



Relatório de Usinagem

Torneamento e Fresamento

Leonardo Maximo Silva Matrícula: 200022172

22 de Fevereiro de 2023

Conteúdo

1	Objetivos	1
2	Fundamentação Teórica da Análise de Capabilidade	1
3	Processo de Torneamento	1
3.1	Projeto	1
3.2	Materiais Utilizados e Parâmetros da Máquina de Usinagem	2
3.3	Planejamento de Usinagem e Código Utilizado	3
3.4	Simulações, Resultados e Usinagem Obtida	7
3.5	Dados colhidos e Análise de Capabilidade	9
3.5.1	Análise de Capabilidade	9
3.5.2	Análise de Erros	25
4	Processo de Fresamento	29
4.1	Projeto	29
4.2	Materiais Utilizados e Parâmetros da Máquina de Usinagem	30
4.3	Planejamento de Usinagem e Código Utilizado	30
4.4	Simulações, Resultados e Usinagem Obtida	36
4.5	Dados colhidos e Análise de Capabilidade	37
4.5.1	Análise de Capabilidade	37
4.5.2	Análise de Erros	43
5	Conclusão	47

1 Objetivos

Demonstrar o Processo de Ciclo de Vida de um Produto a partir da realização do Projeto, geração do Código NC, Simulação e Fabricação de uma peça de Torneamento e de uma peça de Fresamento nas Máquinas Didáticas providas pelo Laboratório GRACO.

2 Fundamentação Teórica da Análise de Capabilidade

O Erro Dimensional consiste no quanto uma determinada medida varia de seu valor desejado e pode ser interpretado segundo um Processo de Análise de Capabilidade. O Erro Geométrico, por outro lado, consiste no quanto a forma de uma peça produzida difere da forma desejada. Para o Processo de Torneamento realizado, é de especial importância o Erro de Paralelismo, o qual indica se a peça usinada encontrava-se com uma inclinação pequena em relação ao Torno tal que não haja um Erro Significativo durante a Usinagem. Para o Processo de Fresamento realizado, o Erro de Perpendicularidade é importante e indica a perpendicularidade entre os lados horizontal e vertical do Frame de 175X175 (mm) construído. A máquina também pode propagar um erro durante o seu funcionamento, conhecido como Erro de Retilineidade, o qual, com o auxílio de uma reta de Erros para as medidas tomadas da peça, pode ser tomado como sendo a diferença absoluta entre o maior erro medido e o correspondente erro localizado na reta de Erros.

A Análise de Capabilidade é um Processo Estatístico utilizado para controlar a produção de um Produto ao indicar o quanto capaz determinado Processo de Fabricação é de produzir uma peça de acordo com os parâmetros requisitados. Essa análise envolve o uso de diversos parâmetros, sendo o mais utilizado conhecido como Índice de Capacidade Potencial (C_p).

O C_p indica, desconsiderando a localização do processo no Campo de Tolerância do Produto, o quanto centralizado em relação à uma distribuição normal as medidas tomadas para um produto estão localizadas, sendo, logo, bilateral e dado por um fator de 6σ ([2]). O C_p pode ser modelado pela equação 1, na qual LSE é o limite superior de afastamento especificado pela tolerância superior do Projeto e LIE é o limite inferior de afastamento especificado pela tolerância inferior do Projeto. O c_p é considerado satisfatório quando é maior ou igual a 1, representando que mais de 99,74% das medidas tomadas encontram-se dentro da Faixa de valores desejados para o Processo.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (1)$$

Outro parâmetro também muito utilizado é o Índice de Capacidade Relativo à Localização (C_{pk}), o qual indica o afastamento das medidas tomadas em relação à média do processo e o Limite de Tolerância Superior ou Inferior, estando, logo, associado à metade da faixa de variação natural do processo (3σ), [2]. Como esse índice não leva em consideração toda faixa de variação do processo, o C_{pk} não foi utilizado para a realização da Análise de Capabilidade das peças produzidas por Torneamento e por Fresamento.

3 Processo de Torneamento

3.1 Projeto

A peça de torneamento planejada deve ter 100mm de Comprimento, Diâmetro mínimo maior ou igual a 30mm, ao menos 5 Diâmetros diferentes e uma interpolação Circular. O plano de Trabalho escolhido foi o XZ de modo que o Zero de Projeto foi tomado como sendo o Centro da Face direita da peça, de modo que o eixo Z seja perpendicular a uma seção Transversal da peça e o eixo X seja paralelo a essa seção.

O Projeto foi realizado em Papel Milimetrado para facilitar sua execução, de modo a obter a peça 1, a qual possui 5 Diâmetros Diferentes, Diâmetro Mínimo de 32mm e duas Interpolações Circulares. Os 5 Diâmetros diferentes ecolhidos foram D1 = 44mm; D2 = 38mm; D3 = 36mm; D4 = 32mm e D5 = 40mm.

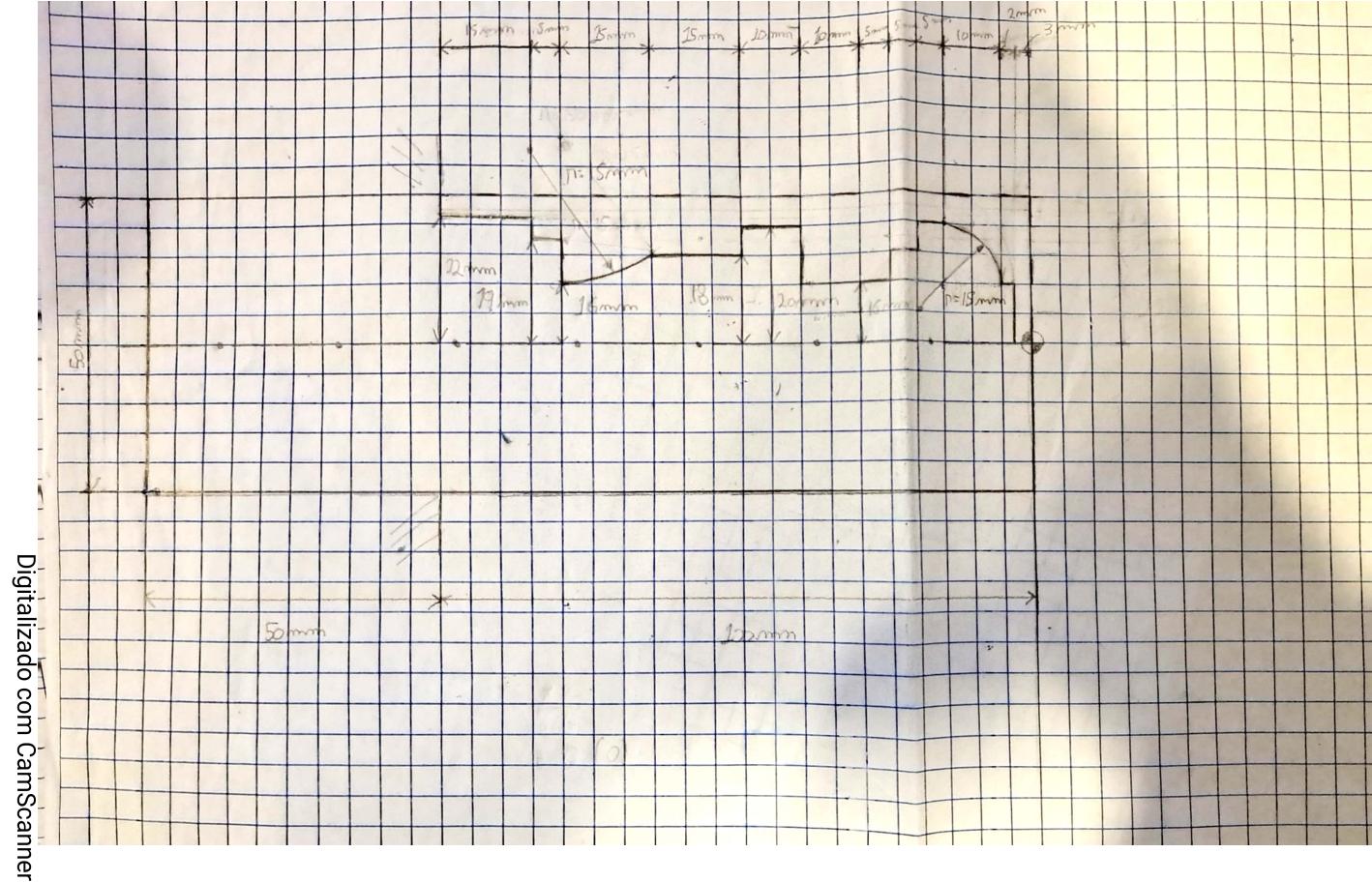


Figura 1: Projeto da peça de Torneamento

3.2 Materiais Utilizados e Parâmetros da Máquina de Usinagem

Para a Execução do Sólido de Revolução correspondente à peça de Torneamento, escolheu-se uma Vela de Sete Dias de Comprimento 150mm, dos quais 50mm foram utilizados para fixação e 100mm para a usinagem, e de Diâmetro de 50mm. O material utilizado foi, portanto, parafina.

O material foi usinado no Torno Didático fornecido pelo Laboratório GRACO. O Plano de Trabalho XZ foi utilizado para uma velocidade de avanço de 450mm/min, uma ferramenta do tipo bit de altura e espessura de 2mm foi escolhida e considerou-se um diâmetro mínimo de 32mm, considerando-se uma margem de segurança de 2mm em relação ao diâmetro mínimo sugerido de 30mm. Para o Torneamento realizado, a Máquina foi zerada manualmente de modo a se considerar o Zero Ferramenta como idêntico ao Zero Peça segundo as especificações de Projeto (1). O Plano de Segurança utilizado durante a Uinagem consistiu da coordenadas Z = 5mm e X = 30mm de acordo com o ponto zero utilizado em 1. As informações relacionadas ao Torneamento estão sumarizadas em 1

Peça Base	Vela de Sete Dias
Material	Parafina
Comprimento	150mm
Diâmetro	50mm
Máquina Utilizada	Torno Didático
Plano de Trabalho	XZ
Velocidade de Avanço	450mm/min
Ferramenta	Bit de 2mm de altura e de espessura
Diâmetro Mínimo Utilizado	32mm
Zeramento	Zero Ferramenta igual ao Zero Peça
Plano de Segurança	Zero Z = 5mm e X = 30mm

Tabela 1: Material e configuração de máquina torneamento

3.3 Planejamento de Usinagem e Código Utilizado

O Planejamento da Usinagem para o Torneamento foi dado a partir de um passo inicial de balanceamento, uma passo de desbaste, um passo de faceamento e dois passos de acabamento.

O passo inicial de balanceamento consistiu em dois passos de usinagem para a remoção de 2mm de diâmetro (ou 1mm de raio) da peça torneada a cada passo de usinagem realizado. Garantiu-se, dessa forma, que a Vela de Sete Dias Usinada apresentasse rotação relativamente uniforme em torno de seu eixo de modo a garantir que não ocorressem problemas durante a usinagem devido a uma rotação não uniforme.

O passo de Desbaste consistiu na remoção de material da peça utilizando uma estratégia de aproximação, uma estratégia de usinagem e uma estratégia de retração de modo a se obter a peça projetada em 1. A estratégia de aproximação consistiu no posicionamento da Ferramenta, a partir de seu Plano de Segurança, no ponto mais à direita de uma seção de remoção de material em Z, mantendo a coordenada X em 5mm, de modo que a peça não seja usinada e que seja possível o uso do Comando G00. A estratégia de usinagem consistiu no uso do Comando G01 para se realizar a retirada do material a partir do ponto desejado na peça. É importante ressaltar que utilizou-se o Comando G01 para o posicionamento da Ferramenta no ponto inicial de uma Interpolação Circular, para a qual foram utilizadas os Comandos G02 (no sentido horário) ou G03 (no sentido anti-horário). A estratégia de retração consistiu no retorno da Ferramenta à posição X = 5mm a partir da última coordenada Z correspondente ao fim do passo de usinagem seguida do uso da instrução G00 para o retorno ao Ponto de Segurança. Durante a Estratégia de Retração, o Cavaco gerado durante a usinagem era removido manualmente. Em cada volume de material removido, foi deixado 1mm de sobrematerial para ser usinado durante o Passo de Acabamento.

O passo de Faceamento consistiu na remoção de 2mm em Z do material a partir do ponto Z = 5mm, de modo que o Comando G01 seja utilizado para se usinar de Z = 5mm até Z = -2mm partindo de X = 19mm (em raio) até X = 1mm em um passo de -2mm. Após X = 1mm, a ferramenta é posicionada em X = -1mm de modo a garantir que não haja uma sobra da vela antes da usinagem no ponto X = 0mm.

O Primeiro passo de Acabamento consistiu na remoção do 1mm de sobrematerial deixado durante o passo de desbaste de modo a se realizar uma usinagem de Z = 0mm a Z = -100mm realizando o "contorno" da peça. O Segundo passo de Acabamento consistiu na repetição do Primeiro Passo de Acabamento, de modo a garantir que não haja material restante durante o acabamento.

O Código utilizado para a realização do Torneamento pode ser visto a seguir:

```
(% 200022172)
(Inicio)
(%1000)
```

N30 G90 G18 G21 G40

(Plano de Seguranca)

N42 G00 X30

N45 Z5

(Balanceamento)

N50 X24

N60 G01 Z-100 F4500

N70 G00 X30

N80 Z5

(Balanceamento 2)

N90 X23

N100 G01 Z-100

N110 G00 X30

N120 Z5

(Desbaste Inicial)

N130 X21

N140 G01 Z-85 F500

N150 G00 X30

N160 G00 Z5

N165 Z-50

N168 G01 X20

N180 Z-85

N190 G00 X30

N200 G00 Z5

N210 Z-50

N220 G01 X19

N230 Z-80

N240 G00 X30

N250 Z5

(Interpolacao Circular 1)

N260 Z-65

N265 G01 X19

N270 G02 X17 Z-80 R15

N280 G00 X30

N290 Z5

N300 Z-20

N310 G01 X19

N320 Z-40

N330 G00 X30

N340 Z5

N350 Z-25

N360 G01 X17
N370 Z-40
N380 G00 X30
N390 Z5

(Antes da Interpolacao Circular 2)
(Retirada do Topo)

N400 G01 X19
N410 Z-5
N420 G00 Z5

N430 G01 X17
N440 Z-5
N450 G00 Z5

N460 G01 X15
N470 Z-3
N480 G00 Z5

N490 G01 X13
N500 Z-3
N510 G00 Z5

N520 G01 X11
N530 Z-3
N540 G00 Z5

N550 G01 X9
N560 Z-3
N570 G00 Z5

N580 G01 X7
N590 Z-3

N600 G00 Z5

N610 G01 X5
N620 Z-3
N630 G00 Z5

N640 G01 X3
N650 Z-3
N660 G00 Z5

N670 G01 X1
N680 Z-3
N690 G00 Z5

N700 G01 X-2
N710 X0
N720 Z-3
N730 G00 Z5

N740 G00 X30

(Interpolacao Circular 2)

N750 Z-5

N760 G01 X17

N770 G03 X21 Z-15 R15

N780 G00 X30

N790 Z5

(Acabamento)

N800 G01 X16

N810 Z-5

N820 G03 X20 Z-15 R15

N830 G01 X20

N840 Z-20

N850 X18

N860 Z-25

N870 X16

N880 Z-40

N890 X20

N900 Z-50

N910 X18

N920 Z-65

N930 G02 X16 Z-80 R15

N940 G01 X19

N950 Z-85

N960 X22

N970 Z-100

N980 G00 X30

N990 Z-5

(Acabamento 2)

N1000 G01 X15

N1010 G01 Z-3

N1020 G01 X14

N1030 G01 Z-3

N1040 G01 X12

N1050 G01 Z-3

N1060 G01 X10

N1070 G01 Z-3

N1080 G01 X8

N1090 G01 Z-3

N1100 G01 X6

N1200 G01 Z-3

N1300 G01 X4

N1400 G01 Z-3

```
N1500 G01 X2
N1600 G01 Z-3

N1700 G01 X0
N1800 G01 Z-3

N1900 G01 X16
N1910 Z-5
N1920 G03 X20 Z-15 R15
N1930 G01 X20
N1940 Z-20
N1950 X18
N1960 Z-25
N1970 X16
N1980 Z-40
N1990 X20
N2000 Z-50
N2010 X18
N2020 Z-65
N2030 G02 X16 Z-80 R15
N2040 G01 X19
N2050 Z-85
N2060 X22
N2070 Z-100
N2080 G00 X30
N2090 Z5
M30
```

3.4 Simulações, Resultados e Usinagem Obtida

Simulando-se o Código para Torneamento descrito em [3.3](#) no Software CNC Simulator, obteve-se o resultado em [2](#), o qual apresenta correspondência satisfatória com o Projeto realizado em [1](#).

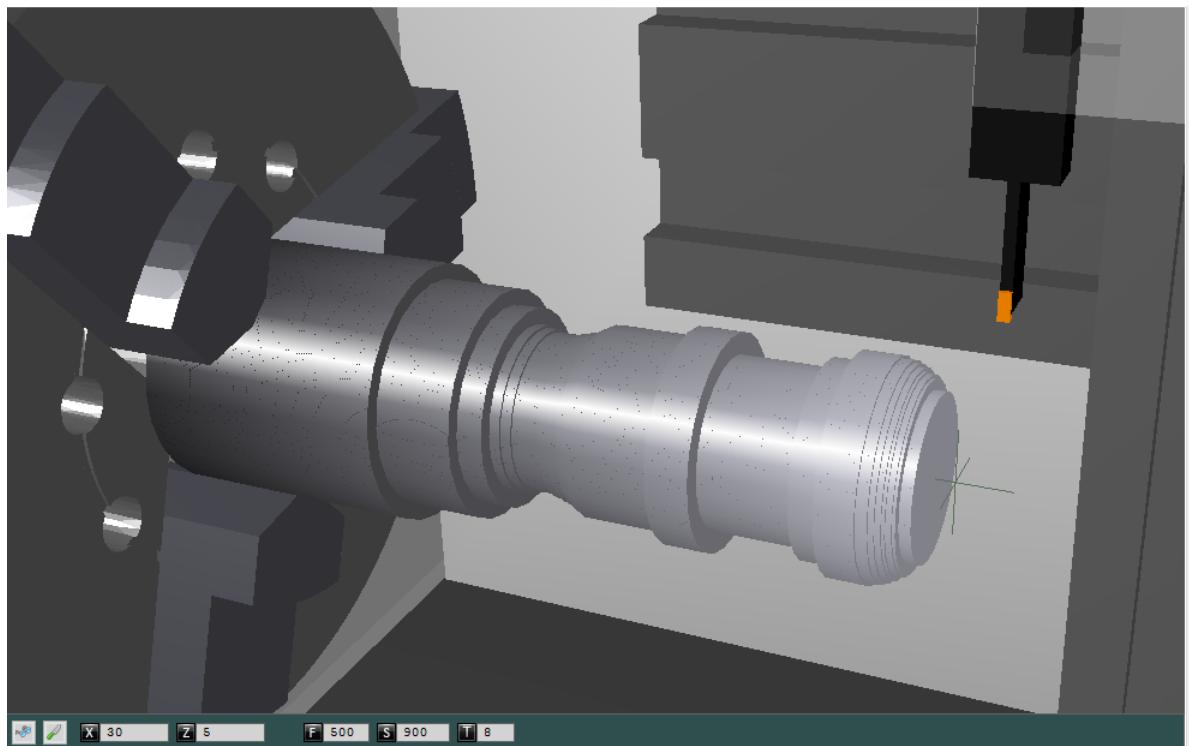


Figura 2: Simulação Peça Torneamento no CNC Simulator

Após realizada a Simulação no Software LinuxCNC, a peça foi torneada, de modo a se obter a peça vista em 3.



Figura 3: Peça de Torneamento Final Obtida

3.5 Dados colhidos e Análise de Capabilidade

Para os Diâmetros escolhidos de $D_1 = 44\text{mm}$, $D_2 = 38\text{mm}$, $D_3 = 36\text{mm}$, $D_4 = 32\text{mm}$ e $D_5 = 40\text{mm}$, mediu-se, com o uso de um micrômetro laser, 10 valores ao longo da peça torneada, de modo a se obter as medidas registradas em 4.

\downarrow	C1	C2	C3	C4	C5
1	43,256	37,187	35,9008	32,163	39,915
2	43,153	37,135	35,7870	32,243	40,086
3	43,002	37,213	35,7220	32,235	40,017
4	43,046	37,153	35,9220	32,330	40,001
5	42,997	37,198	35,8030	32,213	39,998
6	42,967	37,233	35,8010	32,113	39,985
7	43,004	37,320	35,7320	32,244	39,997
8	42,997	37,152	35,7730	32,227	40,126
9	43,422	37,158	35,8450	32,230	40,089
10	43,015	37,223	35,7860	32,266	39,997

Figura 4: Medidas tomadas para o processo de Fresamento

3.5.1 Análise de Capabilidade

Considerando-se uma tolerância de $\pm 0.3\text{mm}$ para diâmetro torneado, realizou-se uma Análise de Capabilidade para cada um dos 5 Diâmetros escolhidos utilizando o Software MiniTab. Para os Diâmetros D_1 e D_2 , representados em 5 e 8, obtiveram-se medidas de média cerca de 1mm menor em relação ao desejado (respectivamente, 43.086mm e 37.187mm) e de desvio padrão de, respectivamente, 0.14784mm e 0.054552mm. Esse erro Sistemático obtido de cerca de 1mm

pode ser ocasionado devido à Propagação de uma Série de Erros inerentes ao Torno utilizado, como a aferição manual do paralelismo entre a peça e máquina, e as vibrações da máquina que podem prejudicar a posição relativa da peça torneada em relação à máquina e à própria ferramenta, a qual, por ser um bit utilizado previamente e que já pode ter sido lixado, não apresentar exatamente as dimensões de 2X2 (mm) esperadas. Além disso, outra fonte de Erro é não se ter compensado o Raio de Ferramenta durante a usinagem, de modo que é possível que ocorram erros por não se considerar as Dimensões da Ferramenta durante a fabricação da peça, como, por exemplo, retirar-se mais material que o esperado pela ferramenta, para maiores diâmetros da peça, entrar mais na peça que o esperado por não se considerar que essa possui um certo comprimento. Muito provavelmente, esse último foi o motivo para os dois Primeiros Diâmetros medidos apresentarem essa discrepância de 1mm verificada durante as medições.

Para os Diâmetros D3, D4 e D5, a média dos valores obtidos encontra-se dentro dos valores desejados, porém, tendendo ao Limite Inferior para D3 e ao Limite Superior para D4 e D5, o que fortalece a hipótese do Erro de Paralelismo. Para D1, encontrou-se um C_p de 0.66, de modo a indicar que as medidas tomadas não possuem boa correspondência entre os valores medidos e a Curva Normal Traçada e, para D2, D3, D4 e D5, encontrou-se C_p maior que 1 para todos esses Diâmetros, sendo, respectivamente, 1.78, 1.49, 1.68 e 1.57, o que indica boa correspondência entre os valores medidos e a curva Normal traçada para as medidas obtidas.

Para se definir um C_p para todo Processo, optou-se por tomar uma Média Aritmética tal que o C_p resultante para o processo seja dado por 2 com o intuito de fornecer uma noção geral da capacidade do Processo utilizado para se produzir a peça desejada, de modo a se obter um C_p de aproximadamente 1.44.

$$C_p = \frac{C_{pD1}^2 + C_{pD2} + C_{pD3} + C_{pD4} + C_{pD5}}{5} = \frac{0.66 + 1.78 + 1.49 + 1.68 + 1.57}{5} \approx 1.44 \quad (2)$$

A máquina e Ferramenta utilizadas apresentam, portanto, capacidade satisfatória para se usar a Peça Projetada dada tanto pelo C_p quanto pela Estabilidade vista em suas Cartas de Controle, com exceção da Carta de Controle para o Diâmetro D1, o qual foi o único Diâmetro tomado que não passou no Teste de Anderson-Darling. O Erro Sistemático verificado em D1 e D2 deve, entretanto, ser investigado em relação a Erros de Paralelismo, o que será realizado a seguir.

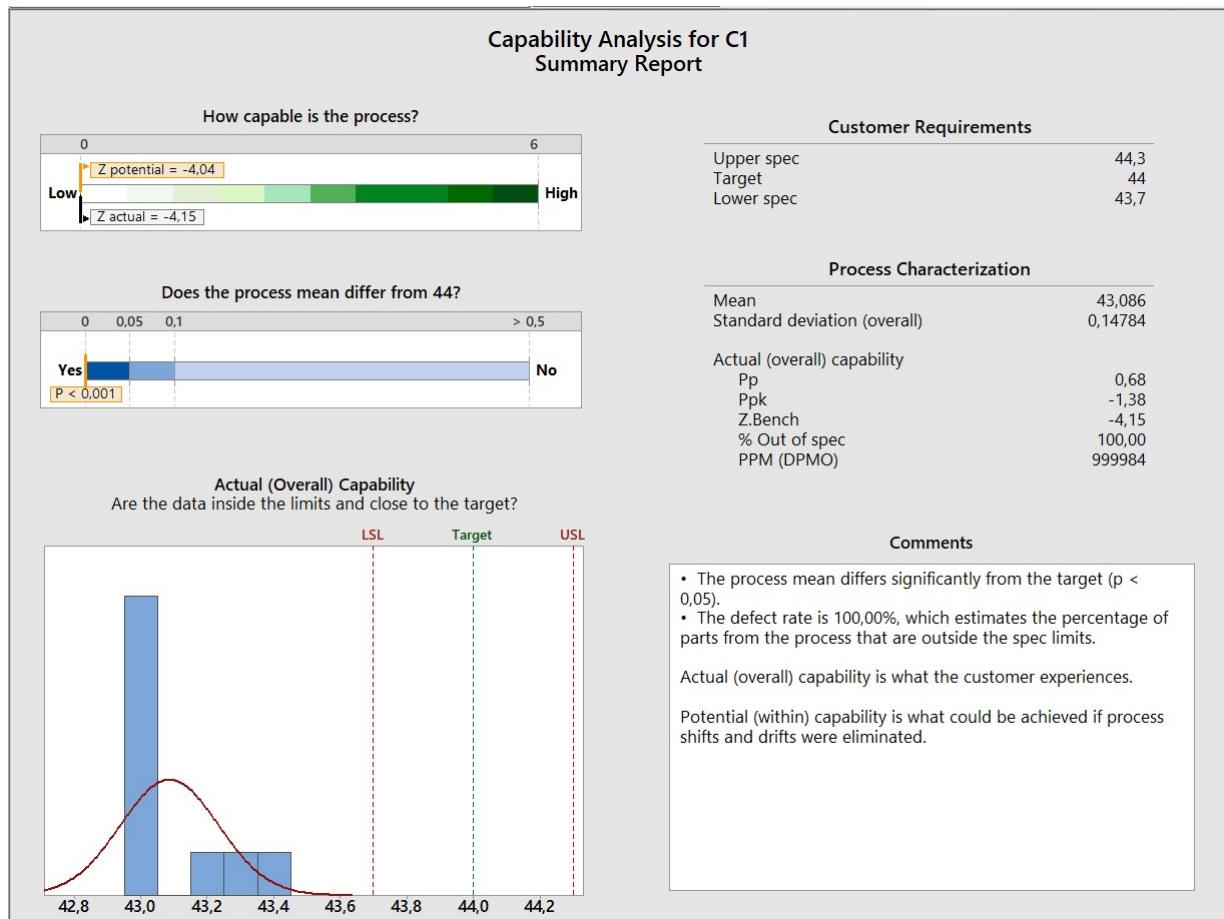


Figura 5: Análise de Capabilidade para D1

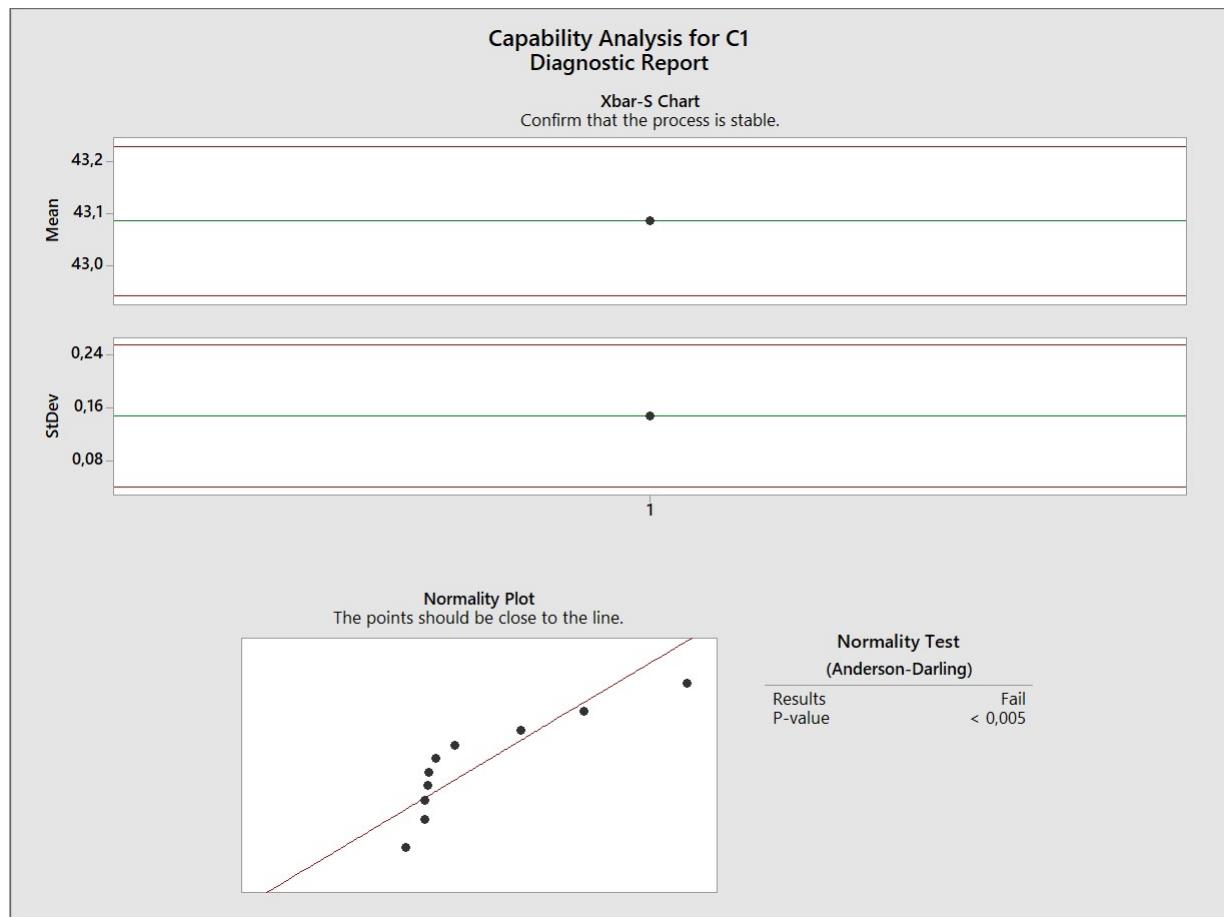


Figura 6: Cartas de Controle geradas para D1

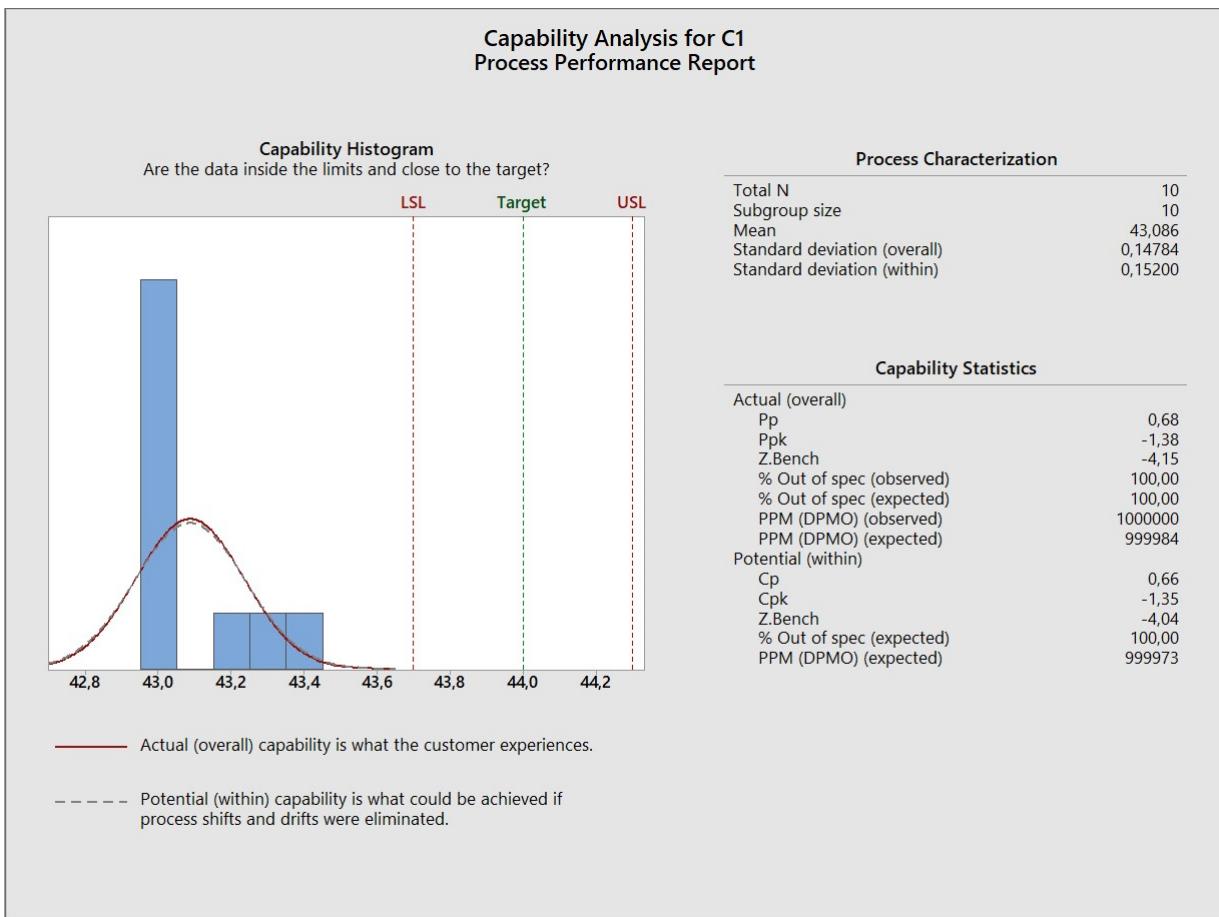


Figura 7: Resumo Análise de Capabilidade para D1

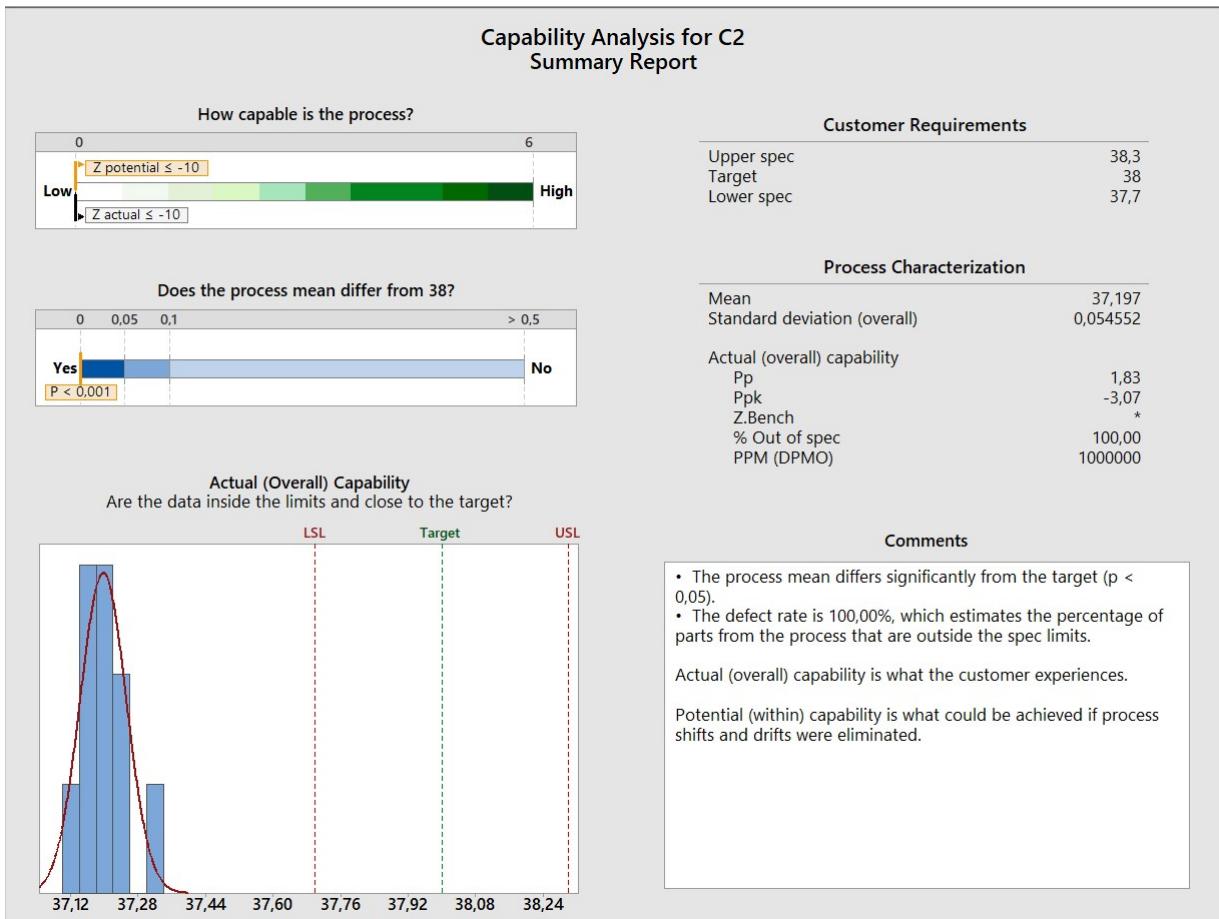


Figura 8: Resumo Análise de Capabilidade para D2

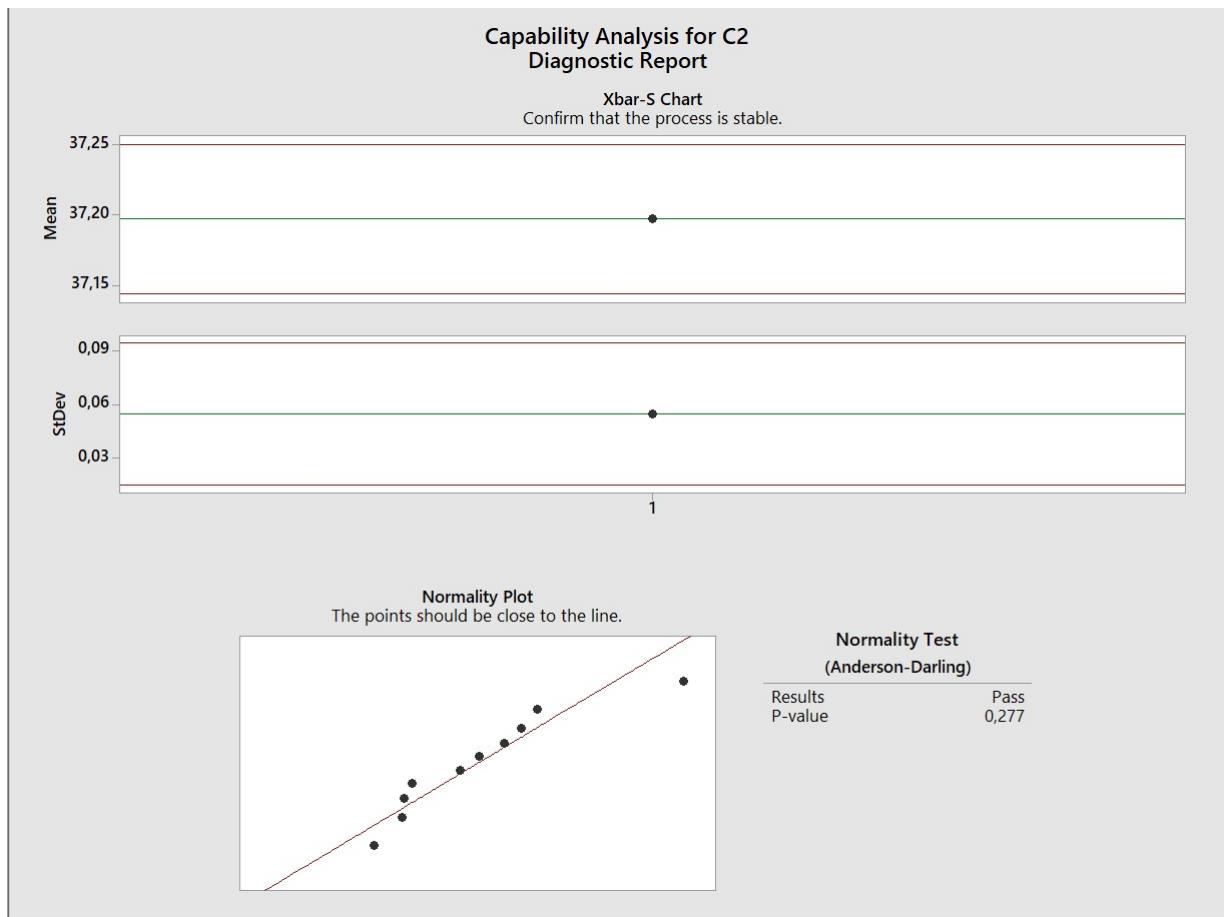


Figura 9: Cartas de Controle geradas para D2

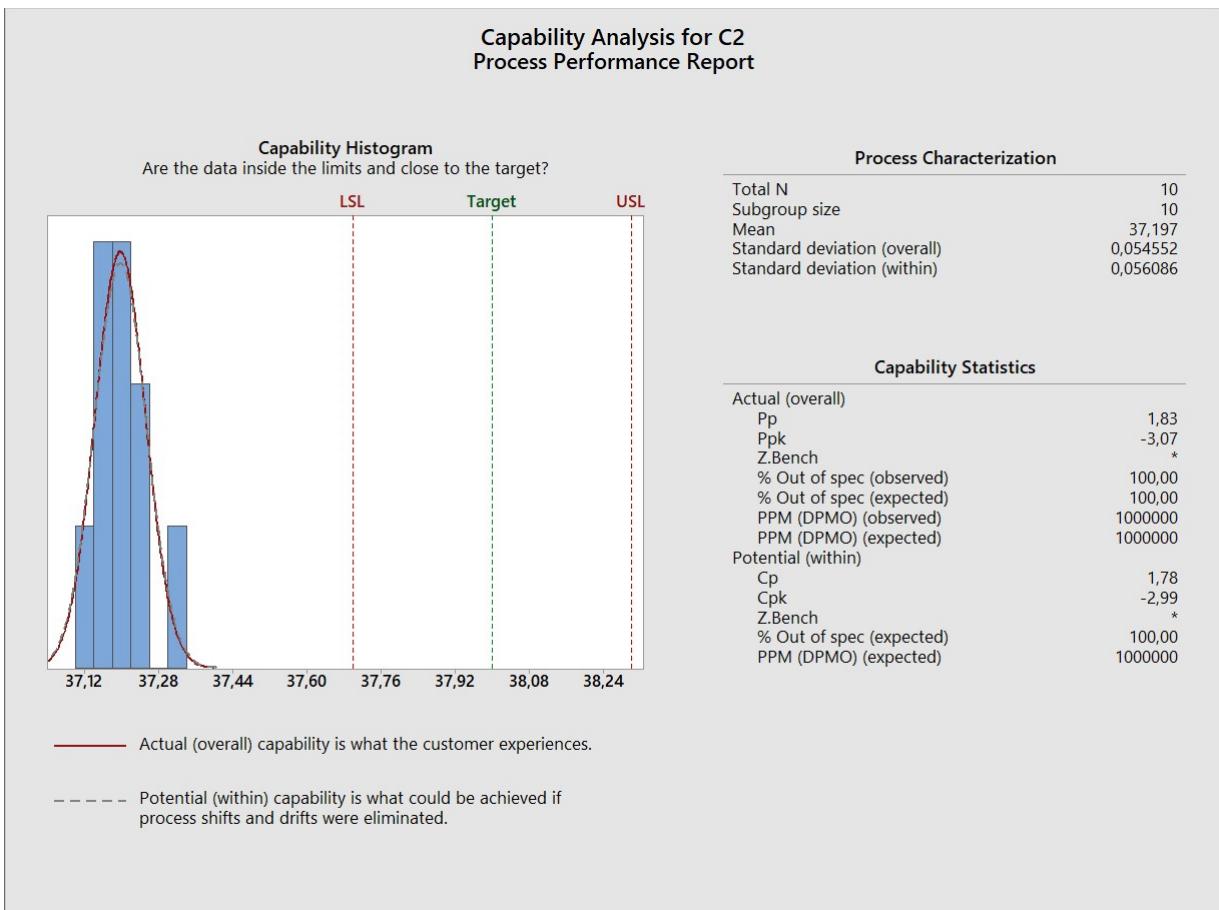


Figura 10: Análise de Capabilidade para D2

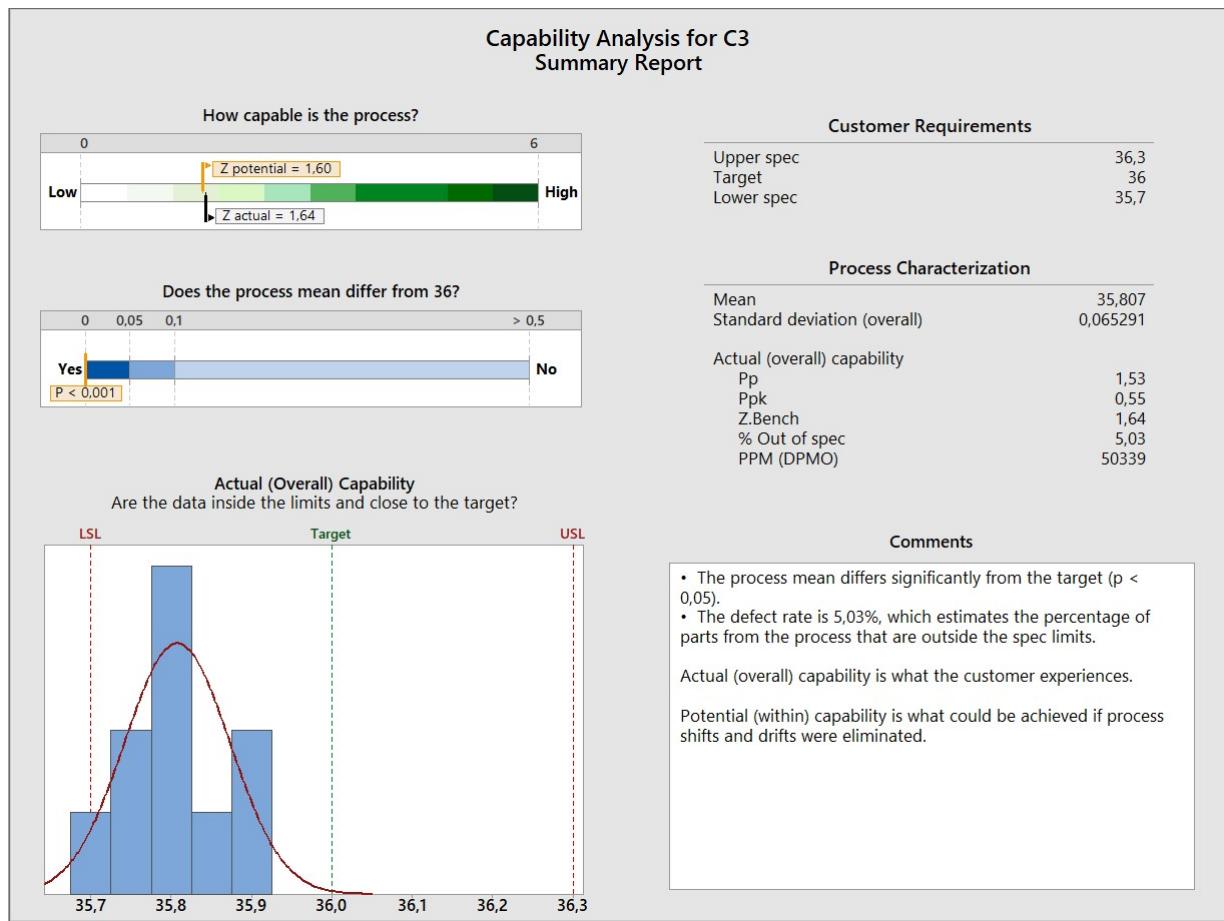


Figura 11: Resumo Análise de Capabilidade para D3

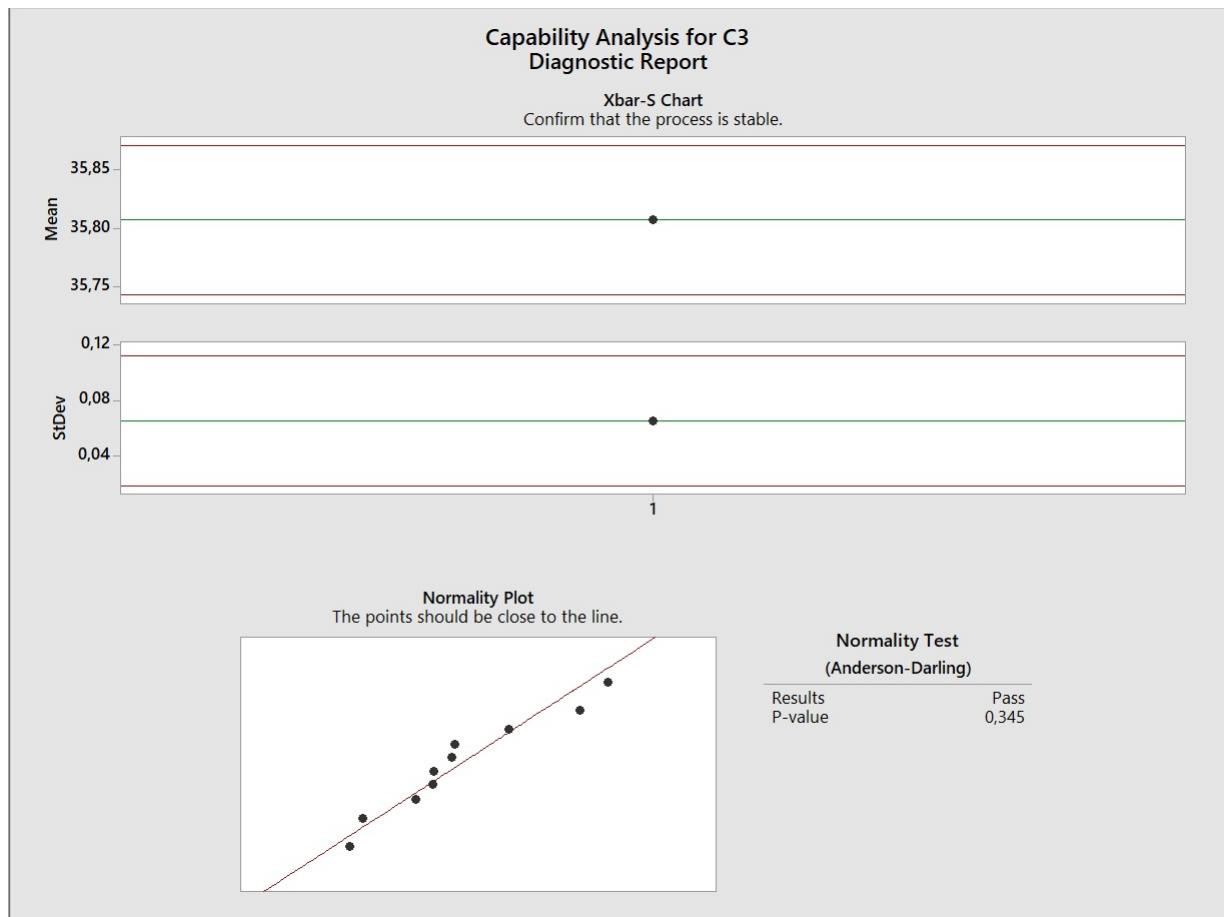


Figura 12: Cartas de Controle geradas para D3

Capability Analysis for C3 Process Performance Report

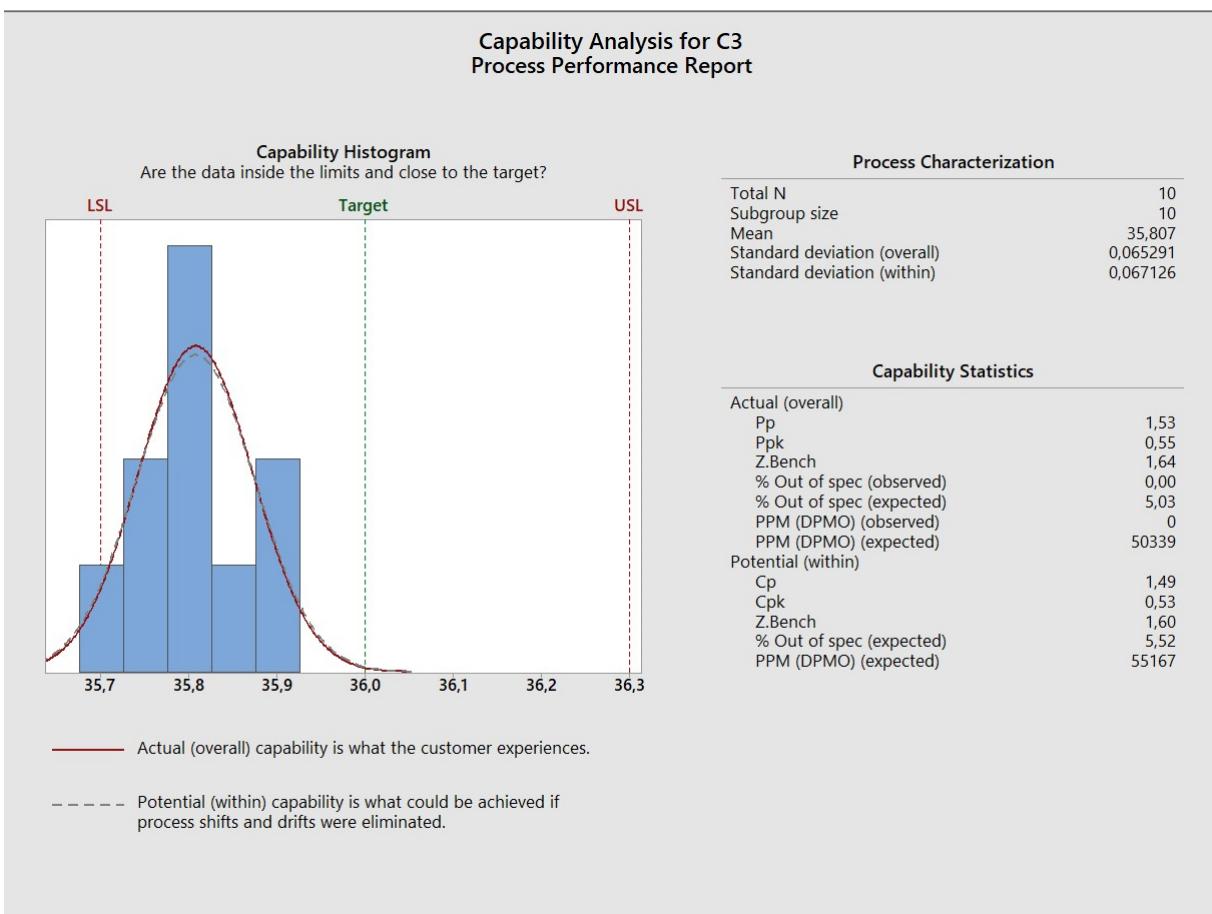


Figura 13: Análise de Capabilidade para D3

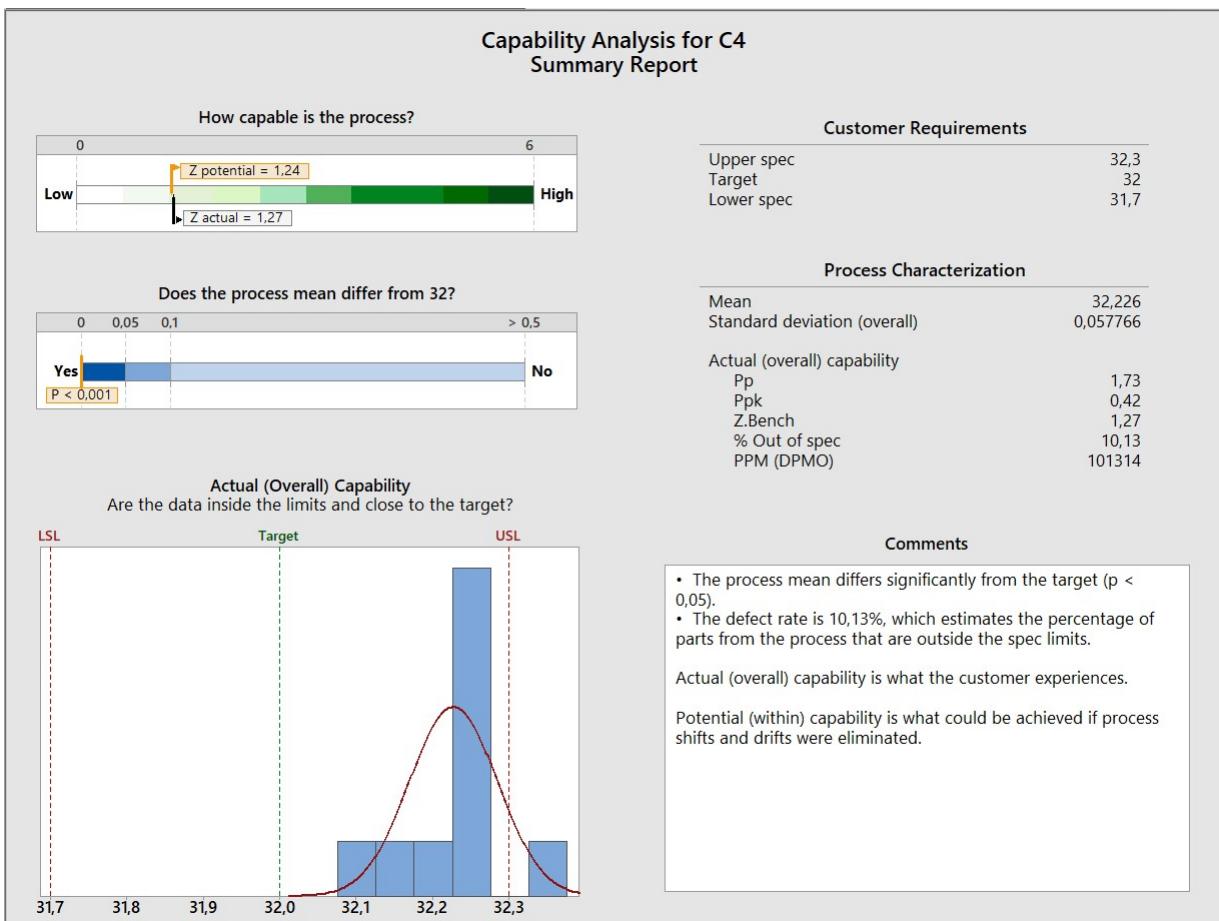


Figura 14: Resumo Análise de Capabilidade para D4

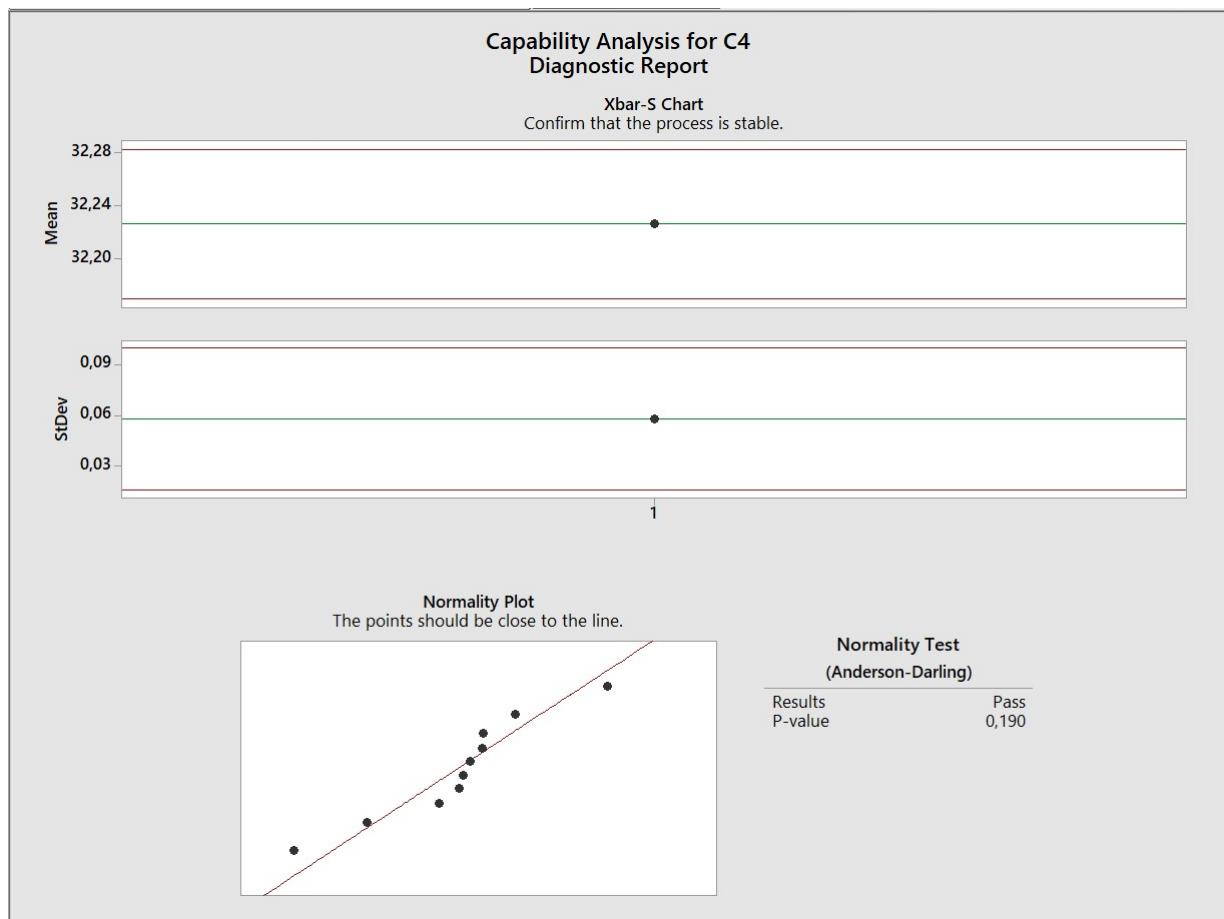


Figura 15: Cartas de Controle geradas para D4

Capability Analysis for C4 Process Performance Report

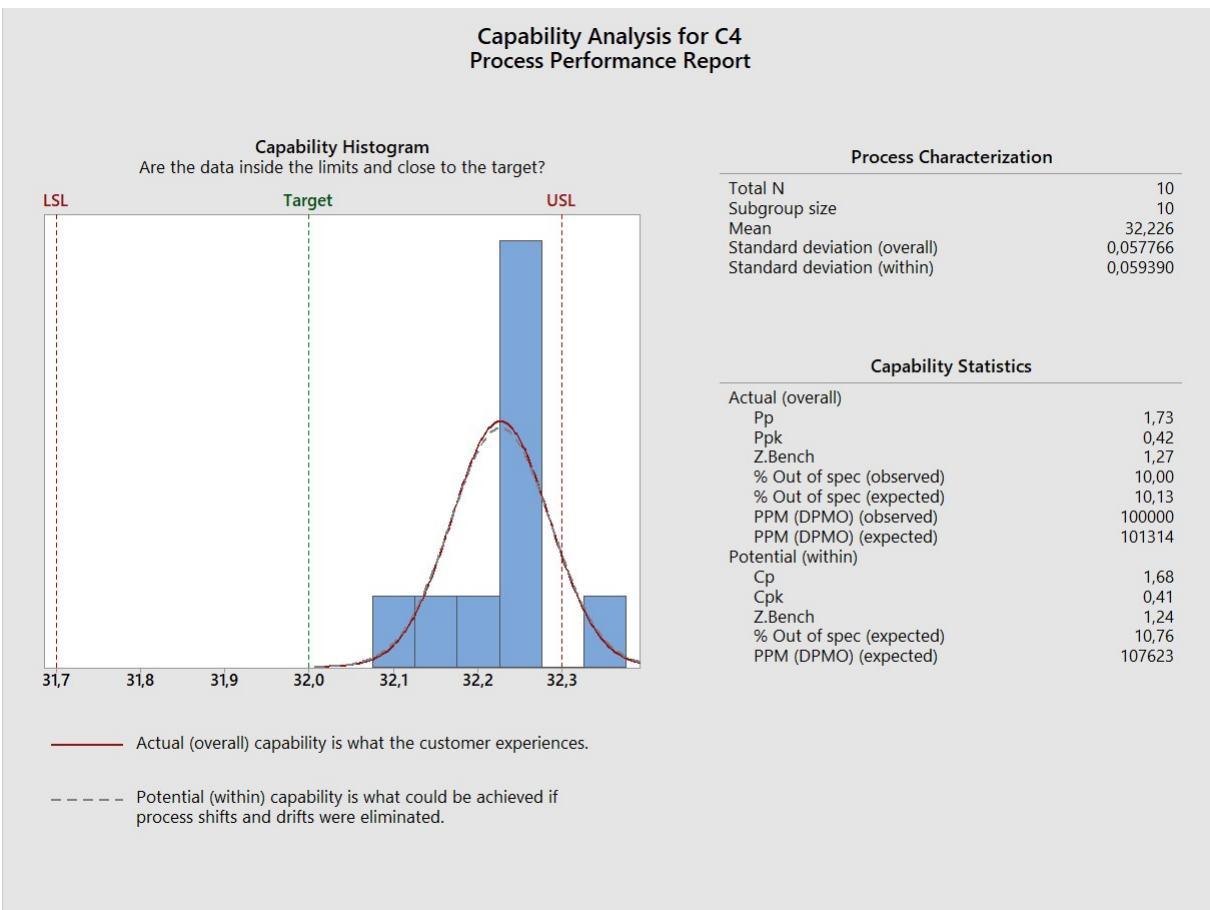


Figura 16: Análise de Capabilidade para D4

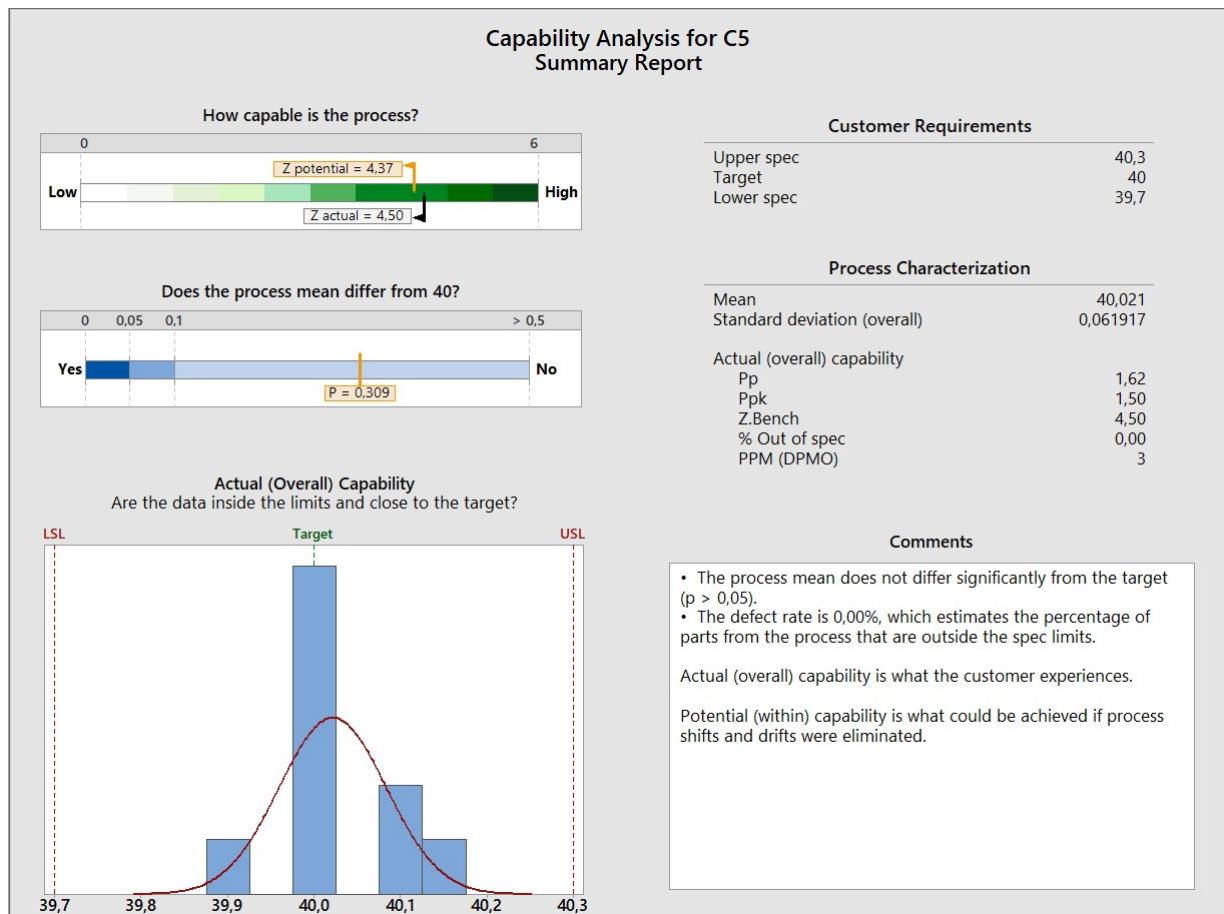


Figura 17: Resumo Análise de Capabilidade para D5

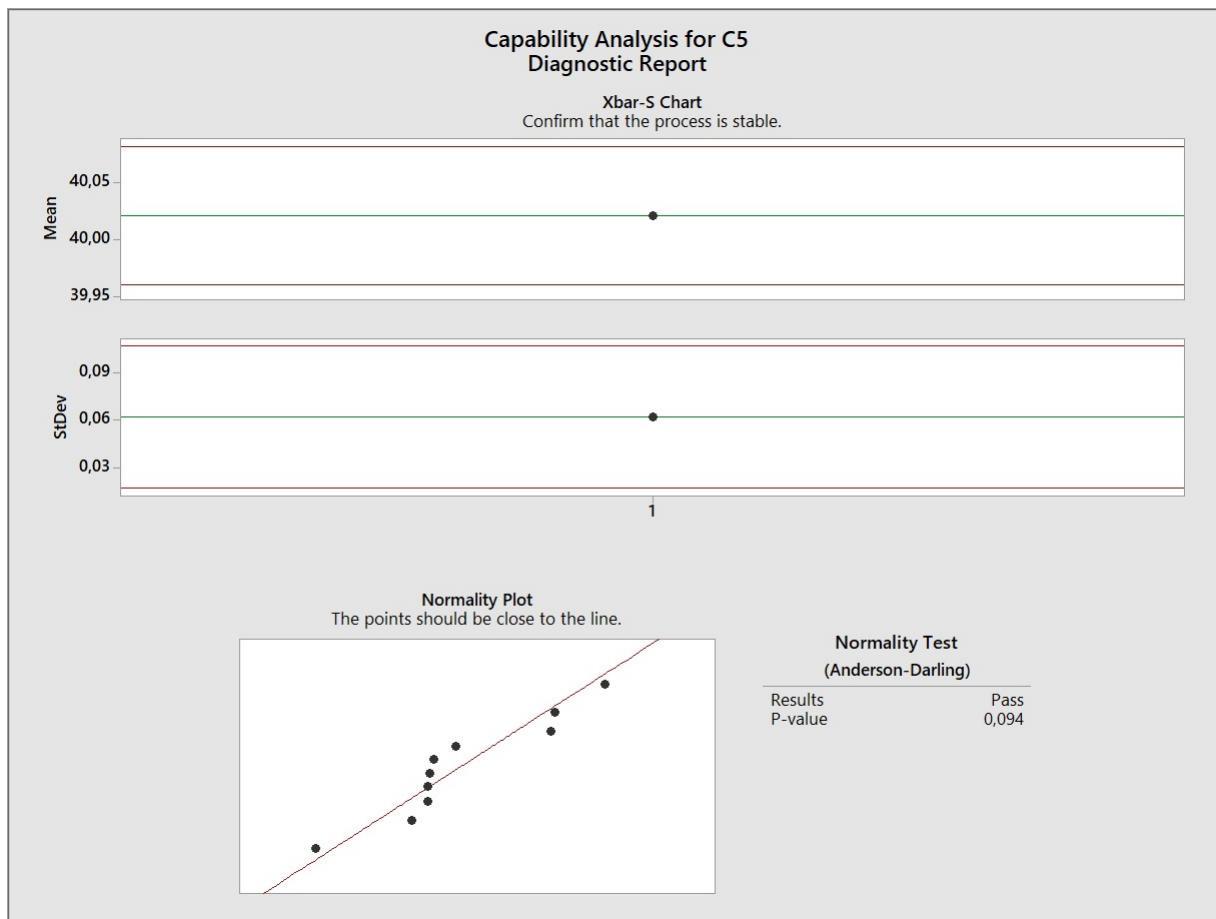


Figura 18: Cartas de Controle geradas para D5

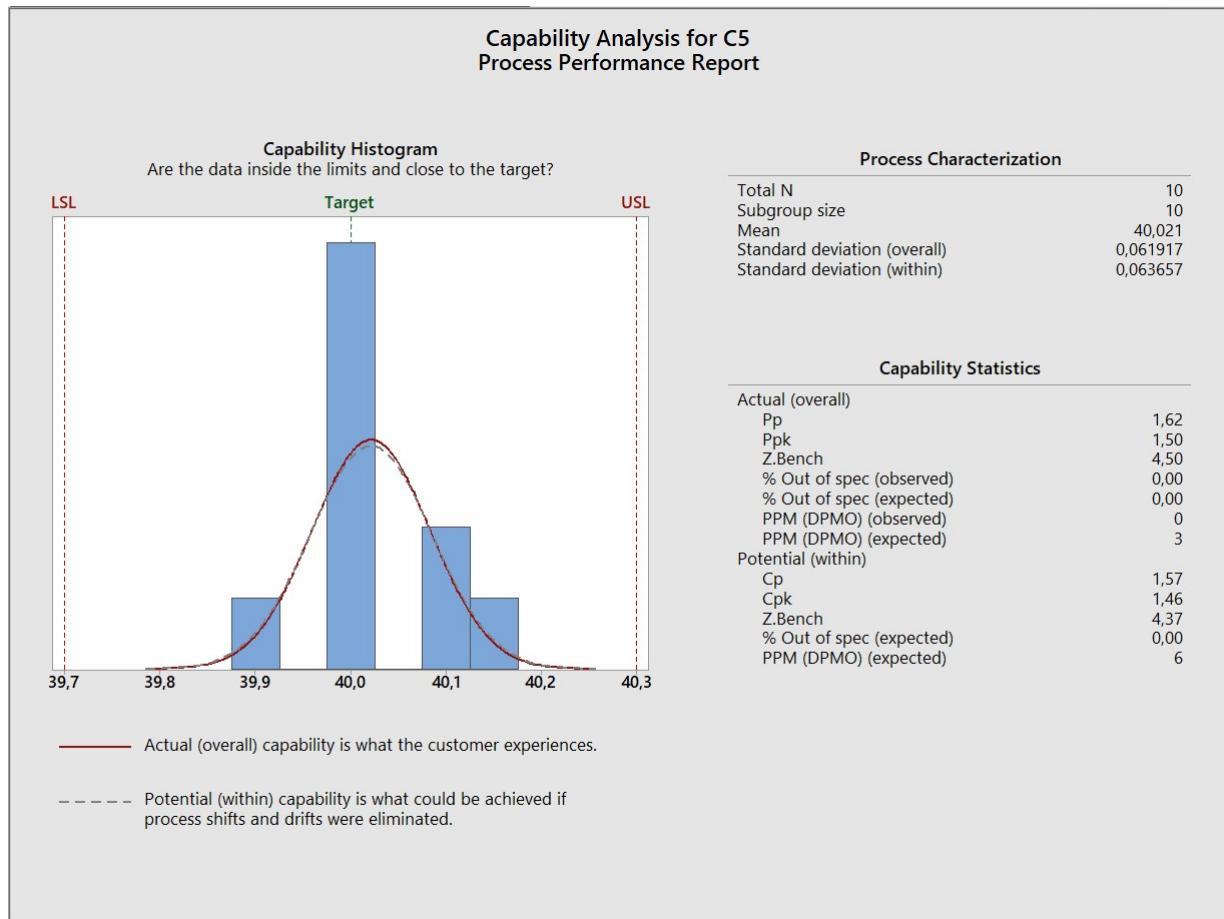


Figura 19: Análise de Capabilidade para D5

3.5.2 Análise de Erros

Como as medidas tomadas foram aleatórios e realizadas em torno de um diâmetro, cujo comprimento da Castanha não pode ser estimado com relativa precisão, não se pode estimar um Erro de Paralelismo entre a peça e Máquina de Torneamento.

A Tolerância de Circularidade, de acordo com [3], é estimada como sendo o Equivalente a dois Círculos Concêntricos, cujos valores medidos para os Diâmetros podem se encontrar. Logo, para se estimar o Erro de Circularidade, pode-se verificar, a partir dos pontos medidos, se estão contidos dentro desses dois limites e estimar o Erro de Circularidade como sendo o maior valor absoluto da Diferença entre o valor medido e a Média dos valores tomados para cada Diâmetro medido. Ou seja, o Erro de Circularidade pode ser dado por 3. Como as medidas realizadas foram aleatórias, de modo que não se pode obter alguma função das medidas realizadas para cada diâmetro em função de um ângulo ou em função das coordenadas x,y e z de cada medição, não é possível utilizar um estimador mais complexo e preciso para o Erro de Circularidade.

$$E_{Circularidade} = \max(|D_i - \bar{D}|) \quad (3)$$

O valor médio de cada Diâmetro e os Erros obtidos em relação a esse valor médio também para cada Diâmetro podem ser vistos em 20 e em 21.

Media D1	Media D2	Media D3	Media D4	Media D5
43,0859	37,1972	35,8073	32,2264	40,0211

Figura 20: Média das Medidas Tomadas para Cada Diâmetro

Erros D1	Erros D2	Erros D3	Erros D4	Erros D5
0,1701	-0,0102	0,0935	-0,0634	-0,106100
0,0671	-0,0622	-0,0194	0,0166	0,064900
-0,0839	0,0158	-0,0853	0,0086	-0,004100
-0,0399	-0,0442	0,1147	0,1036	-0,020100
-0,0889	0,0008	-0,0043	-0,0134	-0,023100
-0,1189	0,0358	-0,0063	-0,1134	-0,036100
-0,0819	0,1228	-0,0753	0,0176	-0,024100
-0,0889	-0,0452	-0,0343	0,0006	0,104900
0,3361	-0,0392	0,0377	0,0036	0,067900
-0,0709	0,0258	-0,0213	0,0396	-0,024100

Figura 21: Medida dos Erros para cada Diâmetro Medido em relação ao valor Médio obtido para cada Diâmetro

Logo, os Erros de Circularidade estimados por 3 são:

$$E_{D1} \approx 0.3361$$

$$E_{D2} \approx 0.1228$$

$$E_{D3} \approx 0.1147$$

$$E_{D4} \approx 0.1134$$

$$E_{D5} \approx 0.106100$$

Tomando-se uma Tolerância Geométrica de Circularidade de $\pm 0.15mm$ como referência, obtiveram-se os seguintes gráficos correspondentes ao ajuste dos pontos medidos em relação aos dois Círculos tomados para o Erro de Circularidade: 22, 23, 24, 25 e 26.

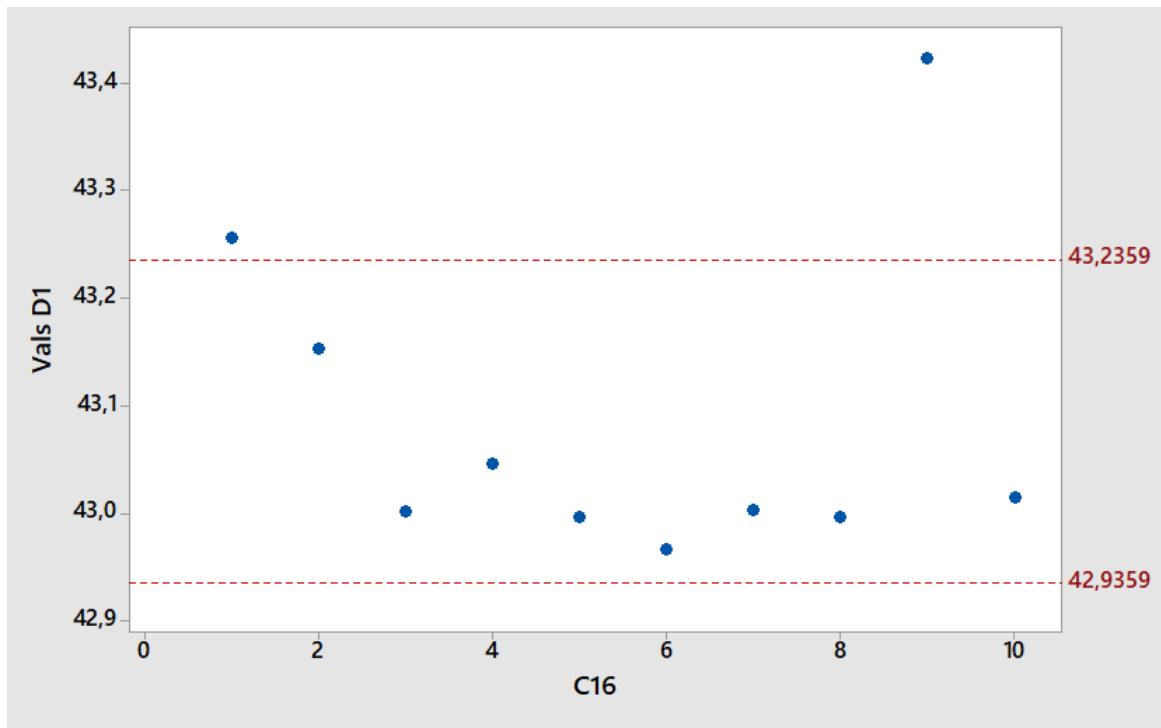


Figura 22: Scatter Plot das Medidas realizadas com Linhas de Referência para o Diâmetro 1

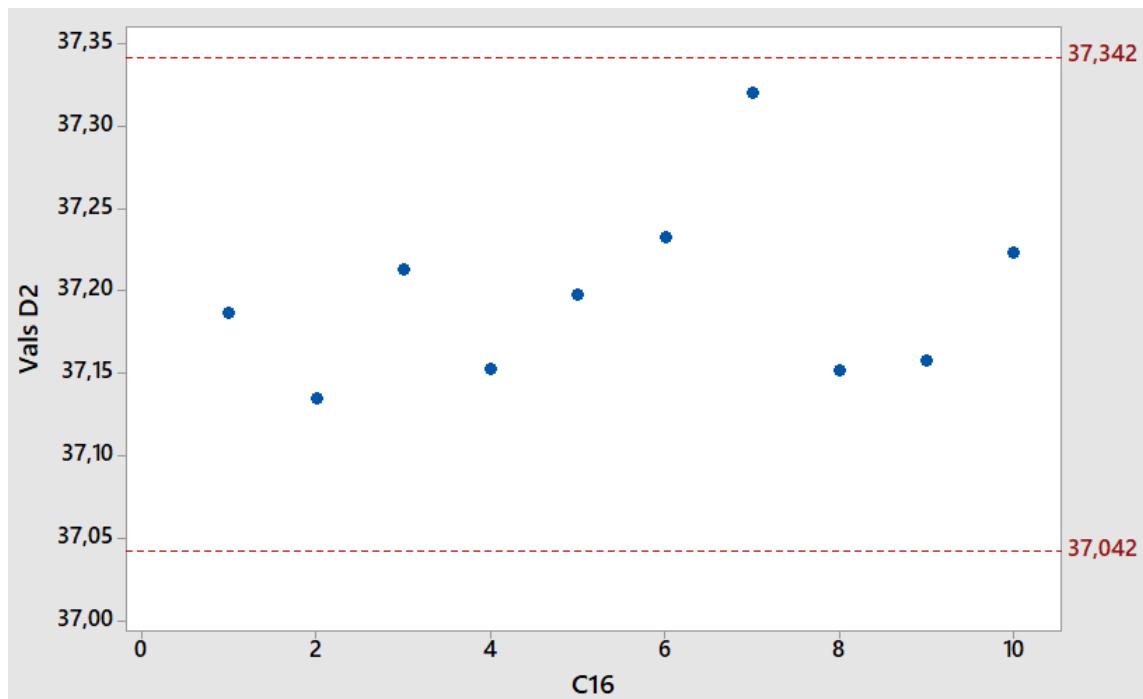


Figura 23: Scatter Plot das Medidas realizadas com Linhas de Referência para o Diâmetro 2

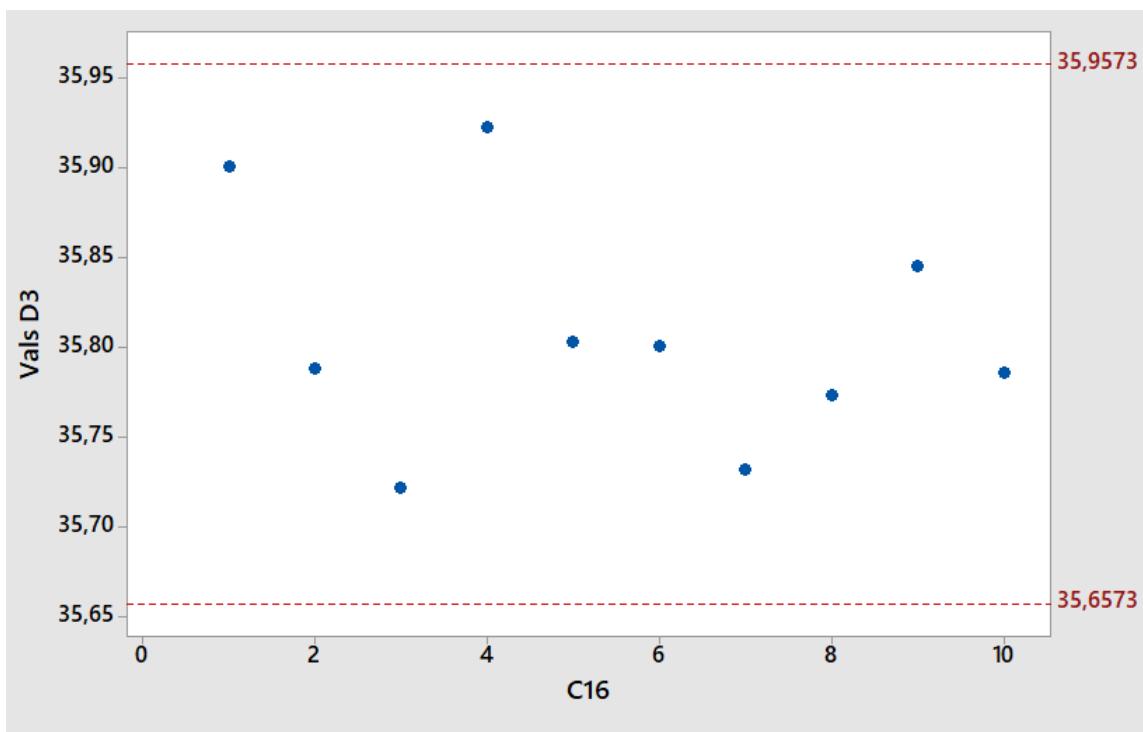


Figura 24: Scatter Plot das Medidas realizadas com Linhas de Referência para o Diâmetro 3

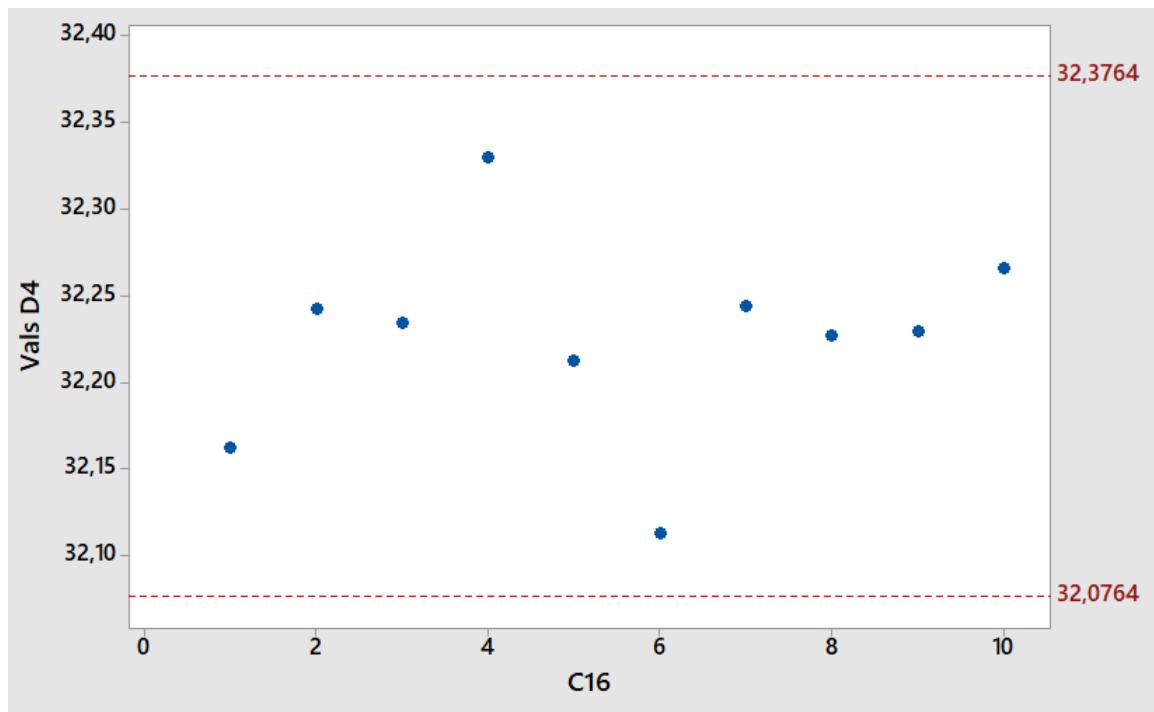


Figura 25: Scatter Plot das Medidas realizadas com Linhas de Referência para o Diâmetro 4

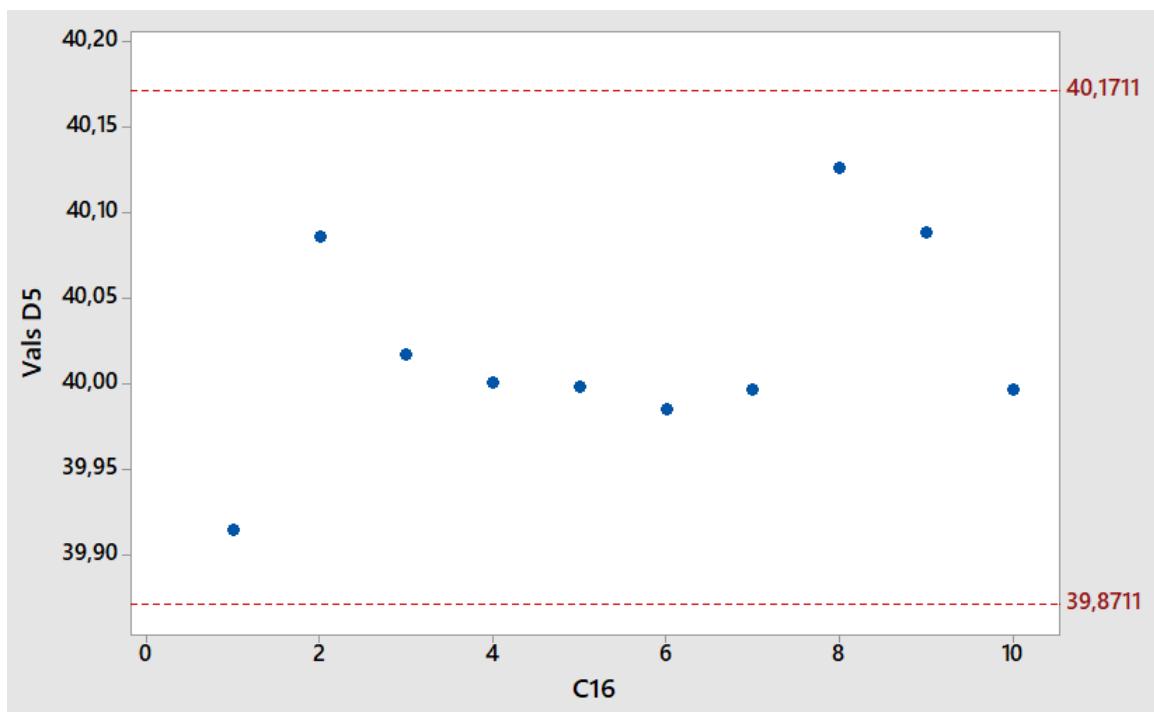


Figura 26: Scatter Plot das Medidas realizadas com Linhas de Referência para o Diâmetro 5

Por meio dos Gráficos, percebe-se, qualitativamente, que há uma boa correspondência entre a Tolerância tomada como referência de $\pm 0.15\text{mm}$ e as Medidas tomadas para os Diâmetros. Pela Estimativa realizadas dos Erros de Circularidade, os Erros para D2, D3, D4 e D5 são de cerca de 0.1mm, o que é razoável para o Processo realizado em uma Máquina Didática cujos parâmetros foram definidos manualmente e sem a utilização de Equipamentos de grande precisão, de modo a se concluir que as Circunferências obtidas para esses Diâmetros apresentam correspondência dentro do esperado com a Circunferência real. Para D1, entretanto, o erro de 0.3361mm é grande e indica a presença de um Erro de Circularidade significativo, ainda que

apenas duas das 10 medidas tomadas tenham superado a tolerância geométrica proposta. Esse erro, logo, indica que D1 não é uma Circunferência perfeita, provavelmente, devido a outros erros inerentes ao Processo de Fabricação, como o Erro ocasionado pelas Vibrações da Máquina, o qual poderia ocasionar as discrepâncias vistas nas medidas tomadas por ser um Erro que pode se manifestar de modo Aleatório para a situação considerada de se produzir um diâmetro durante um Processo de Torneamento.

4 Processo de Fresamento

4.1 Projeto

A peça de Fresamento planejada deve ter ao menos uma cavidade e um contorno, estando contida em um frame de 175X175 (mm) de profundidade de 4mm. Os outros elementos do Projeto devem estar a 2mm de profundidade. O plano de Trabalho escolhido foi XY com corte em profundidade em relação ao Eixo Z. O Zero de Projeto foi tomado como sendo o canto inferior esquerdo do frame de 175X175 (mm), estando localizada no ponto (12.5,12.5) do Projeto realizado.

O Projeto também foi realizado em Papel Milimetrado para facilitar sua execução, de modo a obter uma peça de três cavidades e cinco contornos de modo a se obter o Projeto 27

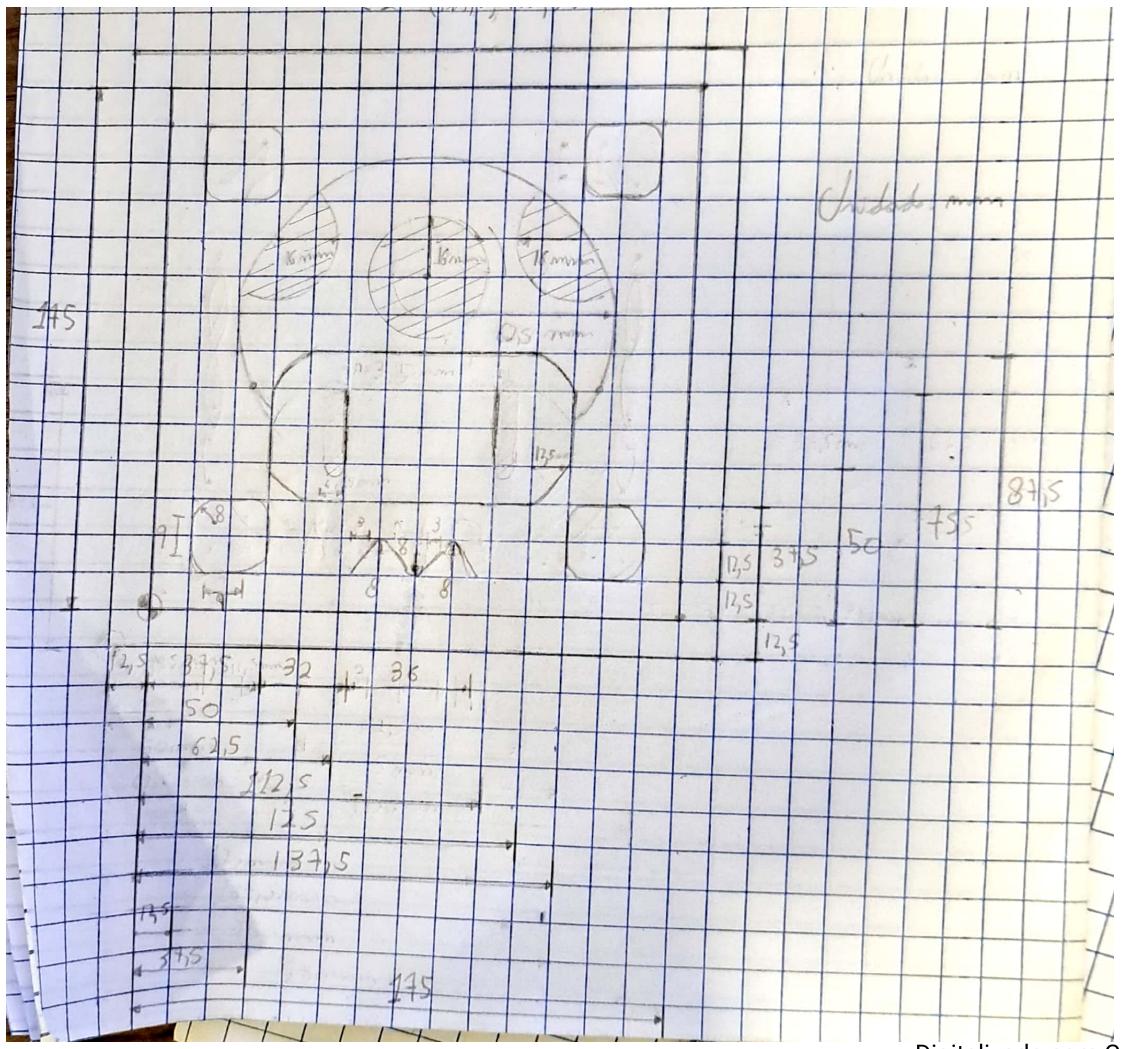


Figura 27: Projeto da peça de Fresamento

4.2 Materiais Utilizados e Parâmetros da Máquina de Usinagem

Para a Execução da Peça de Fresamento, escolheu-se uma placa quadrada de MDF de lado 200mm e de profundidade 15mm (200X200X15). Considerando-se um erro em relação às dimensões da peça, a usinagem deu-se dentro de um frame de dimensões 175X175 (mm).

O material foi usinado na Fresa Didática fornecida pelo Laboratório GRACO. O Plano de Trabalho utilizado foi o plano XY com corte em profundidade em relação ao eixo Z. A velocidade de avanço utilizada foi de 450 mm/min, a ferramenta utilizada foi uma fresa de 3.5mm de diâmetro, a profundidade máxima por passo de usinagem utilizada foi de 2mm e a maior profundidade utilizada foi de 4mm para a construção do frame de dimensões 175X175 (mm), enquanto que foi utilizada a profundidade de 2mm para o restante do Projeto. O raio mínimo para a interpolação circular utilizado foi de 7mm e procurou-se evitar operações de usinagem que gerassem cantos vivos. A máquina foi zerada em relação ao frame de 175X175 (mm), de modo que seu zero se encontre no canto inferior esquerdo do frame de coordenada (12.5,12.5) considerando-se o ponto (0,0) de Projeto (27). O Plano de Segurança para a Operação de Fresamento consistiu no uso do Eixo Z como igual a 5mm, independentes dos Eixos X e Y, tal que essa distância em relação ao Z = 0mm consiste em um plano para o qual, independentes dos valores de X e de Y, a Placa não será usinada. As informações relacionadas ao fresamento podem ser sumarizadas em 2.

Peça Base	Placa MDF quadrada
Material	MDF
Lado	200mm
Profundidade	15mm
Máquina Utilizada	Fresa Didática
Plano de Trabalho	XY com corte no Eixo Z
Velocidade de Avanço	450mm/min
Ferramenta	Fresa de 3.5mm de diâmetro
Profundade Máxima Utilizada	4mm
Zeramento	Coordenada (12.5,12.5) em relação ao (0,0) estabelecido no Projeto
Plano de Segurança	Z = 5mm

Tabela 2: Material e configuração de máquina fresamento

4.3 Planejamento de Usinagem e Código Utilizado

O Planejamento da Usinagem para o Freamento foi dado a partir de dois passos iniciais para a confecção do Frame de 175X175 (mm), seguido do passo para a realização da Figura contida dentro do Frame e um retorno para a posição inicial.

Inicialmente, o Frame foi usinado em dois passos. Para o primeiro passo, foi utilizado uma profundidade de 2mm no frame para a geração do quadrado desejado de 175X175(mm). O segundo passo consistiu na repetição do passo anterior para uma profundidade de 4mm no frame.

Para a realização do contorno, fez-se um desbaste de profundidade de 2mm dentro do frame definido de 175X175(mm) para o qual foram usadas estratégias de aproximação, retração e usinagem. Para a estratégia de aproximação, inicialmente, garante-se que a fresa encontra-se na posição Z = 5mm correspondente ao Plano de Segurança e, assim, define-se as novas coordenadas em X e em Y desejadas para o próximo passo de usinagem. Para a estratégia de usinagem, define-se a profundidade da fresa como Z = -2mm e utiliza-se o Comando G01 para se realizar linhas e os Comandos G02 e G03 para realizar interpolações circulares em sentido horário e anti-horário, respectivamente. Para a estratégia de retração, define-se o eixo Z como sendo Z = 5mm. Durante a estratégia de aproximação, o cavaco era retirado manualmente posicionando-se o removedor de cavaco atrás da fresa de modo a seguir a direção da ferramenta. Deve-se ressaltar que, para garantir que não haja problemas com o mecanismo

da Fresa utilizada, o Comando G01 foi utilizado tanto para as estratégias de aproximação, retração quanto de usinagem.

Por fim, a ferramenta foi colocada novamente em sua posição inicial tomada como X = 0mm, Y = 0mm e Z = 5mm. Como a qualidade do Frame era baixa, foi necessário lixá-lo para melhorar o resultado final obtido da usinagem.

O Código utilizado para a realização do Fresamento pode ser visto a seguir:

N10 G90 G17 G21 G40

(Plano de Segurança)

N30 G01 X0 Y0 Z5 F450

(Frame -2mm de ap)

N40 G01 X0 Y0 Z-2

N50 X175 Y0

N60 X175 Y175

N70 X0 Y175

N80 X0 Y0

N90 G01 X0 Y0 Z5

(Frame -4mm de ap)

N100 G01 X0 Y0 Z-4

N110 X175 Y0

N120 X175 Y175

N130 X0 Y175

N140 X0 Y0

N150 G01 X0 Y0 Z5

(Contorno Rosto ap -2mm)

N160 G01 X50 Y37.5 Z5

N170 G01 X50 Y37.5 Z-2

N180 G01 X125 Y37.5 Z-2

N190 G03 X137.5 Y50 R12.5

N200 G01 X137.5 Y75 Z-2

N210 G03 X125 Y87.5 R12.5

N220 G01 X50 Y87.5 Z-2

N230 G03 X37.5 Y75 R12.5

N240 G01 X37.5 Y50

N250 G03 X50 Y37.5 R12.5

N260 G01 Z5

(Contorno Chapeu ap -2mm)

N280 G01 X137.5 Y50 Z5

N290 G01 X137.5 Y50 Z-2

N300 G03 X87.5 Y150 R62.5

N310 G03 X37.5 Y50 R62.5

N320 G01 Z5

(Cavidade 1 maior ap-2mm)

N340 G01 X103.5 Y112.5 Z5

N350 G01 X103.5 Y112.5 Z-2
N360 G03 X87.5 Y128.5 R16
N370 G03 X71.5 Y112.5 R16
N380 G03 X87.5 Y96.5 R16
N390 G03 X103.5 Y112.5 R16

N400 G01 X100.5 Y112.5 Z-2
N410 G03 X87.5 Y125.5 R13
N420 G03 X74.5 Y112.5 R13
N430 G03 X87.5 Y99.5 R13
N440 G03 X100.5 Y112.5 R13

N450 G01 X97.5 Y112.5 Z-2
N460 G03 X87.5 Y122.5 R10
N470 G03 X77.5 Y112.5 R10
N480 G03 X87.5 Y102.5 R10
N490 G03 X97.5 Y112.5 R10

N500 G01 X94.5 Y112.5 Z-2
N510 G03 X87.5 Y119.5 R7
N520 G03 X80.5 Y112.5 R7
N530 G03 X87.5 Y105.5 R7
N540 G03 X94.5 Y112.5 R7

N543 G01 Z5
N550 X94.5 Y119.5
N550 G01 Z-2
N560 X80.5
N570 Y117.5
N580 X94.5
N590 Y114.5
N600 X94.5
N601 Y111.5
N602 X80.5
N603 Y107.5
N604 X94.5
N605 Y105.5
N606 X80.5

N610 G01 Z5
(Cavidade 2 C 53.125)
N630 X53 Y134.99
N640 G01 Z-2
N650 G02 X53.5 Y125 R16
N660 G02 X37.5 Y109 R16
N670 G02 X35 Y109.19 R16

N680 G01 Z5

N700 X50 Y131.99
N710 G01 Z-2

N720 G02 X50.5 Y125 R13
N730 G02 X37.5 Y112 R13
N740 G02 X35 Y112.19 R13

N750 G01 Z5

N770 X47 Y128.99
N780 G01 Z-2
N790 G02 X47.5 Y125 R10
N800 G02 X37.5 Y115 R10
N810 G02 X35 Y115.19 R10

N820 G01 Z5

N840 X44 Y125.99
N850 G01 Z-2
N860 G02 X44.5 Y125 R7
N870 G02 X37.5 Y118 R7
N880 G02 X35 Y118.19 R7

N890 G01 Z5

N910 X35 Y118.19
N920 G01 Z-2
N930 X37.5 Y121.19
N940 X40 Y124.19

N960 G01 Z5

(Cavidade3 C 137.5.125)
N980 X123 Y134.99
N990 G01 Z-2
N1000 G03 X122.5 Y125 R16
N1010 G03 X137.5 Y109 R16
N1020 G03 X140 Y109.19 R16

N1030 G01 Z5

N1050 X124 Y131.99
N1060 G01 Z-2
N1070 G03 X124.5 Y125 R13
N1080 G03 X137.5 Y112 R13
N1090 G03 X140 Y112.19 R13

N1100 G01 Z5

N1300 X127 Y128.99
N1400 G01 Z-2
N1500 G03 X127.5 Y125 R10
N1600 G03 X137.5 Y115 R10
N1700 G03 X140 Y115.19 R10

N1800 G01 Z5

N2000 X130 Y125.99
N2100 G01 Z-2
N2200 G03 X130.5 Y125 R7
N2300 G03 X137.5 Y118 R7
N2400 G03 X140 Y118.19 R7

N2500 G01 Z5

N2700 X138 Y118.19
N2800 G01 Z-2
N2900 X135 Y126

N3200 G01 Z5
(Olhos)
N3400 X62.5 Y50
N3500 G01 Z-2
N3600 Y75

N3700 G01 Z5

N3900 X112.5 Y50
N4000 G01 Z-2
N4100 Y75

N4200 G01 Z5

(M)
N4400 X69.5 Y12.5
N4500 G01 Z-2
N4600 X72.5 Y25
N4700 G02 X80.5 Y25 R8
N4800 G01 X83.5 Y12.5
N4900 G03 X91.5 Y12.5 R8
N5000 G01 X94.5 Y25
N5100 G02 X102.5 Y25 R8
N5200 G01 X105.5 Y12.5

N5300 G01 Z5
(Quadrado 1)
N5500 X12.5 Y25
N5600 G01 Z-2
N5700 X12.5 Y29.5
N5800 G02 X20.5 Y37.5 R8
N5900 G01 X29.5 Y37.5
N6000 G02 X37.5 Y29.5 R8
N6100 G01 X37.5 Y20.5
N6200 G02 X29.5 Y12.5 R8
N6300 G01 X20.5 Y12.5

N6400 G02 X12.5 Y20.5 R8
N6410 G01 X12.5 Y25

N6500 G01 Z5
(Quadrado 2)
N6700 X12.5 Y150
N6800 G01 Z-2
N6900 X12.5 Y154.5
N7000 G02 X20.5 Y162.5 R8
N7100 G01 X29.5 Y162.5
N7200 G02 X37.5 Y154.5 R8
N7300 G01 X37.5 Y145.5
N7400 G02 X29.5 Y137.5 R8
N7500 G01 X20.5 Y137.5
N7600 G02 X12.5 Y145.5 R8
N7620 G01 X12.5 Y154.5

N7700 G01 Z5
(Quadrado 3)
N7900 X137.5 Y150
N8000 G01 Z-2
N8100 X137.5 Y154.5
N8200 G02 X145.5 Y162.5 R8
N8300 G01 X154.5 Y162.5
N8400 G02 X162.5 Y154.5 R8
N8500 G01 X162.5 Y145.5
N8600 G02 X154.5 Y137.5 R8
N8700 G01 X145.5 Y137.5
N8800 G02 X137.5 Y145.5 R8
N8810 G01 X137.5 Y150

N8900 G01 Z5
(Quadrado 4)
N9100 X137.5 Y25
N9200 G01 Z-2
N9300 X137.5 Y29.5
N9400 G02 X145.5 Y37.5 R8
N9500 G01 X154.5 Y37.5
N9600 G02 X162.5 Y29.5 R8
N9700 G01 X162.5 Y20.5
N9800 G02 X154.5 Y12.5 R8
N9900 G01 X145.5 Y12.5
N10000 G02 X137.5 Y20.5 R8
N10100 G01 X137.5 Y25

N10100 G01 Z5
N10200 X0 Y0
M30

4.4 Simulações, Resultados e Usinagem Obtida

Simulando-se o Código obtido para o Fresamento em 4.3 no Software CNC Simulator, obteve-se o resultado em 28, o qual apresenta correspondência satisfatória com o Projeto realizado em 1.

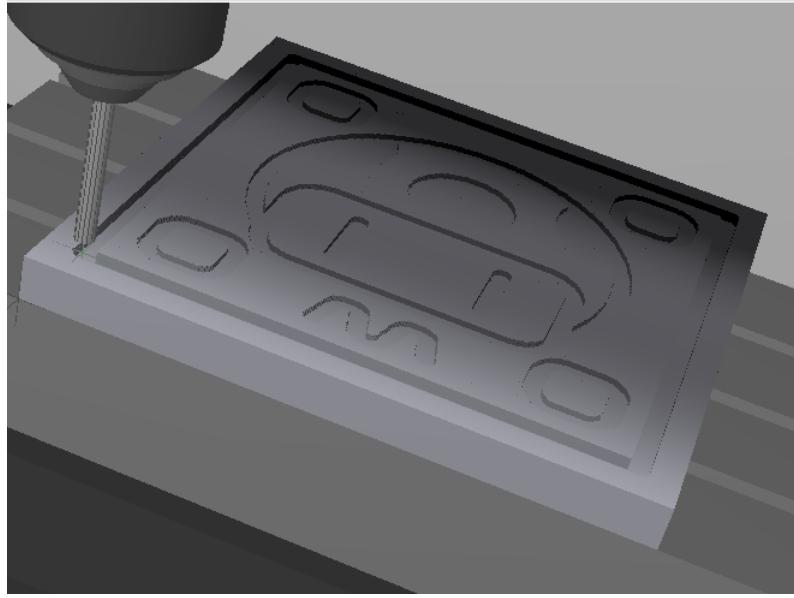


Figura 28: Simulação Peça Fresamento no CNC Simulator

Realizou-se, então, a Simulação da peça no Software LinuxCNC antes de se realizar a Usinagem, de modo a se obter o resultado em 29, o qual apresenta correpondência satisfatória com 28 e 27.

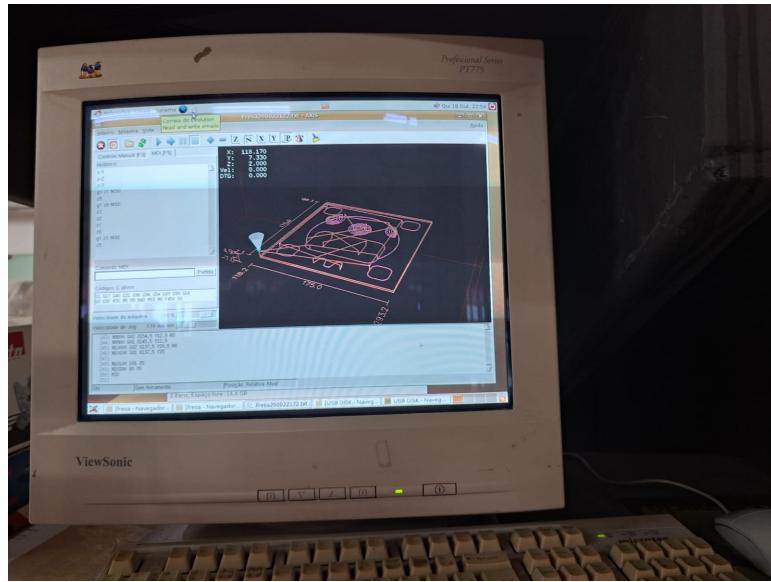


Figura 29: Simulação Peça Fresamento no Linux CNC

A peça usinada, portanto, pode ser vista em 30.



Figura 30: Peça de Fresamento Final Obtida

4.5 Dados colhidos e Análise de Capabilidade

Para as Dimensões do Frame de 171.5X171.5 (mm), considerando-se o diâmetro da fresa utilizada de 3.5mm, utilizou-se um Paquímetro para realizar 15 medidas distanciadas aproximadamente 11.7mm entre si em relação ao Eixo X e em relação ao Eixo Y do Frame Quadrado obtido, de modo a se obter as medidas registradas em 31.

171,58	170,70
171,44	170,56
171,52	170,54
171,50	170,50
171,56	170,52
171,48	170,50
171,58	170,48
171,56	170,46
171,50	170,46
171,46	170,44
171,46	170,38
171,48	170,42
171,36	170,38
171,20	170,42
171,30	170,48

Figura 31: Medidas tomadas para o processo de Fresamento

4.5.1 Análise de Capabilidade

Considerando-se uma tolerância de $\pm 0.3\text{mm}$ para as dimensões em X e em Y do Frame tomado, realizou-se uma Análise de Capabilidade para as Dimensões medidas em X e em Y

utilizando o Software MiniTab. Para a medida em X, representada em 32, a maioria dos valores obtidos encontram-se dentro da Curva de Tolerância desejada, sendo que os valores correspondentes à cerca de 171.2 mm correspondem ao limítrofe do Limite Inferior Desejado. Obteve-se um C_p levemente insatisfatório de 0.92, o que indica que a Fresa utilizada pode não ser capaz de produzir com precisão a peça desejada. Para a medida em Y, representada em 35, os valores encontram-se cerca de 1 mm fora da curva dos valores desejados, indicando um valor médio de 170.48 mm e de desvio padrão de cerca de 0.081580, o que indica que há um Erro Sistemático no Processo, tendo em vista que o C_p obtido de 1.20 é satisfatório. O Erro Sistemático encontrado deve-se, muito provavelmente, à placa de MDF utilizada para a Confecção da peça apresentar certas imperfeições quanto às suas dimensões, de modo a não ser um Quadrado perfeito, além dos erros de Retilineidade ocasionados pelas Vibrações da Máquina e da Ferramenta.

Uma forma de se Estimar o C_p desse processo em relação aos Eixos X e Y pode ser dado pelo Estimador descrito em 4, de modo a se obter um C_{pxy} de aproximadamente 1.09.

$$C_{pxy} = \sqrt{\frac{C_{px}^2 + C_{py}^2}{2}} = \sqrt{\frac{0.96^2 + 1.20^2}{2}} \approx 1.09 \quad (4)$$

A Máquina e Ferramenta utilizadas, portanto, apresentam capacidade satisfatória para se usar a Peça Projetada ao se analisar seu C_{pxy} , ainda que se deva considerar que, como seu C_p resultante é próximo de 1, a capacidade obtida encontra-se no limiar da capacidade mínima aceita. Em relação às Cartas de Controle, o Processo apresenta estabilidade satisfatória, passando no Teste de Anderson-Darling.

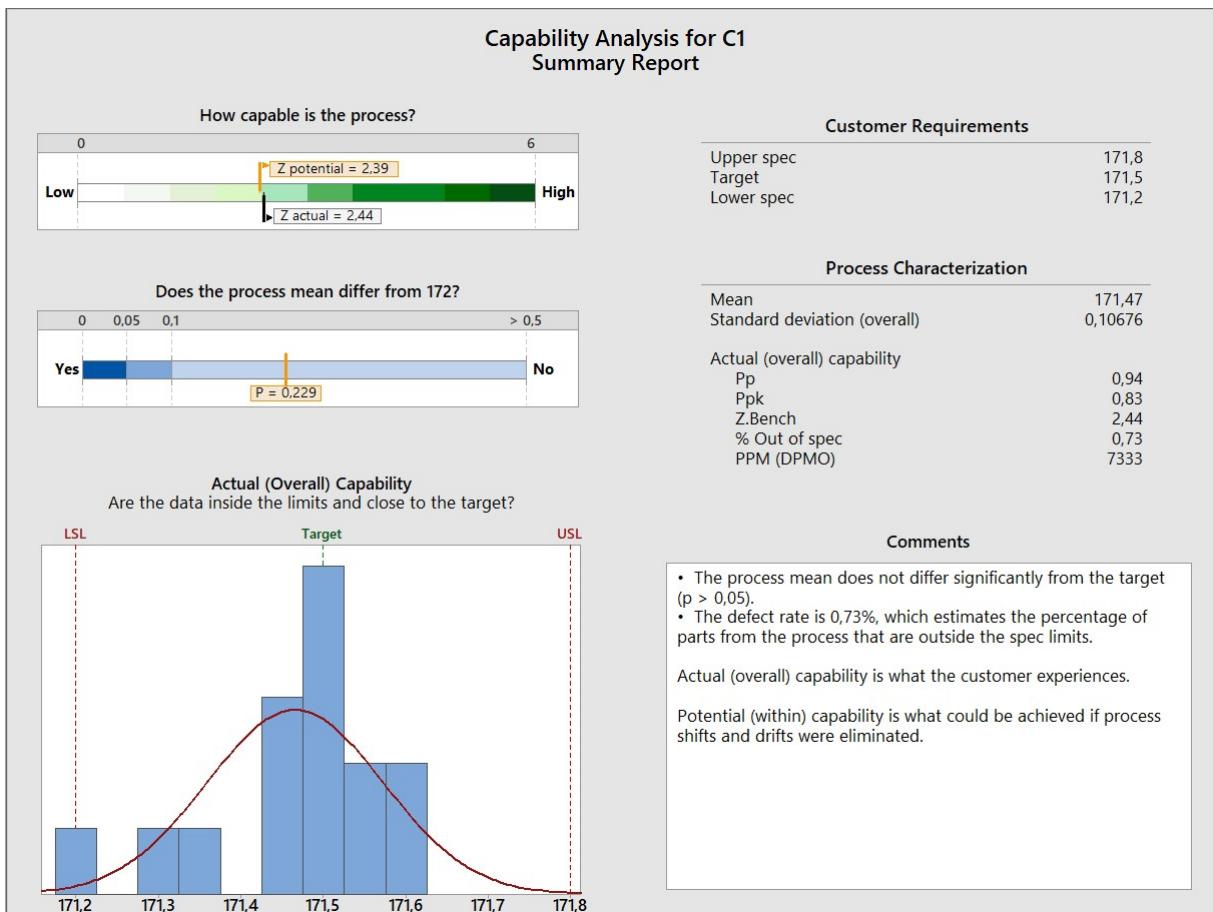


Figura 32: Resumo Análise de Capabilidade para o eixo X

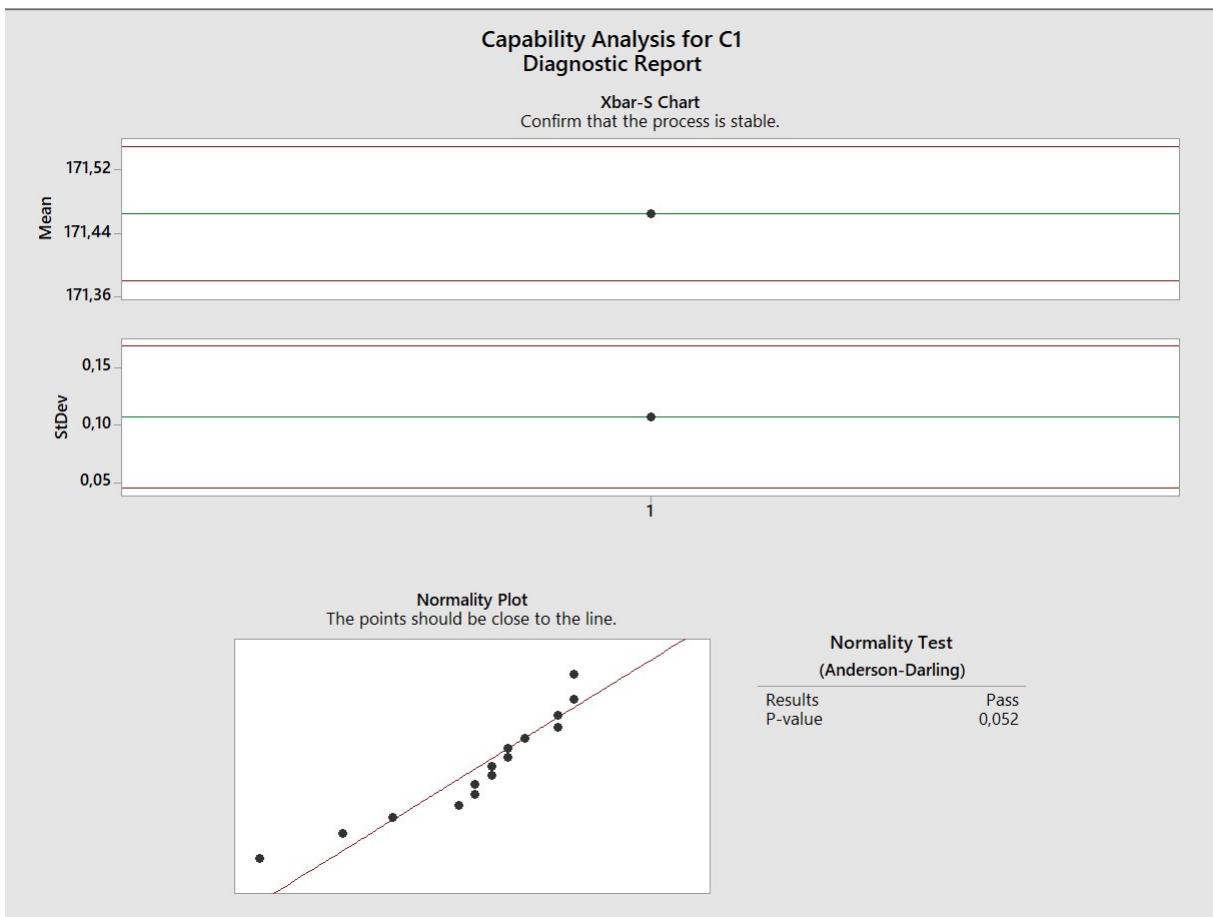


Figura 33: Cartas de Controle geradas para o eixo X

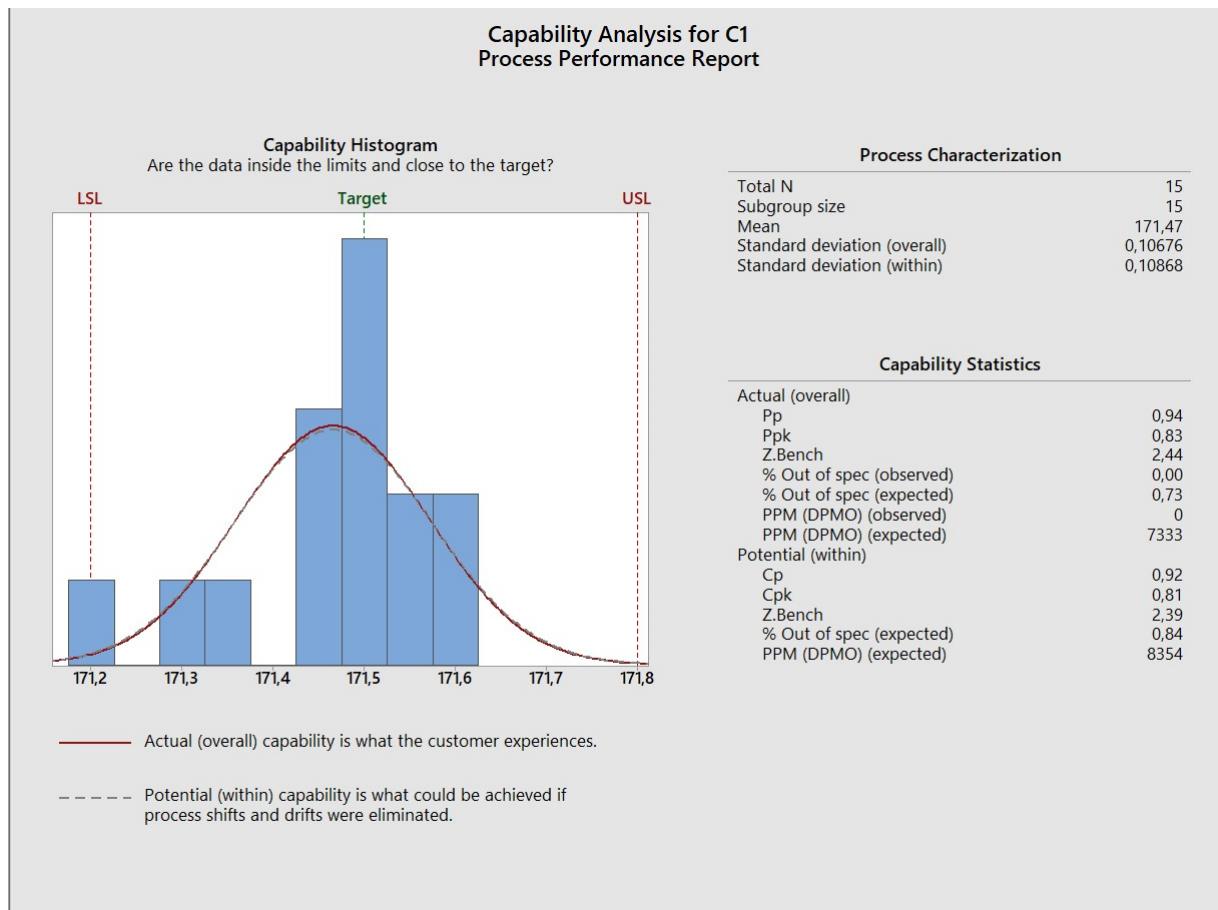


Figura 34: Análise de Capabilidade para o eixo X

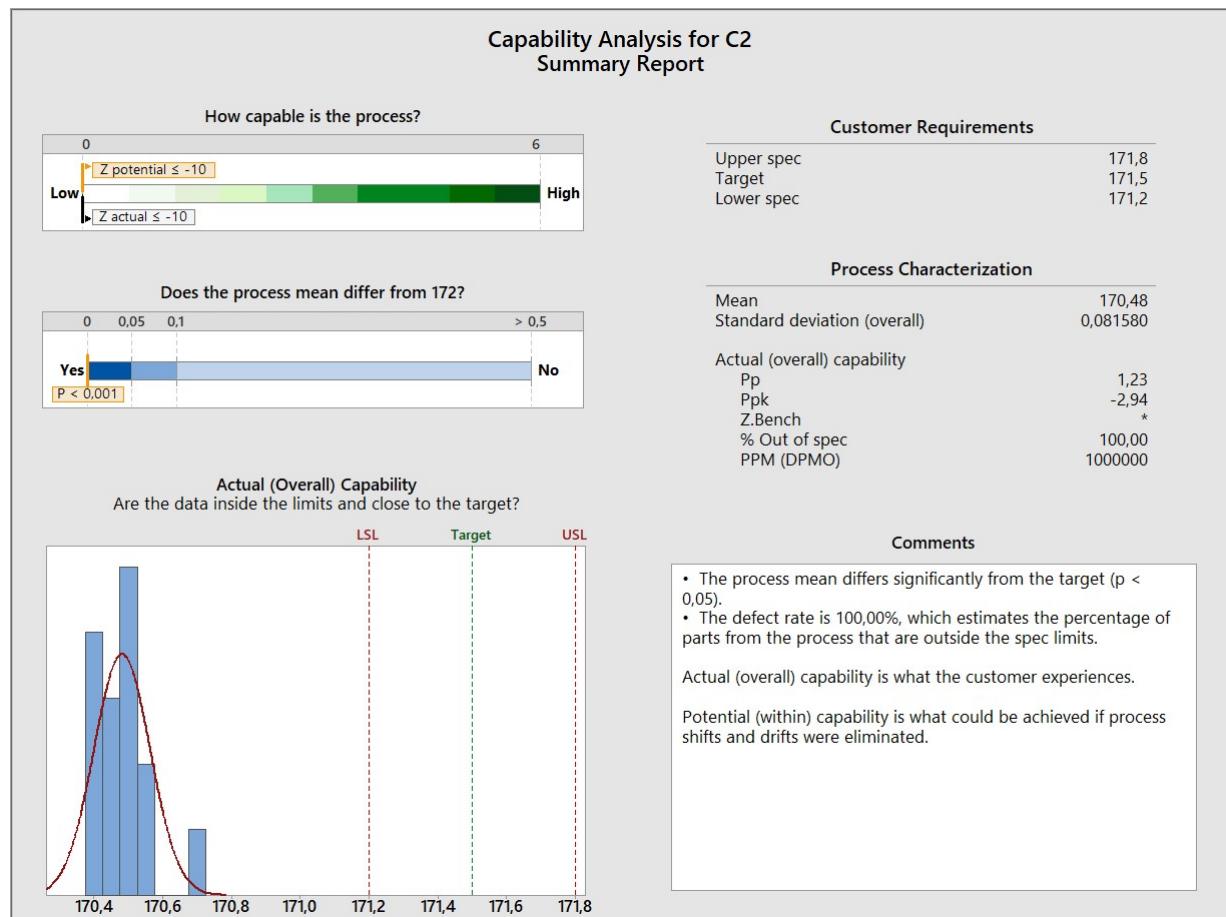


Figura 35: Resumo Análise de Capabilidade para o eixo Y

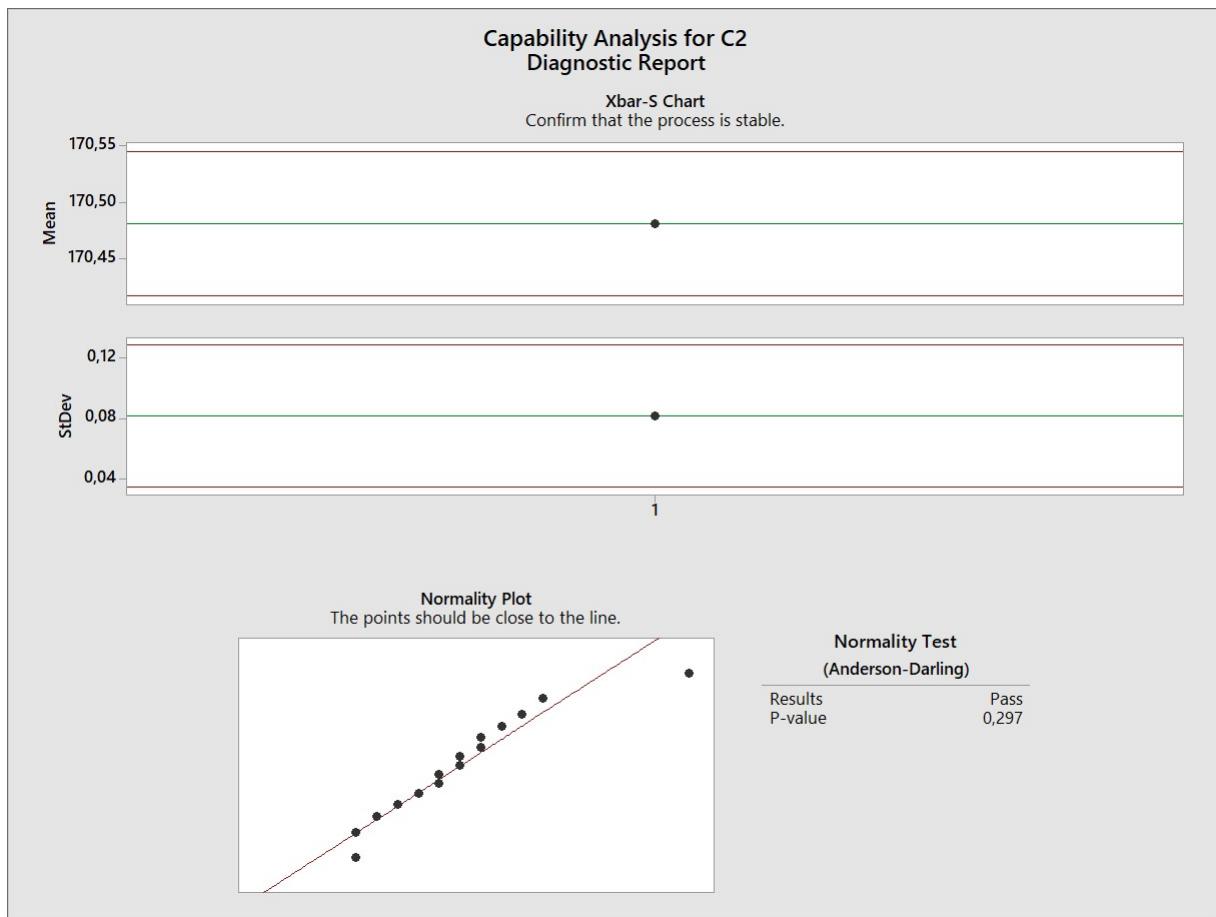


Figura 36: Análise de Capabilidade para o eixo Y

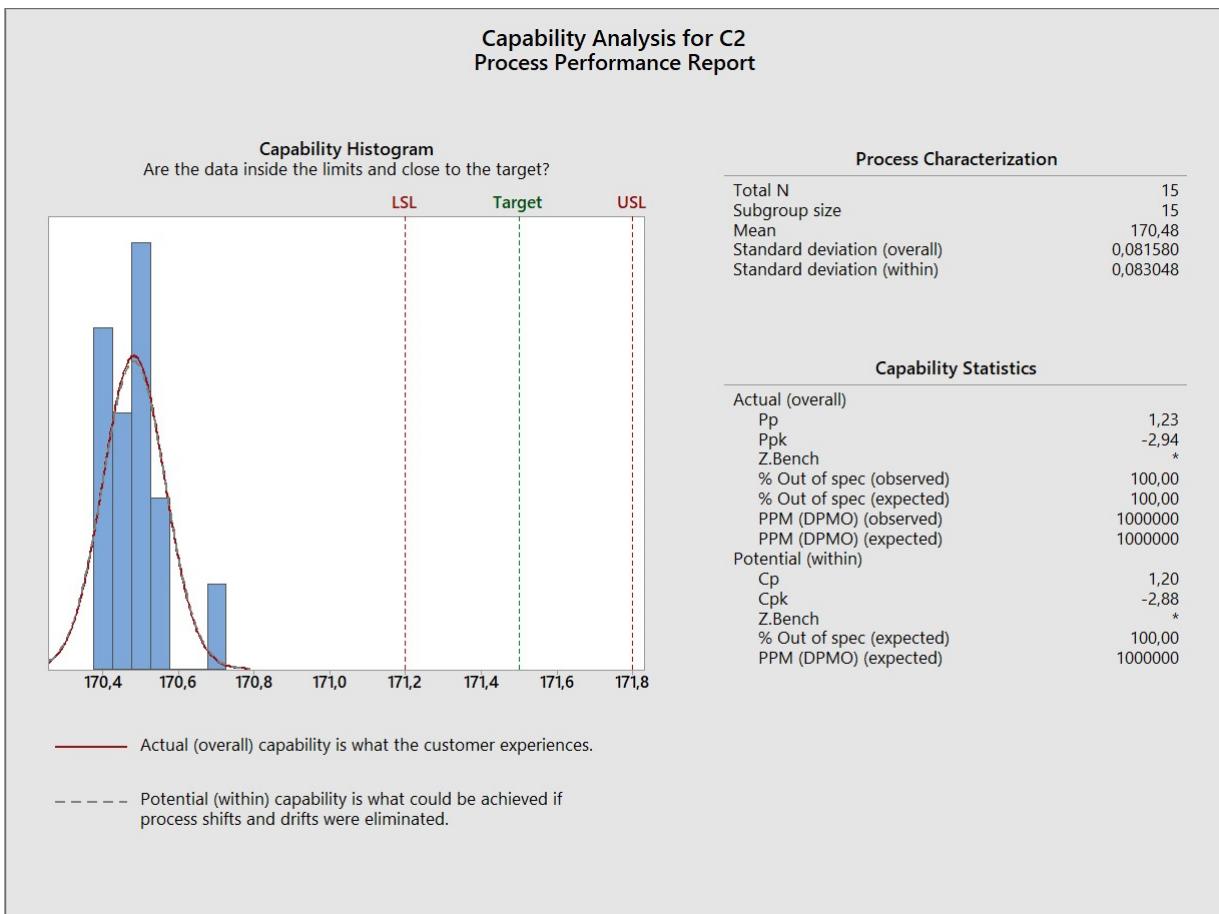


Figura 37: Análise de Capabilidade para o eixo Y

4.5.2 Análise de Erros

De modo análogo ao realizado em [1] para a determinação do Erro de retilíneidade e do Erro de Perpendicularidade, pode-se calcular esses Erros Geométricos para o Frame de 171,5X171,5 (mm). Dessa forma, os erros obtidos para os Eixos X e Y em relação ao valor Nominal de 171,5 mm podem ser vistos, respectivamente, em 38.

C3 ✓	C4 ✓	C5
-0,08	0,80	0
0,06	0,94	1
-0,02	0,96	2
0,00	1,00	3
-0,06	0,98	4
0,02	1,00	5
-0,08	1,02	6
-0,06	1,04	7
0,00	1,04	8
0,04	1,06	9
0,04	1,12	10
0,02	1,08	11
0,14	1,12	12
0,30	1,08	13
0,20	1,02	14

Figura 38: Erros em X à Esquerda, em Y no Centro e número da medida à direita

Utilizando o Software Minitab, pode-se realizar uma Interpolação Linear dos Dados obtidos em 38, obtendo-se os gráficos 39 e 40 para os Eixos X e Y, respectivamente e o gráfico 41 para o inverso da função Y, a qual será utilizada para se estimar o Erro de Perpendicularidade. Dessa forma, obtém-se as equações 5, 6 e 7 para representar essas três retas.

O valor de R^2 obtido para 5 é de cerca de 49.4% e, para 6, de cerca de 65.2%, o que indica uma correspondência apenas mediana entre a Interpolação Linear realizada e os dados tomados, o que indica uma certa dispersão dos dados em relação ao Modelo de Interpolação Linear tomado, logo, deve-se tomar as Análises realizadas com essas Retas apenas como aproximações para um processo cuja influência de outros tipos de Erros, como o Erro Aleatório, e o Erro inerente ao Processo de Medição Manual realizado são relevantes.

Os valores de $m_x = -0.01679$ e de $m_y = 0.01450$ indicam uma pequena inclinação das retas 39 e 40, de modo que é razoável considerar as linhas em X e em Y correspondentes ao Frame como aproximadamente retas.

$$Erro = -0.08283 + 0.01679 \cdot medida \quad (5)$$

$$Erro = 0.9158 + 0.01450 \cdot medida \quad (6)$$

$$Erro = -38.74 + 44.96 \cdot medida \quad (7)$$

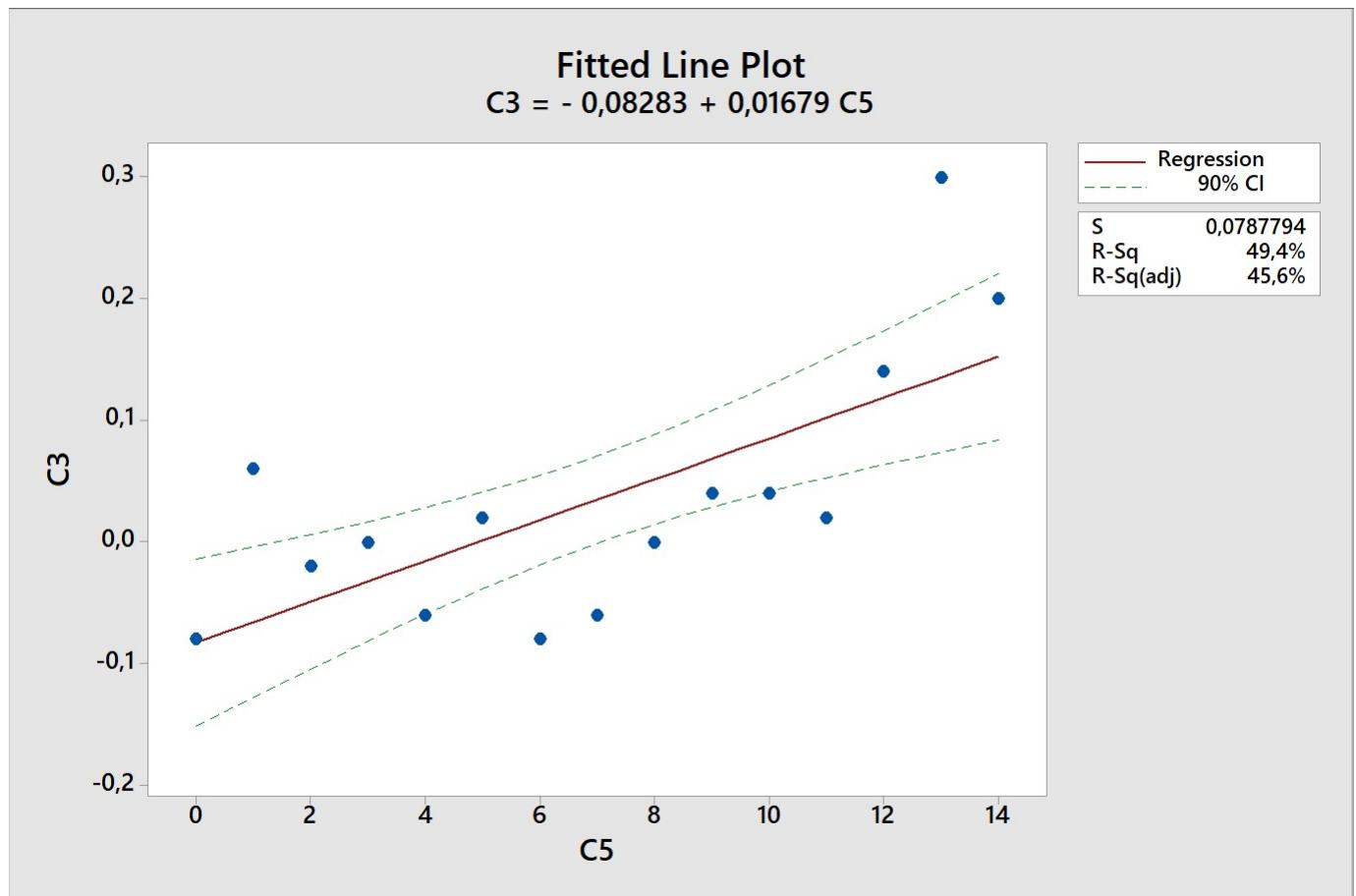


Figura 39: Reta de Medida X Erros para o eixo X da Fresa

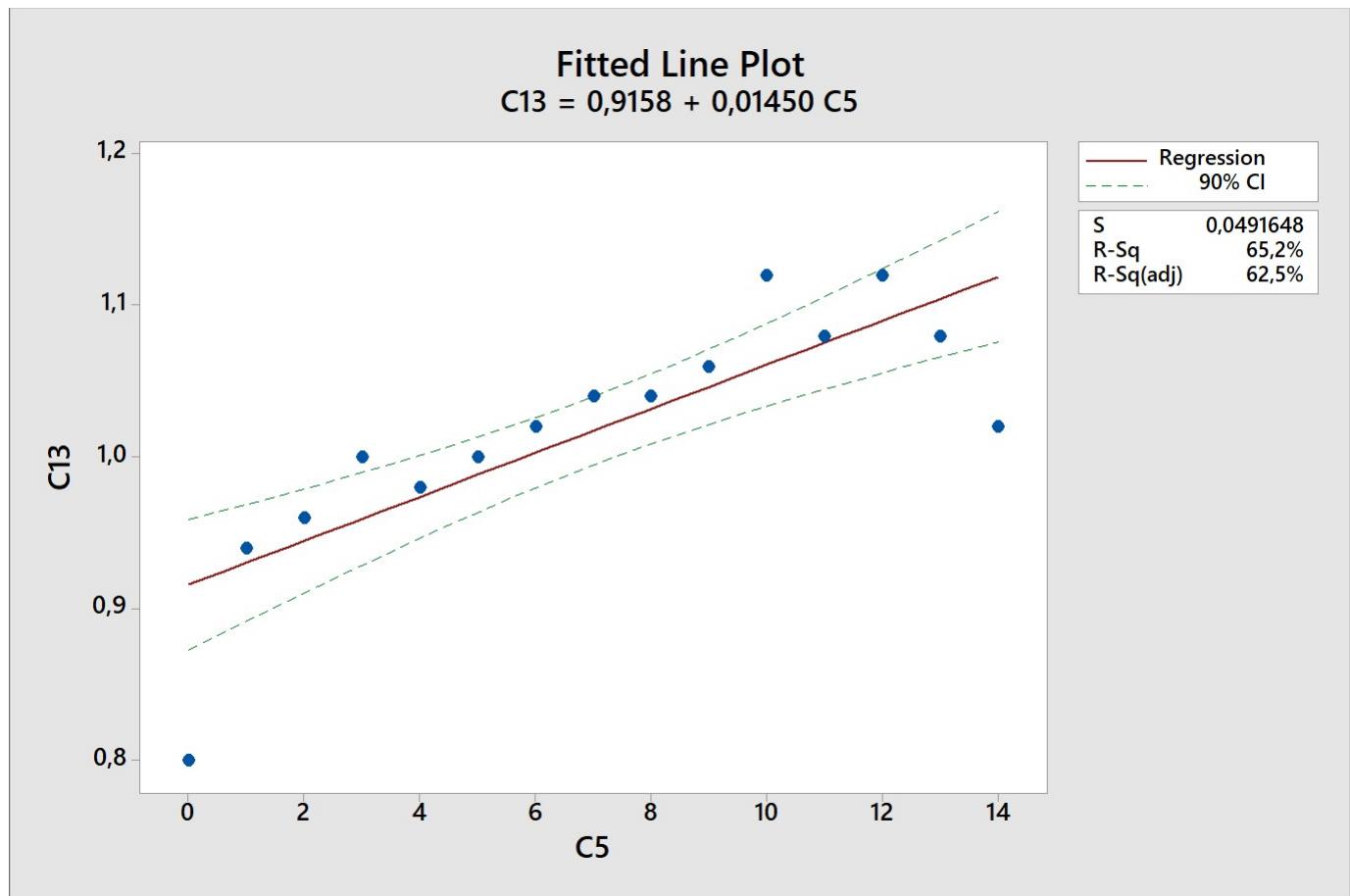


Figura 40: Reta de Medida X Erros para o eixo Y da Fresa

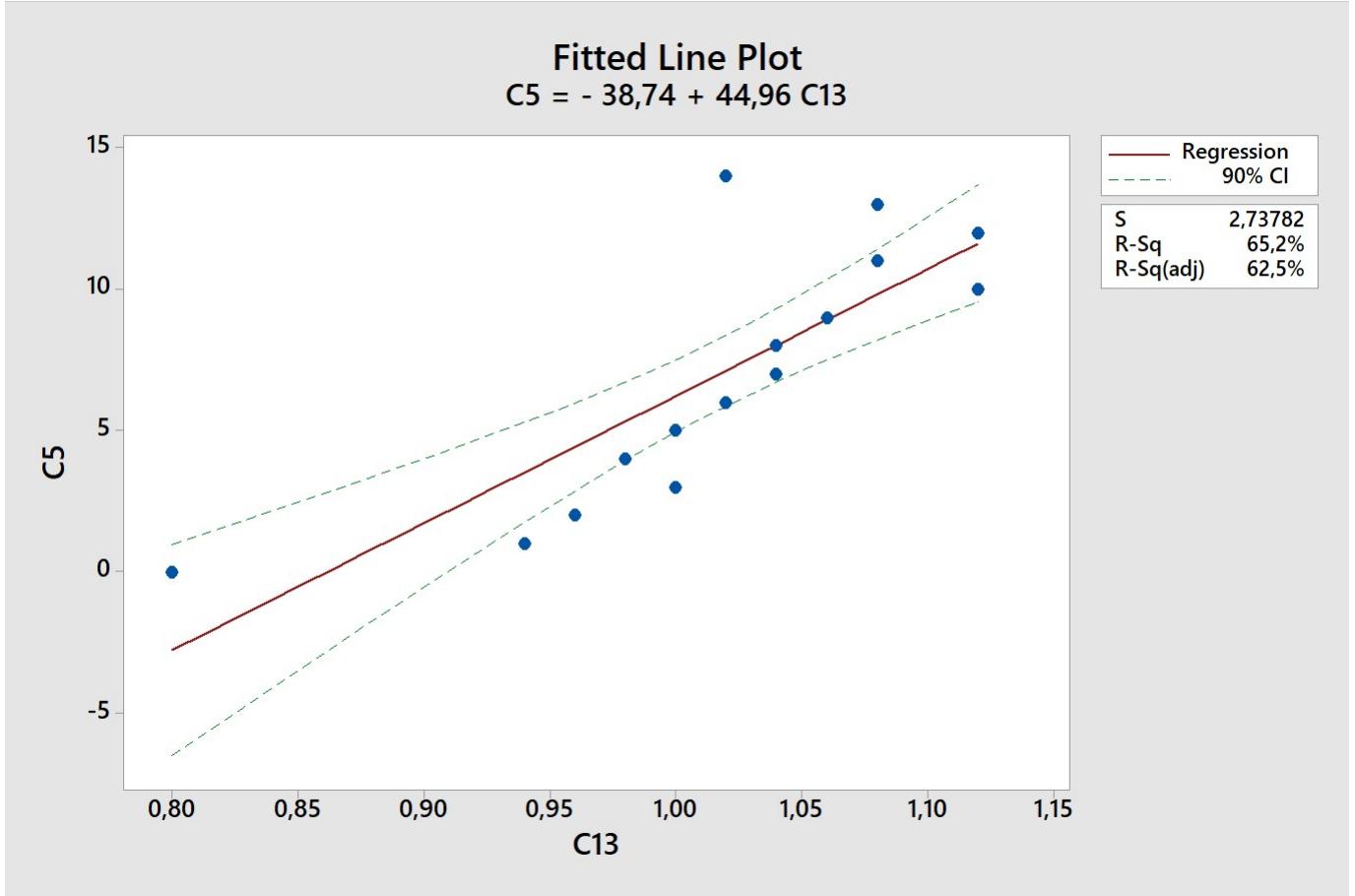


Figura 41: Reta de Erros X Medida para o eixo Y da Fresa

O Erro de Perpendicularidade pode ser tomado como o ponto de Intersecção das Retas correspondentes ao Eixo X e ao Eixo Y. Para se obter esse ponto, é necessário inverter a Equação tomada em relação ao Eixo Y, de modo a se alterar a referência para o Eixo das Ordenadas e tomar-se o Ponto de Intersecção desejado, conforme realizado em [1].

Para se obter o Erro de Perpendicularidade, deve-se calcular o ângulo entre as retas correspondentes ao Eixo X e ao Eixo Y, ou seja, o ângulo entre as retas 5 e 7. Dessa forma, utiliza-se a fórmula 8 , a qual correlaciona o coeficiente angular das retas 39 e 41, de modo a se obter que há um ângulo de aproximadamente 87.76 graus entre as retas X e Y, o que indica um erro de aproximadamente 2.24 graus dos 90 graus desejados para a perpendicularidade entre as retas. Esse erro é, portanto, relevante para o Projeto, mas tendo em vista a imprecisão natural do Processo realizado com Materiais Didáticos e medido com um paquímetro de pouca acurácia, pode ser considerado tolerável para a realização da peça proposta.

$$\theta = \arctg\left(\left|\frac{m_{yinv} - m_x}{1 + m_{yinv}m_x}\right|\right) = \arctg\left(\left|\frac{44.96 - 0.0169}{1 + 44.96 \cdot 0.0169}\right|\right) \approx 87.76^\circ \quad (8)$$

O Erro de Retilíneidade tomado para os eixos X e Y pode ser considerado como o maior valor correspondente ao Módulo da diferença entre um valor medido e o valor médio das medidas tomadas, ou seja, é dado por, respectivamente, 9 e 10, o que indica um Erro de Retilíneidade menor que a tolerância desejada para a peça e, portanto, aceitável para as condições tomadas.

$$E_{Retilíneidade} = \max(|x_i - \bar{x}|) \approx 0.27 \quad (9)$$

$$E_{Retilíneidade} = \max(|y_i - \bar{y}|) \approx 0.22 \quad (10)$$

5 Conclusão

O Ciclo de Vida de um Produto foi, portanto, verificado tanto para a realização de uma peça de Torneamento quanto para uma peça de Fresamento, de modo a envolver as Etapas de Projeto; seleção de Materiais, Máquinas e parâmetros de usinagem; Simulações; Usinagem e Análise de Capabilidade e de Erros da peça finalizada. A partir dessas Análises, percebe-se que a Máquina e Ferramenta utilizadas são, no geral, capazes de realizar as peças desejadas dentro da Tolerância de $\pm 0.3\text{mm}$ estabelecida, entretanto, tanto para o Processo de Torneamento quanto para o de Fresamento, ocorreram Erros Sistemáticos devido, provavelmente, à maneira como as Máquinas de Usinagem foram configuradas, de modo que a Configuração Manual utilizada para os dois Processos não se demonstra como adequada para a realização do setup sem a inserção de Erros Sistemáticos no Processo.

Referências

- [1] Alberto José Alvares. *Análise de Capabilidade - Exemplo Robô ASEA*. https://aprender3.unb.br/pluginfile.php/2299013/mod_resource/content/1/AnaliseCapabilidadeExemploRobo.pdf.
- [2] Carlos Bayeux. *Análise da capacidade de processos (Parte I)*. Maio de 2001.
- [3] Professora Dr. Morgana Pizzolato. *Tolerâncias*. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5372210/mod_resource/content/20Tolerancias%20geometricas%20 - %20RefLab - 2.pdf.