



APLICAÇÃO DE NURBS PARA MODELAGEM DE CURVAS E SUPERFÍCIES DE FORMAS LIVRES UTILIZANDO MMCs COM APALPADORES DO TIPO TOUCH TRIGGER

*Esly César Marinho da Silva*¹, *João Bosco de Aquino Silva*², *José Carlos de Lima Júnior*³ e *Igor Lucena Peixoto Andrezza*⁴

¹ Instituto Federal da Bahia, Simões Filho - BA, Brasil, eslymarinho@ifba.edu.br

² Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, jbosco@ct.ufpb.br

³ Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, limajrcarlos@hotmail.com

⁴ Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, igorlucena@di.ufpb.br

Sumário: Este trabalho teve como objetivo utilizar uma metodologia desenvolvida para modelagem de curvas e superfícies de formas livres utilizando NURBS e MMC com contato para fins de engenharia reversa. A metodologia foi aplicada experimentalmente para a análise de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e miniatura de uma asa de avião.

Palavras-chave: Máquina de Medição por Coordenadas, NURBS, engenharia reversa.

1. INTRODUÇÃO

As Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) são uma importante ferramenta no processo de concepção, fabricação e inspeção dos produtos manufaturados nos dias de hoje. Estes equipamentos são capazes de medir uma grande quantidade de pontos que conferem características de componentes complexos, muitas vezes realizando uma operação simples, [1].

Diante dos vários tipos de equipamentos utilizados para realizar medições de peças, e conseqüentemente, obter resultados com boa exatidão, o que se encontra com maior frequência nas indústrias brasileiras são as MMCs que utilizam medição por contato. A coleta de pontos para obtenção de curvas e superfícies livres requer muita perícia do metrologista. As regiões das peças com mudanças de curvatura precisam de um número maior de pontos, enquanto que as regiões planas ou quase planas necessitam de um número menor. Esse inconveniente seria facilmente resolvido realizando uma medição sem contato, utilizando cabeçote a laser, por exemplo, [2], [3] e [4]. A norma ISO 10.360-2 dita a faixa de exatidão de equipamentos de medição, e dentre eles as MMCs. Para o caso destes equipamentos com cabeçote a Laser, esses possuem exatidão de medição que variam de 20 µm a 100 µm, como por exemplo, [4]. É possível então, estabelecendo uma estratégia de medição associada com o uso da ferramenta NURBS, modelar uma superfície de forma complexa com uso de MMCs que usam apalpadores de contato do tipo touch-trigger de modo a atender as especificações de projeto?

Normalmente a representação gráfica de peças medidas é obtida a partir de um banco de dados contendo pontos

coletados por uma MMC. Para identificar as mais diversas formas e características das superfícies existem várias técnicas, tais como, superfícies Bézier, Splines, B-Splines, e NURBS (Non-Uniform Rational B-splines). As NURBS são uma ferramenta importante e uma grande aliada na modelagem de formas geométricas complexas, dando significativas contribuições na engenharia reversa.

2. CURVAS E SUPERFÍCIES NURBS

Uma importante ferramenta para realizar a modelagem de determinadas curvas e superfícies, durante o processo de aquisição dos dados em um processo de inspeção ou engenharia reversa, é utilizando NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Embora as curvas B-spline sejam muito utilizadas em projetos de curvas, elas não conseguem representar curvas de formatos simples, como no caso, de círculos. Portanto, para representar formas como círculos, elipses, etc., é necessário uma extensão das curvas B-spline. Para resolver estes problemas é necessário generalizar B-splines para curvas racionais usando coordenadas homogêneas, de onde se obtém o nome B-Splines Racional Não-Uniforme, NURBS, [5].

NURBS é uma ferramenta industrial padrão para representação e design de geometrias simples e complexas, e apresentam as seguintes aplicações [6]:

- ✓ Representar formas analíticas padrões e formas livres;
- ✓ Fornecer uma alta flexibilidade no design das formas;
- ✓ O tempo de processamento é razoavelmente pequeno;
- ✓ São generalizações das curvas e superfícies de Bézier e B-splines.

Matematicamente, uma curva NURBS de grau p pode ser definida por,

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i} \quad \text{com } a \leq u \leq b \quad (1)$$

onde $\{P_i\}$ são os pontos de controle da curva, $\{N_{i,p}\}$ são funções básicas B-spline de grau p e cada valor real ω_i é um peso associado ao ponto de controle P_i .

A expressão geral para representar uma superfície NURBS é dada pela Eq. (2),

$$s(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}} \quad (2)$$

$$0 \leq u; v \leq b$$

Onde uma superfície NURBS de grau p na direção u e grau q na direção v é definida através de um sistema bidimensional de pontos de controle $P_{i,j}$ com seus respectivos pesos $\omega_{i,j}$ e funções básicas B-spline, como apresentado na Eq.(2) acima.

O aprimoramento e desenvolvimento de algoritmos de curvas e superfícies NURBS é cada vez mais crescente. [7] aprimorou algoritmos para projeção de pontos sobre curvas e superfícies NURBS. O algoritmo desenvolvido por [8] visava analisar um método de interação geométrico que solucionaria problemas de projeção e inversão, através de propriedades de aproximação de segunda ordem.

Sabe-se, no entanto, que o desenvolvimento de softwares de modelagens utilizando NURBS possibilita a criação de formas/superfícies com boa definição, e pode ser considerada no desenvolvimento de novos produtos. Com esse intuito, é que se desenvolveu uma metodologia utilizando NURBS.

3. METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE NURBS EM MODELAGENS DE CURVAS E SUPERFÍCIES LIVRE

Normalmente a representação gráfica de peças medidas é obtida a partir de um banco de dados contendo pontos coletados por uma MMC. Sabe-se, no entanto, que a exatidão do processo de modelagem de uma peça será tão maior quanto maior for o número de pontos coletados ou medidos sobre a sua superfície.

Ao medir uma peça com uso de uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), vários fatores podem ser determinados tais como distâncias, diâmetros e raios de círculos, paralelismo, perpendicularismo, etc, a partir de pontos adquiridos no processo de medição. Além destes parâmetros, a coleta de pontos coordenados de uma peça é importante para estudos de inspeção e engenharia reversa. Neste último caso, as informações obtidas por este equipamento durante a coleta, seja no plano (X,Y) ou no espaço (X,Y,Z), gera a possibilidade de reconstrução de curvas e superfícies.

O que presencia-se hoje na maioria das empresas é o uso de MMCs com contato devido a sua grande versatilidade de operações, além do baixo custo quando comparado aos sistemas de medições sem contato. Estima-se a existência de mais de 6.000 equipamentos no Brasil, entre Máquinas cartesianas e braços de medição, [9].

Neste trabalho uma metodologia foi então desenvolvida no ambiente MATLAB [10], juntamente

com o toolbox desenvolvido por [11], e a partir de dados coletados experimentalmente num processo de medição com uso de uma MMC com contato utilizando apalpador do tipo touch trigger, utilizou-se as NURBS para a modelagem de curvas e superfícies. O resumo da metodologia desenvolvida pode ser vista na Fig. 1.

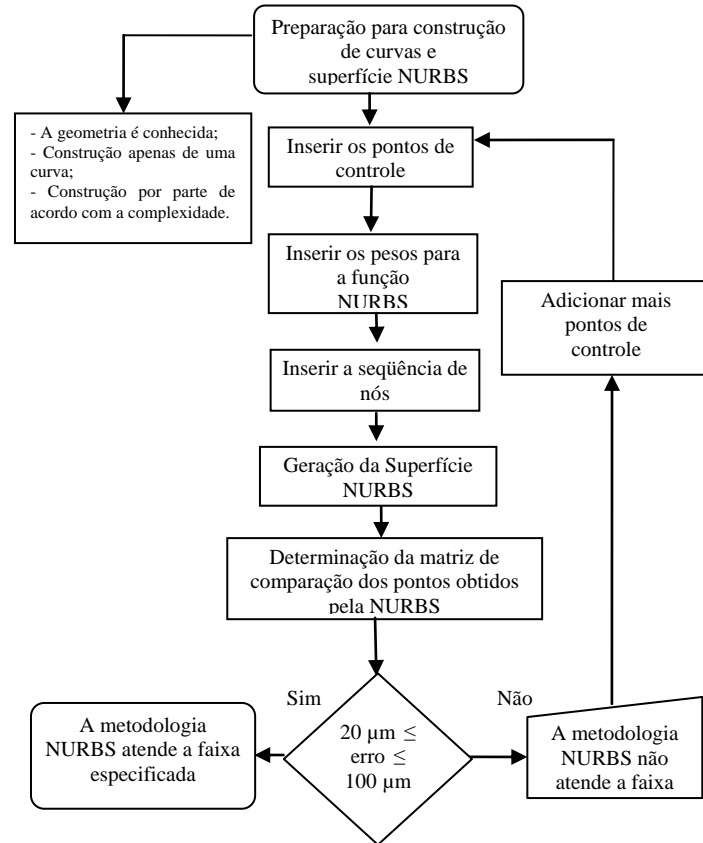


Fig.1: Fluxograma para obtenção de uma curva/superfície NURBS

Como dito anteriormente, através da norma ISO 10.360 que dita à faixa de exatidão de equipamentos de medição, e dentre eles as MMCs, sabe-se que o caso de equipamentos de MMCs com cabeçote a Laser, esses equipamentos possuem incertezas de medição que variam de 20 μm a 100 μm .

Se os resultados com um sistema de medição por contato ponto a ponto atender este nível de incertezas para os erros encontrados, considerou-se neste trabalho, estes resultados como aceitáveis, pois utilizou-se um número muito menor de pontos coletados, quando comparados a sistemas com uso de laser, por exemplo, e mesmo assim consegue atender as incertezas destes.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 1 a seguir apresenta os dados específicos de calibração, no qual mostra os dados de incerteza de medição da Máquina de Medição por Coordenadas utilizada que possui características semelhantes aos equipamentos de medição utilizados na maioria das indústrias.

Tabela 1. Incerteza da MMC utilizada no procedimento experimental

Parâmetro	Valor obtido
Incerteza de medição para todo o volume da máquina (fator de abrangência de 95%)	$U_3 = (2,5 + L/900) \mu\text{m} (*)$
	3,6 μm para deslocamento de 1000 mm
Maior erro identificado no volume da máquina	1,8 μm para deslocamento até 400 mm

*L = Deslocamento realizado pelo cabeçote de medição não importando a direção

Os dados coletados foram armazenados em arquivo IGES e posteriormente utilizados para manuseio como informações de entrada no aplicativo MATLAB para realizar o procedimento da construção das superfícies e sua representação gráfica. O software da máquina utilizado foi o PC-DMIS versão 3.206, conversor IGES versão 5.3 e o sensor de medição por contato ponto a ponto foi RENISHAW SP 600.

Neste trabalho não foi utilizado nenhum software comercial CAD para modelagem de curvas e superfícies de formas livres. Os objetos escolhidos para realizar a parte experimental foram: uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e um capacete para ciclistas.

4.1. Geração de uma Curva Evolvental de uma Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos Utilizando NURBS

Uma engrenagem cilíndrica de dentes retos com diâmetro externo de 1" foi utilizada no processo da coleta de pontos do perfil evolvental. Uma das dificuldades encontradas foi com relação à escolha do sensor apalpador por contato ponto a ponto, pois, o apalpador com menor dimensão da esfera de contato possuía um valor de 2 mm, e conseqüentemente poucos pontos puderam ser coletados na região que representa a curva evolvental da engrenagem. A Fig. 2 mostra a engrenagem utilizada no procedimento experimental



Fig.2: Engrenagem cilíndrica de dentes retos

Seguindo a metodologia desenvolvida por [10] os dados de entrada para obtenção da curva/superfície são os pontos de controle, [12], que neste caso correspondem aos pontos obtidos pela Máquina de Medição por Coordenadas.

Para esta peça foram escolhidos seis pontos no comprimento da curva evolvental da engrenagem. De acordo com a dimensão do dente da engrenagem e da esfera do apalpador escolhido, seis pontos coordenados foram demarcados sobre o perfil evolvental da engrenagem

para realizar a coleta pela máquina. O espaçamento aproximado entre os pontos demarcados sobre a peça foi de 1 mm.

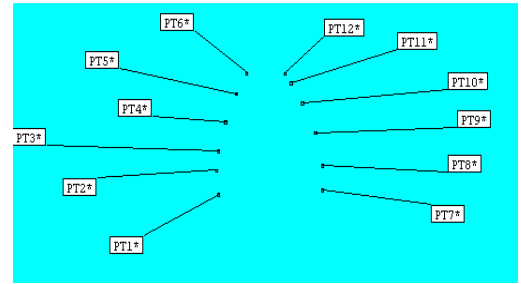


Fig.3: Pontos selecionados para construção da curva evolvental da engrenagem

Como foram selecionados poucos pontos para construção da curva NURBS, utilizou-se então 5 pontos para geração da curva e 1 ponto para realizar a validação da proposta utilizando NURBS. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados para as coordenadas que formam o perfil evolvental do lado esquerdo da engrenagem da vista frontal da Fig. 3.

Tabela 2. Valores obtidos pela Máquina de Medição por Coordenadas para Construção da Curva Evolvente da Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos medidos em mm (Lado Esquerdo da Engrenagem)

Coordenadas	Pontos Coletados pela Máquina					
	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
x	-2,720	-2,779	-2,650	-2,251	-1,690	-1,128
y	16,005	16,001	16,001	16,003	16,003	16,009
z	11,461	12,500	13,284	14,473	15,587	16,453

Como a curva evolvental da engrenagem cilíndrica tem que ser simétrica em ambos lados, a análise foi realizada apenas com os pontos coletados do lado esquerdo da engrenagem. A construção e a análise dos resultados obtidos posteriormente com os pontos coletados para o lado direito da engrenagem seria semelhante, uma vez que a quantidade de pontos é a mesma e o espaçamento entre eles bastante próximos ao do lado esquerdo medido pela MMC.

Além dos pontos coordenados, para uso da ferramenta NURBS é necessário acrescentar valores para função peso, que também faz parte dos dados de entrada. Assim a Tab. 2 fica com os valores representados pela Tab. 3, ou seja, apresenta os pontos selecionados para a construção da superfície evolvental e os respectivos pesos utilizados no processo.

Tabela 3. Valores usados para construção da Curva Evolvente da Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos e os seus respectivos pesos

Coordenadas	Pontos Coletados pela Máquina				
	PT1	PT3	PT4	PT5	PT6
x	-2,720	-2,650	-2,251	-1,690	-1,128
y	16,005	16,001	16,003	16,003	16,009
z	11,461	13,284	14,473	15,587	16,453
Pesos	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

A Tabela 3 apresenta os pontos coordenados e seus respectivos pesos utilizados no processo de obtenção da curva. Vale salientar que não houve alteração dos pesos relacionados a nenhum dos pontos. Isto se deve ao fato de não ocorrer nenhuma mudança acentuada na forma do objeto.

Assim como os pontos coordenados, outra informação de entrada para construção de uma superfície NURBS é o vetor de nós. Sabe-se, no entanto, que um vetor de nós não-uniforme, pode ser definido como uma seqüência não-decrescente de números reais como representado por,

$$u = \{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \} \quad (3)$$

ou seja, $u = \{ 0, \dots, 0, \dots, u_{m-p-1}, 1, \dots, 1 \}$, onde $a = 0$, $b = 1$ e p é o grau da função.

Com a quantidade de pontos de controle escolhidos, o vetor de nós construído com uso da metodologia desenvolvida para geração de uma curva de grau 3, determinou-se que haverá apenas um único parâmetro entre os valores de zero a um no vetor de nós. O vetor de nós então escolhido foi:

$$u = \{ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \} \quad (4)$$

A Figura 4 apresenta a curva obtida a partir dos dados experimentais.

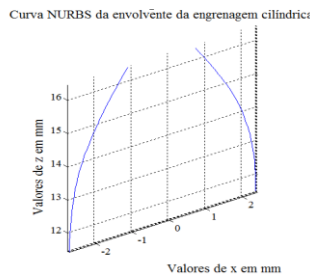


Fig.4: Curva NURBS obtida para a curva evolvental da engrenagem

A partir da construção do perfil evolvental, fez-se a análise dos resultados. Para construção da matriz de comparação entre os pontos, a geração da curva se deu através dos parâmetros de x e z . A partir desta análise, fixou-se os valores de x e observou-se os valores de z obtidos pela MMC e os respectivos valores de aproximação obtidos pela NURBS. A Tabela 4 apresenta estes dados.

Tabela 4. Valores comparativos para a coordenada Z obtidos pela Máquina de Medição por Coordenadas e pelas NURBS

Coordenada Z	Zmedido (mm)	Znurbs (mm)	Erro (mm)
PT1	11,461	11,461	0,000
PT2 (*)	12,500	12,285	-0,215
PT3	13,284	13,425	-0,141
PT4	14,473	14,454	0,019
PT5	15,587	15,541	0,046
PT6	16,453	16,453	0,000

Observa-se na Tab.4 que os valores obtidos pela NURBS apresentaram valores diferenciados. Os resultados apresentados variaram de 0 μ m a 141 μ m para os pontos medidos e utilizados como dado de entrada para a obtenção da curva. Como os pontos usados como dados de entrada PT1 e PT3 estavam mais distantes entre si, quando comparados ao distanciamento entre os pontos PT3, PT4, PT5 e PT6, observa-se que para este intervalo ocorreu um erro maior entre a coordenada medida e a obtida pela NURBS, ou seja, 141 μ m. Porém, este resultado obtido foi considerado aceitável, uma vez que sistemas de escaneamento a Laser possuem incertezas da ordem de 20 a 100 μ m, valores estes, fornecidos pelos fabricantes.

A Tabela 4 também apresenta o ponto PT2 que está em (*) para simbolizar que este ponto não foi utilizado para o cálculo da função NURBS. O resultado para esta situação apresentou um valor de 215 μ m.

Como neste trabalho as NURBS são uma função de aproximação, a tendência natural é que os valores fiquem mais próximos dos pontos coordenados utilizados como dados de entrada na metodologia proposta.

Uma forma de minimizar o valor do erro no processo de validação seria aumentando o número de pontos utilizados como dados de entrada, minimizando prováveis alterações significativas na forma da curva, tornando-a mais suave entre os pontos inseridos.

Outra forma de se tentar minimizar os valores obtidos na Tab. 5 é alterando-se os valores da função peso. Com esse intuito, fez-se um estudo alterando-se estes valores de modo a minimizar os erros apresentados entre os valores medidos e os obtidos pelas NURBS. Realizando manipulações nos valores dos pesos, após o método de tentativas, os melhores resultados estão apresentados na Tab. 5.

Tabela 5. Valores comparativos para a coordenada Z obtidos pela Máquina de Medição por Coordenadas para Construção e pela NURBS com alterações da função pesos

Pontos	Zmedido (mm)	Peso utilizado	Znurbs (mm)	Erro (mm)
PT1	11,461	1,000	11,461	0,000
PT2 (*)	12,500	1,000	12,065	-0,435
PT3	13,284	1,008	13,365	0,081
PT4	14,473	0,999	14,433	-0,040
PT5	15,587	1,000	15,542	-0,045
PT6	16,453	1,000	16,453	0,000

Percebe-se que a Tab.5 mostra que o erro máximo encontrado foi de 81 μ m, levando em consideração apenas os pontos utilizados como dado de entrada para a construção da curva, sendo este ponto equivalente ao erro apresentado pelo ponto PT3.

Quando se altera os pesos, há uma modificação mais acentuada da forma da curva na região em torno do ponto coordenado associado a este peso. Muitas vezes esse procedimento consegue melhorar de maneira satisfatória os resultados relacionados aos erros de medição existente entre os pontos medidos e os pontos obtidos pela ferramenta NURBS. Convém salientar que as modificações dos pesos junto aos pontos coordenados associados, também alteram de maneira significativa as regiões circunvizinhas destes pontos.

Com os valores dos pesos alterados, como mostrado na Tab.5, usou-se o ponto PT2 para verificar o comportamento de um ponto que não foi utilizado para a obtenção da curva para fazer a validação para esta nova situação. Devido à nova forma da curva, o valor do ponto PT2 obtido pela NURBS foi 435 μm . Percebe-se então que a alteração da função peso minimizou os valores dos erros encontrado pela NURBS, mas houve um aumento do erro apresentado no ponto utilizado para realizar a validação.

A Figura 5 mostra a curva evolvental da engrenagem cilíndrica de dentes retos obtida pela NURBS com e sem alteração dos pesos.

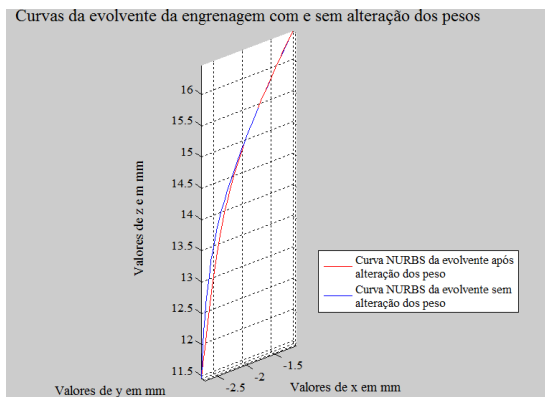


Figura 5. Curvas evolventes obtidas pelas NURBS com e sem alteração dos pesos

A escolha para os valores dos pesos modificados foi realizada de maneira aleatória, servindo apenas para ilustrar a importância destes no estudo da modelagem de superfícies. Pretende-se no futuro desenvolver um algoritmo para encontrar os melhores valores para os pesos para as mais diversas formas e geometrias.

4.2. Modelagem de um capacete para ciclismo de rua utilizando NURBS

Outro procedimento experimental consistiu na obtenção de uma superfície de um capacete de ciclismo. O capacete tem um comprimento aproximado de 30 cm. Para realizar a modelagem do mesmo, dividiu-se o procedimento em duas etapas. Primeiro considerou-se a modelagem da estrutura uniforme do capacete como única e num procedimento posterior, fez-se a medição de uma das regiões vazadas do mesmo. A Figura 6 mostra o modelo utilizado para a geração da superfície.



Figura 6. Capacete ciclístico utilizado para realizar o procedimento experimental

4.2.1. Geração do Capacete de Forma Inteiriça

Assim como descrito nos tópicos anteriores, a primeira tarefa realizada com o objeto em mãos foi à definição dos pontos a serem coletados. Os critérios, o planejamento e estratégia estabelecidos neste projeto em específico levaram em consideração que, para a realização total das medições duas etapas seriam necessárias. Primeiro, a medição de um conjunto de pontos para modelagem do capacete e em segundo, outro conjunto de pontos para modelagem da região vazada. O capacete medido tem aproximadamente 30 cm.

O capacete foi então subdividido em malhas contendo pontos específicos nas regiões onde não continham área vazada para realizar a coleta pela máquina. O ideal seria que se coletasse um número de pontos de modo a formar uma matriz quadrada objetivando facilitar o procedimento computacional na construção das matrizes multicelulares, porém, a forma da superfície não permitia essa configuração. Um conjunto de pontos formando uma matriz quadrada não iria refletir a realidade do objeto, pois, o número de pontos coordenados coletados seria reduzido e conseqüentemente as incertezas das medições não seriam atendidas. Demarcou-se na base do objeto um total de 12 linhas sobre o capacete, e cada linha contendo em média 22 pontos. As doze linhas seriam as linhas da matriz e os pontos distribuídos sobre estas são as colunas utilizadas na matriz.

O algoritmo utiliza na sua sub-rotina coordenadas homogêneas, e por este motivo, é necessário que os dados de entrada formem uma matriz quadrada. Então para a construção específica desta pesquisa trabalhou-se com uma matriz 10 x 20, e esta sendo subdividida em outras duas matrizes de 10 x 10, atendendo assim as especificações da metodologia desenvolvida.

A Figura 7 mostra a região da distribuição da malha para medição com os respectivos pontos a ser coletados.



Figura 7. Região contendo os pontos a ser coletados pela Máquina de Medição por Coordenadas

As operações de planejamento/estratégia, montagem e fixação do modelo e execução das medições da primeira e segunda etapa, levaram aproximadamente 2 dias. Para realizar esta coleta, foi necessária em alguns pontos próxima a região da base do capacete, realizar o movimento de rotação e mudança de ângulo do apalpador para evitar a colisão da haste na superfície do modelo, evitando assim, coleta de pontos não reais de medição.

O procedimento de medição teve seu início com os ajustes manuais para determinação do sistema de coordenadas para posteriormente ser feita a programação automática. A Figura 8 mostra o resultado da medição pode ser visualizado através do software da máquina.

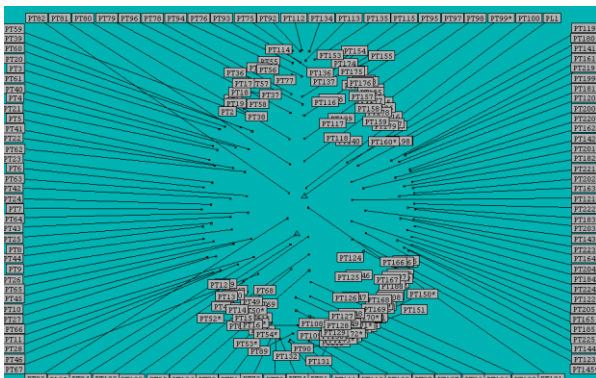


Figura 8. Pontos obtidos pela MMC

A Figura 8 apresenta todos os 264 pontos coletados pela Máquina de Medição por Coordenadas. Para a obtenção da superfície do capacete foram utilizados 200 pontos coordenados como dados de entrada.

Porém para realizar a análise do comportamento das NURBS foram escolhidos três conjuntos de pontos sobre o capacete de modo que estes consigam representar de maneira significativa todas as partes do capacete. Como o capacete é simétrico, no planejamento fez-se essa consideração e este foi dividido em doze linhas sobre sua superfície, seis do lado direito e seis do lado esquerdo. Porém, para a obtenção da superfície o capacete utilizou-se dez linhas, e as outras duas linhas contendo pontos

medidos foram utilizados para realizar a validação da metodologia.

A metodologia foi aplicada somente no lado esquerdo do capacete onde se escolheu três conjuntos de pontos, localizados na base do capacete, outra na diagonal e por último na região superior. O número de pontos utilizados como dados de entrada para a obtenção da superfície foram 200, porém, para realizar a análise dos erros encontrados pela diferença entre os pontos medidos e as NURBS utilizou-se os pontos da base do capacete, da diagonal e da parte superior do mesmo. A Figura 9 mostra estas regiões.

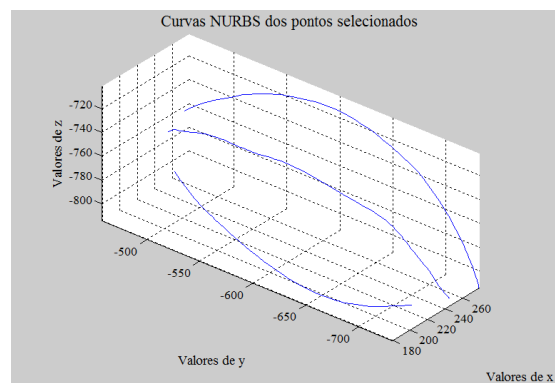


Figura 9. Localização da região da base, diagonal e parte superior do capacete

A Tabela 6 apresenta os pontos coordenados medidos pela MMC para realizar a análise comparativa após a construção da superfície NURBS.

Tabela 6. Valores dos pontos medidos pela MMC para a base do capacete, diagonal e parte superior do capacete

Valores das coordenadas medidas pela MMC								
Base do Capacete			Diagonal do Capacete			Parte superior do Capacete		
Xmedido	Ymedido	Zmedido	Xmedido	Ymedido	Zmedido	Xmedido	Ymedido	Zmedido
276,187	-456,981	-765,150	303,994	-461,959	-765,789	336,477	-486,886	-767,504
277,659	-467,269	-755,709	309,543	-469,962	-759,492	341,914	-494,303	-767,481
280,871	-477,202	-749,151	316,044	-479,343	-754,323	350,284	-505,729	-770,631
284,285	-490,396	-740,824	322,829	-493,007	-748,646	358,821	-520,177	-771,763
290,058	-509,103	-730,055	332,981	-515,500	-741,845	363,215	-529,330	-773,812
293,905	-531,804	-718,628	338,842	-528,739	-738,359	369,523	-543,024	-776,241
297,872	-546,595	-713,768	345,037	-547,936	-733,431	374,509	-555,116	-779,214
306,319	-588,502	-704,243	350,503	-566,202	-729,791	379,397	-570,961	-783,616
306,320	-605,829	-703,991	353,110	-582,990	-728,432	382,432	-586,091	-788,639
305,322	-625,800	-702,266	354,323	-600,538	-728,239	383,828	-600,911	-793,345
306,101	-658,492	-718,870	357,278	-621,210	-733,981	383,740	-614,931	-798,018
304,334	-675,977	-730,157	354,471	-641,225	-739,152	381,951	-630,614	-803,424
304,329	-693,604	-745,987	351,348	-660,818	-746,268	379,203	-643,371	-806,541
303,312	-708,713	-764,794	347,353	-676,208	-756,599	371,548	-664,693	-811,962
302,355	-716,442	-777,643	340,691	-693,510	-769,239	367,438	-673,288	-812,968
300,904	-723,609	-797,553	332,452	-708,243	-784,990	361,269	-684,191	-813,486
300,927	-723,535	-798,308	327,005	-714,116	-798,159	354,318	-694,425	-814,151
301,204	-728,225	-807,350	318,793	-721,306	-803,812	345,962	-704,440	-814,159
300,964	-730,144	-814,293	313,937	-725,926	-814,171	338,406	-711,298	-814,160

As coordenadas medidas serviram então como os dados de entrada para determinar a superfície NURBS para o modelo em estudo. Para a construção da primeira parte da superfície atribuiu-se uma função de grau 3, 10 pontos de

controle. Foi realizado o procedimento análogo para a construção da segunda parte da superfície do capacete. O vetor de nós então escolhido foi:

$$u = \{0\ 0\ 0\ 0\ 0.1\ 0.25\ 0.5\ 0.6\ 0.75\ 0.9\ 1\ 1\ 1\ 1\}$$

$$v = \{0\ 0\ 0\ 0\ 0.1\ 0.25\ 0.5\ 0.6\ 0.75\ 0.9\ 1\ 1\ 1\ 1\}$$

onde esta configuração permitiu uma distribuição mais uniforme dos nós, evitando assim, influenciar de maneira mais específica algumas regiões da superfície, podendo alterar sua forma final. As Figuras 10 e 11 a apresentam duas vistas diferentes da superfície modelada utilizando a ferramenta NURBS.

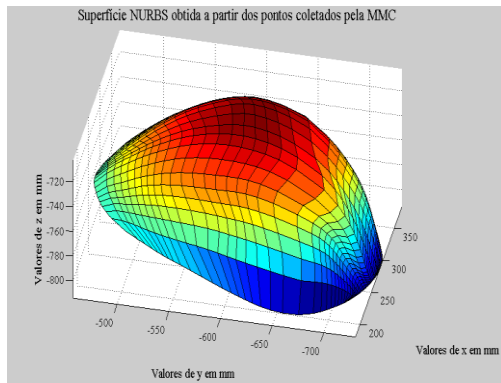


Figura 10. Superfície do capacete obtido utilizando NURBS

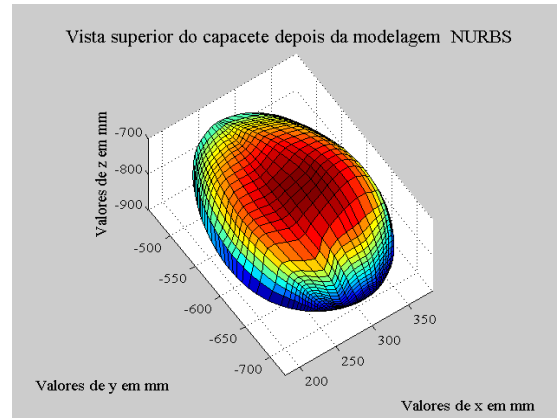


Figura 11. Outra vista da superfície modelada

A partir dos valores encontrados para as NURBS, construiu-se a Tab. 7 com os valores comparativos correspondentes para a coordenada z obtida pela MMC e pela NURBS para a construção da superfície do capacete.

Tabela 7. Valores comparativos para a coordenada Z obtidos pela Máquina de Medição por Coordenadas e pela NURBS para construção da superfície do capacete

Pontos da Base do Capacete			Pontos da Diagonal do Capacete			Pontos da Parte superior do Capacete		
Zmedido	Z NURBS	Erro (mm)	Zmedido	Z NURBS	Erro (mm)	Zmedido	Z NURBS	Erro (mm)
-767,504	-767,504	0,000	-765,789	-765,851	-0,062	-767,504	-767,858	-0,354
-767,481	-766,979	0,502	-759,492	-758,676	0,816	-767,481	-767,765	-0,284
-770,631	-770,954	-0,323	-754,323	-753,372	0,951	-770,631	-770,472	0,159
-771,763	-771,331	0,432	-748,646	-748,042	0,604	-771,763	-771,367	0,396
-773,812	-773,813	-0,001	-741,845	-741,184	0,661	-773,812	-773,860	-0,048
-776,241	-776,102	0,139	-738,359	-737,376	0,983	-776,241	-775,354	0,887
-779,214	-778,946	0,268	-733,431	-732,663	0,768	-779,214	-778,353	0,861
-783,616	-783,087	0,529	-729,791	-728,824	0,967	-783,616	-782,770	0,846
-788,639	-788,429	0,210	-728,432	-727,641	0,791	-788,639	-788,207	0,432
-793,345	-793,345	0,000	-728,239	-727,369	0,870	-793,345	-792,647	0,698
-798,018	-797,697	0,321	-733,981	-733,415	0,566	-798,018	-797,111	0,907
-803,424	-803,415	0,009	-739,152	-739,998	-0,846	-803,424	-802,399	1,025
-806,541	-806,346	0,195	-746,268	-745,891	0,377	-806,541	-805,990	0,551
-811,962	-812,539	-0,577	-756,599	-756,746	-0,147	-811,962	-811,793	0,169
-812,968	-813,097	-0,129	-769,239	-768,371	0,868	-812,968	-811,976	0,992
-813,486	-813,458	0,028	-784,990	-784,010	0,980	-813,486	-812,986	0,500
-814,151	-814,277	-0,126	-798,159	-797,856	0,303	-814,151	-813,406	0,745
-814,159	-814,168	-0,009	-803,812	-804,653	-0,841	-814,159	-813,731	0,428
-814,160	-814,160	0,000	-814,171	-814,167	0,004	-814,160	-814,194	-0,034

A Tabela 7 apresenta os valores correspondentes à base do capacete, à diagonal do capacete e da parte superior deste. Estes valores são relativos ao lado esquerdo do mesmo. Analisando ainda a Tabela 7 verifica-se que os valores encontrados apresentaram: para a base do capacete valores para o erro entre 0 µm e 577 µm, para a diagonal do capacete 0 µm e um valor maior de 983 µm e na parte superior valores entre 0 µm e um ponto atípico de 1025 µm.

A distribuição de pontos demarcados sobre a superfície do capacete mostrou que para o mesmo número de pontos observados (19 pontos coordenados) sobre a superfície deste, o agrupamento dos pontos distribuídos se mostrou

diferenciada. Enquanto, na região da base estes pontos apresentavam-se mais próximos, à medida que os pontos eram distribuídos para a região superior do capacete, o espaçamento entre os pontos tornavam-se maiores, conseqüentemente, os erros apresentados na região da diagonal e da parte superior do capacete foram maiores, como se verifica na Tabela 7.

Percebe-se então, que para minimizar os valores encontrados, seguindo a metodologia desenvolvida nesta tese, é necessária uma maior quantidade de pontos localizados sobre a superfície do capacete para ser utilizados como dados de entrada para modelagem NURBS. A Tabela 8 apresenta os resultados para a

diferença entre a coordenada Z medida pela MMC e pela NURBS.

Tabela 8. Valores das coordenadas utilizadas para realizar a validação do procedimento proposto

Xmedido	Ymedido	Zmedido	Znurbs	Erro (mm)
204,306	-549,461	-743,981	-744,290	0,309
235,947	-704,637	-780,144	-781,056	0,912
279,445	-727,617	803,374	803,467	-0,093
301,526	-721,136	-788,898	-789,337	0,439
328,678	-503,940	-746,838	-747,272	0,434
371,764	-557,784	-768,182	-768,401	0,219
375,825	-654,037	-809,575	-810,041	0,466

A Tabela 8 apresentou valores que variaram entre 93 µm e 912 µm. Percebe-se, que os valores encontrados não apresentaram muito distantes dos obtidos pelos pontos coordenados utilizados como dados de entrada para a obtenção da superfície. A maioria dos valores encontrados na Tab. 8 ficou em torno dos 400 µm, e dois valores atípicos, sendo justamente os valores máximos e mínimos encontrados (912 µm e 91 µm) após o uso da metodologia desenvolvida.

Assim como nos procedimentos experimentais da engrenagem e do avião, realizou-se a modificação dos pesos para verificar o comportamento da curva obtida com os pontos medidos da diagonal do capacete. A Tabela 8 apresenta os valores encontrados para as coordenadas Z obtida pela NURBS e os respectivos erros encontrados para os pontos medidos.

4.2.2. Geração da Forma de Corte a ser dada no Projeto do Capacete Ciclístico

A segunda etapa no processo de medição do capacete consistiu na coleta de pontos medidos em uma região vazada do mesmo. O objetivo dessas medições foi obter um número significativo de pontos de modo a obter a forma da curva como descrito nos tópicos anteriores. A Figura 5.26 apresenta a região vazada medida pela MMC.



Figura 12. Localização dos pontos a ser medido pela MMC para construção da curva NURBS

A Figura 12 mostra a localização dos pontos onde se realizou a medição pela MMC para construção da curva NURBS. Um total de 40 pontos foram utilizados para a obtenção da curva NURBS representando a região vazada

do capacete. O número total de pontos coletados pela MMC foi de 45, sendo 40 pontos utilizados para a construção da curva, e os outros 05 pontos foram utilizados para a validação da metodologia desenvolvida. Na região de maior curvatura, um número maior de pontos foi medido, enquanto que nas partes retas da região vazada, um menor número de pontos foi coletado.

Os pontos medidos pela máquina foram,

$$X_{MEDIDO} = \begin{bmatrix} 419,259 & 419,626 & 420,191 & 421,125 & 421,703 & 422,317 & 423,278 & 424,312 & 427,319 & 429,450 \\ 430,190 & 431,269 & 432,070 & 432,012 & 433,242 & 434,986 & 435,542 & 436,159 & 437,332 & 437,591 \\ 437,655 & 437,454 & 436,206 & 432,994 & 431,585 & 429,632 & 427,303 & 425,058 & 423,294 & 422,512 \\ 417,893 & 417,956 & 418,167 & 418,371 & 418,640 & 419,049 & 419,049 & 419,049 & 419,259 & 419,049 \end{bmatrix}$$

$$Y_{MEDIDO} = \begin{bmatrix} -675,396 & -677,630 & -679,844 & -683,476 & -684,887 & -685,256 & -685,255 & -685,614 & -686,193 & -685,329 \\ -684,516 & -684,517 & -684,525 & -683,317 & -682,428 & -678,565 & -675,741 & -671,188 & -663,171 & -659,240 \\ -657,536 & -655,486 & -653,494 & -651,270 & -651,005 & -650,868 & -650,857 & -650,975 & -651,211 & -651,392 \\ -660,069 & -661,431 & -663,310 & -668,350 & -671,475 & -673,656 & -673,656 & -673,656 & -675,396 & -673,656 \end{bmatrix}$$

$$Z_{MEDIDO} = \begin{bmatrix} -677,916 & -682,232 & -687,200 & -694,505 & -697,825 & -699,398 & -700,971 & -702,783 & -705,344 & -702,909 \\ -701,328 & -699,420 & -697,916 & -696,787 & -692,764 & -683,184 & -677,926 & -670,692 & -658,761 & -654,272 \\ -652,541 & -650,944 & -650,935 & -650,133 & -650,126 & -650,126 & -650,126 & -650,126 & -650,126 & -650,926 \\ -656,237 & -659,073 & -665,410 & -670,184 & -674,846 & -674,846 & -674,840 & -674,846 & -674,850 & -677,916 \end{bmatrix}$$

Neste caso, para a obtenção de uma curva NURBS não é necessário à construção de matrizes multidimensionais. Para a construção dessa curva atribuiu-se uma função de grau 3, e determinou-se que haverá 36 parâmetros com valores entre zero e um contido no vetor de nós. O vetor de nós então escolhido foi:

$$u = \{ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10 \ 0.2 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.275 \ 0.3 \ 0.325 \ 0.35 \ 0.375 \ 0.4 \ 0.425 \ 0.435 \ 0.45 \ 0.465 \ 0.475 \ 0.485 \ 0.5 \ 0.515 \ 0.525 \ 0.535 \ 0.55 \ 0.565 \ 0.575 \ 0.6 \ 0.625 \ 0.65 \ 0.675 \ 0.7 \ 0.725 \ 0.75 \ 0.775 \ 0.8 \ 0.825 \ 0.85 \ 0.875 \ 0.9 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \}$$

onde esta configuração permitiu uma distribuição mais uniforme dos nós, evitando assim, influenciar de maneira mais específica algumas regiões da superfície, podendo alterar sua forma final. Os pontos encontrados para a coordenada Z pela ferramenta NURBS foram,

$$Z_{NURBS} = \begin{bmatrix} -677,916 & -682,062 & -687,035 & -694,201 & -697,511 & -699,323 & -700,997 & -702,533 & -706,181 & -702,712 \\ -701,383 & -699,397 & -697,863 & -696,832 & -692,353 & -682,908 & -677,644 & -670,832 & -658,653 & -654,033 \\ -652,374 & -651,363 & -650,850 & -650,199 & -650,127 & -650,126 & -650,126 & -650,126 & -650,326 & -650,792 \\ -655,249 & -656,286 & -659,402 & -665,149 & -669,888 & -674,857 & -674,887 & -674,878 & -674,874 & -677,916 \end{bmatrix}$$

Com os valores correspondentes de x, y e z medidos, calculou-se a diferença entre os pontos da coordenada z medida e os respectivos valores para esta coordenada obtida pelas NURBS. A partir destes valores criou-se uma matriz de erro para melhor análise dos parâmetros. A seguir apresenta-se a matriz de erro nos quais seus valores são expressos em milímetros.

$$ERRO = \begin{bmatrix} 0,000 & -0,170 & -0,165 & -0,304 & -0,274 & -0,075 & 0,026 & -0,250 & 0,837 & -0,197 \\ 0,055 & -0,023 & -0,053 & 0,045 & -0,411 & -0,276 & -0,282 & 0,140 & -0,108 & -0,239 \\ 0,167 & 0,419 & -0,085 & 0,066 & 0,001 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,200 & -0,134 \\ 0,593 & 0,049 & 0,329 & -0,261 & -0,296 & -0,011 & 0,041 & 0,032 & 0,028 & 0,000 \end{bmatrix}$$

Os valores das diferenças apresentadas e expressas pela matriz de erro acima, apresentam valores bem distintos, ou

seja, uma seqüência de erros com valores da ordem de 0 μm e 60 μm , e outros valores em torno de 250 μm .

Os menores valores encontrados na matriz de erro são devido a uma quantidade maior de pontos utilizados na construção das regiões de maior curvatura, e os erros maiores, apareceram na região de menor curvatura da seção vazada do capacete, uma vez que uma menor quantidade de pontos medidos foram utilizados. Seguindo a metodologia utilizada em todo este capítulo, a curva NURBS obtida para a região vazada do capacete está apresentada na Fig. (13).

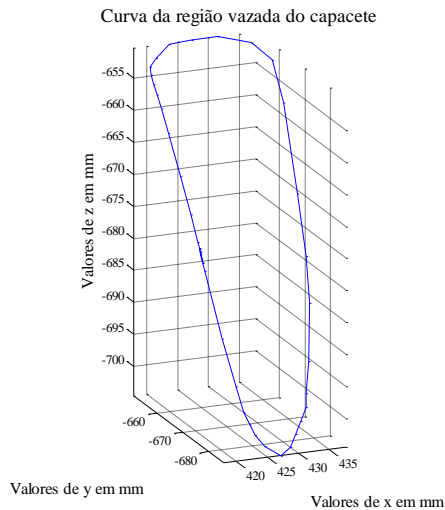


Figura 13. Curva NURBS da região vazada do capacete

A Figura 13 apresenta a curva NURBS obtida a partir dos pontos coletados pela Máquina de Medição por Coordenadas, representando uma região vazada do capacete.

Tabela 9. Resultados obtidos para os valores utilizados para realizar a validação da metodologia aplicada na região vazada do capacete

Xmedido	Ymedido	Zmedido	Znurbs	Erro (mm)
418,191	-665,689	-661,720	-661,877	0,157
420,679	-681,957	-691,302	-690,960	-0,342
426,206	-686,195	-705,074	-704,197	-0,877
434,005	-651,670	-650,636	-650,401	-0,235
436,901	-667,283	-663,918	-664,893	0,975

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos com os valores dos pontos coordenados utilizados para a validação desse procedimento. Os menores valores encontrados na Tab. (9) foram de pontos localizados e medidos nas regiões de maior curvatura da região vazada, sendo estes valores 157 μm , 235 μm e 342 μm . As maiores diferenças apresentadas foram de 877 μm e 975 μm , e foram de pontos localizados em regiões mais retas da região vazada. Isto ocorreu porque o espaçamento entre os pontos medidos eram bem maiores quando comparados aos pontos medidos nas regiões de maior curvatura. Como a função NURBS é uma função de aproximação, quando os pontos medidos são utilizados para a modelagem de curvas e superfícies, já se espera uma diferença entre os valores coletados e os gerados pelas NURBS.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para determinar as mais diversas formas para obtenção de curvas e superfícies a partir de uma nuvem de pontos seja eles gerados a partir expressões analíticas ou através de pontos medidos. De um modo geral, nas situações em que os pontos medidos se localizavam próximos entre si, o uso da ferramenta NURBS se mostrou eficiente, os menores valores para as diferenças obtidas entre os valores medidos e os obtidos pelas NURBS foi encontrado no primeiro, ou seja, a obtenção do perfil evolvental da engrenagem, verificando que a metodologia desenvolvida pode ser utilizada de maneira satisfatória, e que no caso do capacete, uma quantidade maior de pontos garantirá bons resultados com a aplicação desta.

Com a aplicação desta metodologia pretende-se: atender as exigências de medição de peças com as mais variadas formas; atender as especificações de projeto utilizando uma menor quantidade de pontos inspecionados; contribuir para áreas de Inspeção e Engenharia Reversa; contribuir com pesquisas na área de metrologia dimensional com uso de Máquinas de Medição por Coordenadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva, J. B. A & Burdekin, M., "A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs)". Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology. Vol 26. Pag 37 - 48. 2002.
- [2] Silva, E.C.M. & Silva, J.B.A., "Medição de Superfícies de formas livres: Um estudo comparativo com uso de medição com contato e sem contato para fins de uso em inspeção e engenharia reversa". V Congresso Brasileiro de Metrologia, Salvador. 2009.
- [3] Varaday, T., Martin, R.R. & Coxt, J., "Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction". Computer-Aided Design. Elsevier Science Ltd. Vol. 29, No. 4, pp 255-268. Abril, 1997.
- [4] Metris, www.metris.com/catalog, acesso em maio de 2009.
- [5] Minneto, C. F., "Um Estudo sobre Curvas NURBS". Dissertação de Mestrado. UFRGS. 2003.
- [6] Aquino, D.M.G & C, J. C. M., "Malhagem de Superfícies Tridimensionais Utilizando-se de NURBS E B-SPLINES". XII Seminário de Iniciação Científica. UFU. 2003.
- [7] Selimovic, I., "Improved algorithms for the projection of points on NURBS curves and surfaces". Computer Aided Geometric Design. Vol. 23. Pag. 439-445. 2006.
- [8] Hu, S. M. & Wallner, J., "A second order algorithm for orthogonal projection onto curves and surfaces". Computer Aided Geometric Design. Vol. 22, pag. 251-260. 2005.
- [9] SOUSA, A. R., "Importância de Formação Metrológica Avançada na Área de Medição por Coordenadas na Indústria". Metrologia para a competitividade em áreas estratégicas, Salvador, BA. 2008.
- [10] Silva, E.C.M., "Aplicação de NURBS em MMCs, com apalpador touch trigger, para escaneamento de superfícies de formas livres e geometrias complexas". Tese de doutorado. UFPB. Março, 2011.
- [11] Zhang, Paul. "NURBS Toolbox by D.M.Spink". Site <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/82397>. Acesso em 2008.
- [12] Piegl, L. & Tiller, W., "The NURBS Book". Second Edition, Springer-Verlag. 1997.