

APÊNDICE II: CONSIDERAÇÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS E SUAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO E DIGITALIZAÇÃO

Uma MMC ou um BM automatizados, em verdade, é um complexo sistema mecatrônico acionado por controle numérico computadorizado (CNC), que localiza pontos sobre a peça utilizando um sensor localizador. A posição detectada é registrada pela leitura e interpolação a partir de escalas eletro-ópticas digitais. Na Figura II.1 (DONATELLI *et al*, 2005) pode-se observar os principais subsistemas de uma MMC.



Figura II.1: subsistemas de uma MMC.

Pode-se citar os seguintes serviços típicos de uma MMC/BM, realizados em laboratórios e unidades de produção:

- inspeção de lotes de peças provenientes da produção (controle geométrico);
- digitalização para fins de ER;
- medição de peças complexas cuja inspeção utilizando outros métodos é extremamente complicada e demorada;

- calibração de sistemas de medição de comprimento ou ângulo, geralmente de médias ou grandes dimensões: paquímetros, micrômetros, escalas metálicas, etc.;
- calibração de medidas materializadas: blocos-padrão, anéis-padrão, hastes-padrão, calibradores passa não passa, etc.

É importante ressaltar que a calibração de instrumentos ou medidas materializadas em MMCs tem sua viabilidade condicionada a possibilidade de compensação de erros sistemáticos da máquina, além da limitação da incerteza do processo a níveis aceitáveis. Também é comum a utilização de padrões corporificados (barras-padrão, blocos-padrão, anéis-padrão, etc.) em associação com a MMC, empregando-a como um elemento de transferência da medida entre o padrão e o instrumento à calibrar. Isso faz com que a incerteza seja bastante reduzida. Não é comum a utilização de BMs para calibração.

O sensor localizador (Figura II.2: RENISHAW, 1996) é o dispositivo que detecta o ponto sobre determinada região da peça e transfere as suas coordenadas para o computador. Os sensores localizadores mais comuns são do tipo apalpador, tendo, portanto, contato com a peça. Esse contato pode ser ponto a ponto ou contínuo, sendo o último bastante útil para digitalização de superfícies.



Figura II.2: sensor localizador por contato contínuo.

Outro tipo de localizador é do tipo laser (Figura II.3: RENISHAW, 1996), desta feita mais utilizado onde o contato com a peça é desaconselhável. Este localizador sem contato é usado com bastante frequência para a medição de peças com superfície facilmente deformável, como espuma, tecidos ou plásticos, já que a incerteza de medição eleva-se em

função do efeito de retroação da força de medição por contato sobre a peça (SCHOELER & FIDELIS, 1992).



Figura II.3: sensor localizador sem contato a laser.

O sensor por contato (apalpador) tem a vantagem de introduzir menor incerteza de medição ao processo. Todavia, não pode ser empregado em peças com pouca ou nenhuma resistência à força de medição do sensor. Os sensores por contato permanente (contínuo) aumentam a velocidade da digitalização e melhoram o detalhamento da superfície, apesar de introduzirem maior incerteza se comparado ao apalpador. Uma comparação entre sensores típicos de uma MMC pode ser observada no Quadro II.1 (adaptado de RENISHAW, 1996).

Tipo de sensor	Força de medição	Exatidão	Velocidade de medição
Apalpador ponto a ponto (TP200)	2 g	$\pm 2,5 \mu\text{m}$	8 mm/s
Apalpador contínuo (TP600)	2 g	$\pm 1,5 \mu\text{m}$	20 mm/s
Sem contato laser (OTP 6M)	nula	$\pm 25 \mu\text{m}$	50 mm/s

Quadro II.1: comparação entre desempenho de sensores típicos da MMC.

A programação das MMC/BM é relativamente simples e, nos casos onde não existem modelos virtuais 3D da peça, se resume à metodologia de aprendizagem, também chamada *on line*. A peça inicialmente é fixada à mesa e determinado novo sistema de eixos coordenados

baseado no alinhamento do item. A seguir são realizados manualmente (com o uso de um *joystick* ou por movimentação do cabeçote com a mão) os movimentos que permitirão a identificação de elementos geométricos e dos parâmetros necessários às etapas de digitalização. Por fim, o equipamento executa o programa em modo automático, refinando os dados e gerando representações gráficas no seu CAD.

Na programação por aprendizagem, o software de medição grava as movimentações e apalpações que o operador conduz, repetindo-as a seguir (MAAS, 2001). A alternativa à programação por aprendizagem seria a do tipo *off line*. Na programação *off line* o equipamento é pouco utilizado, sendo boa parte do esforço feito com o apoio da interface gráfica do software da MMC/BM. Em tal situação, precisa-se de um modelo 3D da peça, gerado a partir do CAD, sobre o qual a programação será realizada, “tocando” sobre a peça virtual e identificando os elementos a medir diretamente no computador, para posterior execução do programa. Elementos geométricos comuns, como circunferências, cilindros, retas, planos, cones, esferas, etc. são automaticamente identificados pelo sistema. Curvas e superfícies podem ser digitalizadas pela coleta sistematizada de um certo número de pontos, formando uma nuvem de pontos, que posteriormente será processada. Os dados coletados podem ser transferidos para um CAD comercial por intermédio de um arquivo gráfico padrão, que será posteriormente tratado neste texto.

Portanto, somente a programação *on line* aplica-se à digitalização para fins de ER, na medida em que os componentes do sistema podem ser digitalizados sem a necessidade de um modelo 3D gerado em CAD. Evidentemente, na digitalização de um produto matriz não há um modelo 3D disponível.

II.1. PRINCIPAIS FONTES DE ERROS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A MMC é um sistema complexo, composto por diversos módulos e um grande número de elementos móveis, que operando de forma integrada provocam erros de medição. Esses erros são determinados pela diferença entre o sistema coordenado efetivamente indicado pela máquina em relação ao sistema coordenado ideal. Segundo Noronha (1994) “Os erros no movimento da MMC provocam erros de trajetória de um ponto no espaço. A trajetória real é resultante da operação da máquina e afetada por todas as fontes de erros”. A Figura II.4 (NORONHA, 1994) ilustra bem esse efeito.

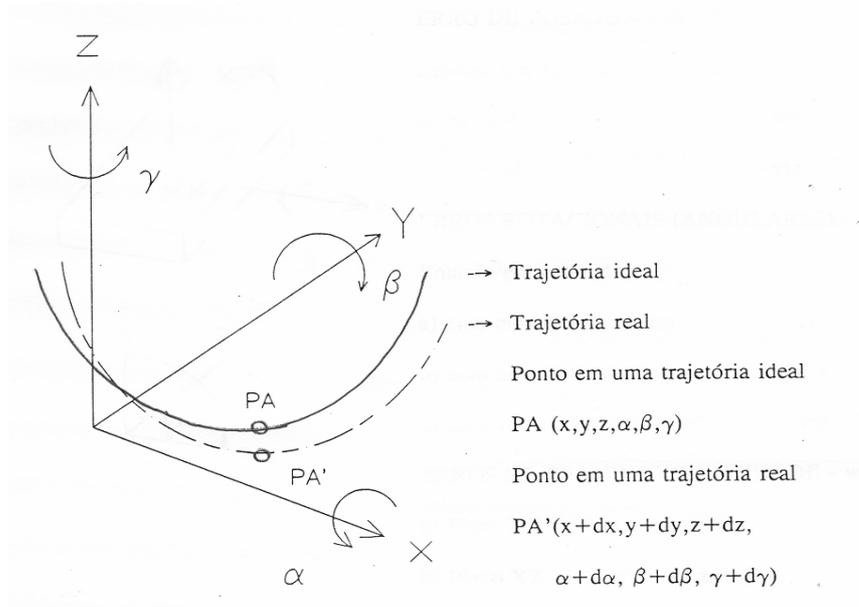


Figura II.4: erros de movimento na MMC.

Arencibia (1999) ressalta ainda que os erros geométricos são predominantes na MMC e por isso recebem um tratamento especial.

Os erros geométricos da MMC podem ser divididos em quatro categorias, conforme ilustrado na Figura II.5 (NORONHA, 1994): posicionamento na direção dos movimentos, retilidade das guias, ortogonalidade entre as guias e rotacionais (inclinação, guinamento e rolamento) na movimentação de cada eixo, à qual se somam as fontes de erro devidas à peça a ser medida: “(...) deformações causadas pelo peso próprio, forma geométrica e dureza do material da peça” (NORONHA, 1994).

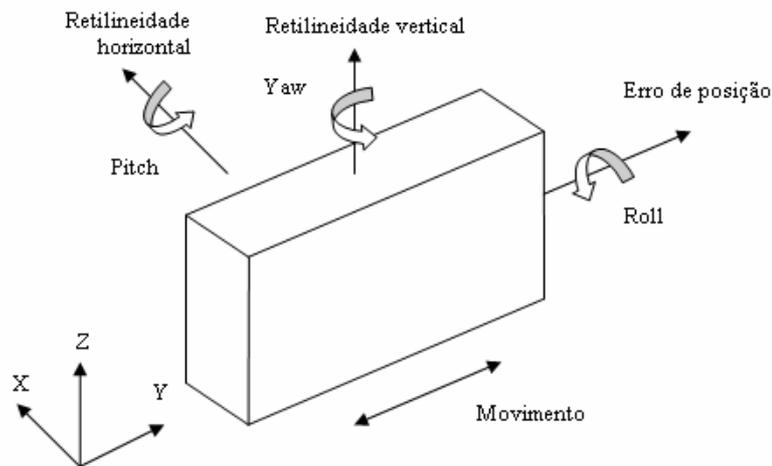


Figura II.5: erros geométricos na MMC.

Focalizando nas fontes de erros provenientes da própria MMC, Noronha (1994) inicia a sua análise pelo elemento localizador do tipo apalpador. Para ele, os erros do sensor dependem de dois fatores:

- da ligação entre o cabeçote apalpador e o módulo de medição de deslocamento;
- da estratégia de medição escolhida.

As principais causas de erros para o cabeçote apalpador são as seguintes:

Causas gerais:

- flexão da haste do sensor em função da força de medição e da direção do movimento;
- achatamento do sensor em função da força de medição;
- erros de forma do sensor (esfericidade).

Causas na medição dinâmica:

- recuo do sensor no contato com a peça, em função do impacto e das propriedades elásticas dos materiais;
- retardo na aquisição das coordenadas, após ter sido atingido o ponto de referência do apalpador para a leitura, além de características intrínsecas do sistema (hardware e software); o erro resultante depende também da velocidade de apalpação.

Uma outra importante causa de erros na MMC é a sua estrutura mecânica. Ainda segundo Noronha (1994) as seguintes causas fazem com que as coordenadas indicadas não coincidam com as coordenadas verdadeiras do ponto apalpado:

- erro de planicidade das guias;
- deficiência de ajuste na montagem de módulos da MMC (erros de perpendicularidade na montagem das guias, por exemplo);
- deformações elásticas de partes e mancais da MMC nos deslocamentos dos eixos da MMC;
- variações de origem térmica de partes da MMC;
- folgas e desgastes.

Os sistemas de medição de deslocamentos utilizados nas MMCs modernas são as escalas eletro-ópticas incrementais, que podem ser de dois tipos:

- reflexiva: um feixe luminoso incide sobre uma escala polida com gravações de traços opacos, refletindo sobre ela em direção a um fotosensor; com o movimento da escala, este fotodetector libera um sinal elétrico;
- transparente: enquanto se desloca, uma escala de vidro gravada com traços escuros interrompe do modo alternado um feixe luminoso entre a fonte e um fotodetector (Figura II.6: NORONHA, 1994).

Em ambos os casos, quando a escala é deslocada, o fotodetector fornece um sinal senoidal cujo período corresponde ao espaçamento entre os traços da escala, e que, após um tratamento (digitalização), é transferido para um contador. Com o número de pulsos contados e o espaçamento entre franjas, é possível calcular o deslocamento da escala (NORONHA, 1994).

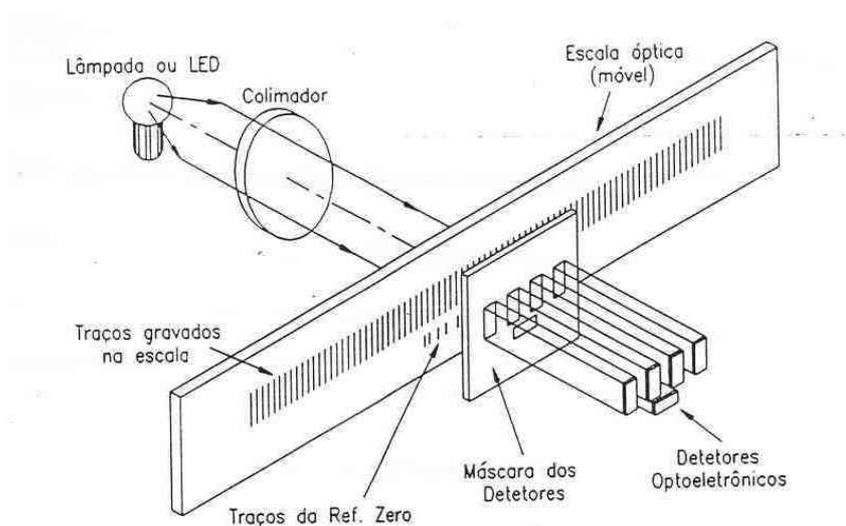


Figura II.6: escala eletro-óptica de deslocamento.

Segundo Noronha (1994) a principal causa de erro das escalas eletro-ópticas está no espaçamento entre traços, que pode apresentar um desvio em relação ao espaçamento padrão, mas existem outras causas de erros:

- erros de interpolação entre franjas;
- ajuste defeituoso das escalas;
- aquecimento local da escala por meio do conjunto optoeletrônico.

Uma outra fonte de erro, citada por Luca (1992) e Arencibia (1999), é a transgressão ao princípio de Abbé. O projeto das MMC não obedece o princípio de Abbé. Arencibia diz: “A linha de referência de um sistema de medição deve ser coincidente com a linha de

medição da peça”. Portanto o erro de Abbé ocorre quando, na medição do deslocamento, o eixo de medição não coincide com a trajetória da ferramenta (apalpador), tornando o deslocamento real da ponta dependente dos eventuais movimentos angulares do braço assim criado (LUCA, 1992).

As condições ambientais também merecem atenção especial, já que a complexidade da MMC acaba tornando-a mais vulnerável às variações de temperatura (NORONHA, 1994).

Segundo Arencibia (1999) é possível fazer uma compensação dos efeitos térmicos por meio da correção dos erros de medição. No entanto, os resultados próximos à temperatura padrão de 20 °C sempre apresentarão menores incertezas no resultado.

As variações uniformes de temperatura se manifestam como variações lineares de comprimento no módulo de medição de deslocamento. Ao contrário, as variações não uniformes trazem como consequência o surgimento de gradientes de temperatura na estrutura mecânica da MMC. De forma similar ao efeito do par bimetálico, os gradientes causam deformações das guias, assim como variações no alinhamento geral da máquina (NORONHA, 1994).

O software das MMCs possui duas finalidades principais: a) realizar cálculos a partir das medições efetuadas, gerando um resultado numérico ou o registro de uma entidade geométrica padronizada; b) controlar os movimentos da máquina por meio de comandos do operador.

No final da década de 1980, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) criou um programa de avaliação dos algoritmos (ATEP). O programa se tornou um serviço regular do instituto para a avaliação de softwares utilizados em MMCs. Como não havia padrões ou métodos específicos para a estimativa da incerteza de medição dos parâmetros gerados por computador, foi criada uma forma de comparar os resultados da coleta e processamento de um conjunto de pontos sobre uma curva ou superfície com o elemento geométrico estabelecido matematicamente. Com a cooperação da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) criou-se uma norma estadunidense para o teste da MMC, a ASME B89.4.10. Também a norma ISO 10.360-6:2001 foi criada com os mesmos objetivos, mas ambas acabaram ganhando mais importância na avaliação do desempenho dos equipamentos quando em uso. O NIST mantém e desenvolve o ATEP, testando softwares para os fabricantes dos equipamentos (DIAZ & HOPP, 1993).

Noronha (1994), relata os estudos realizados pelo *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (PTB) iniciados na década de 1980 que demonstraram a importância da

avaliação sistemática dos softwares utilizados em sistemas de medição. Os estudos foram conduzidos realizando-se ensaios nos softwares provenientes de fabricantes das MMCs de algumas instituições independentes. Foram simulados elementos geométricos básicos, tais como reta, plano, circunferência, cilindro e cone. Os resultados foram comparados com aqueles resultantes de um software desenvolvido pelo próprio PTB (Figura II.7: NORONHA, 1994). Os graus de concordância correspondem às seguintes diferenças com relação aos valores de referência:

- grau 1: até 0,1 μm ,
- grau 2: até 0,5 μm ,
- grau 3: até 2 μm ,
- grau 4: mais de 2 μm .

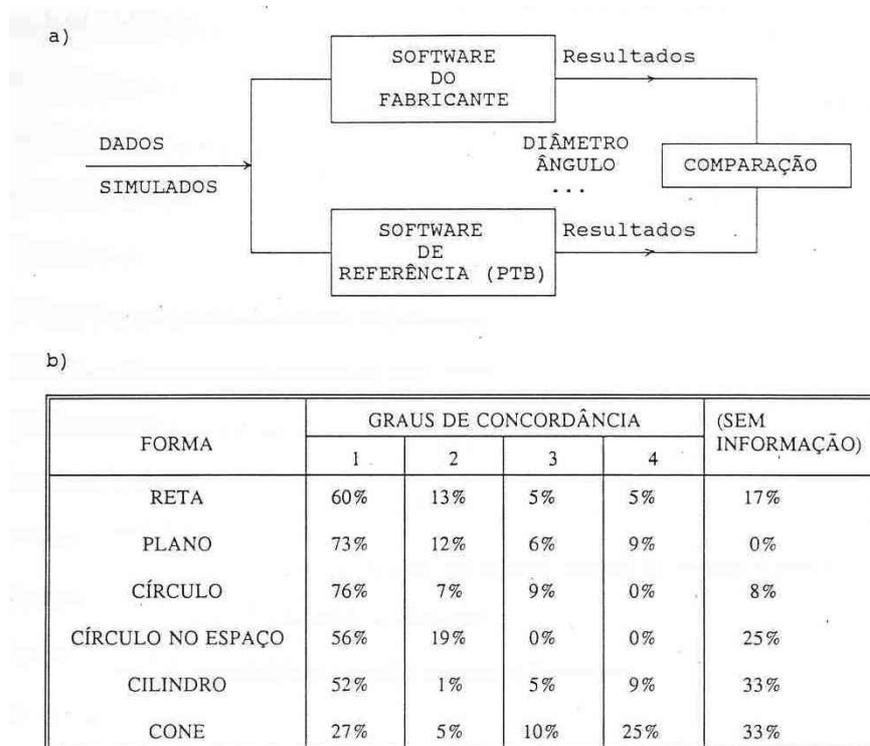


Figura II.7: ensaio de software com dados simulados no PTB.

Vê-se assim que os erros de medição devidos aos softwares podem ser representativos na medida em que outras fontes são minimizadas.

Grande parte das fontes de incerteza de medição citadas anteriormente já possuem alguma forma de compensação (parcial ou total) ou estimativa indireta. As fontes devidas aos erros geométricos e imperfeições da construção da MMC são avaliadas e corrigidas utilizando-se compensações matemáticas no software da máquina (ARENCEBIA, 1999).

Também as alterações geométricas e dimensionais na estrutura da MMC e na peça devidas às variações de temperatura do ambiente podem ser compensadas em alguns modelos mais recentes de MMC (NORONHA, 1994).

Feng & Pandey (2002) alertam ainda que em grande parte das MMCs hoje em uso a compensação automática do diâmetro da esfera de contato não é ainda efetiva na digitalização de superfícies. A indústria ainda não utiliza o sensor adequado e o software específico para tal tarefa, já que os custos são elevadíssimos.

As fontes de incertezas residuais e devidas a fatores externos e aleatórios, são avaliadas mediante a calibração periódica da MMC. A calibração da MMC é realizada mediante a utilização de padrões corporificados (blocos-padrão de comprimento, barras-padrão ou padrão escalonado) ou ainda interferômetros a laser. As normas técnicas JIS B 7440 e VDI/VDE 2617, entre outras, apresentam as diretrizes e procedimentos necessários à avaliação dos erros combinados da máquina e cálculo das incertezas.

APÊNDICE III: EXTRATO DE UM PROGRAMA DE MEDIÇÃO PARA DIGITALIZAÇÃO DE CURVAS EM MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Inicialmente, estão definidos os parâmetros básicos de movimentação da MMC e do sensor de medição (SP-600).

INICIALIZAR=ALINHAMENTO/INÍCIO;RECUPERAR;; LIST= SIM

ALINHAMENTO/FIM

MODO/MANUAL

PRÉ-TOQUE/ 5

RETRAIR/ 5

VERIF/ 10;1

VELOCMOVIMENTO/ 50

FLY/LIG

SENSOROPCION/FORÇAMÁX=0.3; FORÇAINF=0.06; FORÇASUP=0.18;

FORÇAACIONADOR=0.2;

PRECISÃOSENSOR=0.1; PRECISÃOPOS=0.1; NÚMDADOSRETORNO=7;

VELOCRETORNO=0.8333; DENSPONTOVARRED=2;

ACELERAÇÃOVARRED=10; FORÇADESLOCVARRED=0.12;

MODOTOQUES=DFL; TOQUESPRECISÃOMANUAL=NÃO

CARREGARSENSOR/SP600

PONTA/T1A0B0; HASTEIJK=0; 0; 1; ÂNGULO=0

FORMATO/TEXT;OPCIONAIS;CABEÇALHOS;SÍMBOLOS; ;MED; ; ; ;

PL1=ELEM/PLANO,CARTESIANAS

A seguir são definidos elementos geométricos para alinhamento da peça sobre a mesa da MMC. Assim, é possível definir a posição correta da peça no espaço 3D.

TEÓR/219.8273;-715.8243;-782.7751;-0.0000732;-0.0002323;1

REAL/284.9446;-613.5447;-782.7787;-0.0000244;-0.0002322;1

MED/PLANO;3

TOQUE/BÁSICO;205.5304;-759.0756;-782.7862;-0.0000732;-0.0002323;1;269.3331;-
664.2664;-782.7908

TOQUE/BÁSICO;255.1203;-744.262;-782.7791;-0.0000732;-0.0002323;1;320.2595;-
646.2693;-782.7854

TOQUE/BÁSICO;198.8312;-644.1354;-782.76;-0.0000732;-0.0002323;1;265.2414;-
530.0984;-782.7598

FIMMED/

LN1=ELEM/LINHA,CARTESIANAS;NÃODELIM

TEÓR/194.8989;-635.7855;-783.4292;0.0332105;-0.9994484;0

REAL/260.5233;-530.0952;-784.8094;0.027092;-0.9996329;0

MED/LINHA;2;PLANOTRABALHO

TOQUE/BÁSICO;194.8989;-635.7855;-783.4292;-0.9994484;-0.0332105;0;260.5233;-
530.0952;-784.8093

TOQUE/BÁSICO;198.6187;-747.7307;-784.8008;-0.9994484;-0.0332105;0;264.207;-
666.0165;-783.7894

FIMMED/

CIR1=ELEM/CÍRCULO,CARTESIANAS;INT;MÍN_QUADRADOS

TEÓR/210.6479;-751.2008;-784.8967;0;0;1;8.3339

REAL/275.8147;-654.9317;-785.3593;0;0;1;8.3335

MED/CÍRCULO;4;PLANOTRABALHO

TOQUE/BÁSICO;210.7108;-747.0574;-784.8877;-0.0151624;-0.999885;0;275.7895;-
650.7863;-785.3408

MOVIMENTO/CIRCULAR

TOQUE/BÁSICO;214.7731;-750.4773;-784.9014;-0.9849685;-0.1727343;0;279.9974;-
654.7546;-785.3686

MOVIMENTO/CIRCULAR

TOQUE/BÁSICO;210.6073;-755.3488;-784.8959;0.0098;0.999952;0;275.7994;-659.0801;-
785.3636

MOVIMENTO/CIRCULAR

TOQUE/BÁSICO;206.4627;-751.0583;-784.902;0.9994212;-0.0340172;0;271.6517;-
654.487;-785.3642

FIMMED/

ALINH0=ALINHAMENTO/INÍCIO;RECUPERAR:INICIALIZAR; LIST= SIM

ALINHAMENTO/NÍVEL;ZMAIS;PL1

ALINHAMENTO/GIRAR;YMENOS;PARA;LN1;AOREDOR;ZMAIS

ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOX;CIR1

ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOY;CIR1

ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOZ;PL1

ALINHAMENTO/FIM

Após a localização da peça sobre a mesa da MMC, inicia-se a fase automática do programa (etapa em CNC). A partir deste ponto, o programa será executado automaticamente e se inicia com a execução do alinhamento, da mesma forma que feito manualmente.

COMENT/OPER;Inicio CNC

MODO/DCC

MOVIMENTO/PONTO;12.4453;55.7189;79.5779

MOVIMENTO/PONTO;-2.7676;-7.0138;26.3053

PL2=ELEM/PLANO,CARTESIANAS

TEÓR/10.4031;39.4255;0.0005;0.0000912;-0.000004;1

REAL/10.4007;39.4244;0.0183;-0.0000058;0.0000648;1

MED/PLANO;3

TOQUE/BÁSICO;-5.8318;-11.196;0.0017;0.0000912;-0.000004;1;-5.833;-11.1905;0.0215

TOQUE/BÁSICO;44.8885;6.8318;-0.0028;0.0000912;-0.000004;1;44.8767;6.828;0.0206

MOVIMENTO/PONTO;44.9547;6.8098;37.0313

MOVIMENTO/PONTO;-1.0887;123.5022;42.9995

TOQUE/BÁSICO;-7.8473;122.6406;0.0024;0.0000912;-0.000004;1;-

7.8415;122.6357;0.0128

FIMMED/

MOVIMENTO/PONTO;-21.4835;123.0797;13.078

LN2=ELEM/LINHA,CARTESIANAS;NÃO DELIM

TEÓR/-11.9092;122.7893;-1.7695;0.0000442;-1;0

REAL/-11.9105;122.7754;-1.77;0.0000096;-1;0

MED/LINHA;2;PLANOTRABALHO

TOQUE/BÁSICO;-11.9092;122.7893;-1.7695;-1;-0.0000442;0;-11.9105;122.7754;-1.77

MOVIMENTO/PONTO;-33.2569;123.4682;-1.7686

MOVIMENTO/PONTO;-37.3644;-0.2424;-1.7406

TOQUE/BÁSICO;-11.9035;-5.3026;-3.8724;-1;-0.0000442;0;-11.9093;-5.3073;-3.8734

FIMMED/

MOVIMENTO/PONTO;-18.4909;-5.1614;12.3714

MOVIMENTO/PONTO;0.3306;-0.4054;7.2243
 CIR2=ELEM/CÍRCULO,CARTESIANAS;INT;MÍN_QUADRADOS
 TEÓR/0.0019;-0.0007;-2.2013;0;0;1;8.3476
 REAL/0.0006;-0.0136;-2.2033;0;0;1;8.3424
 MED/CÍRCULO;4;PLANOTRABALHO
 TOQUE/BÁSICO;4.1537;-0.6647;-2.207;-0.9874481;0.1579439;0;4.1495;-0.6752;-2.2072
 MOVIMENTO/CIRCULAR
 TOQUE/BÁSICO;-0.1266;-4.1391;-2.2029;0.0310306;0.9995184;0;-0.142;-4.1497;-2.2041
 MOVIMENTO/CIRCULAR
 TOQUE/BÁSICO;-4.1698;-0.5034;-2.2043;0.9928171;0.119642;0;-4.1714;-0.4887;-2.2088
 MOVIMENTO/CIRCULAR
 TOQUE/BÁSICO;0.5884;4.106;-2.1911;-0.1413982;-0.9899528;0;0.5482;4.0962;-2.1931
 FIMMED/
 MOVIMENTO/PONTO;0.5064;0.5776;11.1332
 MOVIMENTO/PONTO;0.5088;0.5855;41.139
 ALINH1=ALINHAMENTO/INÍCIO;RECUPERAR:ALINH0; LIST= SIM
 ALINHAMENTO/NÍVEL;ZMAIS;PL2
 ALINHAMENTO/GIRAR;YMENOS;PARA;LN2;AOREDOR;ZMAIS
 ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOX;CIR2
 ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOY;CIR2
 ALINHAMENTO/TRANSL;EIXOZ;PL2
 ALINHAMENTO/FIM

Nas próximas linhas do programa a digitalização propriamente dita será executada. Para tanto, foram definidos quatro pontos que limitam a zona que se deseja digitalizar. Os pontos selecionados foram os mesmos utilizados no alinhamento CNC (linhas anteriores). A MMC coletou 201 pontos na superfície digitalizada. Abaixo encontram-se os primeiros cinco pontos coletados.

COMENT/OPER;Inicio digitalizacao
 MOVIMENTO/PONTO;19.3902;25.1728;42.7561
 VELOCMOVIMENTO/ 20
 SENSOROPCION/FORÇAMÁX=0.3; FORÇAINF=0.06; FORÇASUP=0.18;
 FORÇAACIONADOR=0.2;
 PRECISÃOSENSOR=0.1; PRECISÃOPOSS=0.1; NÚMDADOSRETORNO=7;

VELOCRETORNO=0.8333; DENSPONTOVARRED=0.5;
 ACELERAÇÃOVARRED=10; FORÇADESLOCVARRED=0.12;
 MODOTOQUES=DFL; TOQUESPRECISÃO MANUAL=NÃO
 SENSOROPCION/FORÇAMÁX=0.3; FORÇAINF=0.06; FORÇASUP=0.18;
 FORÇAACIONADOR=0.2;
 PRECISÃOSENSOR=0.1; PRECISÃOPOS=0.1; NÚMDADOSRETORNO=7;
 VELOCRETORNO=0.8333; DENSPONTOVARRED=1;
 ACELERAÇÃOVARRED=10; FORÇADESLOCVARRED=0.12;
 MODOTOQUES=DFL; TOQUESPRECISÃO MANUAL=NÃO
 PT1=AUTO/PONTO VETORIAL; MOSTRAR TOQUES=NÃO; SHOWALLPARAMS=SIM
 TEÓR/17.4998;23.7012;23.8752;-0.1926365;-0.1282372;0.9728548
 REAL/17.4998;23.7012;23.8752;-0.1926365;-0.1282372;0.9728548
 DESTINO/17.4998;23.7012;23.8752;-0.1926365;-0.1282372;0.9728548
 ESPESS_TEÓR = 0; CARTESIANAS; SALTARTÉO = SIM ;\$
 MOVIMENTO AUTO = NÃO; DISTÂNCIA = 0
 PT2=AUTO/PONTO VETORIAL; MOSTRAR TOQUES=NÃO; SHOWALLPARAMS=SIM
 TEÓR/16.5223;23.704;23.6914;-0.204479;-0.1291265;0.9703168
 REAL/16.5223;23.704;23.6914;-0.204479;-0.1291265;0.9703168
 DESTINO/16.5223;23.704;23.6914;-0.204479;-0.1291265;0.9703168
 ESPESS_TEÓR = 0; CARTESIANAS; SALTARTÉO = SIM ;\$
 MOVIMENTO AUTO = NÃO; DISTÂNCIA = 0
 PT3=AUTO/PONTO VETORIAL; MOSTRAR TOQUES=NÃO; SHOWALLPARAMS=SIM
 TEÓR/15.5889;23.7074;23.4749;-0.2460049;-0.1273796;0.9608621
 REAL/15.5889;23.7074;23.4749;-0.2460049;-0.1273796;0.9608621
 DESTINO/15.5889;23.7074;23.4749;-0.2460049;-0.1273796;0.9608621
 ESPESS_TEÓR = 0; CARTESIANAS; SALTARTÉO = SIM ;\$
 MOVIMENTO AUTO = NÃO; DISTÂNCIA = 0
 PT4=AUTO/PONTO VETORIAL; MOSTRAR TOQUES=NÃO; SHOWALLPARAMS=SIM
 TEÓR/14.6634;23.7236;23.2189;-0.2896827;-0.125745;0.9488267
 REAL/14.6634;23.7236;23.2189;-0.2896827;-0.125745;0.9488267
 DESTINO/14.6634;23.7236;23.2189;-0.2896827;-0.125745;0.9488267
 ESPESS_TEÓR = 0; CARTESIANAS; SALTARTÉO = SIM ;\$
 MOVIMENTO AUTO = NÃO; DISTÂNCIA = 0

PT5=AUTO/PONTO VETORIAL; MOSTRAR TOQUES=NÃO; SHOW ALL PARAMS=SIM
TEÓR/13.7483;23.7423;22.9189;-0.331694;-0.1254085;0.9350143
REAL/13.7483;23.7423;22.9189;-0.331694;-0.1254085;0.9350143
DESTINO/13.7483;23.7423;22.9189;-0.331694;-0.1254085;0.9350143
ESPESS_TEÓR = 0; CARTESIANAS; SALTAR TÉO = SIM ;\$
MOVIMENTO AUTO = NÃO; DISTÂNCIA = 0

APÊNDICE IV: CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PADRÕES DE TRANSFERÊNCIA DE INFORMAÇÕES DE PROJETO EM MEIO DIGITAL

Uma comparação entre o IGES, VDA-FS e STEP é apresentada por KERN (1997), Quadro IV.1.

COMPARAÇÃO	IGES	VDA/FS	STEP
Escopo	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos estruturais • Modelos de superfície • Modelos sólidos • Modelos para análise de elementos finitos • Desenhos técnicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de superfície 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de produtos para todo o ciclo de vida do produto
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Coleção de entidades • Formato de arquivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Coleção de entidades • Formato de arquivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação formal de um modelo de produto • Definição formal de sintaxe de arquivo

Quadro IV.1: comparação IGES/VDA/STEP.

Enquanto o VDA-FS apenas trabalha com modelos de superfície, o IGES apresenta maior flexibilidade, incluindo modelos para análises de engenharia (*Computer Aided Engineering – CAE*). Já a proposta do STEP abrange todos os recursos que possam representar toda o ciclo de vida do produto, incluindo as definições de materiais, testes laboratoriais, tolerâncias e processos de fabricação (SCHILD *et al*, 1995).

O padrão STEP foi disseminado a partir dos esforços da *International Organization for Standardization (ISO)*, que criou a série de normas ISO 10.303, cada parte com um objetivo específico, tratando de temas como: princípios fundamentais do padrão, conceitos e terminologia, representação geométrica e topológica do produto, fundamentos da representação do produto, representação de materiais, apresentação visual, manual de referência da linguagem padronizada, representação dos dados do produto, métodos de implementação (incluindo utilização da linguagem C++), padronização da interface de acesso dos dados (inclusive com dispositivos para Internet), requisitos para testes de laboratório, métodos de testes teóricos, tolerâncias dimensionais e geométricas, representação matemática, qualidade superficial, carregamento, análise por elementos finitos, cinemática, modelagem de

sólidos, representação de desenho mecânico e muitos outros tópicos, totalizando quase 1700 documentos.

Toda especificação em STEP é escrita em EXPRESS (ISO 10303-11:1994), a linguagem de descrição de dados do STEP, ou em inglês puro e simples. A EXPRESS foi concebida para a utilização na modelagem da informação, permitindo a representação não apenas de dados, mas restrições, regras, funções e procedimentos.

As últimas atualizações do padrão STEP datam de 2005 (ISO, 2006), com alterações na linguagem EXPRESS, permitindo melhor relacionamento entre os dados do produto, diminuindo a perda ou troca de informações. Uma outra alteração da mesma época foi a melhoria do mapeamento de dados dentro dos *Object Management Groups* (OMG), para proporcionar a geração de arquivos no formato XML (*Meta-data Interchange Standard*).

As últimas atualizações no padrão IGES datam de 1996, que configuram a versão 5.3 do conversor, cuja norma tem atualmente a codificação ANSI/US PRO/IPO 100-1996.

APÊNDICE V: CONSIDERAÇÕES SOBRE MODELAGEM DE CURVAS E SUPERFÍCIES EM CAD

Bezier propôs um novo tipo de equação de curva para utilização no sistema de modelagem de superfícies da companhia Renault na década de 1960. Essa curva, chamada de Curva de Bezier é definida pelos vértices de um polígono que encerra a curva resultante. Em outras palavras, o efeito dos vértices é ponderado pelas correspondentes funções de combinação (LEE, 1999). Ainda segundo o autor, ele selecionou as funções combinadas de forma que a curva tivesse as seguintes propriedades:

- a) A curva passa pelo primeiro e último vértices do polígono.
- b) O vetor tangente no ponto de início da curva tem a mesma direção do primeiro segmento do polígono. De forma semelhante, o último segmento do polígono dá a inclinação do vetor tangente no ponto final (Figura V.1, adaptada de LEE, 1999).
- c) A n ésima derivada da curva no ponto inicial ou final é determinada pelo $(n+1)$ vértice inicial ou final do polígono.
- d) A mesma curva é gerada se quando a ordem dos vértices do polígono é trocada.

Com as considerações acima, Bezier escolheu a função polinomial de Bernstein como função de combinação (LEE, 1999):

$$B_{i,n}(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i}$$

onde

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

Quando a função de combinação é aplicada aos vértices, a equação da Curva de Bezier é obtida:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} P_i$$

onde P_i é a posição do vetor do i ésimo vértice. Esses vértices são chamados de vértices de controle e o polígono obtido pela conexão dos vértices é o polígono de controle, já que juntos eles controlam a forma da Curva de Bezier. O grau da Curva de Bezier é determinado pelo

número de pontos de controle. Na Figura V.1 pode-se observar exemplos de Curvas de Bezier com diferentes graus para diferentes números de pontos de controle.

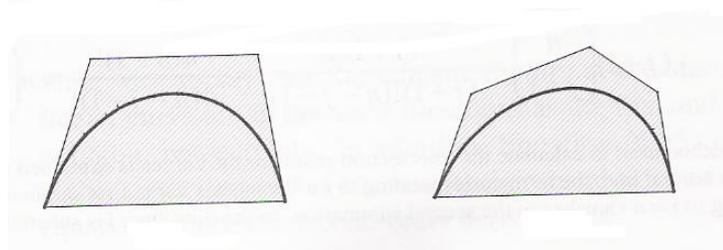


Figura V.1: Curvas de Bezier com diferentes graus.

Retornando ao fato de que o grau da Curva de Bezier é determinado pelo número de pontos de controle, surgem dois problemas: primeiramente, quando uma curva de complicada forma é representada por Bezier, muitos pontos de controle precisam ser utilizados, o que resulta em um grau muito elevado. Isso provoca uma carga elevada de esforço computacional. Porque então não representar a mesma curva por várias Curvas de Bezier de grau menor? Por fim, modificar a forma da curva localmente é difícil, pois mesmo alterando certos pontos de controle, outras porções da curva acabam sendo afetadas. Por outro lado, a propriedade de alterar certas porções da curva sem afetar outros locais é desejável na modelagem em CAD (LEE, 1999).

As desvantagens das curvas de Bezier descritas acima são causadas pela função de combinação. Cox (1972) e De Boor (1972) sugeriram uma alternativa à função proposta por Bezier. A curva resultante dessa nova função é chamada *B-spline* e é expressa da seguinte forma:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad (t_i \leq u \leq t_{n+1})$$

onde

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k} - t_i} + \frac{(t_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k} - t_{i+1}}$$

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & t_i \leq u \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases}$$

E t_i são os valores dos nós, ou o parâmetro que limita os intervalos finitos onde a função tem valor diferente de zero.

O valor do grau da *B-spline* não mais depende do número de pontos de controle e é representado por k .

Para introduzir o conceito de *nonuniform rational B spline curve*, ou simplesmente *NURBS*, estão indicados abaixo os dois tipos básicos de nós.

Os nós periódicos são determinados a partir de:

$$t_i = i - k \quad (0 \leq i \leq n + k).$$

Já nós não periódicos:

$$t_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq i < k \\ i - k + 1 & k \leq i \leq n \\ n - k + 2 & n < i \leq n + k \end{cases}$$

A principal diferença entre os dois tipos de nós é que o primeiro e o último nó não periódico são duplicados k vezes. Esses múltiplos nós fazem com que a *nonperiodic B-spline curve* passe pelo primeiro e último ponto de controle como uma Curva de Bezier. Entretanto, numa curva periódica, o primeiro e último ponto fazem a mesma contribuição para a forma da curva que os outros pontos de controle sem que a curva passe por eles. A *nonperiodic B-spline curve* é mais popular nos sistemas de CAD, já que a maioria dos projetistas prefere curvas que passam pelos pontos inicial e final (LEE, 1999).

As equações acima revelam que o espaço entre nós é sempre uniforme. Esses nós são chamados *uniform knots* e a curva assim contruída é uma *uniform B spline curve*. Quando se modifica a forma da curva, sempre se adicionam ou extraem nós, produzindo-se espaços não uniforme entre eles. Nesse caso tem-se uma *nonuniform B-spline curve*.

A *NURBS* nada mais é que uma *nonuniform B-spline curve* onde se utilizam as mesmas funções de combinação, derivadas de nós não uniformes. Entretanto, os pontos de controle são representados na seguinte forma $(x_i \cdot h_i, y_i \cdot h_i, z_i \cdot h_i, h_i)$, utilizando as coordenadas homogêneas h_i em vez de (x_i, y_i, z_i) . Essas quatro coordenadas são então utilizadas pela função de combinação. Dessa forma, as coordenadas de um ponto em uma *NURBS* no espaço homogêneo $(x \cdot h, y \cdot h, z \cdot h, h)$ é obtida de:

$$x \cdot h = \sum_{i=0}^n (h_i \cdot x_i) N_{i,k}(u),$$

$$y \cdot h = \sum_{i=0}^n (h_i \cdot y_i) N_{i,k}(u),$$

$$z \cdot h = \sum_{i=0}^n (h_i \cdot z_i) N_{i,k}(u) \text{ e}$$

$$h = \sum_{i=0}^n h_i N_{i,k}(u).$$

As coordenadas de x , y e z podem ser obtidas dividindo $x.h$, $y.h$ e $z.h$ por h . Então, a curva NURBS é dada por:

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n h_i P_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n h_i N_{i,k}(u)}$$

e passa pelos pontos inicial e final.

Pode-se estender a definição de uma curva a partir de um polígono de controle para uma superfície estabelecida por um poliedro de controle. Uma superfície definida dessa forma é descrita como:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad (0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1)$$

onde P_{ij} são os pontos de controle nos vértices do poliedro de controle, como ilustrado na Figura V.2 (LEE, 1999).

Como feito para o caso da Superfície de Bezier, o mesmo se aplica à Superfície *B-spline*, a partir da equação da Curva *B-spline*:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad (s_{k-1} \leq u \leq s_{n+1}, t_{l-1} \leq v \leq t_{m+1})$$

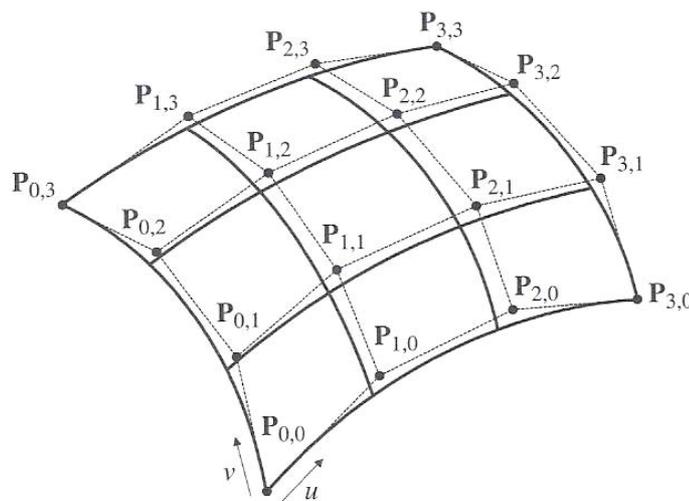


Figura V.2: a superfície de Bezier e seu poliedro de controle.

onde P_{ij} são os pontos de controle localizados nos vértices do poliedro de controle e $N_{i,k}(u)$ e $N_{j,l}(v)$ são as funções de combinação utilizadas nas Curvas *B-splines*. Essas funções são definidas pelos valores dos nós s_0, s_1, \dots, s_{n+k} e t_0, t_1, \dots, t_{l+m} respectivamente. A faixa de parâmetros $s_{k-1} \leq u \leq s_{n+1}, t_{l-1} \leq v \leq t_{m+1}$ é utilizada pois as funções de combinação $N_{i,k}(u)$ e $N_{j,l}(v)$ são definidas apenas nesses intervalos (LEE, 1999).

Assim como feito para o caso das curvas *NURBS* com a introdução das coordenadas homogêneas para os pontos de controle, pode-se fazer o mesmo para a equação da Superfície *NURBS* a partir da Superfície *B-Spline*, resultando:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m h_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m h_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (s_{k-1} \leq u \leq s_{n+1}, t_{l-1} \leq v \leq t_{m+1})$$

Onde P_{ij} são as coordenadas x, y e z e h_{ij} são as coordenadas homogêneas dos pontos de controle. Pode-se observar que os valores dos nós são os mesmos para o caso da Superfície *B-spline*. A equação acima torna-se uma Superfície *B-spline* quando h_{ij} é igual a 1.

Uma característica importante da Superfície *NURBS* é que ela pode representar poliedros regulares, como cilindros, cones, esferas, parabolóides e hiperbolóides (LEE, 1999). Esses elementos geométricos também são chamados de quadráticos, pois possuem grau 2 nos parâmetros u e v .

V.1. INTERPOLAÇÃO DE UMA CURVA

A curva *B-spline* será derivada para passar nos pontos Q_0, Q_1, \dots, Q_n . Serão determinados os valores de ordem, o número dos pontos de controle (incluindo as suas coordenadas) e os valores dos nós da curva de interpolação *B-spline*. Pode-se fazer qualquer curva *B-spline* definida por $(n + 1)$ ou mais pontos de controle passar por $(n + 1)$ pontos (ex. pontos disponibilizados por digitalização), já que a curva deve ter $(n + 1)$ ou mais graus de liberdade. A curva *B-spline* com mais de $(n + 1)$ pontos de controle pode dar ao projetista mais liberdade para manipular as formas da curva. Para simplificar, será apresentado abaixo o método descrito por Lee (1999) para derivar a curva *B-spline* com $(n + 1)$ pontos de controle.

Primeiramente, a ordem da curva *B-spline* deve ser definida. É uma prática comum usar ordem 4, por que a ordem 3 é a mais baixa capaz de satisfazer a continuidade de segunda

ordem (LEE, 1999). Em seguida devem-se determinar os valores dos nós. Como se está utilizando $(n + 1)$ pontos de controle, deve-se determinar $(n + k + 1)$ valores de nós. Há muitas escolhas possíveis para esses valores de nós. Lee (1999) preferiu utilizar os valores abaixo combinando os resultados de Hartley & Judd (1980):

$$\begin{aligned}
 t_i &= 0 & (i = 0, 1, \dots, k-1), \\
 t_i &= t_{i-1} + \frac{\sum_{j=i-k}^{i-2} d_j}{\sum_{m=k}^{n+1} \sum_{j=m-k}^{m-2} d_j} & (i = k, k+1, \dots, n), \\
 t_i &= 1 & (i = n+1, n+2, \dots, n+k),
 \end{aligned}$$

onde

$$d_j = \sqrt{|Q_{j+1} - Q_j|}$$

e Q_j são os pontos disponíveis.

Faz-se P_0, P_1, \dots, P_n serem os $(n + 1)$ pontos de controle para a derivação. Eles devem satisfazer a relação:

$$Q_j = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u_j) \quad (j = 0, 1, \dots, n)$$

onde u_j são os valores a serem definidos para os pontos Q_j . Qualquer conjunto de pontos u_j entre t_{k-1} e t_{n+1} permitirão à *B-spline* passar pelos pontos disponíveis. Entretanto a suavidade da curva variará muito a depender dos valores de u_j . Hartley *apud* Lee (1999) recomendou os valores a seguir para uma curva suave.

$$u_j = \frac{t_{j+1} + t_{j+2} + \dots + t_{j+k-1}}{k-1} \quad (j = 0, 1, \dots, n)$$

A equação $Q_j = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u_j)$ e as equações para P_i são derivadas:

$$\begin{bmatrix}
 \cdot & N_{i,k}(u_0) & \cdot & \cdot \\
 \cdot & N_{i,k}(u_1) & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & N_{i,k}(u_n) & \cdot & \cdot
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 P_0 \\
 P_1 \\
 \cdot \\
 P_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 Q_0 \\
 Q_1 \\
 \cdot \\
 Q_n
 \end{bmatrix}$$

Pode-se solucionar a equação acima para P_i com a finalidade de obter os pontos de controle da curva *B-spline* que interpolam os pontos disponíveis Q_i .

V.2. INTERPOLAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE USANDO CURVAS

A interpolação de pontos para a reconstrução de superfícies pode ser realizada de diversas formas, conforme a equação utilizada. Aqui será utilizada uma equação de *B-spline* passando pelos pontos disponíveis, conforme apresentado por Lee (1999).

Na Figura V.3 (LEE, 1999) pode-se verificar o conjunto de pontos disponíveis para a interpolação, denotados $Q_{p,q}$ ($p = 0, 1, \dots, n$ e $q = 0, 1, \dots, m$).

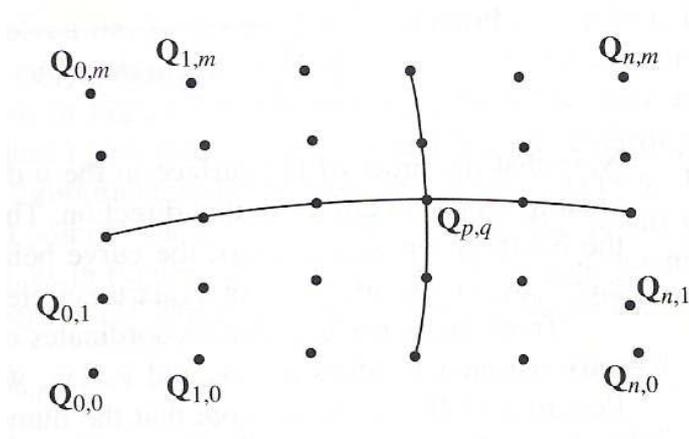


Figura V.3: pontos a serem interpolados.

Por conta da restrição $(n + 1) \times (m + 1)$, que deve ser satisfeita, qualquer *B-spline* com no mínimo os pontos de controle $(n + 1) \times (m + 1)$ pode ser utilizada. Para simplificar, será considerada uma *B-spline* com os pontos de controle $(n + 1) \times (m + 1)$:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)$$

onde P_{ij} são os pontos de controle para que a superfície resultante passe por todos os pontos $Q_{p,q}$. Se é assumido que os valores de cada ponto $Q_{p,q}$ são u_p e v_q , então

$$Q_{p,q} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u_p) N_{j,l}(v_q).$$

A equação acima pode ser reescrita considerando o termo $\sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{j,l}(v_q)$ igual a

$C_i(v_q)$:

$$Q_{p,q} = \sum_{i=0}^n C_i(v_q) N_{i,k}(u_p)$$

Substituindo os valores $0 - m$ por q na equação acima, tem-se:

$$\begin{aligned} Q_{p,0} &= \sum_{i=0}^n C_i(v_0)N_{i,k}(u_p) \\ Q_{p,1} &= \sum_{i=0}^n C_i(v_1)N_{i,k}(u_p) \\ &\vdots \\ Q_{p,m} &= \sum_{i=0}^n C_i(v_m)N_{i,k}(u_p) \end{aligned}$$

Se substitui-se os valores $0 - n$ por p na primeira equação, tem-se $C_i(v_0)(i=0,1,\dots,n)$ como pontos de controle para a curva *B-spline* interpolando $Q_{0,0}, Q_{1,0}, Q_{2,0}, \dots, Q_{n,0}$, que é a primeira curva horizontal mostrada na Figura V.3 (LEE, 1999). De maneira análoga, $C_i(v_1)(i=0,1,\dots,n)$ são os pontos de controle para a curva *B-spline* interpolando os pontos $Q_{0,1}, Q_{1,1}, Q_{2,1}, \dots, Q_{n,1}$, que é a segunda curva. Generalizando, $C_i(v_q)(i=0,1,\dots,n)$ são os pontos de controle para a curva *B-spline* interpolando $Q_{0,q}, Q_{1,q}, Q_{2,q}, \dots, Q_{n,q}$, que é a curva horizontal $(q + 1)$. Esses pontos de controle da curva de interpolação *B-spline* podem ser obtidos como descrito no início desta seção.

Os pontos de controle P_{ij} serão agora obtidos a partir de $C_i(v_q)(q=0,1,\dots,n)$ no passo anterior. Para tanto, retorna-se à definição de $C_i(v_q)$:

$$C_i(v_q) = \sum_{j=0}^m P_{i,j}N_{j,l}(v_q)$$

Se os valores de $0 - m$ são substituídos por q na equação acima, nota-se que P_{ij} são os pontos de controle da curva de interpolação *B-spline* $C_i(v_0), C_i(v_1), \dots, C_i(v_m)$. Em particular, $P_{0,j}$ são os pontos de controle da curva de interpolação *B-spline* $C_0(v_0), C_0(v_1), \dots, C_0(v_m)$ que estão localizados no extremo esquerdo da Figura V.4 (LEE, 1999), $P_{1,j}$ são os pontos da curva $C_1(v_0), C_1(v_1), \dots, C_1(v_m)$ (segundos pontos de controle a partir da esquerda do polígono de controle na figura) e assim respectivamente para os demais.

Lee (1999) sumariza o procedimento de derivação de $P_{i,j}$ da seguinte forma:

- Os pontos disponíveis são interpolados por *B-splines* em uma direção, como ilustrado na Figura V.4.
- Os pontos de controle das *B-splines* no primeiro passo são interpolados na direção transversal àquela da etapa inicial. Isso significa que o *iésimo* ponto de controle de todas as *B-splines* derivado do primeiro passo é reunido e

interpolado pela *B-spline*. Então, os pontos de controle dessa *B-spline* serão $P_{i,0}, P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,m}$. Repetindo essa seqüência para todo i de 0 a n , tem-se todos os $P_{i,j}$.

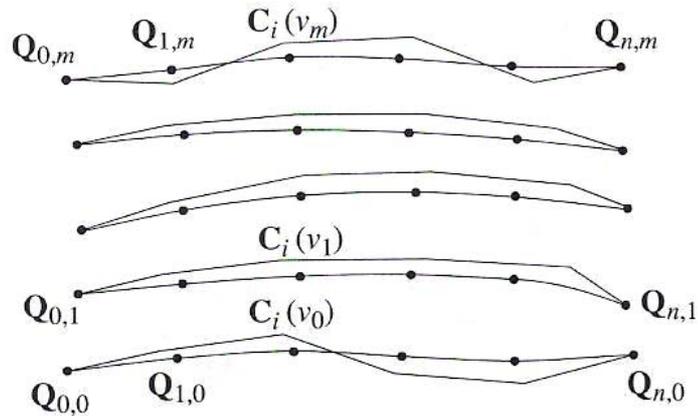


Figura V.4: $C_i(v_q)$ obtida por interpolação na direção u .

Desde que se tenha derivado os pontos de controle da superfície, deve-se determinar as ordens k e l e os valores dos nós nas direções u e v respectivamente. Uma superfície de grau 3 em u e v é a mais utilizada, tendo k e l geralmente valor 4. Os valores dos nós nas direções u e v são determinados da seguinte forma: os valores dos nós são obtidos quando a curva é derivada, como descrito no início desta seção. Assim, têm-se $(m + 1)$ grupos de nós na direção u para cada interpolação mostrada na Figura V.4. Um grupo representativo de nós desses $(m + 1)$ pode ser derivado pela média dos grupos. Em outras palavras, o i ésimo valor é obtido pela média dos i ésimos valores de todos os grupos $(m + 1)$. Os nós na direção v são obtidos da mesma maneira.