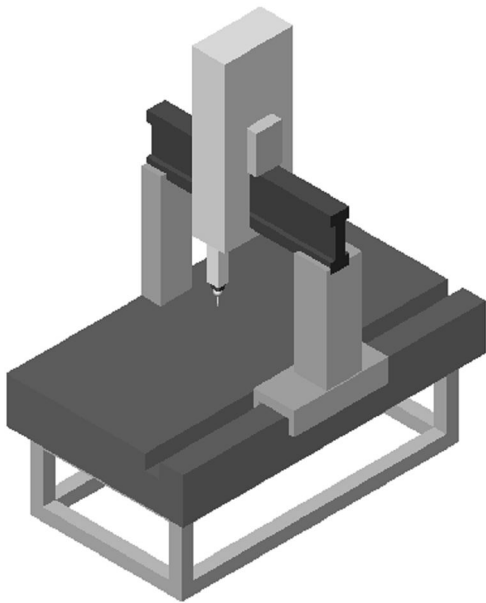


FORMA 3D

FORMAÇÃO AVANÇADA DE METROLOGISTAS 3D

MÓDULO 1

METROLOGISTA 3D – NÍVEL C



FORMA 3D
Nível C ★
METROLOGISTA 3D

André Roberto de Sousa

"A Educação torna as pessoas fáceis de liderar, mas difíceis de manipular, fáceis de governar, mas impossíveis de escravizar."

Henry Peter Broughan

Esse material possui finalidade puramente didática e serve única e exclusivamente de material de apoio aos participantes dos cursos do programa **FORMA3D**. É proibida a sua venda como material em separado.

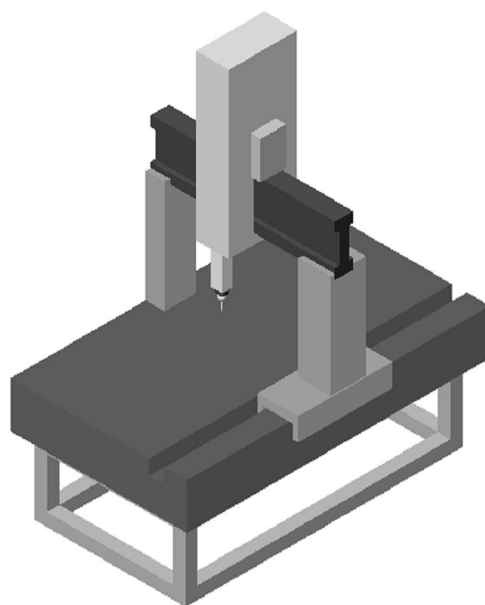
Ao longo do texto existem diversas ilustrações e imagens de máquinas de medir por coordenadas, software de medição e outros equipamentos metrológicos. Todas elas foram gentilmente cedidas pelos seus respectivos fabricantes para serem utilizados como exemplos didáticos nesse material.

Os textos e as ilustrações elaborados especificamente para esse material didático possuem os seus direitos autorais devidamente registrados.

PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO METROLÓGICA

FORMA3D

FORMAÇÃO AVANÇADA DE METROLOGISTAS 3D



André Roberto de Sousa

APRESENTANDO

A Tecnologia de Medição por Coordenadas ou Medição 3D é atualmente o recurso mais poderoso e estratégico que a Indústria metal-mecânica possui para garantir a precisão dimensional dos produtos e aumentar a eficiência dos processos. Por sua automatização, grande flexibilidade e enormes potencialidades geométricas, a Medição 3D apresenta grandes vantagens sobre outros métodos de medição e tem sido aplicada com cada vez mais frequência em todas as fases do ciclo produtivo de peças mecânicas, do desenvolvimento até o controle da produção seriada.

No entanto, como em todo processo de rápida absorção tecnológica, a disseminação da Medição 3D não foi acompanhada pela necessária adequação na formação do pessoal técnico. Por seu caráter matemático, sua sofisticação tecnológica e grande integração com o sistema de manufatura, a Medição 3D requer uma formação mais ampla do que somente a capacitação na operação da máquina e do software de medição, como ocorre atualmente.

A carência dessa formação mais ampla provoca um hiato entre as potencialidades da tecnologia e a capacidade do pessoal técnico em explorar os seus recursos de forma confiável e eficiente. O elo fraco da corrente para a qualidade dos processos de medição tem sido, inquestionavelmente, o elemento humano e, infelizmente, é grande o custo com retrabalhos e refugos causados por falta de confiabilidade metrológica nos processos de medição por coordenadas.

O Programa de Formação Avançada de Metrologistas 3D nasceu dessa necessidade e tem o objetivo de oferecer uma capacitação ampla e padronizada para os usuários da medição 3D e, com isso, contribuir para mudar o panorama da qualificação do pessoal técnico envolvido com as operações de Medição 3D na Indústria Brasileira.

Sua concepção, estruturação e execução obedecem a critérios técnicos e pedagógicos muito bem planejados, de acordo com as diretrizes educacionais mais atuais do Ministério da Educação e adequado à realidade da Indústria Brasileira e ao nível educacional dos profissionais técnicos que nela atuam. Pela enorme presença e importância da Medição 3D nos processos da Indústria Brasileira, consideramos, sem dúvida, o FORMA3D um programa estratégico para a potencializar a qualidade e a produtividade da indústria metal-mecânica nacional.

A MOTIVAÇÃO PARA CRIAR UM PROGRAMA DE FORMAÇÃO EM METROLOGIA 3D

A rápida disseminação da tecnologia de Medição por Coordenadas no Brasil e no mundo não foi acompanhada pelo necessário cuidado na formação do pessoal técnico que trabalha com essa tecnologia, extremamente importante para a garantia da qualidade de processos e produtos na indústria atual.

Por sua sofisticação tecnológica e caráter matemático, a Medição por Coordenadas, ou Medição 3D, requer uma formação técnica mais ampla do que somente nos aspectos operacionais da máquina de medir, que depende de cada fabricante. O pleno entendimento da tecnologia e dos processos que ocorrem antes, durante e após uma medição requer uma capacitação bem mais ampla do que somente a qualificação para operar a máquina e o software de medição. Essa qualificação operacional é bem atendida pelos fabricantes de máquinas de medir, mas a qualificação ampla não é contemplada de modo padronizado.

Essa deficiência na formação faz com que as potencialidades de melhoria que a Medição 3D oferece sejam sub-aproveitadas e que, muitas vezes, a Medição 3D traga graves problemas para as empresas. Informações erradas são geradas, que levam à tomada de decisões erradas, com sérias conseqüências em termos de custo e qualidade. Infelizmente, o elemento humano é o elo fraco da corrente que leva à confiabilidade metrológica nos resultados da medição 3D.

Muito investimento se faz na aquisição da tecnologia de medição por coordenadas e preparação de sala de medidas, mas muito pouco se faz para a formação do profissional que trabalha com essa tecnologia, e essa realidade não é exclusiva do Brasil. Em todo o mundo esse problema ocorre.

Motivados por oferecer cursos de formação específicos para o pessoal técnico que trabalha com a Medição 3D, em vários países começam a surgir programas de formação amplos e independentes, com o suporte de instituições de ensino, de modo a padronizar a formação dos Metrologistas 3D.

Conhecendo profundamente as carências da realidade Brasileira nesse campo, especialistas técnicos e pedagógicos da Indústria e de Centros de Formação se uniram para formular e elaborar um conceito de treinamento inédito no Brasil e em boa parte do mundo, resultando no programa FORMA3D: um programa de capacitação amplo e independente de fabricantes de máquinas, ministrado por pessoas de reconhecida competência na área, com avaliação e certificação por uma Instituição de Ensino Tecnológico.

O PROGRAMA FORMA3D

O FORMA3D é um programa de treinamento independente e generalista, focado em todos os **conhecimentos, habilidades e atitudes** necessárias para que o pessoal técnico que atua direta ou indiretamente com a medição por coordenadas possa desempenhar com eficiência e confiabilidade as suas atividades. O seu objetivo principal consiste em oferecer uma capacitação técnica ampla e independente para os profissionais envolvidos com a Medição 3D na Indústria Brasileira.

A estruturação do programa é multi-institucional e foi realizada por profissionais de empresas e instituições de ensino com até 20 anos de experiência em Medição por Coordenadas, conhecendo profundamente as carências da realidade Brasileira nesse campo. Esses profissionais realizaram pesquisas em várias empresas usuárias da Medição 3D e, com base na observação da realidade Brasileira, condensaram todas as competências e habilidades necessárias à execução das funções do Metrologista 3D¹.

Com base nesse conjunto de competências e habilidades foi definida a estrutura curricular do FORMA3D, contemplando 3 níveis crescentes de especialização:

Módulo 1: Metrologista 3 D – Nível C

Profissional com competência para entender os princípios funcionais e fontes de erros da medição por coordenadas e operacionalizar uma medição pré-definida de forma eficiente e confiável.

Módulo 2: Metrologista 3 D – Nível B

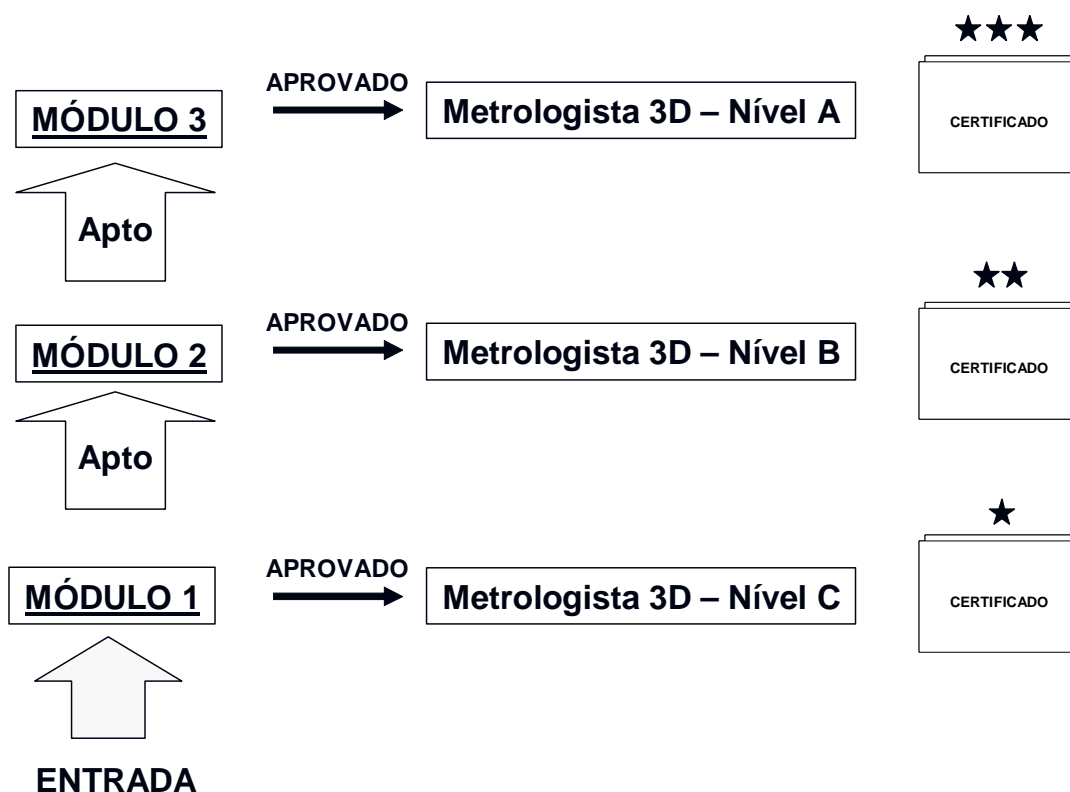
Profissional com competência para interpretar tolerâncias dimensionais e geométricas de acordo com normas internacionais, definir estratégias de medição consistentes, elaborar programas CNC, avaliar a incerteza da medição e verificar a sua confiabilidade em relação às tolerâncias.

¹ A estrutura do FORMA3D está organizada por competências, em conformidade com as novas diretrizes curriculares do Ministério da Educação para o ensino tecnológico. De acordo com o parecer 16/99 do Conselho Nacional de Educação, competência é entendida como “a capacidade de articular, mobilizar e colocar em ação: valores, conhecimentos e habilidades necessários para o desempenho eficiente e eficaz de atividades requeridas pela natureza do trabalho”.

Módulo 3: Metrologista 3 D – Nível A

Profissional com competência para coordenar equipes com operadores e programadores, participar de equipes para definição de projeto orientado à montagem no desenvolvimento de produtos, além de interagir com especialistas da produção para corrigir não conformidades dimensionais nas peças.

Os três módulos são cursados em seqüência. Ao longo e ao final de cada Módulo, as competências e habilidades dos participantes são avaliadas por pessoal técnico e pedagógico de uma Instituição de Ensino Tecnológico. Caso demonstre proficiência nessa avaliação de competências, o participante será certificado no seu respectivo módulo, como mostra a figura a seguir, estando apto a cursar o módulo seguinte. Os módulos serão ministrados por profissionais de reconhecida competência e somente após um processo de credenciamento pelo programa FORMA3D.



Progressão no Curso

Com base nessa estrutura curricular e forma de operação, o programa FORMA3D se caracteriza como um curso de formação amplo e independente, oferecendo à Indústria Brasileira a possibilidade de uma padronização na capacitação dos profissionais da Medição 3D. Essa padronização pode, no médio prazo, caracterizar a função de Metrologista 3D dentro das empresas e servir de base para a estruturação de planos de carreira do pessoal envolvido com a Medição por Coordenadas.

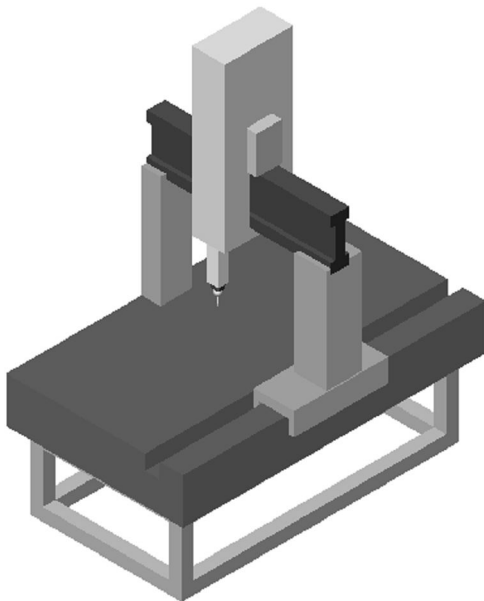
Para consolidar o programa nacionalmente como um curso de formação padronizado e reconhecido pelos usuários da Medição 3D e por órgãos envolvidos com a promoção da Metrologia e da Qualidade no Brasil, o programa FORMA3D permanece em constante articulação com empresas, entidades de classe, instituições de ensino e pesquisa e órgãos governamentais.

FORMA3D

FORMAÇÃO AVANÇADA DE METROLOGISTAS 3D

MÓDULO 1

METROLOGISTA 3D – NÍVEL C



FORMA3D
Nível C ★
METROLOGISTA 3D

André Roberto de Sousa

ÍNDICE

1. Fundamentos de Metrologia Científica, Industrial e Legal	19
1.1 A necessidade de Medir	20
1.2 Importância da Metrologia	24
1.2.1 No cotidiano da sociedade e do indivíduo	24
1.2.2 Nas atividades técnicas	25
1.3 O Sistema Internacional de Unidades	27
1.4 O Processo de Medição e suas imperfeições	33
1.5 Conceitos Metrológicos Fundamentais	40
2. Metrologia Dimensional integrada ao Processo de Manufatura	53
2.1 Evolução histórica do controle de qualidade	53
2.1.1 Na produção artesanal	55
2.1.2 Controle 100% ao final do processo	56
2.1.3 Controle 100% ao longo do processo	57
2.1.4 Controle estatístico da qualidade ao longo do processo	58
2.2 Integração e importância da Metrologia dimensional na manufatura atual	60
2.3 A importância da confiabilidade metrológica	64
3. Confiabilidade na Metrologia Dimensional	69
3.1 Fatores perturbadores do Processo de Medição	70
3.1.1 Sistema de medição	70
3.1.2 Operador	72
3.1.3 Ambiente	74
3.1.4 Peça a medir	79
3.2 As consequências: Erros e Incertezas de Medição	82
3.2.1 Conhecendo as parcelas do erro de medição	87
3.2.2 Estimando o Erro Sistemático	89
3.2.3 Estimando o Erro Aleatório	94
3.2.4 Curva de erros	99

3.3	Determinando o resultado de uma medição	103
3.3.1	Conhecendo e corrigindo a tendência	103
3.3.2	Conhecendo mas não corrigindo a tendência	104
3.3.3	Considerando a tendência já corrigida por ajuste no instrumento	105
3.4	Convivendo com os erros	108
4.	<i>A Tecnologia de Medição por Coordenadas</i>	113
4.1	Evolução da manufatura e a motivação para a medição 3D.	113
4.1	Princípios fundamentais	118
4.2	Evolução e disseminação da Tecnologia	122
4.2.1	Evoluções mecânicas	124
4.2.2	Evoluções eletrônicas	126
4.2.3	Evoluções computacionais	127
4.2.4	Disseminação da tecnologia	128
4.3	Potencialidades e aplicações na Indústria Mecânica	130
4.3.1	Potencialidades	130
4.3.2	Aplicações	133
4.4	O Metrologista 3D: Conhecimentos, Habilidades e Atitudes	135
5.	<i>Fundamentação matemática da Medição por Coordenadas</i>	140
5.1	Espaço Bi-dimensional	140
5.1.1	Sistema de Coordenadas Cartesiano	142
5.1.2	Sistema de Coordenadas Polar	144
5.2	Espaço Tridimensional	146
5.2.1	Sistema de Coordenadas Cartesiano	146
5.2.2	Sistemas de Coordenadas Cilíndrico e Esférico	148
5.2.3	Modificações no Sistema de Coordenadas	149
6.	<i>Geometria plana e espacial</i>	153
6.1	Vetores	153
6.1.1	O Vetor posição	154
6.2	Estudo dos Elementos geométricos regulares	161
6.2.1	Ponto	163
6.2.2	Linha	164

6.2.3	Plano	165
6.2.4	Círculo	167
6.2.5	Cilindro	170
6.2.6	Esfera	171
6.2.7	Cone	173
6.2.8	Elemento Toroidal	174
6.2.9	Identificando elementos geométricos regulares em peças reais	175
6.3	Projeções sobre plano	177
6.4	Associações entre elementos geométricos	179
6.4.1	Distância entre dois elementos geométricos	180
6.4.2	Ângulo entre dois elementos geométricos	184
6.4.3	Interseção de dois elementos geométricos	187
7.	Controle dimensional de peças na Indústria	192
7.1	Introdução à Especificação geométrica de produtos	193
7.2	Importância do Desenho Mecânico	195
7.3	Definições Geométricas normalizadas	197
7.3.1	Elemento geométrico nominal	197
7.3.2	Elemento geométrico real	198
7.3.3	Elemento geométrico extraído	199
7.3.4	Elemento geométrico associado	200
7.4	A Importância estratégica das Tolerâncias	202
7.5	Tolerâncias X Incertezas	207
7.5.1	Análise de aprovação	209
7.5.2	Conseqüências técnicas e econômicas de erros de classificação	213
7.5.3	Relação entre Incerteza e Tolerância	216
7.5.4	Zona de aceitação	218
8.	A Máquina de Medir por Coordenadas	223
8.1	Formas construtivas	223
8.1.1	– Tipo Coluna (<i>cantilever</i>)	224
8.1.2	– Tipo Portal (<i>Bridge</i>)	224
8.1.3	– Tipo Braço Horizontal (<i>Horizontal arm</i>)	226
8.1.4	– Tipo Ponte (<i>Gantry</i>)	227

8.2	Níveis de automatização	228
8.2.1	– Máquinas manuais	229
8.2.2	– Máquinas CNC	231
8.3	Nível de integração com o sistema de produção	233
8.4	Elementos construtivos	237
8.4.1	Mesa	238
8.4.2	Colunas e Braços	238
8.4.3	Guias	239
8.4.4	Mancais	240
8.4.5	Sistemas de acionamento e transmissão	242
8.4.6	Apalpador	244
8.4.7	Escalas de medição	253
8.5	CNC da máquina e computador do usuário	257
8.6	Software de Medição	260
8.6.1	Correções de parâmetros funcionais	260
8.6.2	Configuração de variáveis de máquina	262
8.6.3	Elaboração e execução de programas de medição	262
8.6.4	Transformações matemáticas de Coordenadas espaciais	263
8.6.5	Aquisição de pontos e cálculo dos elementos geométricos	263
8.6.6	Processamentos numéricos e gráficos	264
8.6.7	Emissão de relatórios de medição	265
8.7	Cuidados e Conservação	266
8.7.1	Mesa	268
8.7.2	Colunas e braços	269
8.7.3	Mancais	270
8.7.4	Apalpador	270
8.7.5	Escalas de Medição	272
8.7.6	Sistema computacional	272
9.	Formas de medição por Coordenadas	275
9.1	Medição Manual	275
9.2	Medição Automática	277
9.2.1	Programação por aprendizado	277

9.2.2	Programação Off-line	281
9.2.3	Programação gráfica off-line	284
10.	Preparando a peça e a Máquina para a Medição	288
10.1	Limpeza e estabilização térmica da peça	288
10.2	Ajuste do dispositivo e Fixação da peça	292
10.3	Inicialização da Máquina	294
10.4	Configuração do software	296
11.	Escolhendo e calibrando o apalpador	301
11.1	Análise da medição e Seleção do apalpador	301
11.2	Calibração do apalpador	306
11.3	Cuidados importantes	312
12.	Alinhando matematicamente a Peça	318
12.1	O sistema de coordenadas local	318
12.2	Influência na exatidão e utilidade dos resultados	321
12.3	Princípio matemático do alinhamento	327
12.3.1	Entendimento físico	327
12.3.2	Entendimento matemático	329
12.4	Alterações no sistema de coordenadas	337
12.4.1	Translação do sistema de coordenadas	337
12.4.2	Rotação do sistema de coordenadas	338
12.4.3	Inversão de eixos	339
12.5	Elementos geométricos de referência	339
12.6	Alinhamentos manual e automático	344
13.	Medindo os elementos geométricos das Peças	349
13.1	Características da peça e da medição	349
13.2	Número e distribuição de pontos	353
13.3	Estratégia de apalpação	358

13.4	Evitando as colisões	366
14.	Processando e avaliando os resultados das medições	373
14.1	Processamentos estatísticos básicos	373
14.1.1	Distribuição de dados	374
14.1.2	Caracterização do centro da distribuição dos dados	377
14.1.3	Quantificação da dispersão dos dados	379
14.2	Ajuste matemático de elementos geométricos	382
14.2.1	Gaussiano ou Mínimos quadrados	385
14.2.2	Máximo / Mínimo	386
14.2.3	Chebichev	388
14.3	Relatórios numéricos	389
14.4	Relatórios gráficos	391
14.5	Comparação contra modelo CAD	395
14.6	Identificando não conformidades	397
15.	Preservando a Confiabilidade Metrológica das medições	402
15.1	A Máquina de Medir como Fonte de Incerteza	402
15.1.1	Fontes de Incerteza da Máquina	403
15.1.2	Calibração e Correção de erros da Máquina	411
15.1.3	Ensaio de Verificação na Máquina de Medir	416
15.2	Operador	424
15.3	Ambiente de medição	425
15.3.1	Alimentação elétrica deficiente	427
15.3.2	Vibrações	428
15.3.3	Impurezas em suspensão no ar	431
15.3.4	Umidade excessiva	432
15.3.5	Climatização inadequada	432
15.3.6	Iluminação inadequada	434
15.4	Peça a medir	434
15.5	Validando o procedimento de medição	436
16.	Bibliografias	439

ANEXO	440
VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia	440

12.3 Princípio matemático do alinhamento

O alinhamento da peça consiste, matematicamente, na tarefa de utilizar alguns elementos geométricos para definir de forma inequívoca a posição da peça no volume de trabalho da máquina de medir por coordenadas, ou seja, consiste na criação de planos de amarração para restringir a posição da peça.

12.3.1 Entendimento físico

Para entender bem isso, analisaremos a necessidade de construir um dispositivo simples para fixar um bloco. Se imaginarmos que essa peça está solta no espaço, ela possui 6 possibilidades de movimentação, ou 6 graus de liberdade de movimento. Para colocar essa peça em uma posição bem definida, precisamos, então, eliminar todas as possibilidades de movimento da peça, o que equivale a restringir todos os seus 6 graus de liberdade. Quando os 6 graus de liberdade da peça estiverem restringidos, a sua posição estará totalmente definida (figura 12.11).

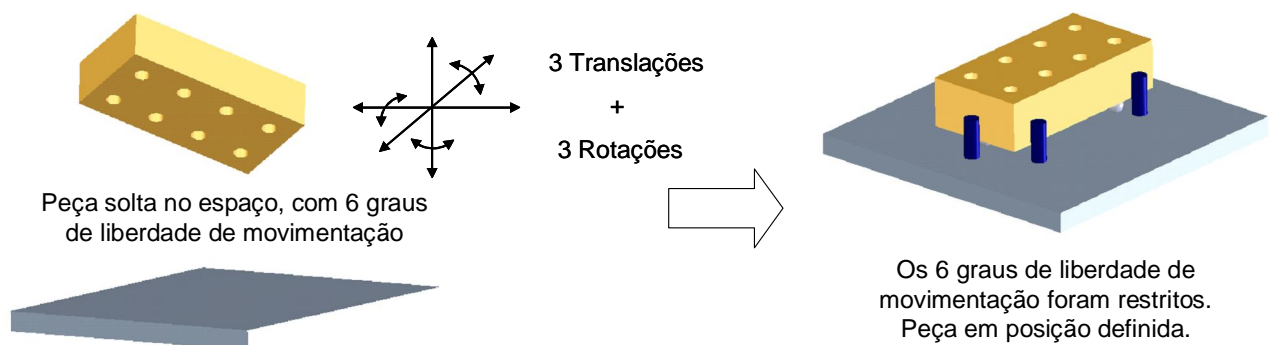


Figura 12.11 – A definição da posição da peça requer a restrição dos seus 6 graus de liberdade.

Para isso, iniciamos a tarefa pela construção de uma placa com 3 esferas fixadas a ela. Essas 3 esferas irão gerar um plano de apoio para a peça e, com isso, 3 graus de liberdade são restringidos: a translação vertical e as rotações em torno dos eixos horizontais. No entanto, a peça ainda

possui a liberdade de translação nas duas direções horizontais e a liberdade de girar em torno do eixo vertical. Faltam restringir, portanto, 3 graus de liberdade (figura 12.12).

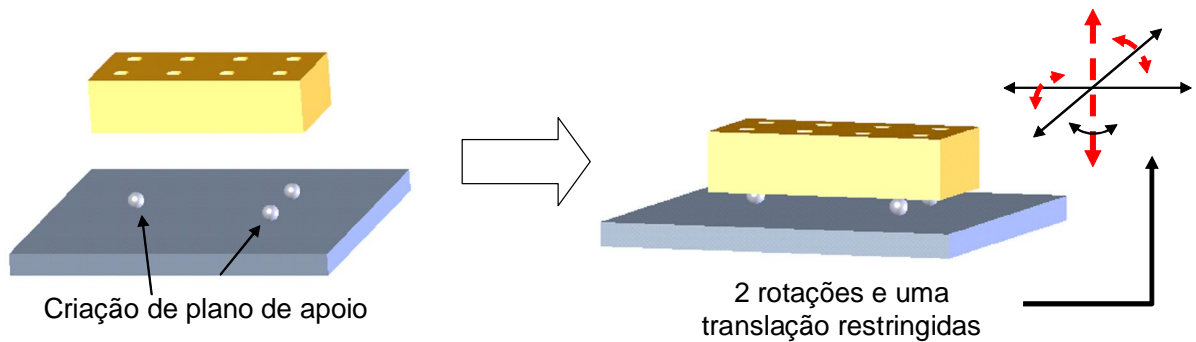


Figura 12.12 – Restrição de 3 graus de liberdade pelo apoio da peça em um plano

Continuando na nossa tarefa, colocamos 2 pinos na lateral do bloco, encostando-o nesses dois pontos de contato. Com isso, mais 2 graus de liberdade são restringidos: a translação perpendicular à linha que passa pelos pinos e a rotação em torno do eixo vertical. No entanto, o bloco ainda possui a liberdade de transladar na direção da linha que passa pelos pinos (figura 12.13).

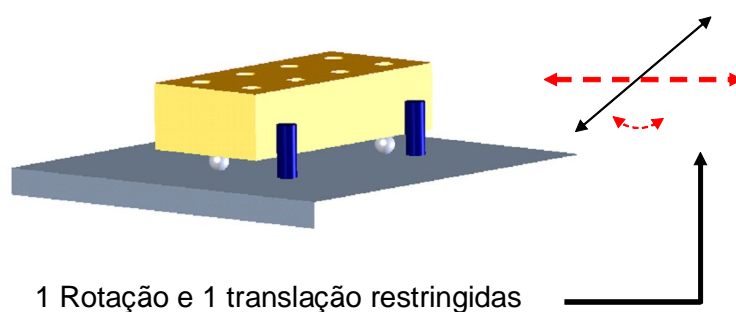


Figura 12.13 – Restrição de 2 graus de liberdade pelo encosto da peça em uma linha

Para restringir esse grau de liberdade ainda restante, colocamos mais um pino em uma face perpendicular à anteriores e encostamos a peça nesse pino. Com isso, a translação que ainda era possível foi eliminada e, assim, todos os 6 graus de liberdade foram restringidos. Com isso, nossa tarefa foi cumprida, uma vez que a posição da peça está totalmente definida no espaço (figura 12.14).

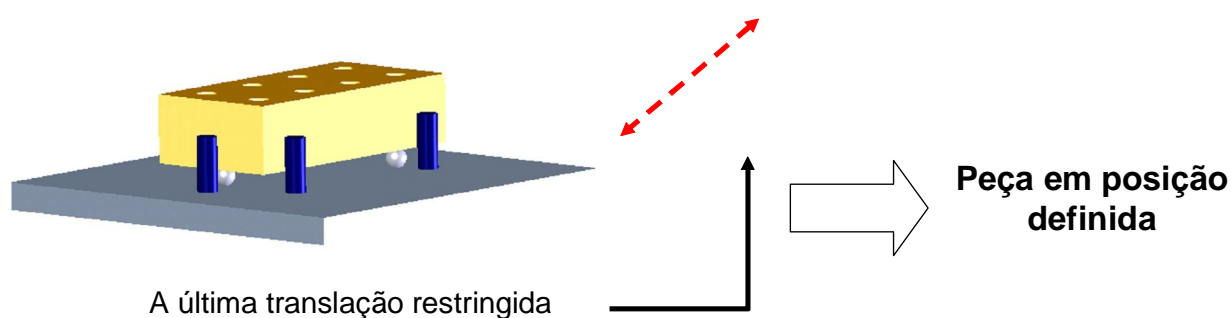


Figura 12.14 – Definição da posição da peça pela restrição dos seus 6 graus de liberdade

O entendimento desse procedimento é fundamental para compreender os processamentos matemáticos realizados pelo software de medição para gerar o sistema de coordenadas da peça. O alinhamento da peça na máquina de medir por coordenadas tem o mesmo objetivo do trabalho realizado acima, mas utilizando uma estratégia matemática em vez de construir um dispositivo físico.

12.3.2 Entendimento matemático

Na medição por coordenadas, sempre precisamos definir uma referência na peça, que será utilizada para direcionar todos os comandos de movimentação e apalpação, bem como o

processamento matemático dos pontos apalpador para gerar os resultados das medições. Essa referência da peça é definida de forma análoga ao exemplo anterior, só que agora são gerados matematicamente planos, linhas e pontos de apoio, e não fisicamente.

O processo de alinhamento matemático da peça pode ser entendido como o procedimento realizado para que a máquina de medir por coordenadas saiba onde se encontra a peça no seu volume de trabalho. Entendido de outra forma, o alinhamento é o processo de transferência do sistema de coordenadas da máquina para a peça.

Para entender bem isso, voltemos ao exemplo do bloco, agora colocando-o numa determinada posição sobre a mesa da máquina de medir (figura 12.15). Precisamos, então, criar matematicamente o plano de apoio, a linha de encosto e o ponto que definem de forma inequívoca a posição da peça e restringe os 6 graus de liberdade do seu sistema de coordenadas. O desenho do bloco pode ser visto, onde estão indicadas as referências a serem utilizadas para o alinhamento matemático.

O procedimento se inicia com a apalpação de um mínimo de 3 pontos sobre uma das faces planas da peça, como o objetivo de gerar um plano que irá restringir 3 graus de liberdade do sistema de coordenadas da peça. Nesse caso do bloco, orientado por instruções contidas no desenho da peça, isso foi feito na sua face superior.

Com isso, agora o software da máquina conhece em que nível a peça se encontra, mas isso é insuficiente para determinar a sua posição de forma completa, pois ainda existem os outros 3 graus de liberdade a restringir no sistema de coordenadas da peça. Esse procedimento é comumente conhecido como o nivelamento da peça, e o plano gerado com os 3 pontos é chamado de **plano primário** (figura 12.16).

Quando esse plano foi criado, o software de medição leva o sistema de coordenadas da máquina para cima da peça e cria um sistema de coordenadas local, com o eixo Z sendo definido perpendicularmente ao plano primário e com a origem no centro geométrico dos pontos apalpados. Os eixos X e Y, sempre perpendiculares a Z, ainda não tiveram os seus graus de liberdade restringidos e estão “soltos” (figura 12.17).

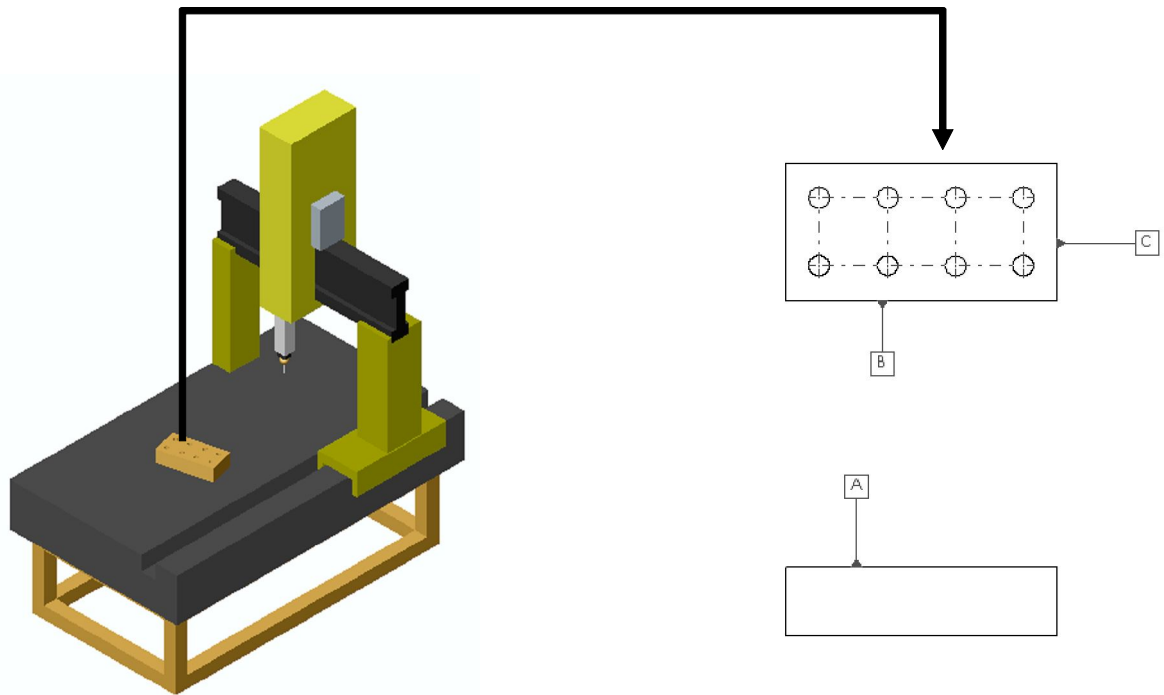


Figura 12.15 – Bloco com as referências para o alinhamento matemático

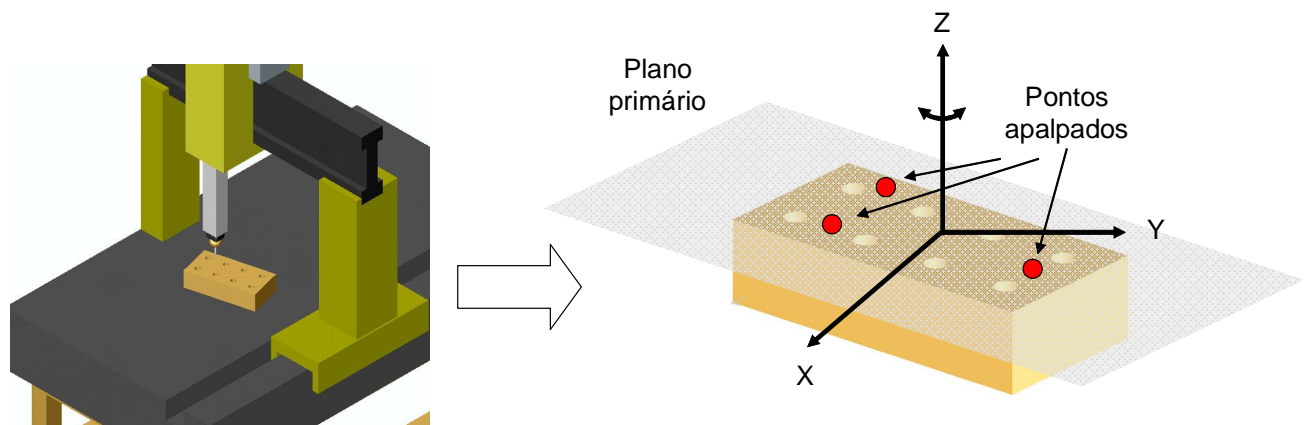


Figura 12.16 – Definição do plano primário de alinhamento

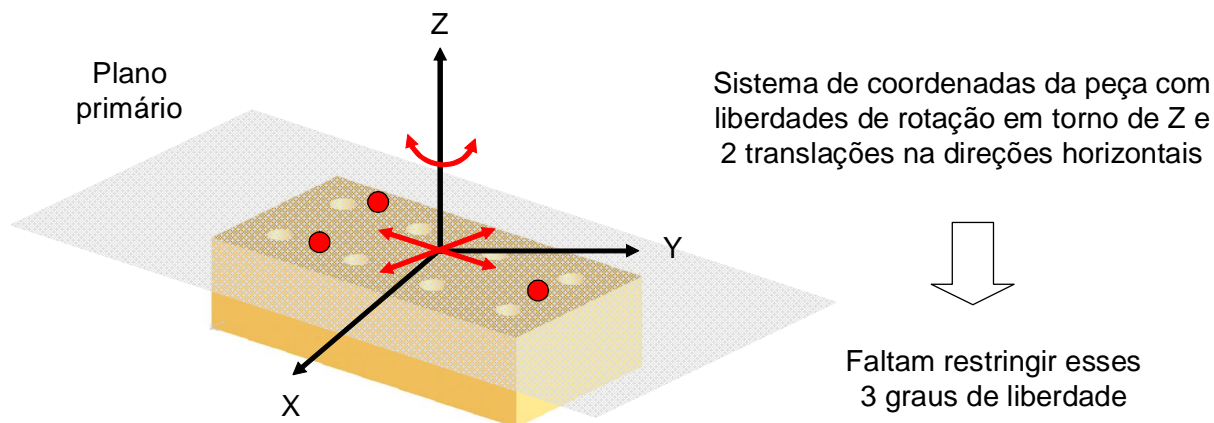


Figura 12.17 – Criação do eixo primário perpendicular ao plano primário (eixos X e Y soltos)

Alguns softwares de medição definem o eixo primário sempre no mesmo sentido do eixo da máquina. Outros softwares de medição definem o sentido do eixo primário em função do sentido de tomada dos pontos, adotando a regra da mão direita. Ou seja, se os pontos são tomados em sentido anti-horário, o eixo primário sai do plano primário. Se os pontos são tomados em sentido horário, o eixo entra no plano primário. A figura 12.18 ilustra esse procedimento.

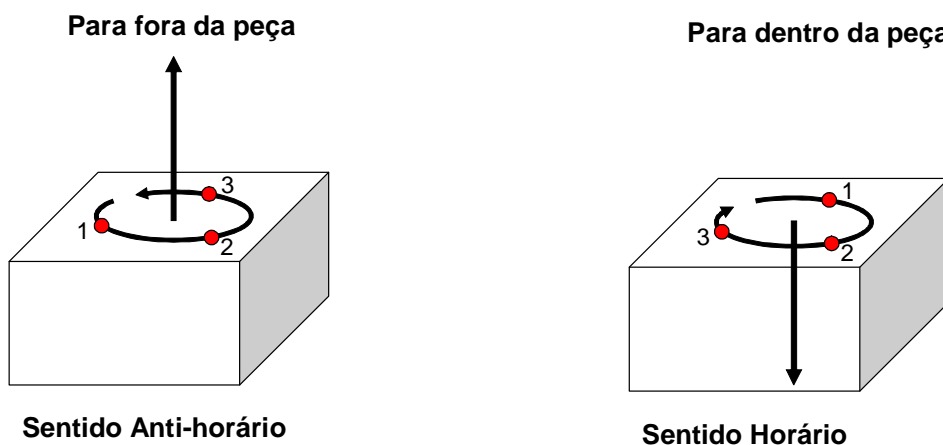


Figura 12.18 – Sentido do eixo Z definido em função dos pontos tomados

Para restringir mais 2 graus de liberdade desse sistema de coordenadas local, precisamos gerar uma linha utilizando a geometria da peça e, nesse bloco, as instruções contidas no desenho indicam que essa linha deve ser gerada na lateral frontal da peça. Para isso, são tomados no mínimo 2 pontos nessa lateral e, com isso, o software de medição calcula uma linha de referência e, com ela, define um **plano secundário** (figura 12.19).

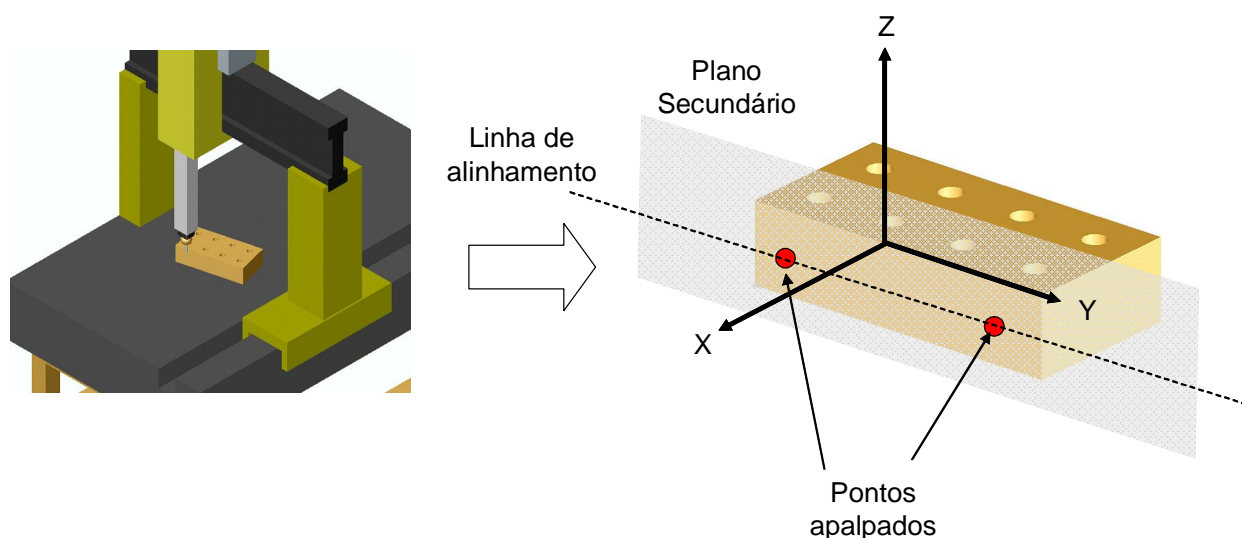


Figura 12.19 – Definição do Plano Secundário

Essa linha de referência restringe mais 2 graus de liberdade e já define a orientação espacial do sistema de coordenadas da peça. Um dos eixos é alinhado com essa linha de referência e o software da máquina agora sabe em que nível e orientação a peça se encontra. Falta agora somente definir um ponto de origem para amarrar a posição do sistema de coordenadas da peça (figura 12.20). A terceira referência é conhecida como **plano terciário**.

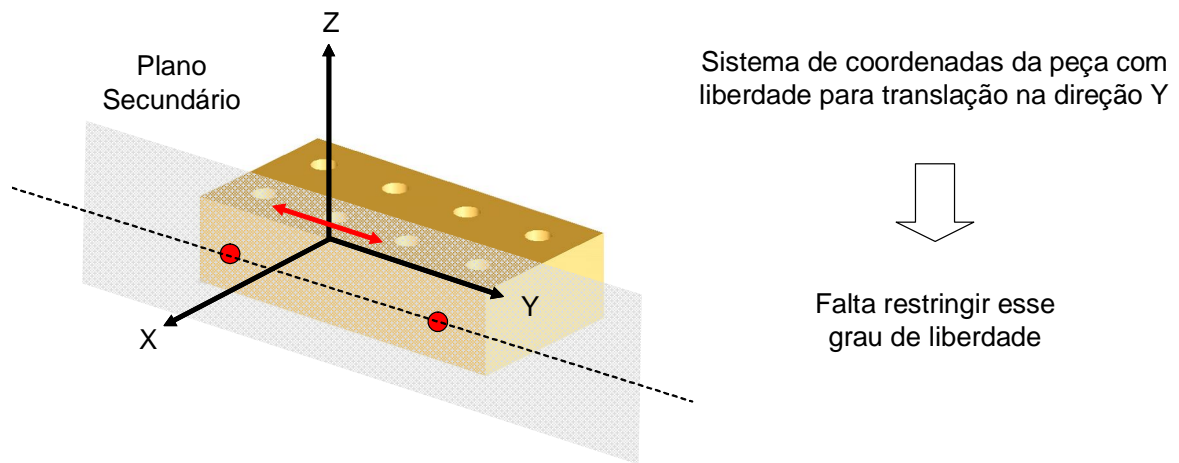


Figura 12.20 – Indefinição na posição do sistema de coordenadas da peça

Para definir a origem do sistema de coordenadas é suficiente esse ponto que, nesse caso, é tocado na face lateral direita do bloco (figura 12.21). Uma vez tomado o ponto, o software de medição cria o plano terciário e restringe todos os graus de liberdade do sistema de coordenadas da peça. Esse sistema de coordenadas terá a sua origem na intersecção dos 3 planos apalpado, como mostra a figura 12.22.

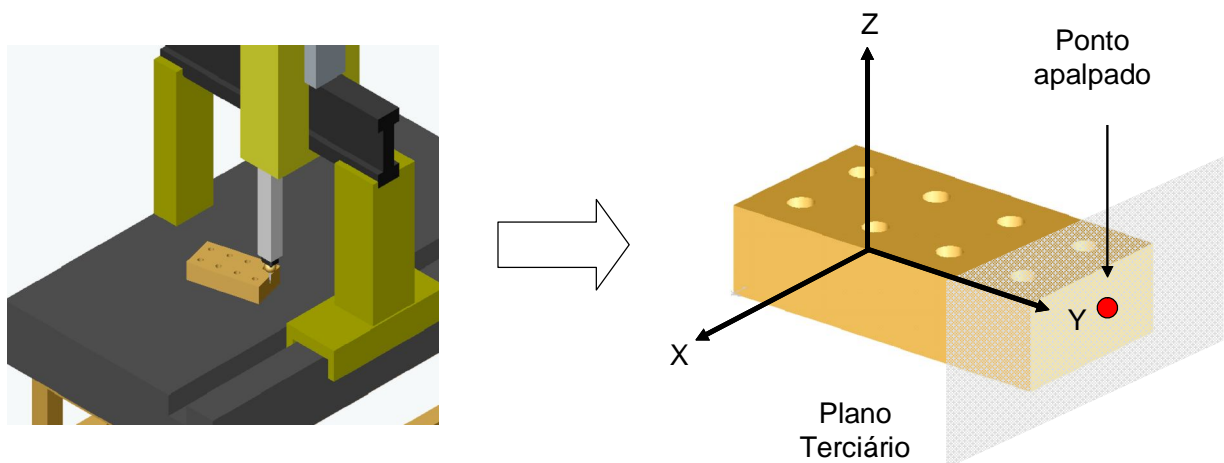


Figura 12.21 – Restrição do último grau de liberdade e definição do sistema de coordenadas da peça

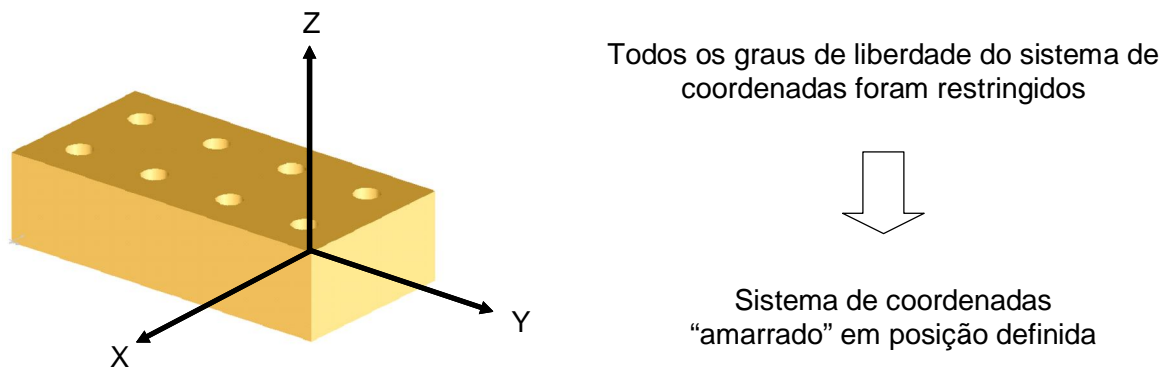


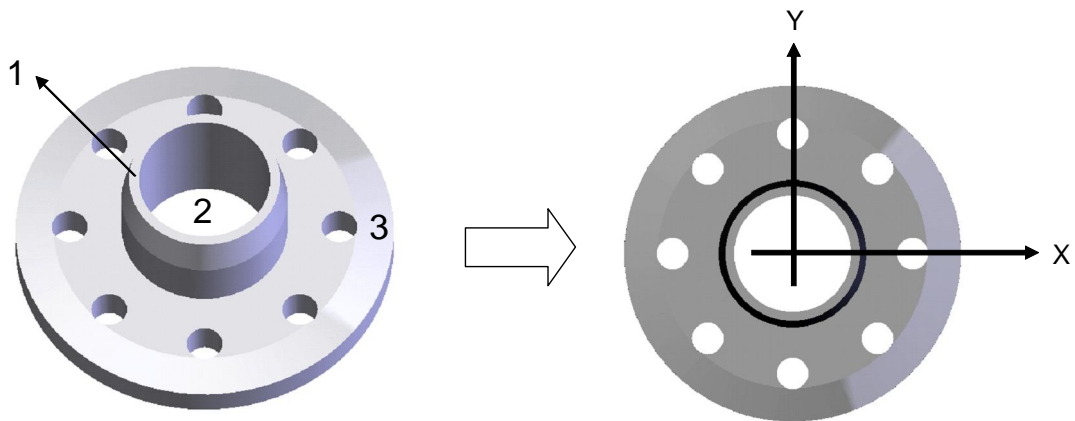
Figura 12.22 – Definição do sistema de coordenadas local

Observe que essa sistemática de colocar o sistema de coordenadas sobre a peça é análoga àquela utilizada anteriormente com a construção do dispositivo de fixação.

- Inicialmente o sistema de coordenadas da peça está solto no espaço, com os 6 graus de liberdade. Quando definimos o plano primário, o sistema de coordenadas agora está "preso" na peça e 3 graus de liberdade seus foram restritos.
- Quando medimos a linha para definir um plano secundário, o sistema de coordenadas é alinhado com essa linha e, assim, já tem a sua orientação espacial totalmente definida.
- Quando o último ponto é tocado sobre a peça, a origem do sistema de coordenadas é definida, e todos os 6 graus de liberdade anteriores são restringidos.

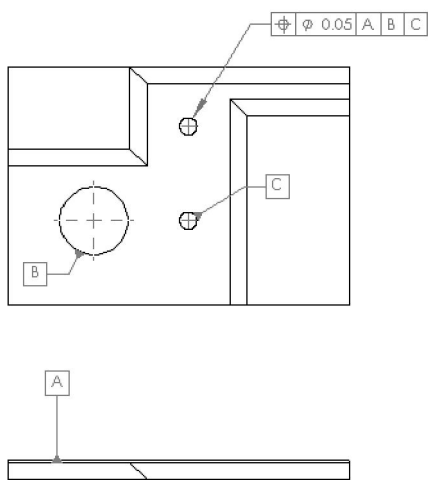
Para a completa definição da posição da peça é necessário que se utilizem elementos geométricos da peça para gerar, no mínimo, um plano, uma reta e um ponto. Esse é o procedimento básico para criar o sistema de coordenadas da peça.

Muitas peças não possuem faces planas, como no caso do bloco, ou então as referências não são as faces. Nesses casos, os elementos geométricos que irão formar a referências devem ser medidos, arquivados e chamados para compor as referências de alinhamento. A peça da figura 12.23 é um exemplo, onde os centros dos furos são utilizados para gerar as referências secundária e terciária (origem).



- 1: Plano primário (eixo Z)
- 2 e 3: Furos que definem a linha secundária (eixo X)
- 2: Furo central define origem dos eixos X e Y

Figura 12.23 – Elementos geométricos utilizados para compor o alinhamento



- 1: Plano primário (eixo Z)
- 2 e 3: Furos que definem a linha secundária (eixo Y)
- 2: Furo que define origem dos eixos X e Y

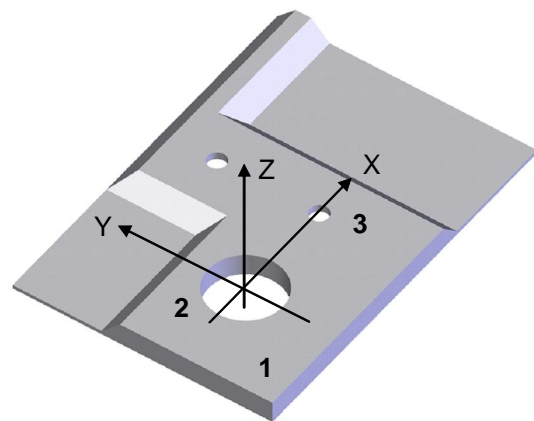


Figura 12.24 – Construção do alinhamento utilizando elementos geométricos da peça