

**PMT2512 - Laboratório de Termodinâmica Computacional - Exercício 3**  
Tecnologia dos Aços Inoxidáveis - Diagrama de Schaeffler

Uma ferramenta útil para a compreensão da tecnologia dos aços inoxidáveis é o **Diagrama de Schaeffler**. Trata-se de um gráfico que relaciona duas variáveis, conhecidas como **romo equivalente**,  $Cr_{eq}$ , e **níquel equivalente**,  $Ni_{eq}$  com a microestrutura esperada para o aço na temperatura ambiente. Essas variáveis são definidas por:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb \quad (1)$$

e

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0,5Mn \quad (2)$$

Os diagramas de Schaeffer são úteis na tecnologia da soldagem, permitindo, por exemplo, prever as microestruturas que serão obtidas em uma junta em função da composição do metal de base e do metal de adição.

Para compreender o diagrama de Schaeffer, vamos usar o sistema Fe - Cr - Ni.

O cálculo básico é idêntico ao caso do sistema Fe - Cr - C, que estudamos no exercício 2. Iremos prosseguir o cálculo, substituindo o comando:

```
TDB_SSOL: def-sys fe cr ni<enter>
FE                CR                NI
DEFINED
TDB_SSOL: get<enter>
```

Como não conhecemos o sistema, o melhor é não rejeitar nenhuma fase, portanto usamos o comando "GET" diretamente.

Prosseguimos ao módulo POLY-3 e procedemos ao cálculo da seção isotérmica a 900°C. Essa é aproximadamente a temperatura final de conformação desses aços e define a microestrutura do material como laminado.

O resultado está na Figura 1.

A interpretação desse diagrama pode ser feita incluindo a legenda, o resultado está na Figura 2.

Vemos que o diagrama é dominado por equilíbrios envolvendo a fase ferrita (BCC) e austenita, exceto na região em que a fase SIGMA se torna estável. Esse intermetálico é comumente observada em aços inoxidáveis. Ele é considerado deletério para a ductilidade do material.

Aços inoxidáveis possuem limites razoavelmente estritos de composição. Teores de cromo são observados entre 12%Cr e 30%Cr e os de níquel atingem até 30%Ni. Vamos então redesenhar o diagrama em uma escala mais propícia (Figura 3).

A Figura 4 apresenta o diagrama clássico de Schaeffer. Vemos que parte desse diagrama praticamente coincide com as fronteiras dos campos da ferrita, da austenita e o campo bifásico.

Naturalmente os campos referentes à martensita não podem ser compreendidos apenas com a seção a 900°C. Precisamos imaginar o que é necessário para se ter martensita em um aço. Na verdade, necessitamos de duas coisas:

1. Uma fase austenita estável em alta temperatura e
2. Uma fase ferrita estável em baixa temperatura

THERMO-CALC (\*\*.03.28:08.45) :PMT2512 - Exercício 3 - Fe-Cr-Ni (1173K)

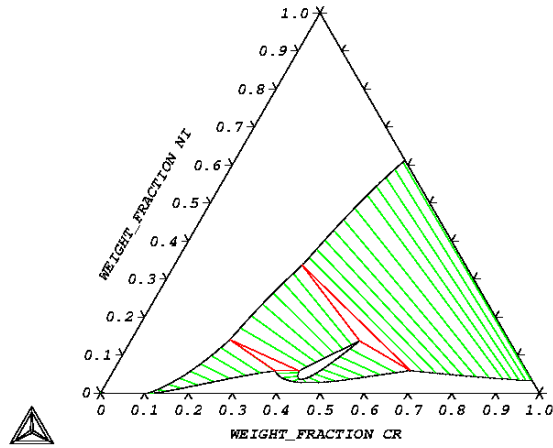


Figure 1: Seção isotérmica a 900°C do sistema Fe - Cr - Ni.

THERMO-CALC (\*\*.03.28:08.45) :PMT2512 - Exercício 3 - Fe-Cr-Ni (1173K)

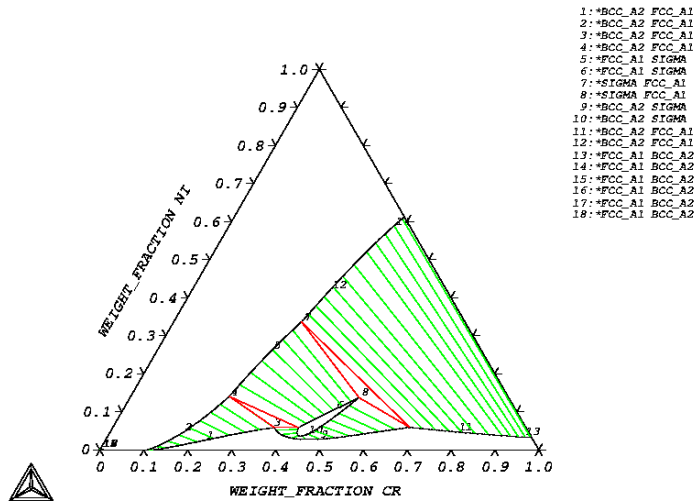


Figure 2: Seção isotérmica a 900°C do sistema Fe - Cr - Ni, incluindo a legenda.

THERMO-CALC (\*\*.03.28:08.49) :PMT2512 - Exercício 3 - Fe-Cr-Ni (1173K)

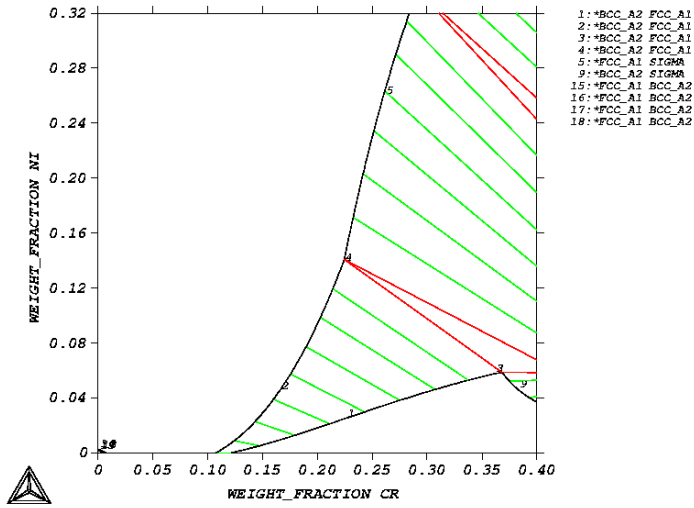


Figure 3: Seção isotérmica a 900°C do sistema Fe - Cr - Ni, em uma escala mais restrita.

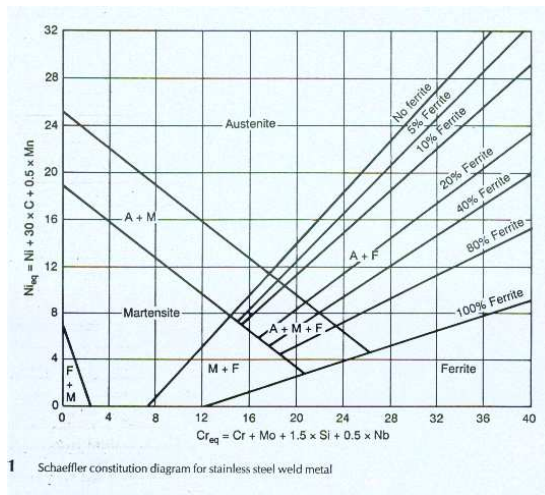
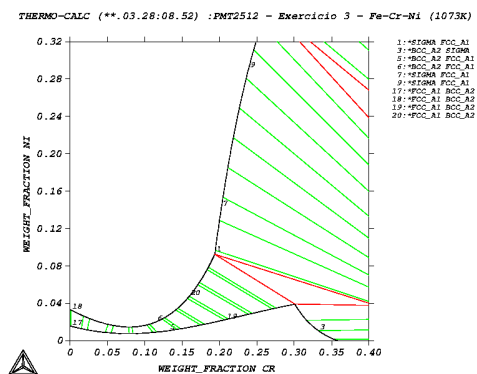


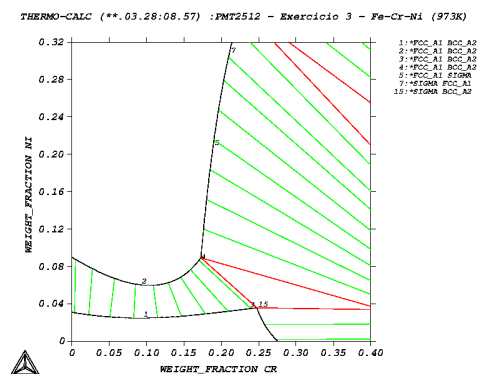
Figure 4: Diagrama de Schaeffer.

Para isso vamos ver o que ocorre com esses equilíbrios quando a temperatura é reduzida.

A Figura 5 mostram a mesma região do diagrama de fases do sistema Fe - Cr - Ni a 800°C e a 700°C. Vemos que a região de estabilidade da ferrita se torna cada vez maior na região pobre em cromo e níquel.



(a)



(b)

Figure 5: Seção isotérmica do sistema Fe - Cr - Ni, a 800°C (a) e a 700°C (b).

Dois problemas típicos da tecnologia dos aços inoxidáveis são a precipitação de fase  $\sigma$  (SIGMA) e a fragilização de 475°C.

Como discutido anteriormente, a fase  $\sigma$  é considerada deletéria para a ductilidade dos aços. Nas temperaturas que já estudamos vimos que essa fase se torna estável a cada vez menores concentração de cromo e níquel. O processo se intensifica a temperaturas menores, como mostra a Figura 6. Nessa seção isotérmica a 500°C observa-se que a fronteira da região de duas fases  $\alpha + \sigma$  está a aproximadamente 17%Cr, o que já é comum de uma série de composições comerciais. Normalmente aços inoxidáveis não são desenhados para operar a temperaturas tão altas, mas na zona afetada pelo calor (ZAC) de soldas isso é inevitável. Por sorte a precipitação

de  $\sigma$  é muito lenta.

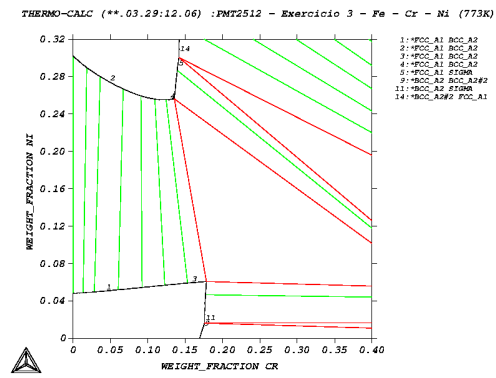


Figure 6: Seção isotérmica do sistema Fe - Cr - Ni, a 500°C.