

# Capacidade de Processo

Os estudos de capacidade do processo, ou capacidade do processo, tem por objetivo verificar se um processo estatisticamente estável atende às especificações de engenharia do produto ou se há geração de itens não conformes.

Esta análise costuma ser efetuada mediante cálculo e interpretação de índices específicos para essa finalidade.



# Capacidade de Processo

## Índice de Capacidade ( $C_p$ )

Este índice compara a variabilidade total permissível para as peças (ou tolerância de especificação) com a variabilidade do processo de fabricação (tolerância natural).

Para o processo ser capaz o valor deste índice não pode ser inferior a 1,33.

$$C_p = \frac{\text{TOL}}{6.\sigma} = \frac{\text{LSE} - \text{LIE}}{6.\sigma}$$



# Capacidade de Processo

Nível do Processo	Cp	Proporção de Não Conformidade	Histograma Típico
Capaz	$Cp \geq 1,33$	$p \leq 64 \text{ ppm}$	
Razoável	$1 \leq Cp < 1,33$	$64\text{ppm} < p \leq 0,27\%$	
Incapaz	$Cp < 1$	$P > 0,27\%$	



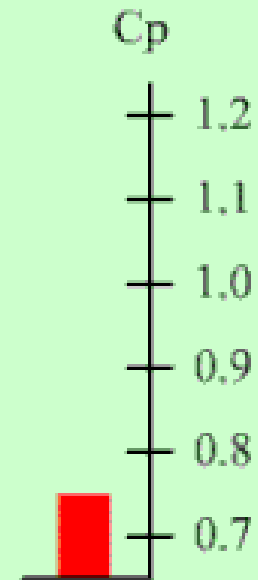
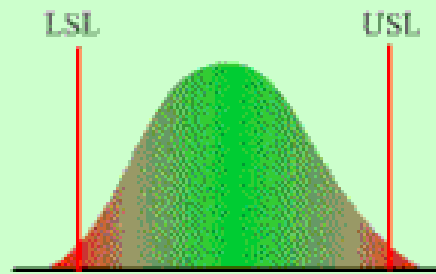
# Capacidade de Processo

## PROCESS CAPABILITY INDICES

- ▶ play
- stop
- ▶ step
- Ⓜrew

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6 \times \sigma}$$

Summarize process potential to meet two-sided specification limits.



© The Red Road



## Índice de Capacidade Específica ( $C_{pk}$ )

É recomendado o seu uso quando se estiver trabalhando com especificações unilaterais, ou quando a média do processo não puder ser deslocada (impossibilidade física ou custo excessivo).

Com este índice, além de se avaliar a variabilidade total permissível para as peças com a tolerância natural de fabricação, verifica-se também a centralização do processo com relação aos limites (superior e inferior) da especificação.

O valor deste índice deve ser igual ou superior a 1, 33 para que o processo seja considerado capaz.



# Capacidade de Processo

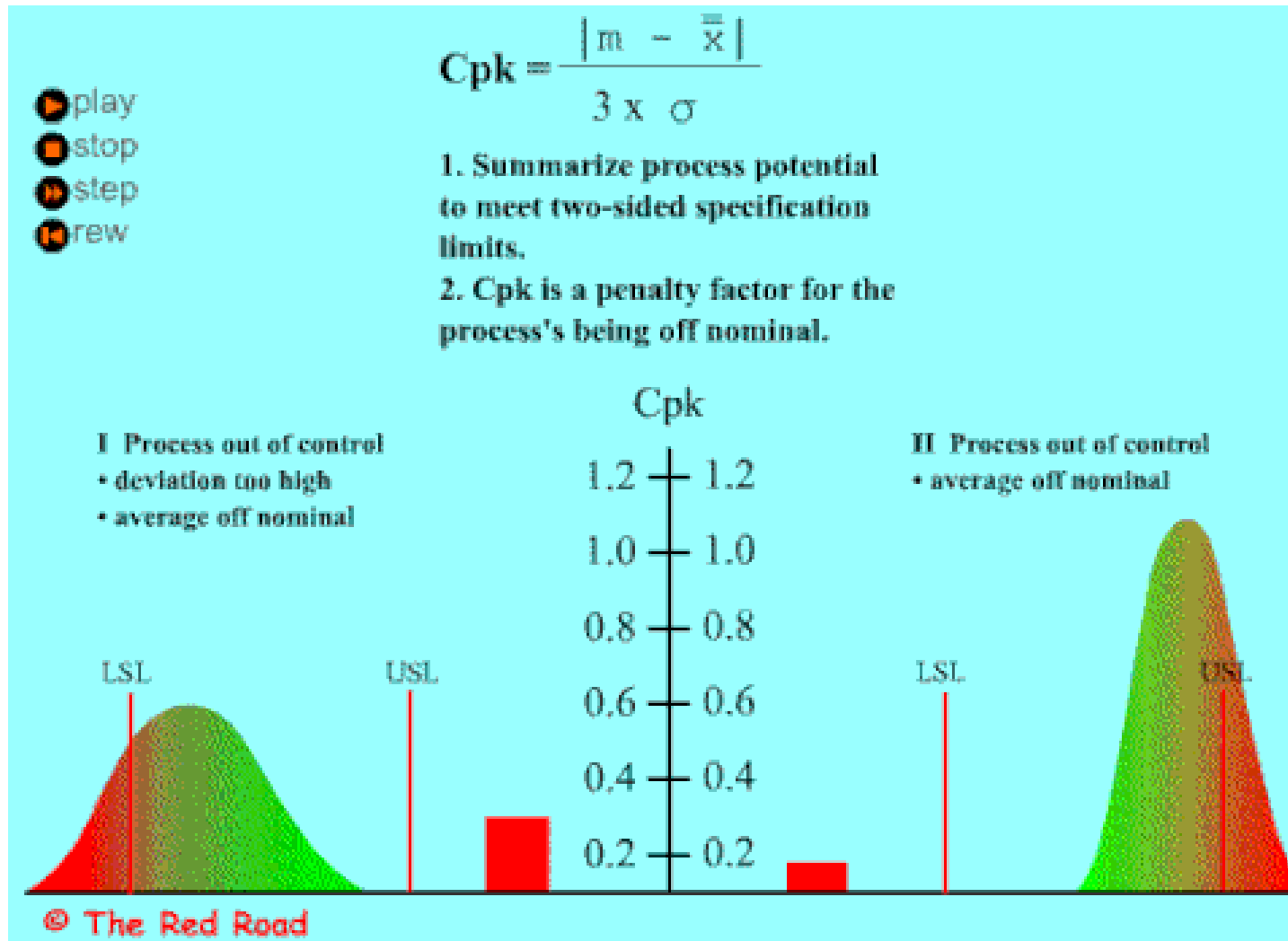
$$C_{pk} = \text{Mín} \{C_{pi}, C_{ps}\}$$

$$C_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3. \sigma}$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3. \sigma}$$



# Capacidade de Processo



# Capacidade de Processo

## Exemplo 1: Quebra de Sapato

### Proposta

Avaliar a capacidade do processo, usando Capability Sixpack (Normal) e Capability Analysis (Normal).

### Problema

Uma importante característica da qualidade que influencia a quebra dos sapatos é a sua dureza (escala Rockwell). O limite inferior de especificação (LSL) é 39 e o limite superior de especificação (USL) é 43, ou seja o valor médio especificado pelo cliente é de 41.

Um analista foi solicitado para avaliar a capacidade do processo, certificando que a produção é capaz de atender as metas exigidas pelo cliente agora e no futuro. O Cpk de 1,5 é requerido para atender as exigências do cliente





# Capacidade de Processo

## Dados Coletados

Os operadores selecionaram aleatoriamente cinco sapatos da linha de produção em intervalos regulares. Estas amostra representam adequadamente a variação inerente ao processo ao longo do tempo. Durante as mensurações os operadores gravaram a dureza de cada sapato quebrado.

## Ferramentas

- Capability Sixpack Normal
- Capability Analysis Normal.

## Arquivo de Dados: BRAKECAP.MPJ

Variável	Descrição
Hardness	Dureza do sapato quebrado
Subgroup	Identificação do subgrupo



# Capacidade de Processo

## Verificando as suposições associadas à Análise de Capacidade

Para obter uma estimativa real da capacidade, as seguintes suposições devem ser satisfeitas:

- O processo está sob controle;
- Os dados provém de uma distribuição normal.

Use o **Capability Sixpack** para verificar estas suposições.

Com base nas determinações do guia AIAG (Automotive Industry Action Group), o Minitab determina qual o gráfico de controle deve ser traçado, baseado no tamanho do subgrupo.

Se o tamanho do Subgrupo é ...	Minitab mostra
1	Gráfico I-MR
2-8	Gráfico Xbar-R
9 ou mais	Gráfico Xbar-S



# Capacidade de Processo

## Capability Sixpack Normal

1. Abra **BRAKECAP.MPJ**;
2. Selecione **Stat>Quality Tools>Capability Sixpack>Normal**;
3. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
4. Clique em **Teste**, selecione **Perform All eight tests**.Clique em **OK**;
5. Clique em **Options**;
6. Em **Target (add Com to table)**, digite **41**.
7. Clique em **OK** em todas as caixas de diálogo

The screenshot shows the 'Capability Sixpack (Normal Distribution)' dialog box. The 'Data are arranged as' section has 'Single column:' selected with 'Hardness' in the text box, and 'Subgroup size:' set to 'Subgroup'. The 'Lower spec:' is 39 and 'Upper spec:' is 43. 'Historical mean' and 'Historical standard deviation' are optional fields. Buttons for 'Transform...', 'Tests...', 'Estimate...', 'Options...', 'Select', 'Help', 'OK', and 'Cancel' are visible.

Capability Sixpack (Normal Distribution)

Data are arranged as

Single column:

Subgroup size:   
(use a constant or an ID column)

Subgroups across rows of:

Lower spec:

Upper spec:

Historical mean:  (optional)

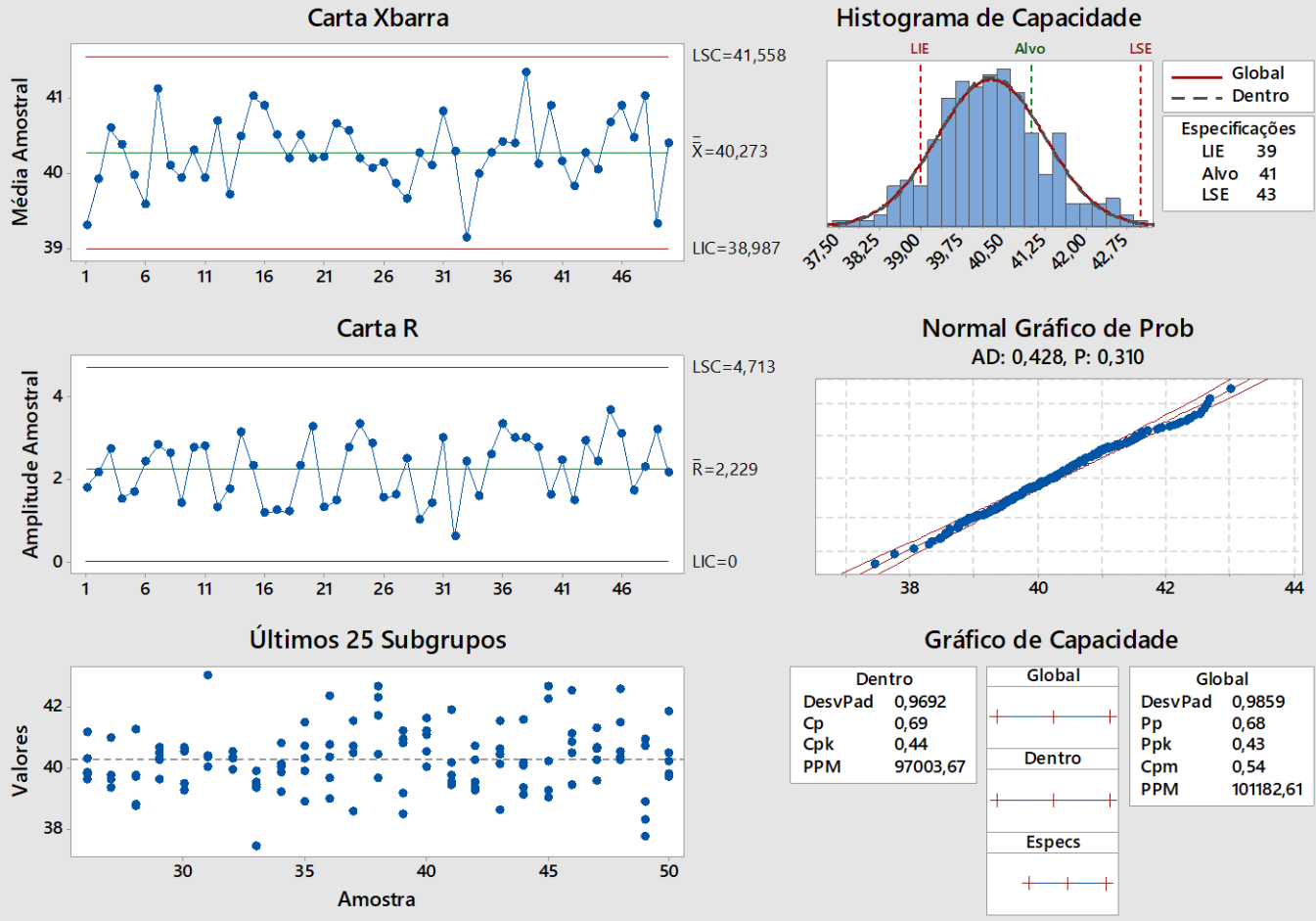
Historical standard deviation:  (optional)

Buttons: Transform..., Tests..., Estimate..., Options..., Select, Help, OK, Cancel



# Capacidade de Processo

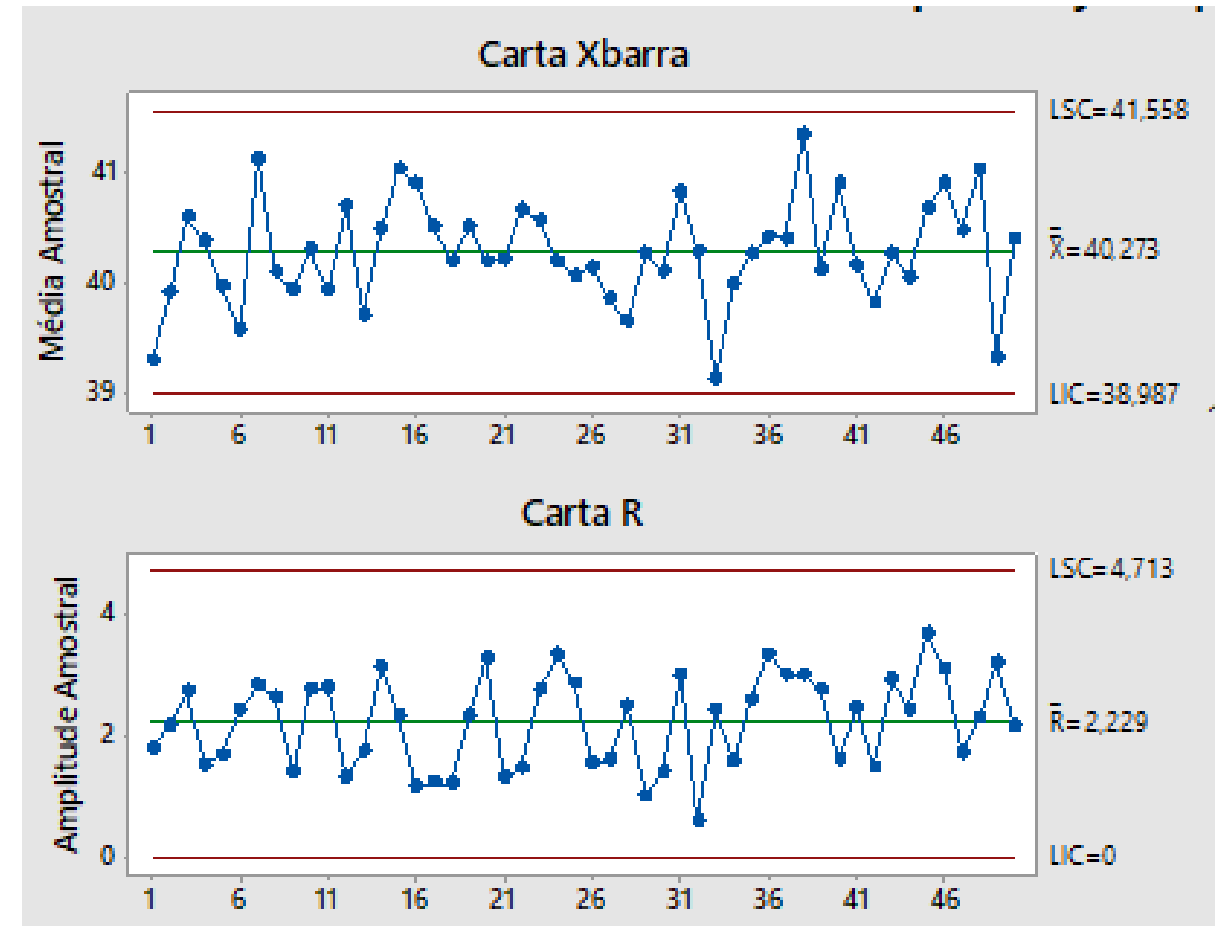
## Relatório de Process Capability Sixpack para Hardness



# Capacidade de Processo

## Gráfico Xbar-R

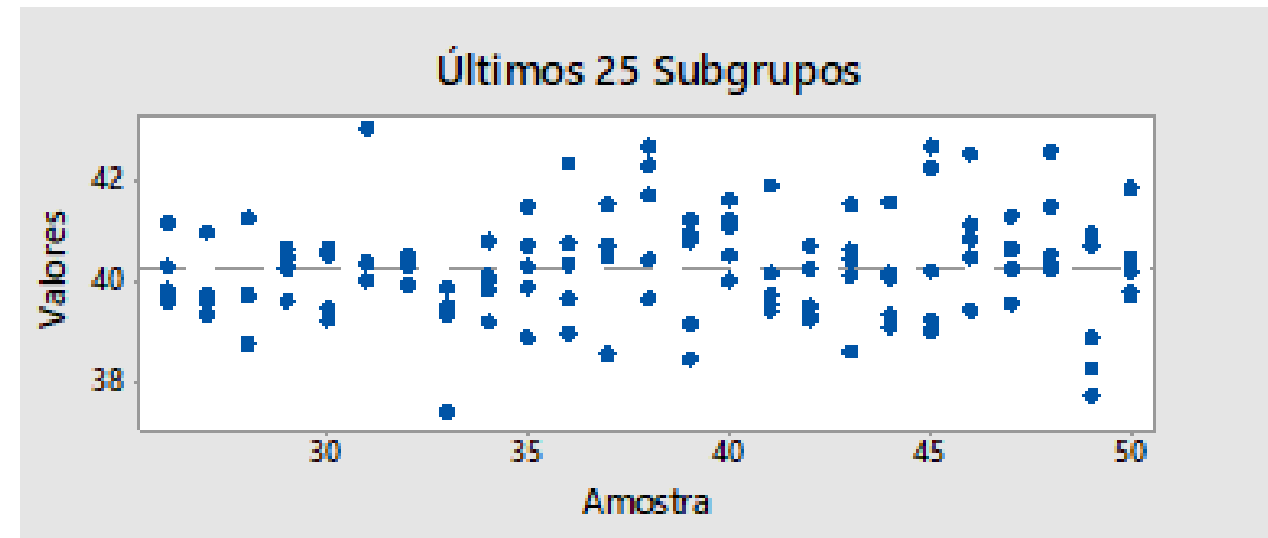
Os Gráficos de Controle mostram que os pontos estão dentro dos limites de controle, sugerindo que o processo se encontra estável. Sendo assim, a média do processo e o desvio-padrão podem ser usados para calcular o índice de capacidade.



# Capacidade de Processo

## Dodplot para os últimos 25 subgrupos

O Dotplot dos 25 últimos subgrupos indica que os valores observados são aleatórios e simetricamente distribuídos em torno da média do processo.

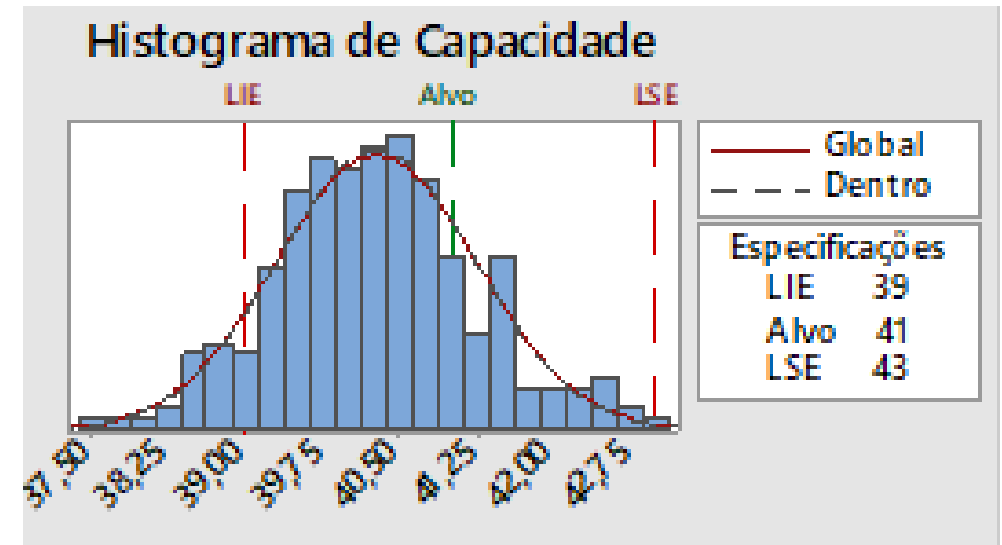


# Capacidade de Processo

## Histograma de Capacidade

Podemos usar o histograma com a curva de distribuição sobreposta sobre as barras para acessar visualmente se os dados provém ou não de uma distribuição Normal. Para acessar as distribuições de normalidade mais objetivamente, usaremos o gráfico de probabilidade e o resultado do teste de normalidade.

Também pode ser observado neste gráfico uma prévia da capacidade do processo, identificando onde ocorre a perda de capacidade.



# Capacidade de Processo

## Teste de Normalidade

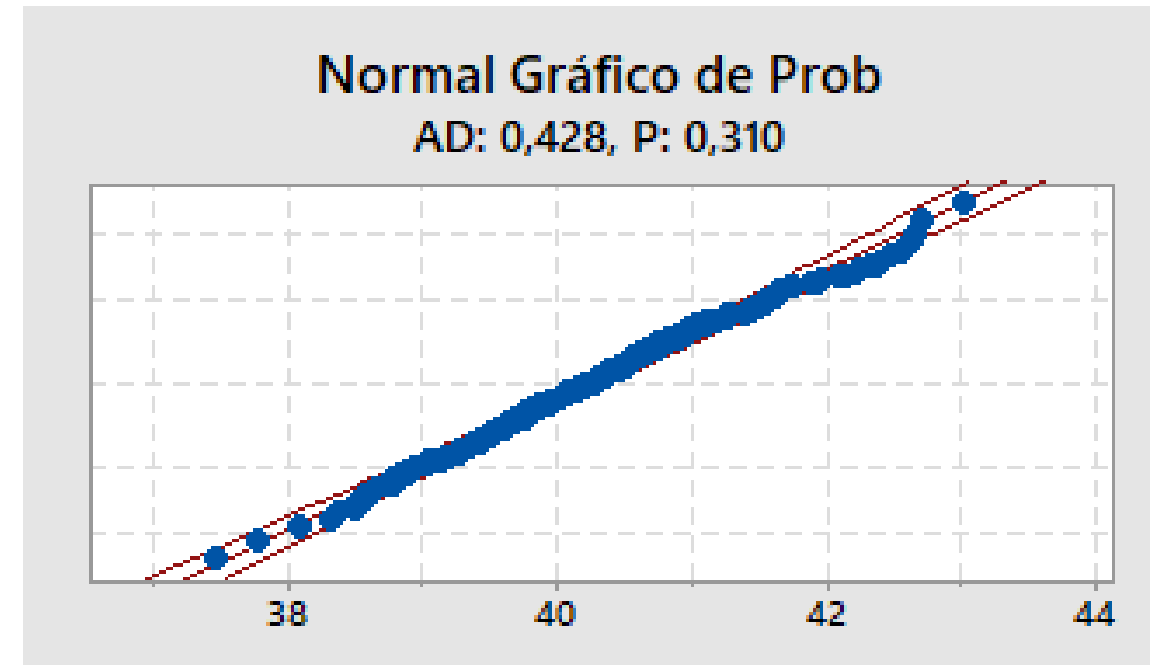
Os dados encontram-se dispersos aproximadamente ao longo de uma linha, indicando que a suposição de normalidade é razoável.

As hipóteses para o teste de normalidade de Anderson-Darling são:

$H_0$ : Dados provém de uma distribuição normal;

$H_1$ : Dados não provém de uma distribuição normal.

Como Valor-P observado (0,310) é maior que 0,05, não rejeitaremos a hipótese nula que os dados provém de uma distribuição Normal, ao nível de 5% de significância.





# Capacidade de Processo

## Capability Analysis Normal

1. Selecione **Stat>Quality Tools>Capability Analysis>Normal**;
2. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
3. Clique em **Options**;
4. Em **Target (adds Com to table)** digite **41**;
5. Marque **Include confidence intervals** ;
6. Clique em **Ok** em todas as caixas de diálogo.

Capability Analysis (Normal Distribution)

Data are arranged as

Single column:

Subgroup size:   
(use a constant or an ID column)

Subgroups across rows of:

Lower spec:   Boundary

Upper spec:   Boundary

Historical mean:  (optional)

Historical standard deviation:  (optional)

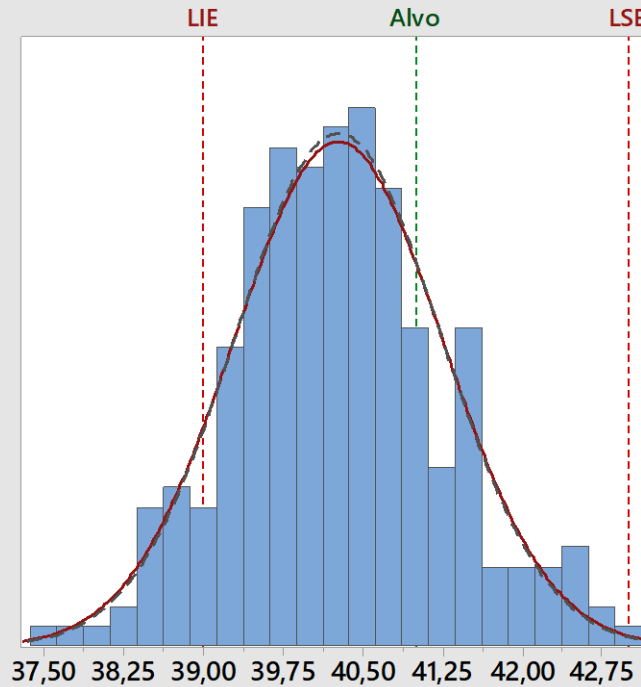
Buttons: Transform..., Estimate..., Options..., Storage..., Select, Help, OK, Cancel



# Capacidade de Processo

## Relatório de Capacidade do Processo para Hardness (usando 95,0% de confiança)

Dados do Processo	
LIE	39
Alvo	41
LSE	43
Média Amostral	40,2728
N Amostral	250
DesvPad(Global)	0,985882
DesvPad(Dentro)	0,969225



— Global  
- - - Dentro

Capacidade Global	
Pp	0,68
IC para Pp	(0,62; 0,74)
PPL	0,43
PPU	0,92
Ppk	0,43
IC para Ppk	(0,37; 0,49)
Cpm	0,54
LI para Cpm	0,51

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	0,69
IC para Cp	(0,62; 0,76)
CPL	0,44
CPU	0,94
Cpk	0,44
IC para Cpk	(0,38; 0,50)

	Desempenho		
	Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	96000,00	98347,40	94555,64
PPM > LSE	4000,00	2835,22	2448,03
PPM Total	100000,00	101182,61	97003,67



# Capacidade de Processo

## Capacidade (dentro do Subgrupo) Potencial

Os índices de Capacidade são calculados usando a estimativa da média e desvio-padrão do processo nos subgrupos.

### *C<sub>p</sub>*

Este índice de capacidade compara a variação tolerada para o processo especificado pelo cliente (tolerância) com a região total ocupada pelo processo sob controle estatístico. A equação de cálculo é:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sigma_{within}}$$

Se somente o limite superior de especificação for avaliado, o Minitab não processa o *C<sub>p</sub>*. Devido ao fato do *C<sub>p</sub>* não avaliar se o processo se encontra centrado no valor alvo, ele representa teoricamente a capacidade potencial do processo.



# Capacidade de Processo

## Cpu e Cpl

Ambas estatísticas Cpl e Cpu avaliam não somente a variabilidade, mas também se o processo se encontra centrado no valor alvo especificado pelo cliente. As equações de cálculo são:

$$CPL = \frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot \sigma_{within}}$$

$$CPU = \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_{within}}$$

## CpK

O CpK é igual ao menor valor entre Cpl e Cpu. Se CpK e Cp forem idênticos significa que o processo está centrado nos limites de especificação. Quanto mais distante o processo estiver do centro da especificação do cliente, menor será o valor de CpK em relação ao Cp.



# Capacidade de Processo

## Capacidade Total

Ambas as variações entre os subgrupos e dentro de cada subgrupo contribuem com a variação total do processo. Quando o processo está sob controle estatístico, a cada variação entre os subgrupos é atribuído um peso marcado nos subgrupos, então podemos dizer grosseiramente que o desvio-padrão total é igual ao desvio-padrão nos subgrupos.

As equações de cálculo da Capacidade Total são similares as da Capacidade Potencial com exceção do desvio padrão:

$$Pp = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sigma_{overall}} \quad , \quad PPL = \frac{\bar{x} - LSL}{3 \cdot \sigma_{overall}} \quad , \quad PPU = \frac{USL - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_{overall}}$$



# Capacidade de Processo

## Cpm

Ocasionalmente, alguns analistas gostam de operar em torno de um valor alvo que não é necessariamente centrado nos limites de especificação do cliente. Neste caso, o CpK não é uma estatística útil e, ao invés disso, utilizaremos o Cpm.

O Cpm será calculado através da equação:

$$Cpm = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\frac{\sum (X_i - Alvo)^2}{n - 1}}}$$



# Capacidade de Processo

## Exemplo 2: Isolamento Cerâmico

### Proposta

Avaliar a capacidade do processo, para dados não normais, usando a transformação de Box-Cox e Johnson

### Problema

Para a Companhia que produz isolamentos cerâmicos, o estudo avalia a capacidade da Companhia em atingir as especificações do cliente. O isolamento cerâmico é um cilindro com um orifício no centro. As especificações exigem que o orifício seja concêntrico, com diâmetro máximo de 30 microns.



# Capacidade de Processo

## Dados Coletados

Isolamentos Cerâmicos são assados em grandes fornos formando lotes em cada três horas. Por motivos de monitoramento de processo, os técnicos selecionaram aleatoriamente 10 isolamentos cerâmicos de cada lote e mediram sua concentricidade.

## Ferramentas

- Capability Sixpack Normal
- Individual Distribution Identification;
- Johnson Transformation;
- Capability Analysis NonNormal.

## Arquivo de Dados: CERAMIC.MPJ

Variável	Descrição
Concentricity	Diâmetro do orifício
Date/Times	Data e hora que o isolador foi fabricado





# Capacidade de Processo

## Capability Sixpack Normal

1. Abra **CERAMIC.MPJ**;
2. Selecione **Stat>Quality Tools>Capability Sixpack>Normal**;
3. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
4. Clique em **Test**, selecione **Perform All eight tests**.Clique em **OK**;
5. Clique em **Options**;
6. Em **Target (add Com to table)**, digite **41**.
7. Clique em **OK** em todas as caixas de diálogo

Capability Sixpack (Normal Distribution)

Data are arranged as

Single column: Concentricity

Subgroup size: 'Date/Time'  
(use a constant or an ID column)

Subgroups across rows of:

Lower spec:

Upper spec:

Historical mean:  (optional)

Historical standard deviation:  (optional)

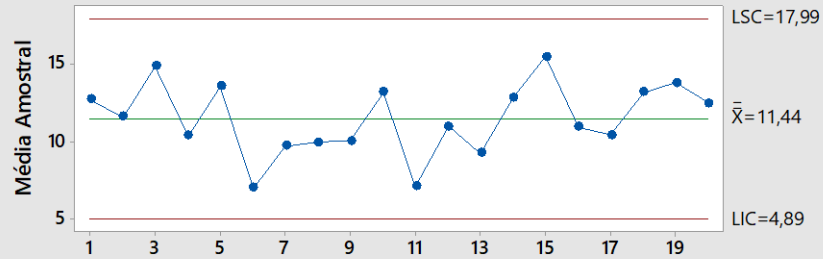
Buttons: Transform..., Tests..., Estimate..., Options..., Select, Help, OK, Cancel



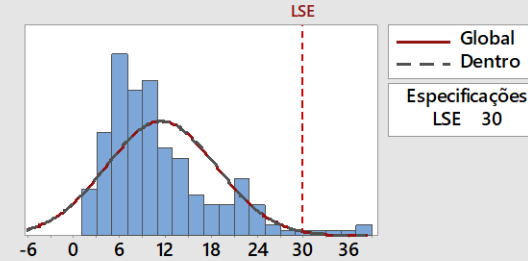
# Capacidade de Processo

## Relatório de Process Capability Sixpack para Concentricity

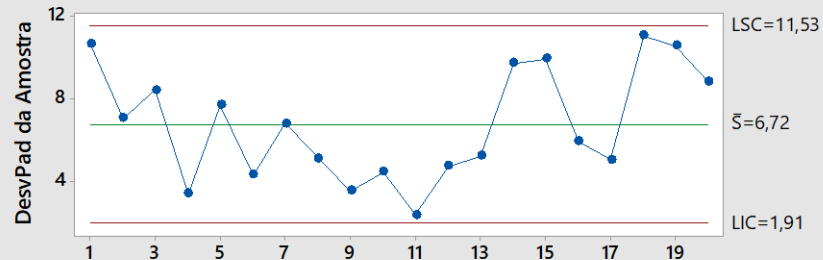
Carta Xbarra



Histograma de Capacidade

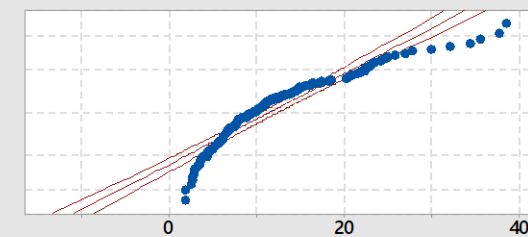


Carta S



Normal Gráfico de Prob

AD: 6,713, P: < 0,005



Últimos 20 Subgrupos

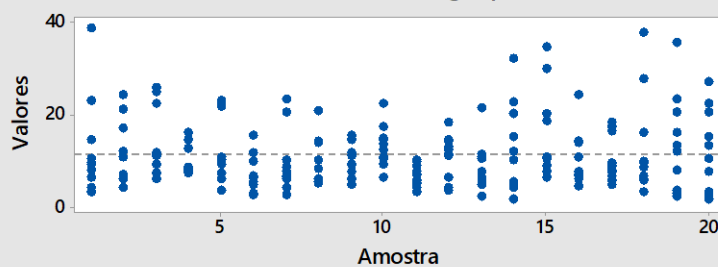
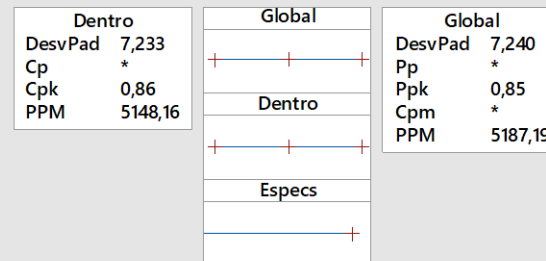


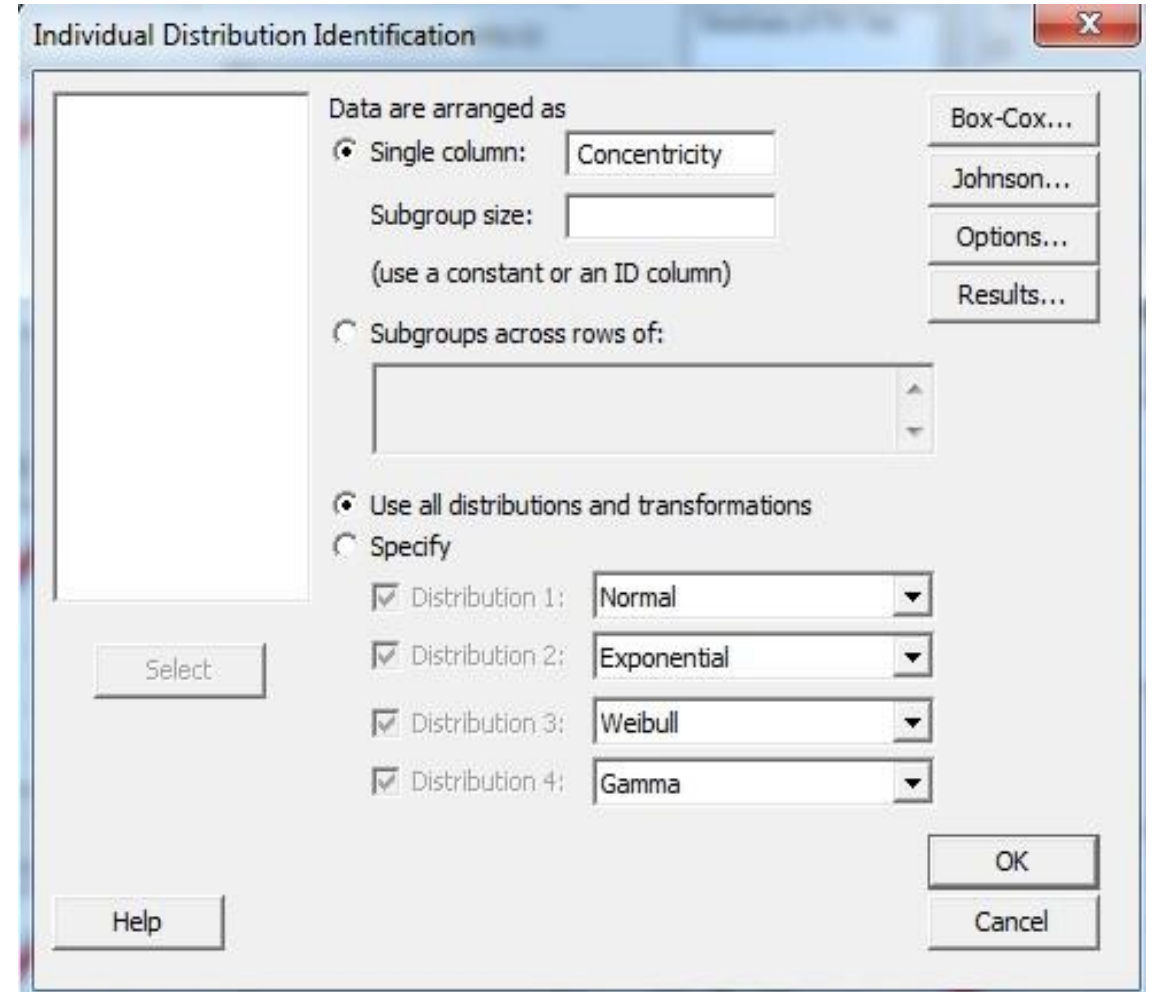
Gráfico de Capacidade



# Capacidade de Processo

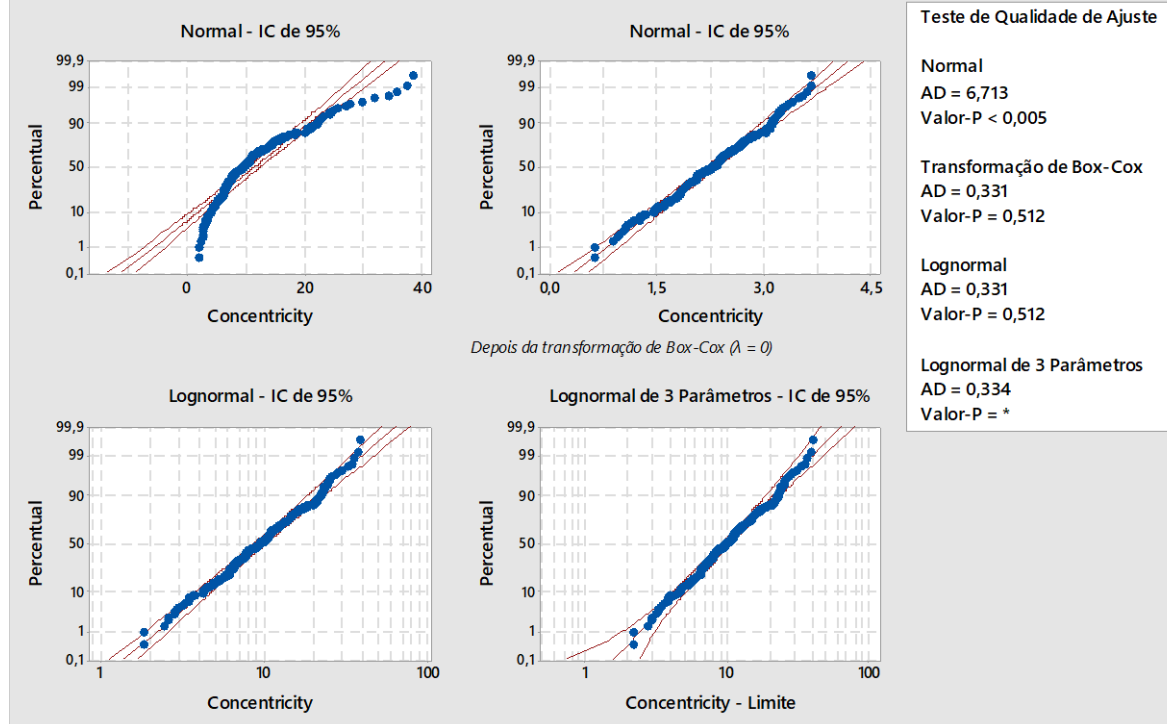
## Individual Distribution Identification

1. Selecione **Stat>Quality Individual Distribution Identification**;
2. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
3. Clique em **Ok**.

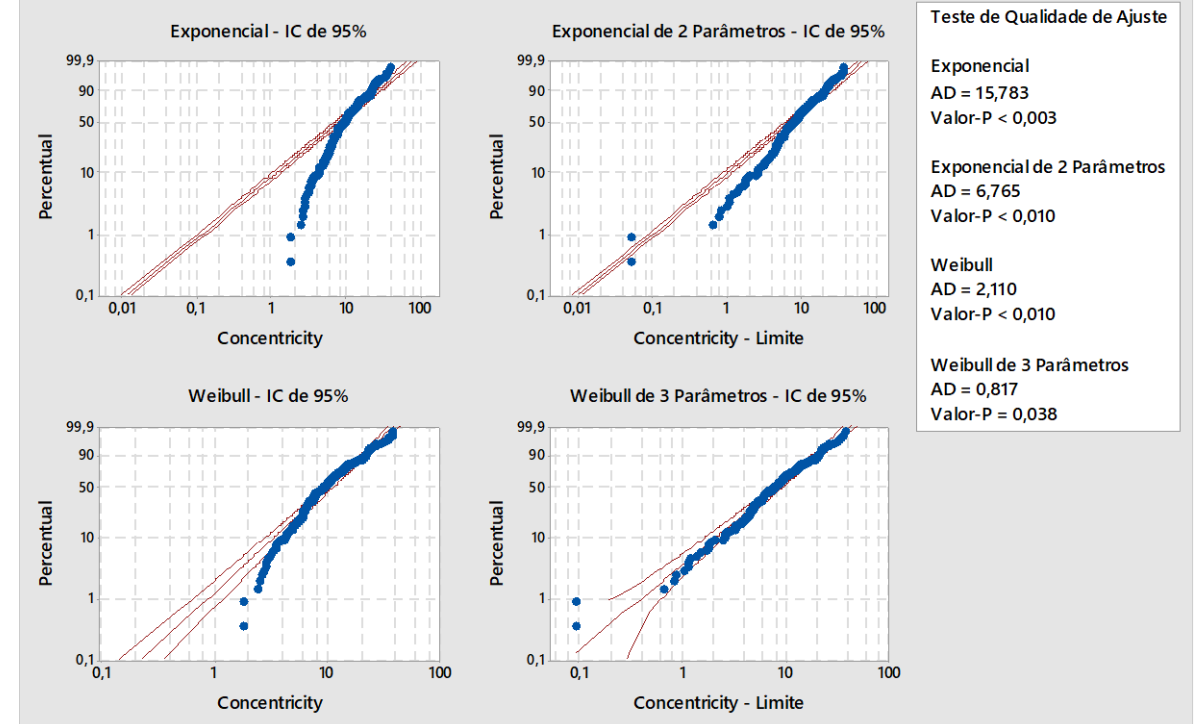


# Capacidade de Processo

## Gráfico de Probabilidade para Concentricity

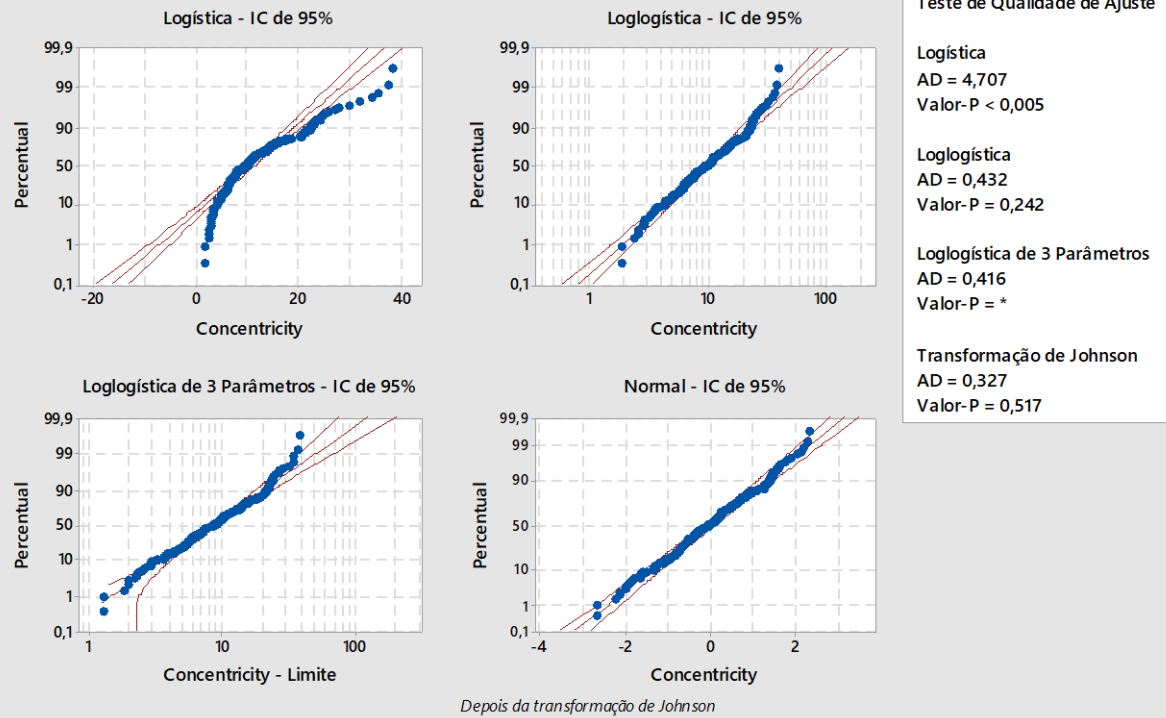


## Gráfico de Probabilidade para Concentricity

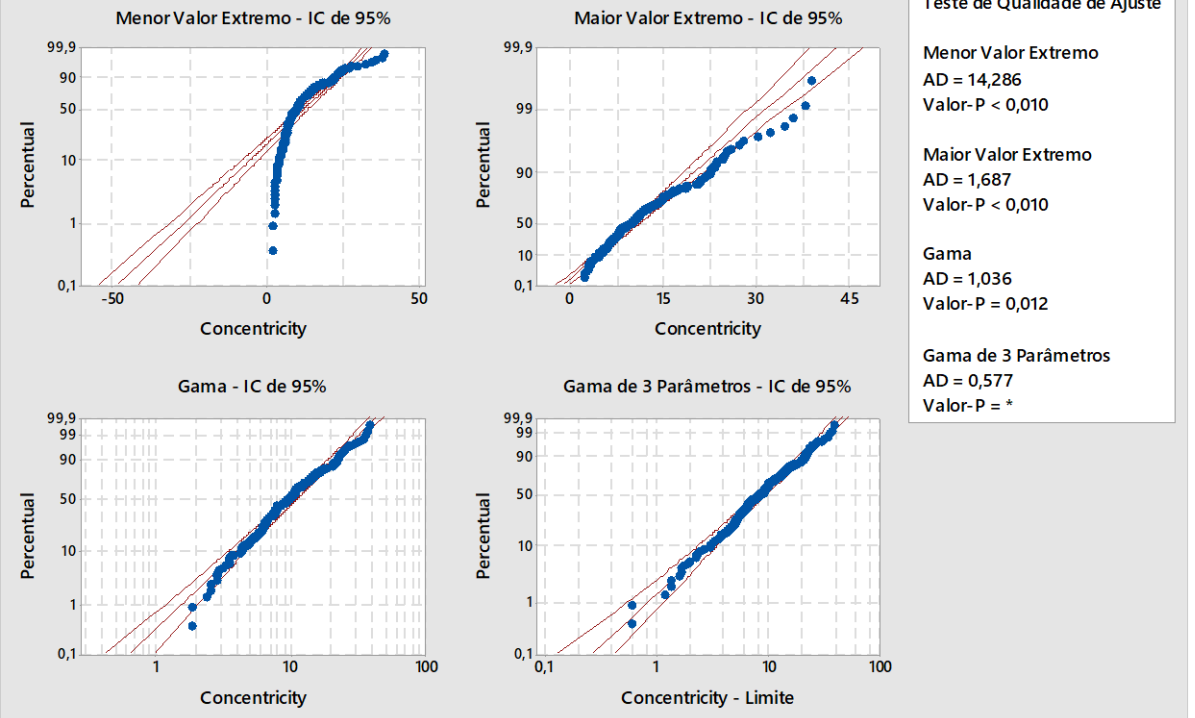


# Capacidade de Processo

## Gráfico de Probabilidade para Concentricity



## Gráfico de Probabilidade para Concentricity



# Capacidade de Processo

## Capability Analysis (Normal) Box-Cox Transformation

1. Abra **CERAMIC.MPJ**;
2. Selecione **Stat>Quality Tools>Capability>Normal**;
3. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
4. Clique em **Transform**, marque **Box-Cox power transformation ( $W = Y^{**\lambda}$ )**, e marque a opção **Use optimal lambda**.
5. Clique em **Options**, então marque **Include confidence intervals**;
6. Clique em **OK** em todas as caixas de diálogo.

Capability Analysis (Normal Distribution)

Data are arranged as

Single column:

Subgroup size:

(use a constant or an ID column)

Subgroups across rows of:

Lower spec:   Boundary

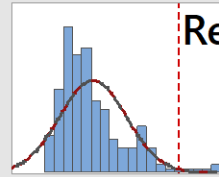
Upper spec:   Boundary

Historical mean:  (optional)

Historical standard deviation:  (optional)

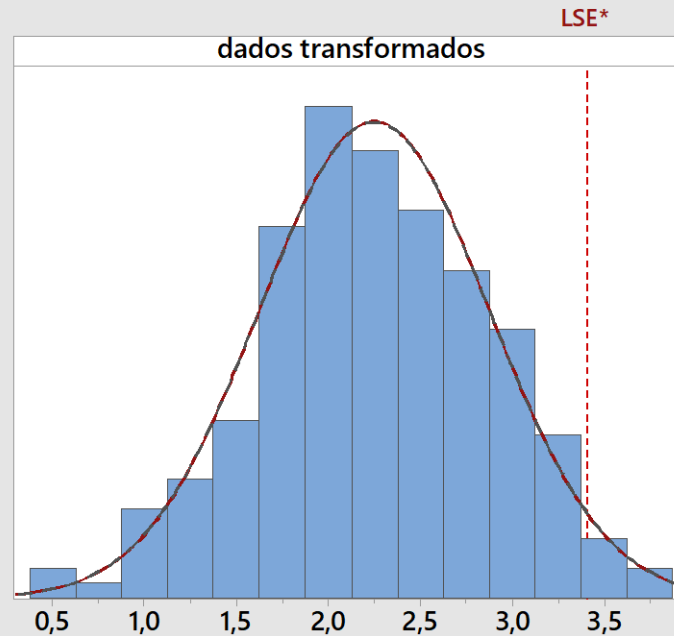


# Capacidade de Processo



Relatório de Capacidade do Processo para Concentricity  
 Usar Transformação de Box-Cox com  $\lambda = 0$   
 (usando 95,0% de confiança)

Dados do Processo	
LIE	*
Alvo	*
LSE	30
Média Amostral	11,4425
N Amostral	200
DesvPad(Global)	7,24028
DesvPad(Dentro)	7,23288
Depois da Transformação	
LIE*	*
Alvo*	*
LSE*	3,4012
Média Amostral*	2,25027
DesvPad(Global)*	0,62389
DesvPad(Dentro)*	0,624649



Capacidade Global	
Pp	*
IC para Pp	(*; *)
PPL	*
PPU	0,61
Ppk	0,61
IC para Ppk	(0,54; 0,69)
Cpm	*
Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	*
IC para Cp	(*; *)
CPL	*
CPU	0,61
Cpk	0,61
IC para Cpk	(0,54; 0,69)

	Desempenho		
	Observado	Global Esperado*	Dentro Esperado*
PPM < LIE	*	*	*
PPM > LSE	25000,00	32536,18	32699,80
PPM Total	25000,00	32536,18	32699,80

\* Calculado com LIE\* e LSE\*



# Capacidade de Processo

## Capability Analysis (Normal) Johnson Transformation

1. Selecione **Stat>Quality Tools>Capability Analysis>Normal**;
2. Complete a caixa de diálogo, como mostra a figura a seguir:
3. Clique em **Transform**;
4. Selecione **Johnson Transformation (for overall analysis only)**;
5. Clique em **OK**;
6. Clique em **Options**;
7. Marque **Include confidence intervals**.
8. Clique em **OK** em todas as caixas de diálogo.

Capability Analysis (Normal Distribution)

C1	Concentricity
C2	Date/Time

Data are arranged as

Single column:

Subgroup size:   
(use a constant or an ID column)

Subgroups across rows of:

Lower spec:   Boundary

Upper spec:   Boundary

Historical mean:  (optional)

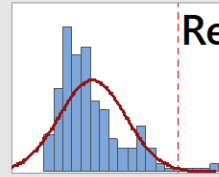
Historical standard deviation:  (optional)

Buttons: Transform..., Estimate..., Options..., Storage..., Select, Help, OK, Cancel



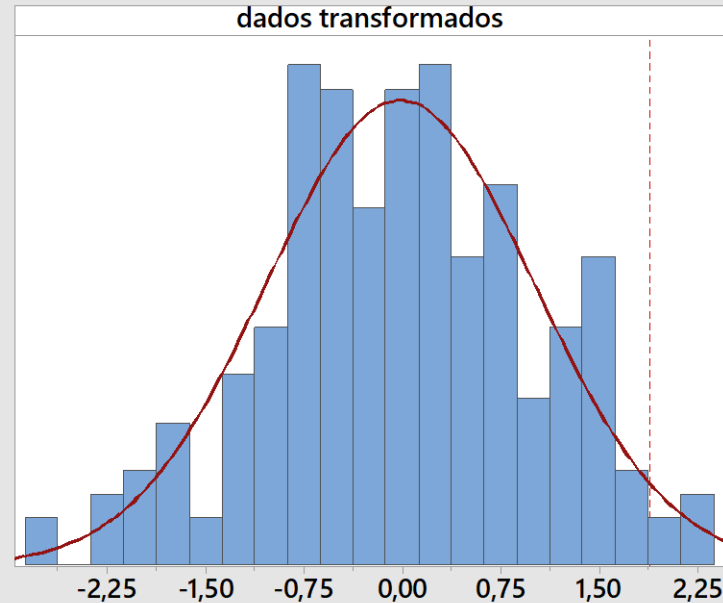


# Capacidade de Processo



**Relatório de Capacidade do Processo para Concentricity**  
**Transformação de Johnson com SL Tipo de Distribuição**  
 $-3,809 + 1,671 \times \ln(X + 0,161)$   
 (usando 95,0% de confiança)

Dados do Processo	
LIE	*
Alvo	*
LSE	30
Média Amostral	11,4425
N Amostral	200
DesvPad(Global)	7,24028
Depois da Transformação	
LIE*	*
Alvo*	*
LSE*	1,88372
Média Amostral*	-0,0147461
DesvPad(Global)*	1,02141



Capacidade Global	
Pp	*
IC para Pp	(*; *)
PPL	*
PPU	0,62
Ppk	0,62
IC para Ppk	(0,54; 0,70)
Cpm	*

	Desempenho	
	Observado	Global Esperado*
PPM < LIE	*	*
PPM > LSE	25000,00	31536,80
PPM Total	25000,00	31536,80

\* Calculado com LIE\* e LSE\*

