 0,14\mathbf{Nb} + 2,27\mathbf{V} + 0,72\mathbf{W} + 2,20\mathbf{Ti} + 0,21\mathbf{Ta} + 2,48\mathbf{Al}$$

Diagrama de Balmforth

Diagrama desenvolvido por Balmforth representa um incremento significativo na previsão da % de ferrita dos aços inoxidáveis martensíticos

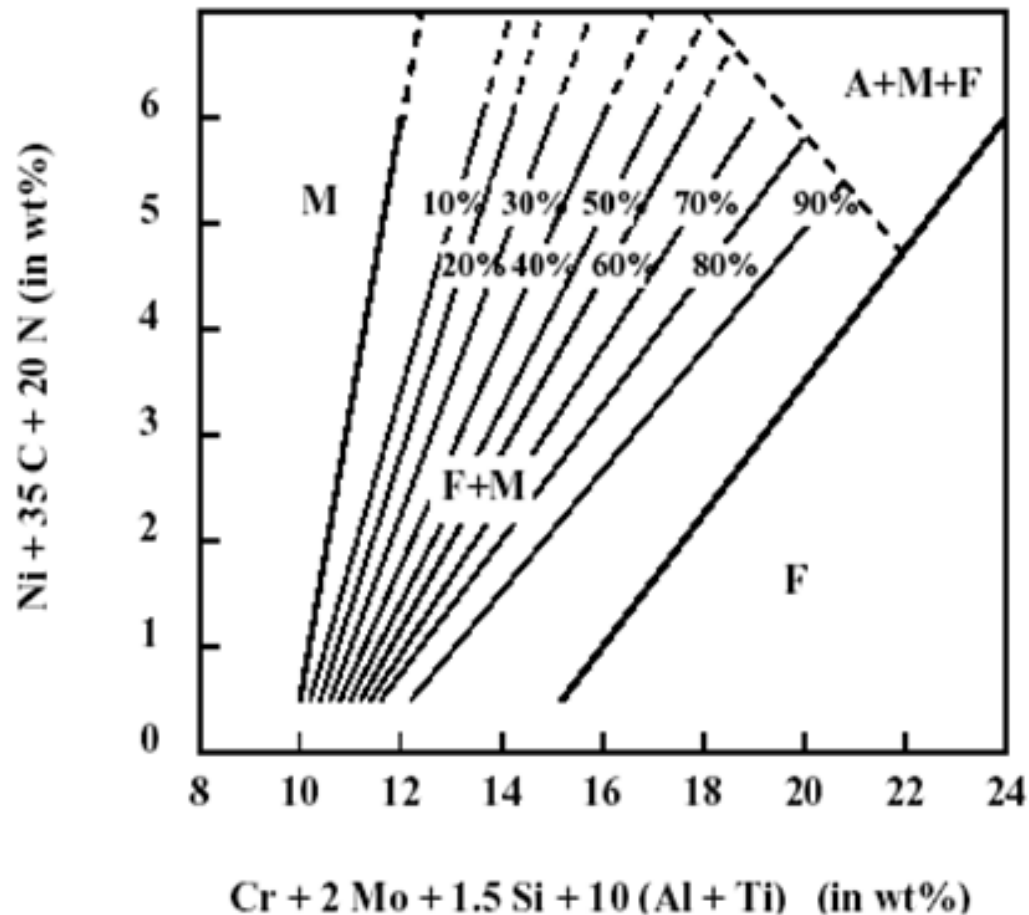
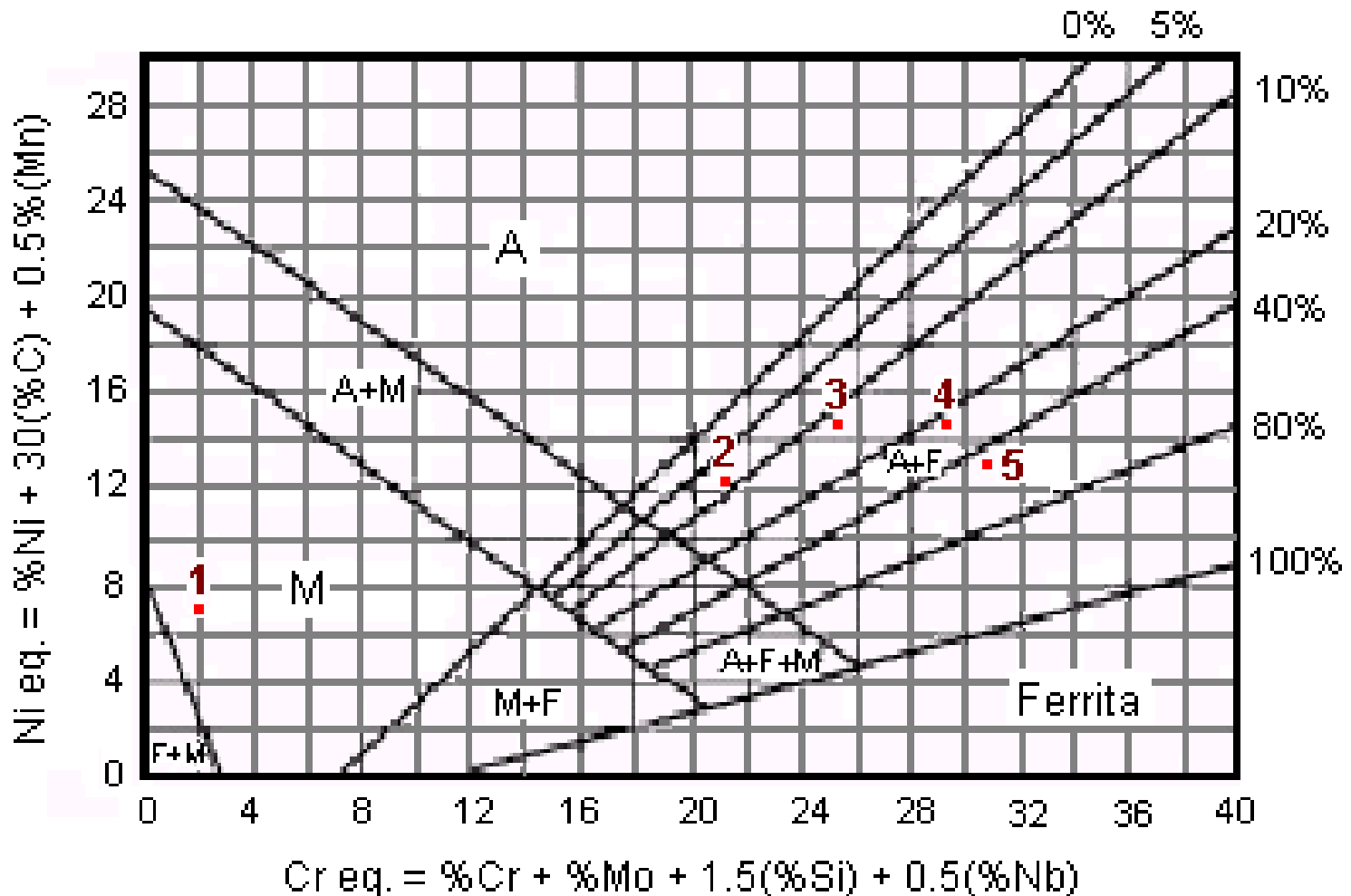


Diagrama de Schaeffler



aplicativo.EXE



Bibliografia Consultada

- [1] Márcio de Almeida Ramos, “Metalurgia”, Edição da PETROBRAS
- [2] Paulo J. Modenesi, Soldabilidade de algumas ligas metálicas Modenesi. UFMG. 2008
- [3] ACESITA - Aços inoxidáveis: Dicas de Soldagem. Boletim N6, 1999.
- [4] Paredes, R. S. C. Aços Inoxidáveis – Metalurgia e Soldabilidade. UFPR, 2011.
- [5] Apostila Tensões Residuais em soldagem – curso de formação de Eng. Inspeção PETROBRAS
- [6] Tarcísio Reis de Oliveira. Curso de Especialização em Soldagem – UFU – 2012
- [7] Folkhard E. Welding Metallurgy os Stainless Steels. N.Y , 1994.
- [8] Pedro Silva Teles, “Tubulações Industriais” - Materiais, projeto e desenho”
- [9] R. Columbier e J. Hochmann, “Aceros Inoxidables Aceros Refractarios”, Ediciones Urmo / Bilbao
- [10] ESAB Apostila Eletrodos Inoxidaveis – www.esab.com
- [11] A. F. Padilha, “Aços Inoxidáveis Austeníticos”, Ed. Hemus, 1994