

# AValiação DA CAPACIDADE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM ATENDER TEMPERABILIDADE PARA O AÇO SAE 1548M<sup>1</sup>

Luiz Carlos da Cruz<sup>2</sup>  
Dagoberto Brandão Santos<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho foi desenvolvido para avaliação da capacidade do processo de produção do aço SAE 1548M ao de atendimento do diâmetro crítico ideal (DI), calculado com base na composição química das corridas conforme a norma ASTM A 255. Através da propriedade de adição de variâncias foi desenvolvido um modelo matemático-estatístico para previsão de faixa DI que possa ser utilizado durante o processo de fabricação para ajustes de composição química no forno panela e RH. Comparou-se o resultado da simulação com os resultados reais de corridas produzidas. Constatou-se que a previsão do modelo estatístico foi confirmada pelos dados de produção em escala industrial mostrando-se bastante eficiente, contribuindo para que o processo de fabricação fosse capaz de atender as especificações. Foram identificados os elementos mais importantes no controle da variabilidade do DI: o Mn e o Cr. Uma alteração no processo de adição de Mn resultou em melhoria significativa dos resultados. A técnica estatística empregada de adição de variâncias mostrou ser uma ferramenta adequada de estimativa de resultados que envolvem parâmetros e ou elementos que interagem entre si. Verificou-se que o método pode ser estendido para outros aços, inclusive na estimativa de outros parâmetros que dependem da composição química tais como carbono equivalente e propriedades mecânicas.

**Palavras-chave:** Temperabilidade; Capacidade de processos; Composição química

## EVALUATION OF THE PROCESS CAPABILITY TO CONFORM THE REQUIREMENTS OF HARDENABILITY FOR THE STEEL GRADE SAE 1548M

### Abstract

This work was developed to evaluate the process capability of the SAE 1548M that has the requirement of Ideal Diameter (DI), calculated through the chemical composition of the heats according to ASTM A 255 standard. Through the additive law of variances, a statistics mathematics model was developed in order to estimate the DI range by using the chemical composition of the heats. This model can be used during the refining process in the ladle furnace and vacuum degassing unit (RH). The simulation results were checked against real results, showing good efficiency, helping the production process to be able to fulfill the specifications. The most important chemical elements in the variability control of the DI were identified: the Mn and Cr. A process change in the Mn addition has achieved great improvements. The statistic technique of additive law of variances has show to be an efficient tool to estimate results that depend on the parameters that interact themselves. It was shown that the method can be applied to other steels, not only to estimate the DI, but other parameters that are linked to the chemical composition such as equivalent carbon and mechanical properties.

**Key words:** Hardenability; Process capability; Chemical composition.

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc. em Metalurgia Física, CQE-ASQ, Especialista de Produtos - Gerdau Açominas.

<sup>3</sup> Membro da ABM, Dr, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

# 1 INTRODUÇÃO

A Gerdau Açominas produz cerca de 10.000 t/mês de aços carbono e baixa liga em barras quadradas destinadas a forjarias. Os principais produtos finais são eixos, pontas de eixo, virabrequins, bielas e engrenagens. Estes materiais têm exigências de controle de temperabilidade mediante especificação de DI (Diâmetro Crítico Ideal) ou de ensaio Jominy. Para atender a especificação de DI é necessário definir a composição química visada para se atingi-la. Este trabalho utilizou dados históricos de corridas para desenvolver um modelo matemático-estatístico de previsão da capacidade de atendimento de DI. O modelo foi aplicado em produção em escala industrial e os resultados reais comparados com a previsão.

## 2 OBJETIVOS

- Desenvolver um modelo matemático-estatístico de previsão de faixa de DI (diâmetro crítico ideal) que possa ser utilizado durante o processo de fabricação para ajustes de composição química no forno panela e RH.
- Avaliar a capacidade do processo de fabricação de aço em atender a especificação de DI para o aço SAE 1548M.
- Identificar oportunidades de melhoria de atendimento a especificações de temperabilidade com atuação em parâmetros de processo que mais influenciam no DI e na sua variabilidade.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

**3.1 Temperabilidade:** é medida pela profundidade na qual se pode obter uma microestrutura de 50% de martensita e uma dureza correspondente a ela para o teor de carbono do aço. <sup>(1)</sup>

**3.2 Capacidade de Processos:** Envolve a comparação do resultado de um processo (limites naturais do processo) com as especificações do produto. É medido pelo ICP (Índice de Capacidade de Processos):

$$ICP = \text{mínimo}((\bar{X} - LIE)/3\sigma; (LSE - \bar{X})/3\sigma) \quad (3.1)$$

$\bar{X}$  = média dos valores individuais de um parâmetro do processo;

$\sigma$  = desvio padrão desses valores individuais;

LIE/LSE = Limites inferior e superior de especificação

Regra prática:<sup>(2)</sup>

- ICP > 1,33 Processo capaz
- ICP = 1,00 ~ 1,33 Processo capaz com controle adequado
- ICP < 1,00 Processo incapaz.

**3.3 DI (Diâmetro Crítico Ideal):** diâmetro da barra redonda que quando resfriada em meio com severidade de têmpera  $H = \infty$  (têmpera ideal) terá 50% de martensita no centro. Têmpera ideal: a transferência de calor da barra para o meio de têmpera é tão rápida de tal maneira que a temperatura da superfície da barra é diminuída instantaneamente para a temperatura do meio de têmpera. <sup>(3)</sup>

### 3.4 Aço SAE 1548M: Especificação de DI: 1,80 polegadas mínimo.

Tabela 1. Composição química especificada

	COMPOSIÇÃO QUÍMICA - análise de panela (%)										
	Faixas	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Al
Especificação do Cliente	Mínimo	0,44	1,10	0,15	0,20	0,25	0,06	0,25	0,025	0,025	0,045
	Máximo	0,53	1,40	0,35	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx
Especificação Gerdau Açominas	Mínimo	0,44	1,16	0,17	0,12	0,10	0,01	0,10	0,025	0,018	0,015
	Máximo	0,48	1,31	0,27	0,18	máx	0,06	máx	máx	0,025	0,035
	Visado	0,46	1,24	0,22	0,15	-	0,03	-	-	0,021	0,025

**3.5 Cálculo de DI:** O método a seguir<sup>(1)</sup> é baseado no conceito de que uma liga pura de Fe-C possui certa temperabilidade e que cada elemento adicional (Mn, Si, etc.) deve ser representado por um fator de multiplicação pelo qual o diâmetro básico ( $D_{base}$ ) deve ser multiplicado.

$$\bullet \quad DI = D_{base} \times f_{Mn} \times f_{Si} \times f_{Cr} \times f_{Ni} \times \dots \quad (3.2)$$

- $D_{base}$  = Depende do teor de C e do tamanho de grão austenítico.

- $f_{Mn, Si, \dots}$  = fator de multiplicação do Mn, Si, etc = FM.

Padronizado pelas normas ASTM A 255<sup>(4)</sup> e SAE J406<sup>(5)</sup>

Para o aço SAE 1548M o cálculo de DI é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Cálculo de DI

ELEMENTO	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	DI (pol)
%	0,46	1,24	0,22	0,15	0,00	0,03	-
FM	0,228	5,204	1,154	1,324	1,00	1,09	<b>1,98</b>

**3.6 Interação de Tolerâncias:** Para dimensões que se unem às outras para criar um resultado final (tal como numa montagem de peças) existe um tratamento estatístico que reconhece a interação entre as tolerâncias de cada peça. Pode-se fazer analogia com o DI, que resulta dos fatores de multiplicação dos elementos C, Mn, Si, etc. Cada elemento tem sua própria tolerância e, assim, a variabilidade do todo (DI) estará relacionada com a variabilidade de cada elemento individual. Há duas abordagens para este tópico:

**Método convencional:** Usa a adição simples das tolerâncias. Ao se medir o efeito de cada elemento na variabilidade do DI deve-se utilizar 100% de combinação entre os elementos químicos. Este método adota os teores mínimos e máximos da especificação de composição química e é matematicamente correto, mas muito conservador e, assim, o resultado é uma faixa especificada de DI muito ampla.

**Método estatístico:** De acordo com as leis da probabilidade, é improvável que todos os extremos de composição química aconteçam ao mesmo tempo. Tomando-se como exemplo 5 elementos de uma corrida tais como C, Mn, Si, Cr e Mo: se a probabilidade de ocorrência de um elemento no mínimo da especificação for de 1%, tem-se 1 corrida em 100 com este valor. A probabilidade de ocorrência na mesma corrida dos 5 elementos no mínimo da faixa será:

$$(1/100) \times (1/100) \times (1/100) \times (1/100) \times (1/100) = 1/10^{10}$$

Utilizando este conceito, tolerâncias mais abertas podem ser estabelecidas para cada elemento sem aumentar significativamente a variabilidade do DI. O problema de se determinar qual é a faixa prevista de DI e a probabilidade de ocorrência de

corridas fora da especificação de DI pode ser solucionado utilizando a propriedade de adição de variâncias:<sup>(6)</sup>

$$\sigma^2_T = \sigma^2_A + \sigma^2_B + \sigma^2_C \quad (3.3)$$

A, B, C = C, Mn, Si, etc.

$\sigma^2_T$  = variância do DI (quadrado do desvio padrão  $\sigma$ ).

$\sigma^2_A$  = contribuição da variância do teor de A na variância do DI.

## 4 METODOLOGIA

Trabalho realizado em escala industrial, de janeiro-2003 a junho-2004. Envolve as seguintes etapas:

- As adições iniciais de ligas visam a composição química no limite inferior de DI.
- Ajustes no forno panela são realizados para valores próximos ao DI visado.
- Ajustes finais (RH) em um elemento químico específico na corrida, se necessário, procurando atender o DI visado.

**Planejamento do Modelo Matemático-estatístico:** A equação 4.1, a seguir, é uma adaptação da equação 3.3 ao caso específico de cálculo de variância do DI como função da variância de cada elemento:

$$\sigma^2_{DI} = f(\sigma^2_C + \sigma^2_{Mn} + \sigma^2_{Si} + \sigma^2_{Cr} + \sigma^2_{Ni} + \sigma^2_{Mo} + \sigma^2_{Cu}) \quad (4.1)$$

Com o cálculo do  $\sigma$  esperado do DI, determinou-se uma faixa de DI (limites de predição estatísticos). Este DI estimado foi comparado com os dados das corridas produzidas. Os dados reais de  $\sigma$  de cada elemento foram incorporados ao modelo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estimativa do DI - Método Convencional

Tabela 3. Cálculo de DI – faixa do cliente

ELEMENTO (%)	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	DI (pol)
Mínimo	0,44	1,10	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Máximo	0,53	1,40	0,35	0,20	0,25	0,06	0,25	
FM Mínimo	0,228	4,667	1,105	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>1,15</b>
FM Máximo	0,246	6,020	1,245	1,432	1,091	1,18	1,09	<b>3,70</b>

Não garante o atendimento de DI  $\geq$  1,80 pol. Com a faixa interna:

Tabela 4. Cálculo de DI – faixa interna restritiva

ELEMENTO (%)	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	DI (pol)
Mínimo	0,44	1,16	0,17	0,12	0,00	0,01	0,00	-
Máximo	0,48	1,31	0,27	0,18	0,10	0,06	0,10	
Visado	0,46	1,24	0,22	0,15	0,00	0,03	0,00	
FM Mínimo	0,223	4,867	1,119	1,259	1,00	1,03	1,00	<b>1,57</b>
FM Máximo	0,233	5,561	1,189	1,389	1,036	1,18	1,04	<b>2,72</b>
FM Visado	0,228	5,204	1,154	1,324	1,00	1,09	1,00	<b>1,98</b>

Amplitude do DI = 2,72 – 1,57 = 1,15pol. Mesmo com a produção do aço na composição química interna não há garantia de atendimento do DI  $\geq$  1,80 pol.

## 5.2 Método Estatístico – Modelo Matemático-estatístico de Previsão de DI

Calcula-se o desvio padrão estimado do DI através da equação 4.1. Etapas:

1. A faixa de cada elemento tem distribuição normal e atende à capacidade de processo =  $6\sigma$ .  $C = 0,44-0,48\%$ .  $\sigma_C = (0,48-0,44)/6 = 0,0067\%$ .
2. O efeito de cada elemento no  $DI_{\text{visado}}=1,98$  será devido aos FM (ASTM A 255) do elemento no teor mínimo e no teor máximo. Para o C os FM 0,223 (C=0,44%) e 0,233 (C=0,48%) promovem uma variação no DI de 1,93 a 2,02 polegadas.
3. Calcula-se a variação do DI devido ao elemento C:  $2,02 - 1,93 = 0,09$  pol.
4. Considera-se esta variação como sendo  $6\sigma$ , calcula-se o  $\sigma$ , obtendo-se 0,014 pol.
5. Variância =  $\sigma^2 = 0,00021$ . Esta é a contribuição do C para a variância total do DI.
6. Repete-se o cálculo para todos os elementos e aplica-se a equação 4.1:

$$\sigma_{DI}^2 = 0,00021^2 + 0,00193^2 + 0,00040^2 + 0,00105^2 + 0,00205^2$$

$$\sigma_{DI} = 0,075 \text{ pol.}$$

A Tabela V.3 mostra o cálculo completo na planilha eletrônica:

Tabela 5. Cálculo do efeito dos elementos no DI

EFEITO DOS ELEMENTOS NO DI VISADO - FAIXA GERDAU AÇOMINAS								
Elemento	Visado	FM	Faixa	FM	efeito no DI	$6\sigma$	$\sigma$	$\sigma^2$
C	0,46	0,228	0,44	0,223	1,93			
			0,48	0,233	2,02	0,09	0,014	0,00021
Mn	1,24	5,204	1,16	4,867	1,85			
			1,31	5,561	2,11	0,26	0,044	0,00193
Si	0,22	1,154	0,17	1,119	1,92			
			0,27	1,189	2,04	0,12	0,020	0,00040
Cr	0,15	1,324	0,12	1,259	1,88			
			0,18	1,389	2,07	0,19	0,032	0,00105
Mo	0,03	1,09	0,01	1,03	1,87			
			0,06	1,18	2,14	0,27	0,045	0,00205
<b>DI visado</b>		<b>1,98</b>				<b>soma</b>		<b>0,00564</b>
							<b><math>\sigma</math> do DI</b>	<b>0,075</b>

Segundo Gryna et al.,<sup>(6)</sup> os limites de predição estatísticos são calculados pelo  $DI_{\text{médio}} \pm 3\sigma_{DI}$  (previsão de 99,73% das corridas dentro da faixa especificada):

DI mínimo =  $1,98 - 3 \times 0,075 = 1,75$  pol.

DI máximo =  $1,98 + 3 \times 0,075 = 2,20$  pol.

Amplitude DI =  $2,20 - 1,75 = 0,45$  pol.

A Figura 1 mostra estes valores previstos de DI. Houve um estreitamento da amplitude de 1,15 (método convencional) para 0,45 polegadas (método estatístico).

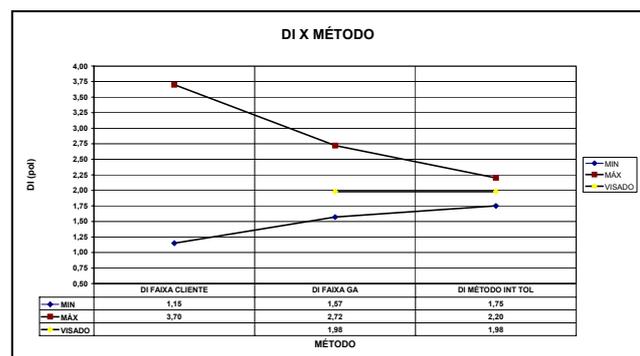


Figura 1. DI calculado X Método

### 5.3 Limites de Controle Estatístico (Limites Naturais) – 118 Corridas de 2003

O cálculo dos limites naturais de processo foi feito conforme WHEELER:<sup>(7)</sup>

$$\text{Limites Naturais} = \bar{X} \pm 3 \text{ desvios padrão} \quad (5.1)$$

LSNP/LINP = Limite superior/inferior natural de processo

O cálculo do desvio padrão da população de corridas é realizado pela amplitude média das amostras, subgrupos de 2. A fórmulas utilizadas são as seguintes:

$$\text{LSNP/LINP} = \bar{X} \pm 3(\overline{mR}/d2) \quad (5.2)$$

$\bar{X}$  = DI médio das corridas produzidas

$\overline{mR}$  = amplitude média com subgrupo n = 2; 117 subgrupos.

d2 = 1,128 = fator de correção da amplitude para n = 2 dados

$$\text{LSNP} = 2,03 + 3x(0,076/1,128) = 2,03 + 3x0,067 = 2,23$$

$$\text{LINP} = 2,03 - 3x(0,076/1,128) = 2,03 - 3x0,067 = 1,83$$

$$\text{Amplitude} = 2,23 - 1,83 = 0,40 \text{ pol.}$$

$$\text{ICP} = (\bar{X} - \text{LIE})/3\sigma$$

$$\text{ICP} = (2,03 - 1,80)/3x0,067 = 1,14 - \text{“processo capaz com controle adequado”}.$$

A Figura 2 mostra um histograma dos resultados de DI.

#### 5.3.1 Discussão dos resultados do modelo de previsão de DI – Corridas de 2003

Verifica-se que o  $\sigma$  para alguns elementos é diferente do proposto (ex:  $\sigma_C = 0,0125$ , mas foi calculado com  $\sigma_C = 0,0067$ ). Aplicando  $\pm 3\sigma$  em relação aos teores visados obtém-se uma nova faixa (ex: C =  $0,46 \pm 0,0125 = 0,42/0,50$ ). Realimentando o método estatístico mencionado em 5.2, obtém-se o  $\sigma_{DI} = 0,067$  pol. (Tabela 6):

Tabela 6. Estimativa do  $\sigma_{DI}$  com  $\sigma$  real dos elementos

EFEITO DOS ELEMENTOS NO DI VISADO - DESVIO PADRÃO REAL									
EI	Visado	FM	$\sigma$ real	Faixa	FM	Efeito no DI	6 $\sigma$	$\sigma$	$\sigma^2$
C	0,46	0,228	0,0125	0,42	0,219	1,90			
				0,50	0,237	2,05	0,16	0,026	0,00068
Mn	1,24	5,204	0,0233	1,17	4,900	1,86			
				1,31	5,561	2,11	0,25	0,042	0,00175
Si	0,22	1,154	0,0127	0,18	1,127	1,93			
				0,26	1,18	2,02	0,09	0,015	0,00023
Cr	0,15	1,324	0,0099	0,12	1,259	1,88			
				0,18	1,389	2,07	0,19	0,032	0,00105
Mo	0,03	1,09	0,0053	0,014	1,042	1,89			
				0,046	1,138	2,06	0,17	0,029	0,00084
<b>DI visado</b>		<b>1,98</b>					<b>soma</b>		<b>0,00454</b>
								<b><math>\sigma</math> do DI</b>	<b>0,067</b>

Refazendo os cálculos efetuados em 5.2 com aplicação do cálculo dos limites de predição estatístico (média  $\pm 3$  unidades de desvio padrão estimado) obtém-se:

$$\text{DI mín.} = 1,77 \text{ pol.}; \text{DI max.} = 2,18 \text{ pol.}; \text{Amplitude do DI} = 0,40 \text{ pol.}$$

- Esta amplitude é a mesma obtida em 5.3, onde foram calculados os limites naturais do processo com os dados das 118 corridas. Destaca-se o ótimo

resultado obtido pelo modelo estatístico, onde a variabilidade prevista (medida pela amplitude) foi confirmada pelo resultado das corridas de 2003. Os elementos que mais contribuem para o  $\sigma_{DI}$  são os que promovem a maior amplitude de DI (“efeito no DI” na Tabela 6). Assim, a ordem de influência dos elementos é: Mn, Cr, Mo, C e Si.

### 5.3.2 Melhoria do processo - alteração da correção do Mn

Foi alterado o teor inicial visado de Mn no vazamento do convertedor:

Situação anterior: Mn visado no vazamento = 1,19%

Alteração: Mn visado no vazamento = 1,14% (padrão alterado em 06.03.04).

### 5.4 Avaliação dos Resultados de DI – 80 Corridas de 2004

A Figura 3 apresenta os resultados de Mn, antes e após a alteração. Houve uma redução significativa no  $\sigma_{Mn} = 0,015$  ( $\sigma_{Mn-2003} = 0,0233$ ), contribuindo para um menor  $\sigma_{DI}$ . O cálculo dos limites naturais de processo citado em 5.3 fornece:

$$LSNP = \bar{X} + 3(\overline{mR}/d2) = 2,05 + 3x(0,061/1,128) = 2,05 + 3x0,054 = 2,21$$

$$LINP = \bar{X} - 3(\overline{mR}/d2) = 2,05 - 3x(0,061/1,128) = 2,05 - 3x0,054 = 1,89$$

Amplitude = 0,32 polegadas (redução de 20% em relação a corridas de 2003).

$$\underline{ICP} = (2,05 - 1,89)/(3x0,054) = 1,54 = \text{Processo capaz.}$$

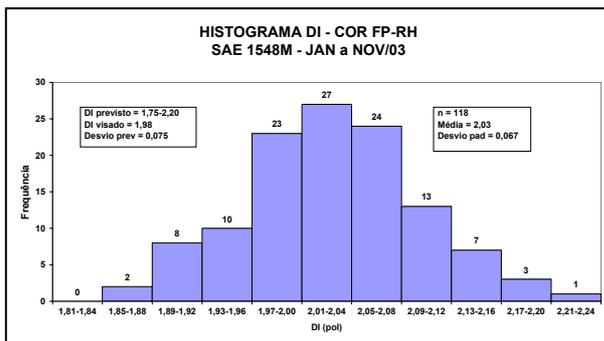


Figura 2. Histograma do DI

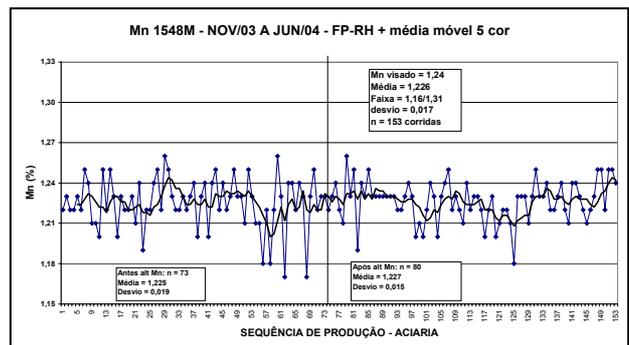


Figura 3. Mn

#### 5.4.1 Revisão da Estimativa de DI – 80 corridas de 2004

Realimentando o método estatístico com os novos  $\sigma$ , obtém-se  $\sigma_{DI} = 0,056$  pol. (Tabela 7):

**Tabela 7.** Estimativa do  $\sigma$  do DI com desvio padrão real dos elementos

<b>EFEITO DOS ELEMENTOS NO DI VISADO - <math>\sigma</math> REAL - MAR-JUN 2004</b>										
El	Visado	FM	Faixa	$\sigma$ real	FM	efeito no DI	$6\sigma$	$\sigma$	$\sigma^2$	ordem
C	0,46	0,228	0,420		0,218	1,89				
			0,500	0,0133	0,238	2,06	0,173	0,029	0,00083	1°
Mn	1,24	5,204	1,195		4,984	1,89				
			1,285	0,0150	5,434	2,06	0,171	0,028	0,00081	2°
Si	0,22	1,154	0,189		1,133	1,94				
			0,252	0,0105	1,176	2,01	0,074	0,012	0,00015	5°
Cr	0,15	1,324	0,127		1,274	1,90				
			0,173	0,0078	1,374	2,05	0,149	0,025	0,00062	4°
Mo	0,03	1,09	0,015		1,045	1,89				
			0,045	0,0049	1,135	2,06	0,163	0,027	0,00074	3°
<b>DI</b>		<b>1,98</b>					<b>soma</b>		<b>0,00315</b>	
								<b><math>\sigma</math> DI</b>	<b>0,056</b>	

Com aplicação do cálculo dos limites de predição estatístico (média  $\pm 3\sigma_{DI}$ ):

$$DI = 1,81/2,14 \text{ pol. Amplitude do DI} = 2,14 - 1,81 = 0,33 \text{ pol.}$$

Confirma-se novamente uma boa previsão do modelo matemático-estatístico (amplitude de 0,33 pol. versus 0,32 dos dados reais).

### 5.5 Simulação de Probabilidade de Não Atendimento de Especificação de DI

Nesta abordagem serão utilizados os seguintes parâmetros:

a) Aço SAE 1548M, DI = 1,80 pol. mínimo.

b) Desvio padrão dos elementos da produção de março a junho-04 (Tabela 7).

Segundo Gryna e outros,<sup>(6)</sup> os limites de predição estatística deverão ser calculados utilizando X unidades de desvio padrão. Para 4 diferentes simulações. obtém-se os limites de predição de DI:

**Tabela 8.** Parâmetros para simulação

Simulação	Probabilidade			Limites de predição - DI				$\sigma_{DI}$
	DI na faixa	unidades de $\sigma_{DI}$	DI < 1,80	DI Mín	DI Máx	DI Visado	Amplitude	
<b>1</b>	99,73%	$\pm 3$	0,135%	1,81	2,14	1,98	0,33	0,0562
<b>2</b>	99%	$\pm 2,575$	0,5%	1,80	2,09	1,94	0,29	0,0555
<b>3</b>	95%	$\pm 1,96$	2,5%	1,80	2,02	1,91	0,22	0,0548
<b>4</b>	90%	$\pm 1,645$	5,0%	1,80	1,98	1,89	0,18	0,0541

O gráfico da Figura 5.4 representa a probabilidade de DI abaixo do especificado:

- Especificação de faixas estreitas de DI significa aumento de ocorrência de corridas não conformes (parte superior do gráfico).
- Redução de não conformidades leva ao aumento da faixa especificada de DI, o que dependerá de renegociação com os clientes (parte inferior do gráfico).
- Para se evitar as duas situações acima, a solução pode ser melhoria do processo de produção através de redução da variabilidade dos elementos.

O resultado que pode ser obtido está mostrado na Figura 5, que é uma evolução da Figura 1, indicando uma redução adicional na variabilidade do DI.

## 5.6 Aplicação da Metodologia

Passo a passo a aplicação do modelo matemático-estatístico é conforme a seguir:

1. Cliente: especifica o aço e o DI (que pode ser DI mínimo ou faixa de DI).
2. Define-se a composição química a ser visada para atender o DI.
3. Com a norma ASTM A-255, o  $\sigma$  de cada elemento e o modelo matemático-estatístico define-se a composição química interna e DI a ser atendido.

Para facilitar a utilização, o modelo foi inserido no sistema de produção e fornece:

- Resultados de DI de acordo com as etapas de produção da corrida;
- Projeto de composição química para o aço: software de simulação rápida da faixa de composição química de cada elemento para atingir o DI especificado.

Os resultados obtidos com o modelo foram muito bons, podendo estendido aos demais aços, e inclusive uma abordagem similar poderia ser usada na estimativa de outros parâmetros tais como carbono equivalente e propriedades mecânicas.

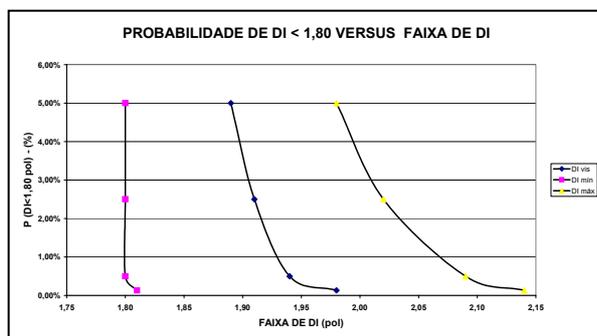


Figura 4. Simulação - atendimento DI

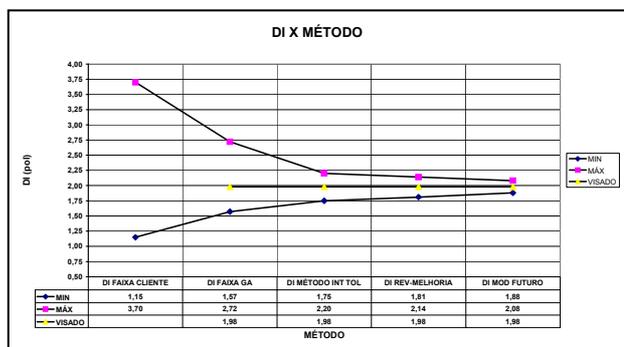


Figura 5. DI calculado X Método

## 6. CONCLUSÕES

- O modelo matemático-estatístico desenvolvido mostrou-se adequado e permitiu especificar com segurança a faixa interna de composição química adequada para atendimento ao DI. A eficiência da previsão do modelo foi testada e confirmada por dados de produção em escala industrial. A técnica estatística empregada de adição de variâncias mostrou ser uma ferramenta adequada de estimativa de resultados que envolvem parâmetros e ou elementos que interagem.
- Foi possível conhecer a capacidade do processo.
- A ordem de influência dos elementos na variabilidade do DI foi: Mn, Cr, Mo, C e Si. A adição de ligas de Mn foi alterada, obtendo-se melhoria nos resultados.
- Uma abordagem similar poderia ser usada na estimativa de outros parâmetros tais como carbono equivalente e propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- 1 CHUEN, S. L. K. Estimativa da Temperabilidade do aço SAE 8620 à partir da composição química e do tamanho de grão austenítico. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1979. 186p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 2 WORTMAN, B. The Quality Engineer Primer. 3<sup>rd</sup> ed. Indiana: Quality Council of Indiana, 1993.
- 3 MELLO, G. F. Hardness and Hardenability. ASM, Metals Park, Ohio, 1977a.

- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS , Pennsylvania, USA. A 255 89; Standard Method for End-Quench Test for Hardenability of Steel. Philadelphia, PA, 1989. 18p.
- 5 SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J 406. Methods of Determining Hardenability of Steels. Philadelphia, PA, 1998. 25p.
- 6 GRZYNA, F. M. Product Development. DUDEWICZ, E. J. Basic statistical Methods. In: JURAN, J. M. and GRZYNA, F. M. Quality Control Handbook. 4<sup>th</sup> ed. New York: Mc Graw-Hill Publishing Co., 1988. Chapter 13, pp. 13.56-13.61 and Chapter 23, pp. 23.52-23.59.
- 7 WHEELER, D. J. Charts Done Right. Quality Progress, May 1994, p. 65-58.
- 8 CRUZ, L. C., SANTOS, D. B. Avaliação da Capacidade do Processo de Fabricação em Atender Especificação de Temperabilidade para o Aço SAE 1548M. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 81p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).