

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MICROESTRUTURA DE SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS POR MEIO DE PLANILHA DO “Microsoft Excel 2010®” - SOLDINOX

Eraldo Guedes<sup>1</sup>  
Ramón Sigifredo Cortés Paredes<sup>2</sup>

## Resumo

O presente estudo consiste na proposição de uma ferramenta de interface amigável com o usuário que possibilite a simulação ou previsão computacional da microestrutura de soldagem, em especial de aços-liga e inoxidáveis, bem como características da zona termicamente afetada (ZTA). A base computacional escolhida foi o programa *Microsoft Excel 2010*® por se tratar de um programa largamente difundido nos computadores em escala mundial, cujo formato pode ser facilmente convertido para *software* livre. A microestrutura da poça de soldagem é baseada nos estudos de Schäffler, DeLong, WRC e Balmforth. Já a ZTA é caracterizada com base na Equação de Adams.

**Palavras-chave:** Soldagem, Aço inoxidável, Aços-liga, Caracterização microestrutural, Excel.

## COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE WELDING MICROSTRUCTURE OF STAINLESS STEELS AIDED BY “Microsoft Excel 2010®” SPREADSHEET - SOLDINOX

## Abstract

The present study consists in the proposition of an easy-to-use user interface tool that allows the computational simulation or prediction of the welding microstructure, especially alloy and stainless steels, as well as characteristics of the heat-affected zone (HAZ). The computational base chosen was the *Microsoft Excel 2010*® program because it is a widely used software on the worldwide scale, whose format can be easily converted to free software. The microstructure of the weld well is based on the studies of Schäffler, DeLong, WRC and Balmforth. Already the HAZ is characterized based on the Adams Equation.

**Key words:** Welding, Stainless steel, Alloy steels, Microstructural characterization, Excel.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFPR. Bloco IV do Setor de Tecnologia – Centro Politécnico (Campus III) Bairro Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil. E mail: [eraldo@ufpr.br](mailto:eraldo@ufpr.br)

<sup>2</sup> Doutor Engenheiro, DEMEC/UFPR. Bloco IV do Setor de Tecnologia – Centro Politécnico (Campus III) Bairro Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil. E mail: [ramon@ufpr.br](mailto:ramon@ufpr.br)

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de aços inoxidáveis em soluções comerciais, industriais, decorativas e artísticas parece não reconhecer um limite em sua aplicação. Suas propriedades de resistência à corrosão, assepsia e estética garantem vantagens quase sempre imbatíveis, levando-se em conta a relação custo/benefício. A robustez e beleza dos produtos acabados esconde uma das reais razões de existir dos profissionais de Engenharia: a necessidade de atingir objetivos práticos com eficácia, responsabilidade sócio-ambiental e, sobretudo, a satisfação do cliente final. Todos estes aspectos passam pela necessidade de se evitar problemas relacionados à qualidade dos materiais envolvidos, que podem causar acidentes, retrabalhos, prejuízos, entre outros<sup>3</sup>.

A união soldada é, de longe, a forma mais adequada de junção e fabricação de máquinas, equipamentos, utensílios e objetos em aços inoxidáveis, seja pela continuidade, resistência, vedação, ou ainda, pelo excelente acabamento resultante<sup>4</sup>. Todavia, por se tratar de um processo que envolve fusão de metais, geralmente em condições de elevadas taxas de aquecimento e resfriamento, com serviços realizados com frequência fora de ambientes protegidos e controlados, tais como unidades industriais a céu aberto, dutos de petróleo e gás em regiões remotas, ou ainda sob massas d'água, é comum a ocorrência de defeitos e falhas relacionadas ao processo, bem como com os elementos químicos constituintes dos metais envolvidos. As falhas mais graves envolvem as trincas a quente, que surgem durante ou logo após o processo de soldagem, trincas a frio, que ocorrem de médio a longo prazo, que podem gerar incidentes catastróficos como explosões, vazamentos, contaminações e demais acidentes<sup>1-3</sup>.

Com base em diversos estudos<sup>1</sup>, descobriu-se que a microestrutura final, principal responsável pela ocorrência das falhas, é dependente do teor dos elementos de liga envolvidos. Observou-se empiricamente que o níquel induz à solidificação na forma austenítica (CFC), enquanto que o cromo favorece a ferrita (CCC). Notou-se, também, que os demais elementos de liga mais comuns tendem a se enquadrar nestas duas formas de influência na estrutura final, favorecendo uma ou outra microestrutura, em maior ou menor grau. Com base nisso, se tornou possível correlacionar a composição química do metal (ou metais) de base, bem como dos consumíveis, à microestrutura final, com base no par ordenado Cromo-equivalente ( $Cr_{eq}$ ) e Níquel-equivalente ( $Ni_{eq}$ ). A partir de então, tais estudos deram origem aos diagramas de Schöffler, DeLong, WRC e Balmforth.

Outra fonte frequente de falhas em uniões soldadas é a região adjacente à linha de soldagem que atinge temperaturas insuficientes à fusão, mas que é sujeita a transformações metalúrgicas preliminares que podem comprometer a microestrutura de forma perniciosa, tanto quanto na zona fundida. Tal região é comumente chamada de Zona Termicamente Afetada (ZTA), e sua microestrutura é dependente da temperatura atingida durante o processo de solda. Esta temperatura pode ser estimada mediante modelos matemáticos. Dentre diversos modelos disponíveis,

aquele proposto por Adams de distribuição bidimensional do calor no processo de soldagem, é o mais disseminado devido à sua simplicidade e razoável aplicabilidade, e será aplicado na solução proposta.

Os cálculos relacionados a esses diagramas costumam ser trabalhosos, com regras de ponderação binária ou terciária em gráficos de dispersão bidimensionais, cuja execução pode ser demorada ou dispendiosa na maioria dos casos. O presente estudo objetiva simplificar os cálculos de cromo-equivalente e níquel-equivalente, bem como a posição da temperatura máxima de Adams, de maneira visual e didática, para auxílio na aprendizagem do assunto abordado, e auxiliando no processo de tomada de decisão no ramo da soldagem.

## 2 METODOLOGIA

O SOLDINOX, nome adotado pelos autores do presente artigo para denominar uma planilha do Excel<sup>®</sup> especialmente desenvolvida, é uma ferramenta matemática de simulação de soldas em ligas ferrosas em geral. Seu objetivo é prever a microestrutura final da poça de fusão, bem como estimar a dimensão e características da ZTA (zona termicamente afetada).

A planilha é um formato de arquivo bastante disseminado nos meios acadêmico e profissional que permite a automatização de cálculos, apresentando resultados em questão de minutos que, de outra forma, poderiam levar horas ou dias. Através de fórmulas e algoritmos internos ao programa, é possível estruturar diagramas e tabelas de forma a efetuar cálculos em diversas aplicações, seja na Engenharia ou demais ramos que envolvam cálculos computacionais complexos.

A planilha foi desenvolvida de forma a facilitar a interação com o usuário, simulando um formato de *website* dividido em várias abas, que serão detalhadas a seguir. Por motivo de clareza, as imagens pertinentes a cada aba estarão na seção de resultados e discussão, no item 3.2, onde poderão ser melhor compreendidas.

### 2.1 ABAS DO SOLDINOX

CAPA - Tela inicial do Soldinox. Possui uma imagem temática relacionada ao ramo da soldagem, e *hiperlinks* que permitem a navegação entre as demais abas. Cada uma das outras abas possui um *hiperlink* para retornar à aba CAPA;

GLOSSÁRIO - Aba que contém os termos e definições contidas nas demais abas. Pode ser definido como o manual de instruções do SOLDINOX;

ENTRADA - Interface de interação inicial entre o usuário e o SOLDINOX, onde são informados os dados referentes aos materiais e consumíveis de solda - especificações e composição química pertinente - bem como os parâmetros de solda a serem aplicados. Há espaço para a inclusão de 5 (cinco) materiais diferentes

entre metais-base e consumíveis. Por exemplo, para uma soldagem dissimilar, onde duas ligas diferentes devam ser unidas, há possibilidade de simular ou mesclar até 3 (três) consumíveis diferentes.

Estas informações são utilizadas nas outras abas, para a previsão da microestrutura de acordo com a situação. Os parâmetros de soldagem apresentarão o resultado na própria aba ENTRADA, que é a posição da temperatura de interesse (temperatura máxima -  $T_p$ ) no momento da soldagem. Esta posição é capaz de estimar uma possível origem de defeitos de microestrutura na ZTA, mediante a aplicação da equação de Adams<sup>1-2</sup>:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13 \rho C t y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (1)$$

Sendo:

$T_p$  = Temperatura máxima (°C) a uma distância  $y$ (mm) a partir da linha de fusão.  
 $T_0$  = Temperatura inicial da chapa (°C)  
 $T_m$  = Temperatura de fusão (°C) – especificamente a temperatura LÍQUIDUS de metal a ser soldado.

$H_{net}$  = Energia líquida adicionada

$$H_{net} = \frac{fEI}{v} \left\{ \begin{array}{l} f = \text{eficiência na transferência de calor} \\ E = \text{tensão de soldagem (v olts)} \\ I = \text{corrente de soldagem (ampére)} \\ v = \text{velocidade de soldagem (mm/seg)} \end{array} \right.$$

$\rho$  = Densidade do material (g/mm<sup>3</sup>)  
 $C$  = Calor específico do metal (J/g.°C)  
 $t$  = espessura da chapa em (mm)

A equação (1) pode ser usada para:

1. Determinação da temperatura máxima em pontos específicos da ZTA.
2. Estimar a largura da ZTA.
3. Estimar o efeito pré-aquecimento na largura da ZTA.
4. Estimar o efeito energia adicionada sobre a largura da ZTA.

Todos os campos com fundo amarelo são editáveis.

As demais abas possuem como característica comum o carregamento das composições químicas de todos os metais-base e consumíveis dispostos na ENTRADA nas linhas 1 a 5, que podem ser livremente escolhidos na coluna ESPECIFICAÇÃO, bem como permite a composição ponderada de dois ou três materiais/consumíveis, nas linhas 6 a 10.

Tal ponderação é possibilitada pela diluição mediante o uso da coluna "TEOR (%)". Todos os campos com fundo azul são editáveis;

SCHÄFFLER<sup>1</sup> - A primeira equação, elaborada em 1949, para os valores de cromo equivalente e níquel equivalente obtidos da seguinte forma:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5*Si + 0,5*#, \text{ (onde “\#” pode ser nióbio, titânio, etc.)}$$

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

## Diagrama de Schaeffler

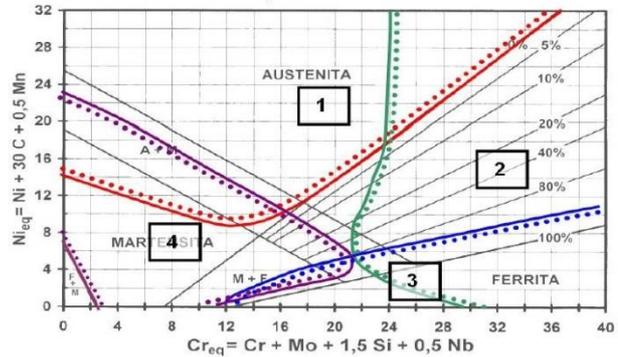


Figura 1 - Diagrama de Schaeffler<sup>1</sup>

Regiões do gráfico:

- 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;
- 4) Fragilização e fissuração por formação de martensita.

Pode-se observar, na parte central, na região de coexistência de ferrita e austenita, uma pequena área triangular que não é atingida por nenhum dos problemas indicados. De uma forma geral, os consumíveis de aços inoxidáveis austeníticos são projetados para, após diluição com o metal-base, fornecer uma solda cuja composição química resulte nessa região;

DELONG<sup>1</sup> - Em 1974, foi percebido que a presença de nitrogênio na solda, seja por contaminação nos materiais ou atmosférica, é um importante fator austenitizante da poça de fusão, fato este ignorado por Schaeffler. Desta forma, o cálculo de níquel equivalente é alterado da seguinte maneira:

$$Ni_{eq} = Ni + 30*C + 0,5*Mn + 30*N \quad (3)$$

## Diagrama de DeLong

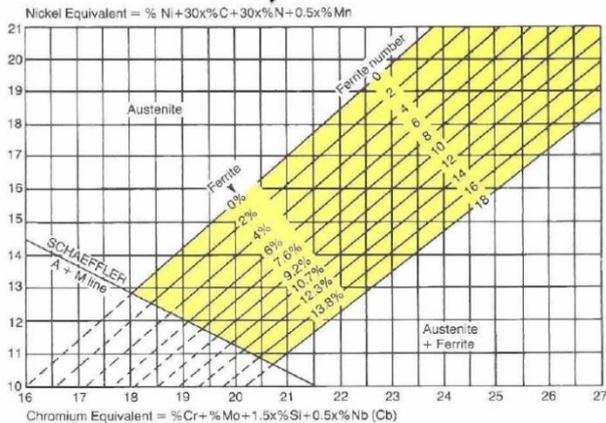


Figura 2 - Diagrama de DeLong<sup>1</sup>

Esta alteração só é significativa na região  $Cr_{eq}$  x  $Ni_{eq}$ , destacada no diagrama de DeLong;

WRC<sup>1</sup> - De 1992. Permite prever a estrutura da poça de solidificação que utiliza os cálculos de  $Cr_{eq}$  e  $Ni_{eq}$ . Otimizados, levando em consideração o efeito austenizante do cobre, da seguinte forma:

$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7*\#$ , (onde “#” pode ser nióbio, titânio, etc.)

$Ni_{eq} = Ni + 35*C + 20*N + 0,25*Cu$   
(4)

## Diagrama WRC-1992

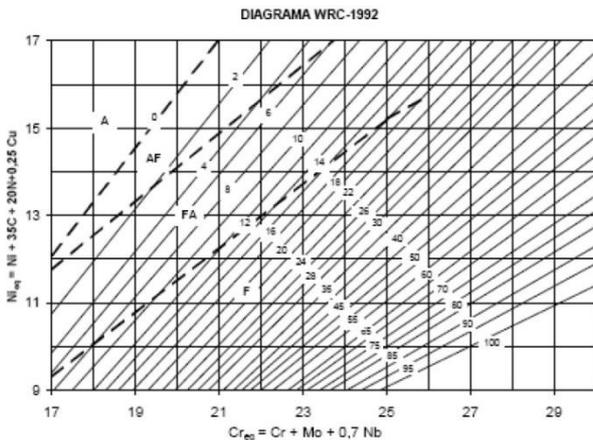


Figura 3 - Diagrama WRC<sup>1</sup>

Esta alteração só é significativa na região  $Cr_{eq}$  x  $Ni_{eq}$ , destacada no diagrama WRC, que leva em consideração o efeito austenizante (níquel equivalente) do cobre.

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;

BALMFORTH<sup>1</sup> - Diagrama desenvolvido por Balmforth e Lippold no ano 2000, que representa um incremento significativo na previsão do teor de ferrita dos aços inoxidáveis martensíticos;

## Diagrama de Balmforth

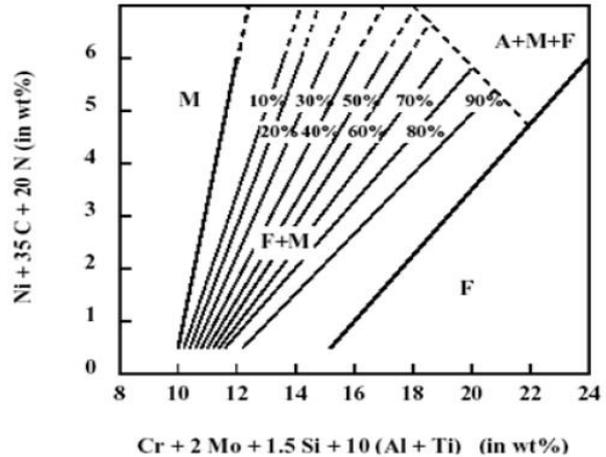


Figura 4 - Diagrama de Balmforth<sup>1</sup>

## MATERIAIS

Banco de dados que contempla os metais-base e consumíveis de soldagem mais comuns para aplicações em aços, inoxidáveis ou em geral. Há espaço previsto para cadastro de novos materiais, de acordo com a necessidade do usuário. A coluna "ESPECIFICAÇÃO" é reservada para o nome do material, norma aplicada, etc. A coluna "TIPO" serve para classificar os materiais, conforme a tabela abaixo:

SIGLA	CLASSE
A	AUSTENÍTICO
F	FERRÍTICO
M	MARTENSÍTICO
D	DUPLEX
AS	SUPER-AUSTENÍTICO
SF	SUPER-FERRÍTICO
SM	SUPER-MARTENSÍTICO
BL	BAIXA LIGA
EP	ENDURECÍVEL POR PRECIPITAÇÃO
EA	ELETRODO AUSTENÍTICO

Figura 5 - Tipos de Materiais do Soldinox<sup>®</sup>

As demais colunas se referem aos teores dos diversos elementos químicos de interesse. São valores médios.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 PROPOSIÇÃO DO PROBLEMA

Para a verificação da validade da aplicação do SOLDINOX e das formulações por trás do mesmo, foi selecionado e reproduzido, em escala reduzida, um caso real para análise e discussão:

[Nos sistemas de hidrotratamento (HDT) do processo de refino de petróleo, os equipamentos necessitam de materiais resistentes a esforços mecânicos e ao meio corrosivo, devido à presença de hidrogênio a temperaturas intermediárias (entre 300 e 500°C) e pressão (50 a 100 bar) num ambiente corrosivo ácido. Aços inoxidáveis apresentam boa resistência à corrosão, oxidação e ao hidrogênio. Porém, apresentam resistência mecânica menor que aços estruturais de baixa liga (Cr- Mo).

Uma solução é utilizar aço estrutural revestido com aços inoxidáveis. De um modo geral, os vasos de HDT são de aço entre 2,25 e 7,50% de cromo com até 3,0% de molibdênio, revestidos com dupla camada de aços inoxidáveis austeníticos AISI 309L e AISI 347 pelos processos arco submerso (AS) e MIG/MAG.

O caso visa avaliar os revestimentos aplicados pelos processos de arco submerso e MIG/MAG.

Informação disponível:

--	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
A	.085	1.16	.96	.006	.004	6.79	1.97	.53
B	.090	1.19	.82	.005	.003	6.91	2.22	.65
C	.087	1.13	.94	.008	.003	6.92	2.33	.65

--	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	O	N
A	.010	.008	.07	.20	.004	.254	.025	.014
B	.009	.006	.061	.17	.007	.260	.011	.011
C	.011	.008	.058	.24	.005	.260	.011	.011

Figura 6 - Composição química do aço carbono ao cromo-molibdênio de três medições [% peso].

C	Mn	Si	P	S
.06	1.8	1.0	.045	.003

Cr	Ni	Mo	Nb	N
23,5	13,5	2,6	.50	.10 máx

Figura 7 - Composição química do eletrodo AISI 309L [% peso], primeiro passe.

C	Mn	Si	P	S
.08	2 máx	1.5	.045	.003

Cr	Ni	Mo	Nb	N
19	15	1.2	10x%C	.10 máx

Figura 8 - Composição química do eletrodo AISI 347 [% peso], segundo passe.

O eletrodo AISI 309L é depositado pelo processo por arco submerso e o eletrodo 347 pelo processo MIG/MAG.]

#### 3.2 SIMULAÇÃO NO SOLDINOX

Foram carregados os dados na planilha, adotando-se os valores médios para os teores de elementos químicos pertinentes à análise. As próximas figuras trazem os resultados obtidos para a situação proposta:

ESPECIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA (%)										C	
	Carbono (C)	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Manganês (Mn)	Molibdênio (Mo)	Níquel (Ni)	Nitrogênio (N)	Silício (Si)	Outros*	Velocidade de soldagem (mm/s):		Densidade do material (g/cm³):
ÁÇO ESTRUTURAL CASO HDT	0,087	0,063	5,873	0,873	1,973	0,610	0,012	1,160	0,790	10,0	7,850	12,000
AWS ER309L	0,060	0,750	23,500	1,800	2,600	13,500	0,140	1,000	0,500	1,0	40,0	600,0
AWS ER347	0,080	0,000	19,000	1,000	1,200	15,000	0,130	1,500	0,800			
Temperatura inicial da chapa (°C):	35,0											
Temperatura de fusão (°C):	1500,0											
Temperatura de interesse (°C):	770,0											
Espessura da chapa (mm):	9,5											
PARÂMETROS DE SOLDAGEM	* Titânio (Ti), Nióbio (Nb), etc.											
MATERIAIS E CONSUMÍVEIS	POSIÇÃO DA TEMPERATURA DE INTERESSE (Equação de Adams - mm):											
	0,4											

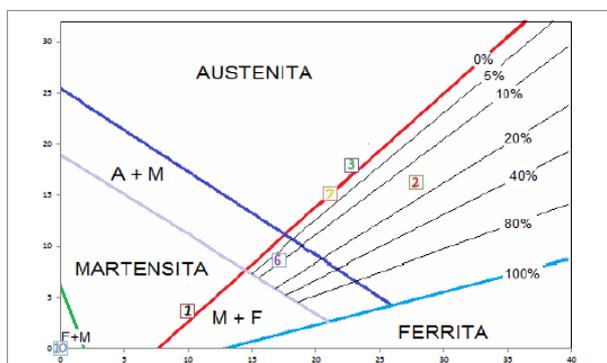
Figura 9 - Dados da aba "ENTRADA"

A figura 9 apresenta os dados do problema nos campos com fundo amarelo, que se dividem em 2 categorias: MATERIAIS E CONSUMÍVEIS e PARÂMETROS DE SOLDAGEM. A primeira alimenta as análises com base na composição química, enquanto que a segunda serve de base para a determinação da posição da temperatura de interesse – ou Temperatura Máxima de Adams – cujo resultado é apresentado na mesma tela, na parte superior, no campo de fundo azul. Nesse caso, a uma distância aproximada de até 0,4 mm a partir da linha de fusão, há maior probabilidade de área com transformação austenítica durante a soldagem. É nesta região que se devem concentrar eventuais análises metalográficas e ensaios de resistência e dureza, a fim de se detectar problemas relacionados à retenção de austenita.

DIAGRAMA DE SCHÄFFLER

CAPA

NR	ESPECIFICAÇÃO	TEOR (%)	Cr	Mn	Si	*	Ni	C	Mn	Cr <sub>eq</sub>	Ni <sub>eq</sub>
1	AÇO ESTRUTURAL CASO HDT	100	5,873	1,973	1,160	0,790	0,610	0,087	0,873	9,981	3,657
2	AWS ER309L	100	23,500	2,600	1,000	0,500	13,500	0,060	1,900	27,850	16,200
3	AWS ER347	100	19,000	1,200	1,500	0,800	15,000	0,080	1,000	22,850	17,900
4		100								0,000	0,000
5		100								0,000	0,000
6	1 + 2	1									
		2	12,924	2,224	1,086	0,674	5,766	0,076	1,244	17,129	8,674
		0									
7	6 + 3	6									
		3	17,177	1,507	1,379	0,762	12,230	0,079	1,073	21,134	15,132
		0									
8											
9			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100									
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100									
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



\* Nb, Ti, etc.

Figura 10 - Resultados da aba "SCHAEFFLER"

Os resultados microestruturais com base nos estudos de Schaeffler estão apresentados na figura 10. Nas 3 primeiras linhas estão os materiais, sendo o de número 1 o metal de base, e os números 2 e 3 os consumíveis adotados no problema proposto. Os números 4 e 5 estão em branco por não serem necessários neste caso.

Os pontos 6 e 7 correspondem, respectivamente, aos dois passes de solda, o primeiro com a combinação do metal de base com o primeiro eletrodo (1 + 2), com diluição de 60% compatível com o processo de soldagem com arco submerso, ou seja, 60% da composição do metal fundido advém do metal de base e 40%, conseqüentemente, é do consumível. O ponto 7 representa o segundo passe, onde o segundo eletrodo é depositado sobre o primeiro passe (6 + 3), com processo MIG/MAG que causa uma diluição de 30%.

As colunas que informam os teores de cada elemento químico, bem como dos cálculos de cromo-equivalente e níquel-equivalente, estão ao lado para

conferência. Os valores de Cr<sub>eq</sub> e Ni<sub>eq</sub> Fornecem o par ordenado de valores para cada material e passe de solda que denotam os pontos que figuram no Diagrama de Schaeffler logo abaixo, que mostra o caráter metalúrgico de cada um. O metal de base, por exemplo, corresponde ao ponto 1 no diagrama, está inteiramente inserido na região de estrutura martensítica, o que o caracteriza como um aço estrutural com característica de solidificação dura e frágil em se tratando de soldagem. O ponto 2 apresenta o eletrodo composto de AISI 309L na área intermediária entre as estruturas ferrítica e austenítica, com teor estimado desta em 15%. E o consumível AISI 347 figura no ponto 3, de composição exclusivamente austenítica.

O primeiro passe de revestimento, aplicado pelo processo de soldagem com arco submerso do consumível AISI 309L sobre o metal de base (1 + 2) resulta numa estrutura tripla na região central do diagrama onde coexistem as 3 estruturas típicas possíveis. Caso o processo parasse nesta etapa, haveria o risco de trincas a frio devido à fragilização e fissuração por formação de martensita. Só este risco já encorajaria a aplicação de um segundo passe, que pudesse reverter esta tendência. O teor aproximado de 10% de ferrita não representa risco, nesse caso, de trincas a quente ou perda de ductilidade em altas temperaturas.

O ponto número 7 traz o resultado do segundo passe, aplicado pelo processo MIG/MAG sobre o passe anterior (6 + 3). É possível notar o afastamento deste ponto do campo martensítico, praticamente eliminando o risco de trincas a frio, bem como a aproximação com o campo austenítico, minimizando a presença de ferrita, o que pode aumentar o risco de trincas a quente.

DIAGRAMA DE DELONG

CAPA

NR	ESPECIFICAÇÃO	TEOR (%)	Cr	Mn	Si	*	Ni	C	N	Mn	Cr <sub>eq</sub>	Ni <sub>eq</sub>
1	AÇO ESTRUTURAL CASO HOT	100	5,873	1,973	1,160	0,790	0,610	0,087	0,012	0,873	9,881	4,017
2	AWS ER309L	100	23,500	2,600	1,000	0,500	13,200	0,060	0,140	1,800	27,850	20,400
3	AWS ER347	100	19,000	1,200	1,500	0,800	15,000	0,080	0,130	1,000	22,850	21,800
4		100									0,000	0,000
5		100									0,000	0,000
6	1 + 2	1	60									
		2	40	12,924	2,224	1,096	0,674	5,766	0,076	0,063	1,244	17,129
		0										
7	6 + 3	6	30									
		3	70	17,177	1,507	1,379	0,762	12,230	0,079	0,110	1,073	21,134
		0										
8			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100										
9			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100										
10			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100										

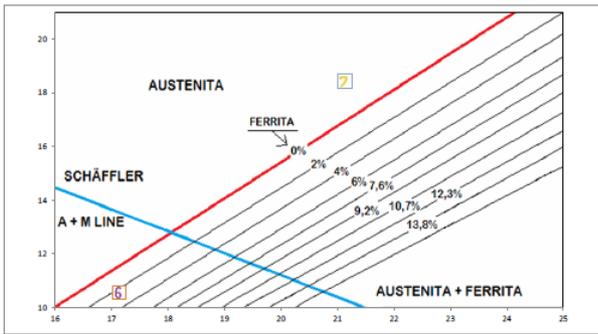
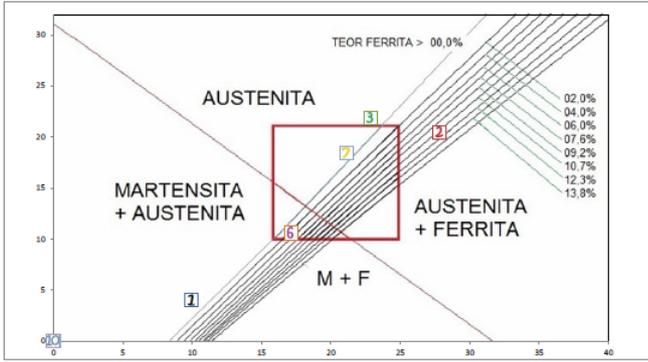


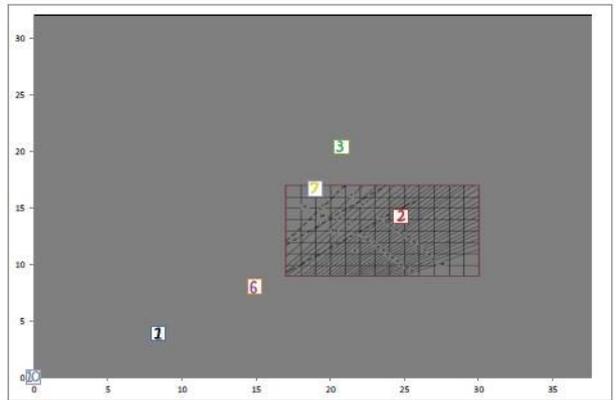
Figura 11 - Resultados da aba "DELONG"

A figura 11 traz, de maneira similar à anterior, os resultados com base em DeLong. Diferentemente de Schäffler, aqui é possível observar o efeito da contaminação pela presença de nitrogênio durante a solda, que faz com que o ponto 7 "suba" no gráfico até o campo 100% austenítico. O que era apenas uma possibilidade para Schäffler, é bem mais definitivo para DeLong: as trincas de solidificação, ou perda de ductilidade em temperaturas acima de 1250 °C, constituem um perigo eminente nesse caso.

DIAGRAMA WRC

CAPA

NR	ESPECIFICAÇÃO	TEOR (%)	Cr	Mn	*	Ni	C	N	Cu	Cr <sub>eq</sub>	Ni <sub>eq</sub>
1	AÇO ESTRUTURAL CASO HOT	100	5,873	1,973	0,790	0,610	0,087	0,012	0,063	8,399	3,911
2	AWS ER309L	100	24,000	0,750	0,000	13,000	0,030	0,000	0,720	24,750	14,238
3	AWS ER347	100	19,000	1,200	0,800	15,000	0,080	0,130	0,000	20,760	20,400
4		100								0,000	0,000
5		100								0,000	0,000
6	1 + 2	1	60								
		2	40	13,124	1,484	0,474	5,266	0,064	0,007	0,338	14,939
		0									
7	6 + 3	6	30								
		3	70	17,237	1,285	0,702	12,170	0,075	0,093	0,101	19,014
		0									
8			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100									
9			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100									
10			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		100									



\* Nb, Ti, etc.

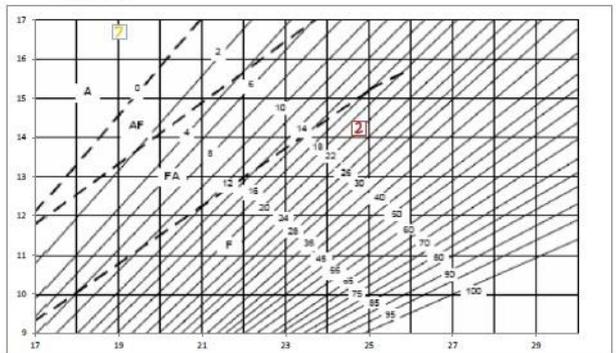


Figura 12 - Resultados da aba "WRC"

A influência austenizante do cobre, ou seja, que eleva o Ni<sub>eq</sub>, é claramente demonstrada na figura 12, o diagrama WRC, e confirma o resultado previsto por DeLong. O risco de trincas a quente é bastante pronunciado.

## DIAGRAMA DE BALMFORTH

CAPA

Nº	ESPECIFICAÇÃO	TEOR (%)	Cr	Mn	Si	S	Ni	C	N	C <sub>eq</sub>	N <sub>eq</sub>
1	AÇO ESTRUTURAL CASO HD1	100	5,873	1,973	1,180	0,790	0,610	0,087	0,012	19,459	3,895
2	AWS ER309L	100	23,500	2,600	1,000	0,500	13,500	0,060	0,140	35,200	18,400
3	AWS ER347	100	19,000	1,200	1,500	0,800	15,000	0,080	0,130	31,650	20,400
4		100								0,000	0,000
5		100								0,000	0,000
6	1+2	50	12,924	2,224	1,096	0,674	5,766	0,076	0,063	25,755	9,697
		40									
		0									
7	6+3	30	17,177	1,507	1,379	0,762	12,230	0,079	0,110	29,882	17,189
		70									
		0									
8		100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9		100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10		100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		50									
		0									

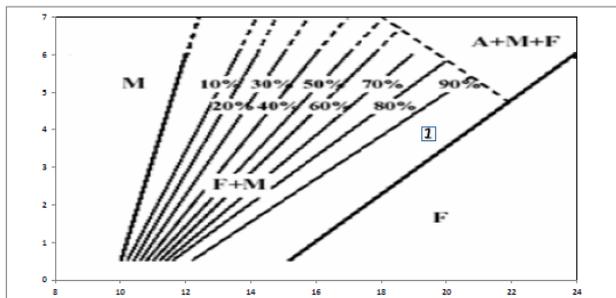
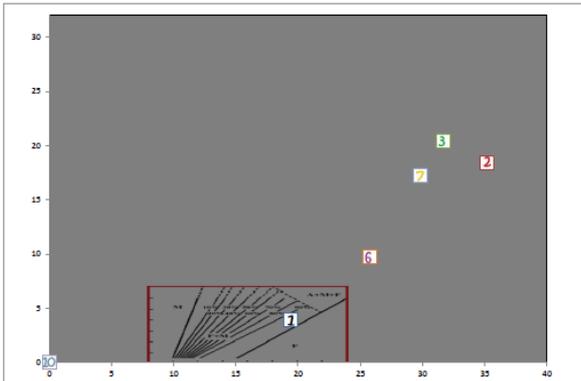


Figura 13 - Resultados da aba "BALMFORTH"

A figura 13 traz o diagrama de Balmforth. Como se esperava, não acrescenta nenhuma informação relevante pelo fato de este diagrama ter sido elaborado com foco na região de transição entre ferrita e martensita. Nenhum dos pontos dos passes figura na região de interesse deste gráfico.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 KOU, S. "Welding Metallurgy", 2nd. Edition - Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2003.
- 2 MACHADO, I. G. "Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações", 1ª. Edição – Porto Alegre: Imprensa Livre, p. 67, 2000.
- 3 CALLISTER, W.D. "Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução", 5ª. Edição – Utah, USA: LTC, p. 250, 2002.
- 4 MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B., "Curso de Metalurgia da Soldagem". Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos / DEM / UFMG. Belo Horizonte, 1992.

## 4 CONCLUSÕES

O exemplo abordado evidencia as potencialidades de uso do SOLDINOX, permitindo também a simulação rápida do efeito de pequenas alterações, seja na composição química, diluição, passes de solda sucessivos, tensão ou corrente de soldagem. A visualização e comparação diretas por meio dos gráficos interativos permitem análises consistentes e a solidificação dos conceitos pertinentes ao conteúdo abordado.

Por razões de economia de espaço visual, e também de memória, foi adotado um limite de 10 pontos por gráfico, sendo 5 deles para materiais e consumíveis, e outros 5 que permitem a mescla entre eles, inclusive com mesclas anteriores, recurso bastante útil para juntas multipasse, onde vários cordões de solda são superpostos. Este fator pode configurar uma limitação do uso da planilha, mas que pode ser facilmente contornado pela duplicação de arquivos ou, ainda, pela edição da mesma por um programador devidamente capacitado.

Uma sugestão para aprofundamento do presente estudo é a execução de corpos de prova soldados com posterior análise metalográfica, com foco especial na ZTA para verificação da validade da equação de Adams. Esta equação, bem como as relações determinadas nos demais estudos relacionados à microestrutura do cordão de solda abarcados nesta planilha, já possui ampla cobertura em diversos trabalhos acadêmicos, não tendo foco em sua comprovação tendo em vista a sua simples compilação na planilha para facilitação de cálculos.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte técnico do DEMEC-UFPR, LABATS, LACTEC, bem como da REPAR/MI/EE (Petrobras) na execução deste trabalho.