Carlos Relvas

4.ª Edição

CONTROLO NUMÉRICO COMPUTORIZADO

Conceitos Fundamentais

engebook

AUTOR
Carlos Relvas

TÍTULO
Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais – 4.ª Edição

EDIÇÃO
Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

CHANCELA
Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO
Booki – Conteúdos Especializados
Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: info@booki.pt . www.booki.pt

PARCEIRO DE COMUNICAÇÃO
robótica – Revista Técnica

APOIO À EDIÇÃO
CENFIM – Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica
FAGOR AUTOMATION – SUCURSAL PORTUGUESA
FUCHS LUBRIFICANTES, Unip. Lda.
NORCAM – ENGENHARIA E DESIGN INDUSTRIAL, Lda.
SECO TOOLS PORTUGAL, Lda.

REVISÃO
Quantica Editora – Conteudos Especializados, Lda.

DESIGN
Luciano Carvalho
Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

IMPRESSÃO
Impresso em Espanha, novembro, 2018

DEPÓSITO LEGAL
443731/18

A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2018 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.
Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.
A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.
Por opção do autor, este livro não segue o novo Acordo Ortográfico de 1990.

CDU
621.7 Tecnologia mecânica em geral: processos, ferramentas, máquinas, equipamentos.
621.5 Energia pneumática, maquinaria e ferramentas. Refrigeração.

ISBN
Papel: 9789898927163
E-book: 9789898927170

Engebook – Catalogação da publicação
Família: Mecânica
Subfamília: Tecnologia/Fabrico

Prefácio

(1.ª Edição, março de 2000)

Dos jovens e, em particular, daqueles que estão empenhados em apresentar-se como cidadãos dignos da sua juventude é de esperar ambição, audácia e generosidade.

O Autor deste livro enquadra-se perfeitamente nos pressupostos caracterizadores do que pode apelidar-se de jovem e responsável e tem demonstrado ao longo da sua vida profissional e académica, ser detentor de elevada personalidade que lhe permitiu já e permitirá mais intensamente no futuro percorrer uma trajetória de promoção pessoal legitimada pelo interesse e entusiasmo com que se dedica às causas em que acredita. Irreverente quanto basta, consequente, não acomodado, responsável, interessado, trabalhador, inteligente e estudioso, são algumas das qualidades que se lhe reconhecem e que lhe grangearam grande liberdade e autonomia enquanto, como Monitor, esteve ao serviço do CINFU (Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição), presidindo à formação de serralheiros de moldes. Estava em causa o lançamento da formação de profissionais, recorrendo às novas tecnologias CNC (Controlo Numérico Computorizado) apoiadas em equipamentos de CAD/CAM de grande capacidade de processamento, elevada fiabilidade e reprodutibilidade dos resultados ao longo do tempo. A estratégia apontava para a substituição das metodologias tradicionais de fabricação mecânica, onde a habilidade do operador é decisiva na realização de um trabalho de grande especificidade e responsabilidade, como é o fabrico de moldes para fundição, por novas tecnologias que obrigam à aquisição de conhecimentos profundos necessários à elaboração de programas de maquinagem que os equipamentos CNC deverão executar. O Autor do livro *Controlo Numérico Computorizado - Conceitos Fundamentais* aceitou o desafio, que então lhe foi proposto, de proceder à escolha e à instalação dos equipamentos ao mesmo tempo que preparava os programas e os textos necessários a uma aprendizagem eficiente. O livro aparece pois, naturalmente, na sequência do trabalho então realizado pelo Autor e se se tiver em conta que este é um profissional competente que se mantém atento à evolução tecnológica, certamente que se está perante uma obra que faltava na literatura técnica portuguesa e que vai ser adotada por todos quantos pretendem iniciar-se nas técnicas de CNC ou melhorar o seu desempenho profissional.

Ao Autor, enquanto monitor no CINFU, foi dada a rara oportunidade na altura, de se integrar numa equipa jovem e já em pleno funcionamento, que dispondo de equipamento moderno e em permanente atualização, ambicionava afirmar-se como líder na implantação em Portugal dos sistemas de CAD/CAM/CAE «puxando» pelo setor metalo-mecânico relacionado com as tecnologias de fundição. Por isso, a partir da instalação de máquinas CNC (torno, centro de maquinagem e eletroerosão) tornava-se possível validar os programas elaborados em CAD/CAM e as ferramentas necessárias à sua execução. Assim, se promoveu o fabrico de peças e de moldes, de grande dificuldade, em tempo recorde.

A estratégia de formação de técnicos de fabricação mecânica (nível 3), pelo CINFU, incluía, primeiro a elaboração de programas detalhados das disciplinas a lecionar e depois a publicação de manuais, em português, que integrassem todas as matérias programadas. Este segundo passo, considerado como indispensável, dado não existirem textos em português, nunca foi concretizado, apesar de se ter gasto muito dinheiro na elaboração e publicação dos programas. Porém, nunca é tarde para se retomar uma estratégia qualificada e assumida como correta e indispensável a um ensino profissionalizante de qualidade. Por isso, se a este livro for dada a atenção que lhe é devida, poderá iniciar-se uma nova era na formação dos técnicos de que o País necessita para a sua participação no progresso industrial qualquer que seja o setor em causa. Os jovens saídos dos ensinos secundários e superior, com conhecimentos académicos suficientes, poderão vir a ser profissionais conscientes se lhes forem facultados meios que permitam a sua profissionalização e uma evolução sustentada ao longo da vida, o que passa necessariamente pela disponibilidade de meios de estudo e da reiterada frequência de cursos de aperfeiçoamento.

À publicação desta primeira edição, que será seguramente um êxito, seguir-se-ão outras, revistas tendo em atenção não só as críticas construtivas que o Autor irá certamente receber, mas também porque, dentro da dinâmica que se lhe é reconhecida estará atento às evoluções tecnológicas que irão ocorrer, pois trata-se de um setor onde os avanços científicos são contínuos e a tecnologia progride a um ritmo cada vez mais veloz.

As novas tecnologias, num mundo globalizado, constituem instrumentos indispensáveis ao sucesso, qualquer que seja a atividade em causa e onde quer que venha a ser exercida. Por isso, se exige uma aprendizagem alicerçada em conhecimentos fundamentais cada vez mais alargados, apoiados em meios de estudo necessários para uma progressão contínua ao longo da vida. A partilha de conhecimentos científicos, técnicos ou profissionais, adquiridos ou gerados deverão ser difundidos, de modo a servirem aos outros, e essa difusão deve ser considerada como um dever de cidadania.

Por isso, a publicação deste livro constitui um exemplo a prosseguir.

Horácio Maia e Costa
(Professor Catedrático da FEUP)

Índice

Prefácio ..... **V**

CAPÍTULO 1 – Tecnologia dos equipamentos **1**
1.1 A evolução dos métodos de fabrico 1
1.1.1 O aparecimento do controlo numérico 2
1.1.2 O que é o controlo numérico 3
1.1.3 O que é a programação 3
1.1.4 Os métodos de programação 4
1.1.5 As vantagens do CNC 4
1.1.6 Âmbito de aplicação 5
1.1.7 Tipos de máquinas CNC 6
1.1.8 As ferramentas utilizadas 6
1.2 O comando CNC 7
1.2.1 Tipos de comandos e controlo dos deslocamentos 7
1.2.2 Componentes de um comando CNC 8
1.2.3 Áreas de trabalho e modos de operação 11
1.3 Tecnologia das máquinas-ferramenta 12
1.3.1 Sistema de controlo de posicionamento 18
1.4 Sistemas de eixos e movimentos 18
1.4.1 Sistemas de coordenadas de dois eixos 18
1.4.2 Sistemas de coordenadas de três eixos 19
1.4.3 Sistemas de coordenadas de algumas máquinas CNC 20
1.4.4 Nomenclatura dos eixos e movimentos 21
1.5 Referenciais e calibração 23
1.5.1 Ponto-zero da máquina 23

1.5.2 Ponto de referência da máquina ... 24
1.5.3 Ponto-zero da peça ... 25
1.5.3.1 Determinação do ponto-zero da peça ... 26
1.5.4 Ponto-referência da ferramenta ... 27
1.5.5 Métodos de determinação das medidas das ferramentas ... 28
1.5.6 Método de calibração com ferramenta de referência ... 28
1.5.7 Utilização do calibrador ... 29

CAPÍTULO 2 – Organização CNC ... 31
2.1 Formas de elaboração de programas ... 31
2.2 Linguagens de programação ... 32
2.2.1 Linguagens normalizadas ... 32
2.2.2 Linguagens conversacionais ... 33
2.3 Sistemas de armazenamento de dados ... 34
2.3.1 Introdução temporária e permanente ... 34
2.3.2 Suportes de armazenamento de dados ... 35
2.4 Especificações do fabricante ... 36
2.5 Dossier de programação ... 37
2.5.1 Ficha de pré-programação ... 37
2.5.2 Folha de programação ... 37
2.5.3 Folha de preparação ou ajustagem ... 38
2.5.4 Ficha de ferramentas e ficha de dispositivos de fixação ... 38
2.6 Preparação do posto de trabalho em CNC ... 40
2.6.1 Análise preliminar ... 40
2.6.2 Elaboração do plano de trabalho ... 41
2.6.3 Seleção dos meios de maquinagem ... 42
2.7 Estabelecimento do processo e das gamas de maquinagem ... 43
2.7.1 Gamas de maquinagem ... 44
2.7.2 Fichas de instrução ... 45
2.8 Dossier de fabricação para a maquinagem de peças mecânicas ... 45
2.9 Determinação do método de fabricação ... 47

CAPÍTULO 3 – Maquinagem em torno CNC ... 49
3.1 Definições e movimentos característicos ... 49
3.2 Operações realizáveis ... 51
3.2.1 As etapas das operações ... 54
3.3 As ferramentas ... 55
3.4 Ângulos característicos e geometria de corte ... 56
3.5 Os materiais das ferramentas ... 59

3.5.1 Classificação ISO para os materiais das ferramentas 60
3.6 A escolha da ferramenta 61
3.6.1 Seleção da ferramenta de corte 62
3.6.2 Critérios de seleção da ferramenta de corte 62
3.6.3 Manutenção e manipulação das ferramentas de corte 64
3.6.4 Chave de códigos para pastilhas (norma ISO) 65
3.6.5 Sistemas de fixação mecânica dos porta-plaquetes 66
3.6.6 Chave de códigos para suportes porta-plaquetes de fixação mecânica (norma ISO) 66
3.7 Formação de apara em torneamento 67
3.8 Os parâmetros de corte 68
3.8.1 Seleção dos parâmetros de corte 70
3.9 Os problemas do torneamento 72

CAPÍTULO 4 – Maquinagem em centro de maquinagem CNC 75
4.1 Definições e características de um centro de maquinagem 75
4.1.1 Tipos e classificações 76
4.1.2 Sistemas de montagem e fixação de peças 77
4.1.3 Sistemas de troca automática de ferramentas 78
4.2 Conceitos sobre ferramentas e porta-ferramentas 79
4.3 Tipos de brocas 81
4.4 Fresas e suas características 82
4.4.1 Fresas porta-plaquetes ou de pastilha recambiável 82
4.4.2 Fresas inteiriças de navalhas 83
4.5 Ângulos característicos e geometria de corte 84
4.5.1 Ângulos característicos 84
4.5.2 Geometria de corte 85
4.5.3 Classificação das fresas pela sua geometria de corte 86
4.6 Operações realizáveis 87
4.6.1 A furação 87
4.6.2 A mandrilagem 88
4.6.3 A roscagem 89
4.7 As operações de fresamento 90
4.7.1 Operações de 2 eixos 91
4.7.2 Operações de 2 ½ eixos 92
4.7.3 Operações de 3 e mais eixos simultâneos 93
4.7.4 As fases do fresamento 93
4.7.5 Os processos de fresamento 94
4.7.6 Os movimentos de fresamento 94

4.8 Formação de apara em fresamento ... 95
4.9 Os parâmetros de corte ... 97
4.9.1 Seleção dos parâmetros de corte ... 98
4.10 Os problemas do fresamento ... 100

CAPÍTULO 5 – Programação manual ... 103
5.1 Deslocamentos e posicionamentos ... 103
5.1.1 Interpolação linear ... 103
5.1.2 Interpolação circular ... 104
5.1.3 Divisão em elementos de contorno ... 106
5.2 Programação CN ... 107
5.2.1 Tipos de informações do programa ... 107
5.2.2 Recolha da informação ... 108
5.2.3 Parâmetros da peça a fabricar ... 108
5.2.4 Parâmetros de corte ... 108
5.3 Os componentes de um programa CN ... 109
5.3.1 Os passos da operação ... 109
5.3.2 Os termos da programação CN ... 110
5.3.3 Funções de programação ... 112
5.4 Funções preparatórias ... 112
5.4.1 Outras funções preparatórias ... 120
5.5 Funções auxiliares ou mistas ... 121
5.6 Tabelas e corretores ... 123
5.6.1 Conceito de corretores ... 123
5.6.2 As tabelas ... 124
5.6.3 Tabelas de corretores ... 124
5.6.4 Tabelas de ferramentas ... 124
5.6.5 Tabelas de materiais ... 125
5.7 Elaboração de programas CN ... 125
5.7.1 Estrutura de um programa CN ... 128
5.8 Exemplos de programação ... 130
5.9 Tabela resumo das funções preparatórias ... 133

CAPÍTULO 6 – Programação torno ... 137
6.1 Funções elementares ... 137
6.1.1 Definição do ponto-zero da peça ... 137
6.1.2 Funções preparatórias ... 138
6.1.3 Compensação do raio da ferramenta ... 140
6.1.4 Programação dos parâmetros tecnológicos ... 143

6.1.5 Estrutura do programa ... 146
6.2 Ciclos de furação ... 147
6.3 Ciclos fixos de torneamento ... 149
6.3.1 Ciclo de facejamento ... 149
6.3.2 Ciclo de desbaste por torneamento cilíndrico ... 149
6.3.3 Ciclo de desbaste por torneamento cilíndrico com rebaixo e acabamento ... 151
6.3.4 Ciclo de acabamento ... 151
6.3.5 Ciclo de desbaste em facejamento ... 152
6.3.6 Ciclo de cópia ... 153
6.3.7 Ciclo de acanalar ou ranhurar ... 154
6.3.8 Ciclo de roscagem ... 155
6.4 Corretores *(offsets)* ... 155
6.4.1 Corretor de compensação do raio da ferramenta ... 156
6.4.2 Corretores programáveis ou assinaláveis ... 156
6.5 Exemplos completos de programação CN ... 157

CAPÍTULO 7 – Programação de centro de maquinagem ... 161
7.1 Funções elementares ... 161
7.1.1 Sistemas de eixos ... 161
7.1.2 Definição do ponto-zero peça ... 163
7.2 Recursos da programação CN ... 164
7.2.1 Movimentos e posicionamentos ... 164
7.2.2 Programação de chanfros e raios tangentes ... 166
7.2.3 Programação em coordenadas polares ... 167
7.2.4 Sistemas de trabalho e corretores de posição ... 168
7.2.5 Compensação do raio da ferramenta ... 168
7.2.6 Corretores programáveis ou assinaláveis ... 173
7.2.7 Exemplo de programação com compensação do raio ... 174
7.2.8 Programação dos parâmetros tecnológicos ... 175
7.3 Ciclos fixos de furos *(canned cycles)* ... 178
7.4 Ciclos fixos de fresamento ... 184
7.5 As operações auxiliares ... 187
7.5.1 Exemplos de programação ... 189
7.6 Exemplos completos de programação ... 196

CAPÍTULO 8 – Programação de sub-rotinas ... 203
8.1 Conceitos sobre sub-rotinas ... 203
8.1.1 Introdução às sub-rotinas ... 203
8.1.2 Conceito de sub-rotina ... 204

8.1.3 Vantagens / desvantagens ... 204
8.1.4 Estrutura de uma sub-rotina ... 205
8.1.5 Níveis de chamada ... 207
8.2 Exemplos de programação ... 207
8.3 Sub-rotinas paramétricas ... 210
8.3.1 Conceito de parâmetro ... 210
8.3.2 Conceito de sub-rotina paramétrica ... 211
8.3.3 Conceito de macro ... 211
8.3.4 Chamada da sub-rotina paramétrica ... 211
8.3.5 Definição de variáveis ... 211
8.3.6 Tipos de variáveis ... 212
8.3.7 Atribuição das variáveis ... 213
8.3.8 Princípio de funcionamento de um contador ... 214
8.4 Desenho lógico do programa ... 214
8.4.1 Exemplificação de um caso estudado ... 215
8.5 Exemplos de programação de sub-rotinas paramétricas ... 217
8.5.1 Sistema Fanuc (macros A) ... 217
8.5.2 Sistema Heidenhain ... 222

CAPÍTULO 9 – Introdução à fresagem de alta velocidade ... 227
9.1 Breves conceitos ... 227
9.1.1 Maquinagem multi-eixos (5 eixos) ... 229
9.2 Regras básicas da maquinagem em MAV ... 231
9.3 Fatores que afetam a precisão na maquinagem de alta velocidade ... 231
9.3.1 Construção da máquina ... 231
9.3.2 Caraterísticas das ferramentas ... 232
9.3.3 Erro de posicionamento ... 234
9.3.4 Velocidade de processamento do controlador ... 235
9.4 Os fundamentos do «erro de arrasto» ... 236

CAPÍTULO 10 – A programação CAD/CAM ... 241
10.1 O processo CAD/CAM/CNC ... 241
10.2 Fases do processo ... 243
10.3 O processo de programação automática CAM ... 245
10.3.1 Importar modelo da peça CAD 3D para o CAM ... 245
10.3.1.1 Formato STL (Standard Triangulated Language) ... 245
10.3.1.2 Formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) ... 246
10.3.1.3 Formato STEP (Standard for Transfer and Exchange of Product data model) ... 246
10.3.2 Definição do sistema de eixos e sua orientação ... 246

10.3.3 Definição do bloco inicial ... 247
10.3.4 Definição das operações ... 248
10.3.5 Seleção de ferramentas e sua geometria ... 248
10.3.6 Geração das trajetórias ... 250
10.3.6.1 Movimentos de corte e estratégias de maquinagem mais adequadas ... 250
10.3.6.2 Estratégias de desbaste ... 251
10.3.6.3 Estratégias de pré-acabamento ... 253
10.3.6.4 Estratégias de acabamento ... 254
10.3.6.5 Modos de entrada da ferramenta ... 257
10.3.6.6 Modos de ligação entre os percursos ... 260
10.3.6.7 Seleção dos parâmetros de corte ... 262
10.3.6.7.1 Profundidade de corte (*stepdown*) ... 262
10.3.6.7.2 Largura de corte (*stepover*) ... 262
10.3.6.7.3 Velocidade de corte e velocidade de avanço ... 263
10.3.7 Simulação virtual da maquinagem e análise de colisões ... 264
10.3.8 Geração do programa CN ... 265
10.3.9 Pós-processamento ... 265
10.3.10 Envio do programa para a máquina CNC ... 266
10.3.11 Execução da peça ou modelo ... 266
10.4 A programação CADCAM na MAV ... 267

CAPÍTULO 11 – Controlo de processo em máquinas CNC ... 271
11.1 Conceitos e fundamentos ... 271
11.2 Sistemas automáticos de calibração de ferramentas ... 273
11.3 Sistemas de centragem e posicionamento de peças ... 274
11.4 Sistemas de controlo dimensional e geométrico durante o processo ... 275
11.4.1 Fundamentos da metrologia 3D ... 275
11.4.2 Tolerância geométrica ... 276
11.4.3 Toleranciamento GD&T ... 276
11.4.3.1 Elementos isolados ... 277
11.4.3.2 Elementos relacionados ... 277
11.5 Sistemas de aquisição de coordenadas ... 278
11.5.1 Sistemas de contato ... 278
11.5.2 Sistemas óticos ... 278
11.5.3 A estratégia de medição ... 279
11.5.4 Técnicas efetivas de medição ... 279

CAPÍTULO 12 – Tecnologia de eletroerosão ... 281
12.1 Introdução ... 281

12.2 Princípio de funcionamento da eletroerosão por penetração ... 282
12.2.1 As fases da operação ... 283
12.2.2 Fatores de rendimento da operação ... 284
12.2.3 Fatores: intensidade de impulso, tempo de impulso, tempo de pausa e efeito de polaridade ... 284
12.2.4 Regulação dos fatores e os processos de trabalho ... 286
12.3 Os elétrodos ... 286
12.3.1 Elétrodos dinâmicos e eletroerosão orbital ... 286
12.3.2 Elétrodos múltiplos ... 287
12.4 Os dielétricos e os processos de limpeza ... 287
12.5 Outros tipos de eletroerosão ... 289
12.5.1 Eletroerosão com elétrodos rotativos ... 289
12.5.2 Eletroerosão por fio ... 290
12.6 Vocabulário empregue em eletroerosão ... 291

Anexos ... 295
Lista de funções G – Controlador Fanuc 0T ... 295
Lista de funções G – Controlador Fanuc 0M ... 297
Lista de funções M – Controlador Fanuc 0T / 0M ... 299
Lista de funções ISO – FAGOR ... 300

Bibliografia ... 305

Tecnologia dos equipamentos

1

1.1 › A evolução dos métodos de fabrico

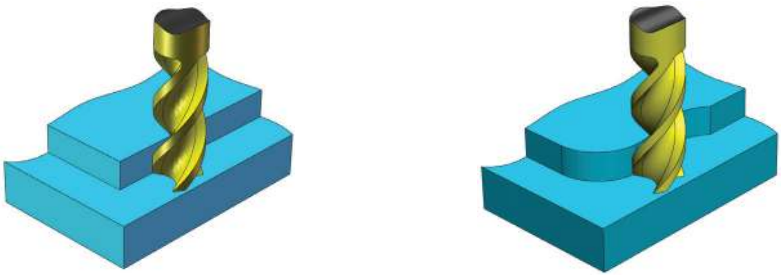
A máquina-ferramenta tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico do mundo, a tal ponto que não exageramos se dissermos que a taxa de desenvolvimento das máquinas-ferramenta controla diretamente o desenvolvimento industrial. Com a utilização da máquina-ferramenta tem-se realizado, de forma prática, maquinaria de todo tipo que, ainda que concebida e projetada, não podia ser comercializada pois não existiam meios adequados para a sua fabricação industrial.

Um exemplo característico é a máquina a vapor. A máquina a vapor ainda que inventada por James Watt em 1766, não teve o desenvolvimento conveniente até 1776, ano em que John Wilkinson construiu a primeira mandriladora, graças à qual foi possível fabricar as máquinas a vapor em grande escala. A partir desse momento o desenvolvimento industrial foi acelerado. As elevadas potências disponíveis em numerosas máquinas de vapor que estavam a ser construídas, permitiram a produção industrial de uma ampla gama de produtos manufaturados em grandes quantidades e a preços mais acessíveis.

Nos sistemas de produção convencionais, usados na maior parte das fábricas, as máquinas-ferramenta do mesmo tipo estão agrupadas, sendo cada máquina operada independentemente. As operações de maquinagem necessárias à fabricação de uma peça, dividem-se no número de operações individuais, sendo cada qual executada na máquina mais adequada. Com o objetivo de se obter uma maior eficácia e rentabilidade, muitos trabalhos são organizados de tal forma que os grupos de peças que requerem operações similares, são fabricados em máquinas dispostas sequencialmente. Assim por exemplo, se para a obtenção final de um conjunto de peças forem necessárias realizar operações de fresamento, mandrilagem e furação, parece lógico que se alcançará maior eficácia se todas as máquinas-ferramenta necessárias para realizar estas operações estiverem agrupadas.

b) Controlo de Percurso ou «Paraxial» – Este sistema tem a possibilidade, para além do posicionamento em movimento rápido, realizar também um deslocamento paralelo aos eixos de coordenadas, com velocidade de maquinagem controlada, acionando um eixo de cada vez.

c) Controlo «Contínuo» ou de Trajetória – Este sistema possibilita executar, para além do posicionamento em movimento rápido, uma trajetória perfeitamente definida tanto na sua forma como na velocidade de avanço (execução de trajetórias lineares e circulares). Um comando de trajetória pode substituir um comando de Ponto a Ponto ou Paraxial. Num comando de uma máquina CNC, para além do número de eixos que contém, importa saber quantos podem ser acionados simultaneamente através deste.



a) Sistema de controlo paraxial

b) Sistema de controlo de trajetória

Figura 1.5 › Dois dos sistemas de controlo mais utilizados atualmente

1.2.2 › Componentes de um comando CNC

Os elementos de um comando CNC são:

a) Processador – Os comandos CNC são constituídos por um processador do qual fazem parte um ou mais microprocessadores e memórias. No microprocessador são processados os dados do programa CN e os dados de ajustagem existentes em memória, que são posteriormente transferidos à máquina através de impulsos de comando, conforme é apresentado no esquema da figura 1.6.

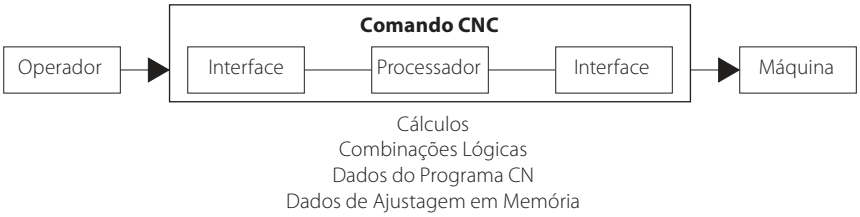


Figura 1.6 › Esquema da função do processador central

Organização CNC

2

2.1 › Formas de elaboração de programas

Na elaboração de programas CNC são diversos os caminhos que podem ser seguidos, dependendo de como a mesma está organizada na empresa e que suportes adicionais de processamento de dados estão disponíveis. A terminologia normalmente aplicada na programação pode tomar as seguintes formas:

a) Programação no Planeamento

Utiliza-se quando:

- Os comandos disponíveis não oferecem o necessário conforto de operação;
- As peças a serem maquinadas são de geometria extremamente complexa;
- Existem muitas máquinas CNC similares na fábrica;
- Não há pessoal suficientemente qualificado na oficina;
- A programação pode ser feita por recurso a sistemas CAM ou CAD/CAM.

b) Programação na Oficina

Utiliza-se quando:

- As máquinas CNC oferecem o necessário conforto de operação;
- As peças a serem maquinadas não são de geometria complexa;
- Existem poucas máquinas CNC na fábrica;
- Trata-se de fabricação unitária;
- O pessoal da oficina é altamente qualificado;
- Depende da rapidez das correções e otimizações de programas.

Muitos comandos foram concebidos para programação em oficina, porém constatam-se grandes diferenças no que diz respeito à operação dos mesmos. Na oficina, a maioria dos controladores oferece

A figura 2.1 ilustra exemplos de folhas de preparação e de programação.

Figura 2.1 › Folhas de preparação e de programação

Maquinagem em torno CNC

3

3.1 › Definições e movimentos característicos

O Torno CNC é uma máquina-ferramenta utilizada para a obtenção de peças de revolução, permitindo a execução de superfícies cilíndricas, cónicas, boleadas, abertura de roscas ou hélices. O processo consiste em fazer rodar a peça em torno de um eixo e pela aproximação da ferramenta imóvel de encontro à peça, origina o corte do material, obtendo-se deste modo o perfil da superfície desejada.

Durante este processo realizam-se três movimentos característicos que possibilitam a produção da peça:

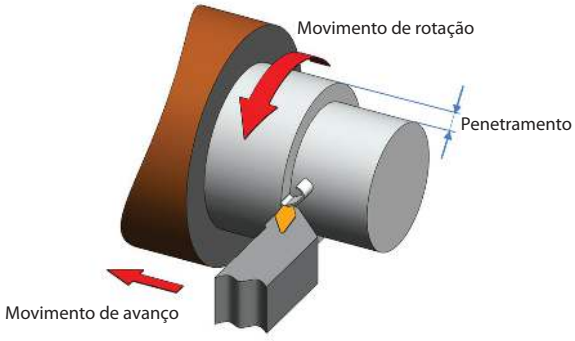


Figura 3.1 › Movimentos realizados pelo Torno

› **Movimento Principal ou de Corte** – produz-se pela rotação da peça que se move a uma determinada velocidade de corte. Expressa-se em metros por minuto (no caso da velocidade linear ou de corte) ou em rotações por minuto (no caso de se pretender indicar a velocidade angular).

h) **Mandrilagem** – consiste em corrigir a dimensão de um furo de modo a garantir um determinado diâmetro e o melhoramento do acabamento superficial das suas paredes fazendo uso de um mandril. Sendo uma operação bastante delicada, deve-se ter em atenção, não só o valor das velocidades de rotação e de avanço, como também da sobreespessura deixada para a mandrilagem. Esta deverá estar dentro de valores recomendados para evitar a quebra do mandril ou um fraco acabamento das paredes interiores do furo. Tal como na furação, é muito importante o posicionamento e alinhamento do mandril em relação ao eixo do furo.

i) **Roscagem a Macho ou a Caçonete** – consiste na abertura de roscas no torno com o auxílio de machos de roscar ou caçonetes. Estas ferramentas devem ser montadas em acessórios próprios que permitem compensar a sua inércia e possibilitem o amortecimento necessário, evitando danificar a ferramenta ou a peça. A velocidade de avanço por rotação é igual ao passo mas esta não pode ultrapassar o valor máximo permitido para a máquina. É também importante garantir o alinhamento da ferramenta, macho ou caçonete, com a peça e o seu eixo de rotação.

j) **Recartilhagem** (figura 3.10) – consiste numa operação de gravação por esmagamento de umas «serrilhas» recorrendo ao uso de uns roletes estriados, direitos para recartilhagem direita, picados, em cruz, inclinados ou com roletes contrapostos para a recartilhagem cruzada. Esta operação é normalmente executada em zonas das peças que poderão estar sujeitas a operações de aperto e desaperto manuais, peças de gravação ou por questões meramente estéticas.

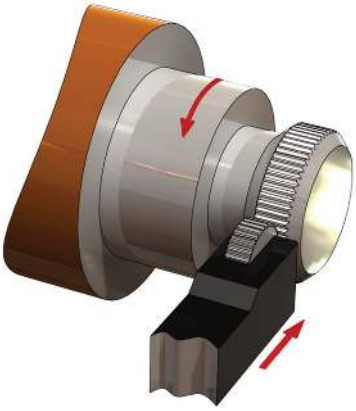


Figura 3.10

3.2.1 › As etapas das operações

As operações de torneamento podem ser compostas de pelo menos duas etapas distintas: o desbaste e o acabamento. Contudo, pode ainda existir uma etapa prévia ao desbaste designada por pré-desbaste e uma outra entre o desbaste e o acabamento, designada por pré-acabamento ou semi-acabamento.

a) **Desbaste** – é a fase da operação na qual se remove o maior volume de material e se aproxima a peça do seu perfil final. Durante esta fase o objetivo consiste na remoção do maior volume de apara possível no menor espaço de tempo. Por este facto, existem dois fatores importantes a considerar: a secção da apara e a velocidade de corte. Para que a secção da apara seja máxima e a vida útil da

e) Diamante – Existem dois tipos de ferramentas diamantadas. Uma é fabricada à base do diamante puro, tem um baixo desgaste mas é extremamente frágil, o que limita a sua utilização. A outra consiste num composto de carbonetos e pequenos cristais de diamante. Este tipo de material permitiu melhorar a resistência ao choque sem perda significativa das outras qualidades. As ferramentas diamantadas permitem elevadas velocidades de corte e muito boa qualidade de acabamento superficial das peças, mantendo uma vida útil da aresta de corte muito superior à obtida pelos outros materiais.

3.5.1 › Classificação ISO para os materiais das ferramentas

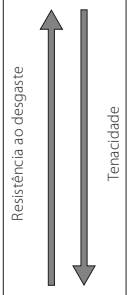
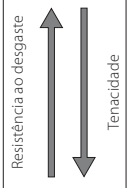
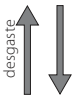
Código	Sub-grupo	Cor	Materiais	Operações e condições	Observações
P	01	AZUL		Torneamento e mandrilagem de acabamento: grande velocidade de corte, pequena secção de apara, precisão de cotas e bom acabamento superficial. Trabalho sem vibrações.	
	10		Materiais ferrosos de apara longa	Torneamento, cópia, fresamento e roscagem. Grande velocidade de corte e secções de apara pequenas ou médias.	
	20			Torneamento, cópia e fresamento. Velocidade de corte e secções de apara médias. Sangramento de secção pequena.	
	30		Aços, aços vazados, ferros maleáveis, fundição nodular	Torneamento, fresamento e sangramento. Média ou pequena velocidade de corte. Secções de apara médias ou grandes. Condições de corte desfavoráveis.	
	40			Torneamento e sangramento. Baixa velocidade de corte. Grandes secções de apara. Condições de corte desfavoráveis.	
	50			Pequenas operações de corte, exigindo maior tenacidade e grandes ângulos de corte.	
M	10	AMARELA	Materiais ferrosos de apara longa ou curta.	Torneamento a média ou grande velocidade de corte e secções de apara pequenas ou médias. Sem vibrações.	
	20				
	30		aços inoxidáveis, aços vazados, aços manganês, aços de corte livre	Torneamento e fresamento. Velocidades de corte e secções de apara médias.	
	40		ligas de ferros fundidos, ferros maleáveis	Torneamento, fresamento e sangramento. Velocidades de corte médias e secções de apara médias ou grandes.	
			Aplicações intermédias	Torneamento em máquinas automáticas.	
K	01	VERMELHA	Materiais ferrosos de apara longa	Torneamento, acabamentos, fresamento e mandrilagem.	
	10				
	20		ferros fundidos, fundição maleável e em coquilha, aços endurecidos	As mesmas operações mais a furação e a brochagem.	
	30		Materiais não ferrosos, plásticos e madeiras	As mesmas operações mas exigindo uma grande tenacidade dos carbonetos.	

Figura 3.15 › Quadro da classificação ISO para a maquinagem com metal duro sinterizado

Maquinagem em centro de maquinagem CNC

4

4.1 › Definições e características de um centro de maquinagem

Um centro de maquinagem CM (figura 4.1) é uma máquina-ferramenta baseada numa fresadora, mas que pode apresentar em relação a esta um conjunto de funções e possibilidades, como por exemplo:

- troca automática de ferramentas *(Automatic Tool Changer – ATC);*
- mesas amovíveis de trabalho *(Pallets*);
- sistema de calibração e detetação automática de quebra da ferramenta *(Sensor Broken Tool*);
- eixos suplementares, rotativos e outros *(4 e 5 eixos);*
- blindagens exteriores e transportador de limalha *(Chip Conveyor*).

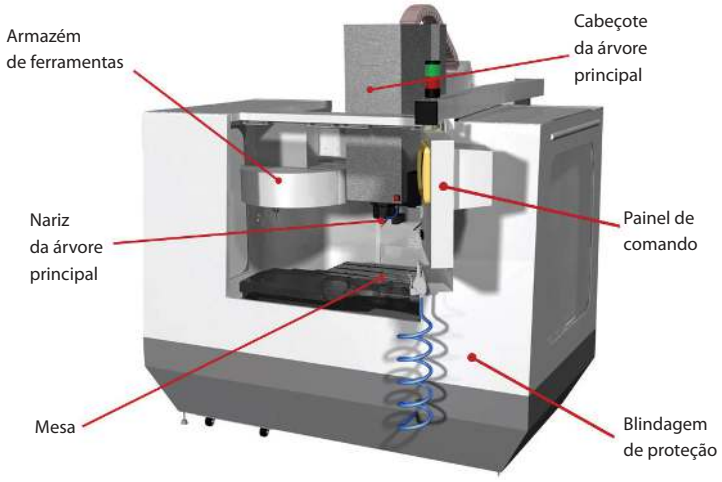
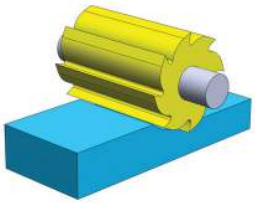


Figura 4.1 › Centro de maquinagem e sua nomenclatura

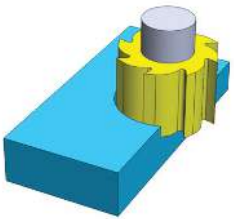
4.7.5 › Os processos de fresamento

Na obtenção de uma superfície por fresamento, existem fundamentalmente dois processos:

O **Fresamento Cilíndrico** – caracteriza-se pelo eixo de rotação da ferramenta trabalhar paralelamente à superfície a maquinar, sendo o corte realizado na periferia da superfície lateral de corte da ferramenta. Deste modo, a superfície maquinada poderá apresentar-se levemente ondulada. (*Por exemplo quando se utiliza uma fresa de disco*).



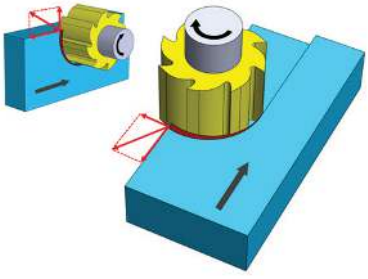
O **Fresamento Frontal** – caracteriza-se pelo eixo de rotação da ferramenta trabalhar perpendicularmente à superfície a maquinar, sendo o corte realizado quer nas partes laterais da ferramenta quer pelo topo da mesma. Esta forma de fresamento origina, depois da maquinagem, o aparecimento de uma superfície raiada. (*Por exemplo quando se utiliza uma fresa de topo*).



4.7.6 › Os movimentos de fresamento

Os movimentos de fresamento são caracterizados pelo movimento da fresa em relação à peça, distinguindo-se dois tipos diferentes. No fresamento discordante a fresa gira em sentido contrário ao avanço da mesa e no fresamento concordante a fresa gira no mesmo sentido do avanço da mesa.

No **Fresamento Discordante** – existe o crescimento da espessura da apara desde zero até à espessura máxima, o que resulta que antes da aresta da fresa iniciar o corte esta tende a escorregar pelo material com uma certa pressão. Devido a esta pressão, tanto a peça como a ferramenta cederão e tendem a afastarem-se um pouco. A distância durante a qual a aresta escorrega, antes de iniciar o corte, resulta das propriedades do material da peça, da sua forma, da sua fixação e da rigidez da máquina. Este fenómeno de escorregamento provoca um maior desgaste na ferramenta do que o corte propriamente dito.



Programação manual

5

5.1 › Deslocamentos e posicionamentos

Para a maquinagem de uma peça as ferramentas deslocam-se nos percursos programados, e para tal, o controlo executa um cálculo interno denominado *Interpolação*.

Durante o deslocamento, os eixos respetivos são constantemente controlados, de tal forma que a ferramenta não se desvie além da tolerância.

5.1.1 › Interpolação linear

Se uma ferramenta se deslocar em linha reta de um ponto inicial para um determinado ponto final estamos perante uma interpolação linear. Assim, para uma interpolação linear, o controlo calcula uma série de pontos que constituem uma linha reta de ligação entre as duas posições da ferramenta.

Quando o deslocamento se realiza por movimento conjugado de um ou dois eixos, estamos perante uma trajetória no plano; quando o deslocamento se realiza por movimento conjugado de mais de dois eixos estamos perante uma trajetória no espaço.

Para programar um deslocamento linear basta definir o ponto final ou o ponto de chegada do movimento. Este ponto pode ser definido pelas suas coordenadas cartesianas em medidas relativas ou absolutas (figura 5.1 a) e b)), ou através de coordenadas polares (figura 5.2 b).

G00 – Posicionamento (movimento rápido)

A instrução de movimento rápido de posicionamento é descrita pelo termo G00. Através desta função, os eixos movimentam-se para a posição de comando à velocidade máxima, pelo que se torna necessário programar as coordenadas do ponto de chegada.

SINTAXE: G00 (X ± 4.3) (Y ± 4.3) (Z ± 4.3)

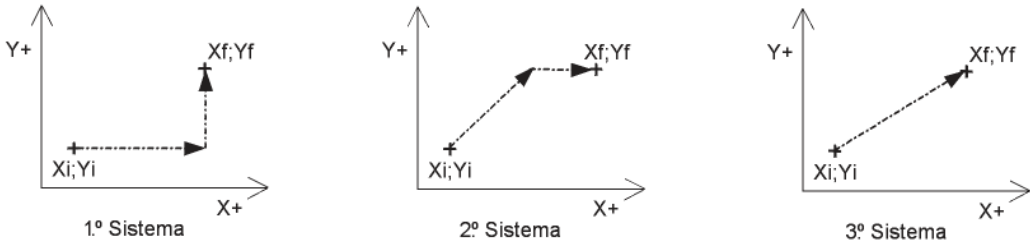


Figura 5.6 › Sistemas de posicionamento rápido

Nota:

› O movimento rápido de posicionamento pode fazer-se de três formas distintas conforme o tipo de comando da máquina (figura 5.6)

1.º Sistema *– A máquina desloca um eixo de cada vez conforme o que estiver estabelecido nos parâmetros, por exemplo 1.º o eixo do X, depois o eixo Y e finalmente o eixo Z. A máquina desloca-se segundo linhas retas paralelas a cada um dos eixos respetivos.*

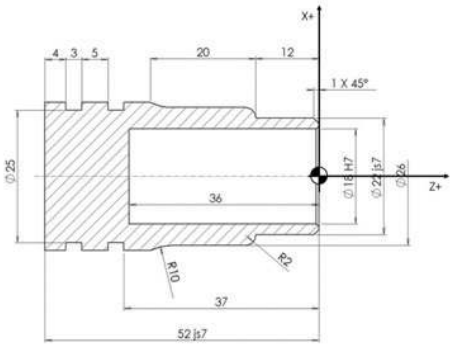
2.º Sistema *– A máquina movimenta-se à máxima velocidade dos eixos, o que leva à obtenção de uma linha oblíqua (aproximadamente a 45º), imobilizando o eixo que atingir a respetiva coordenada e prosseguindo o deslocamento no(s) eixo(s) restante(s).*

3.º Sistema *– A máquina movimenta-se em todos os eixos simultaneamente a velocidades sincronizadas de forma a atingir a coordenada em cada um dos eixos ao mesmo tempo. Deste modo, a máquina movimenta-se segundo uma linha reta entre o ponto inicial e o ponto de chegada.*

REGRAS DE UTILIZAÇÃO:

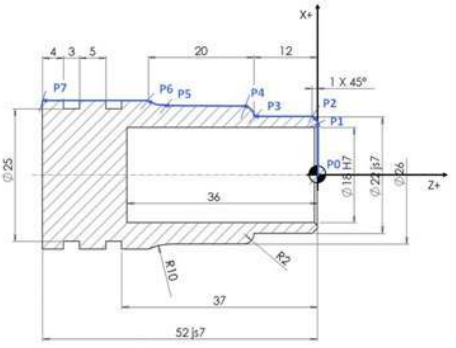
› Pode ser programado em modo absoluto ou incremental;
› Não pode ser programado no mesmo bloco juntamente com G01, G02, G03;
› O comando de velocidade de avanço (F) não afeta a velocidade de posicionamento em G00.

Definição do ponto-zero da peça



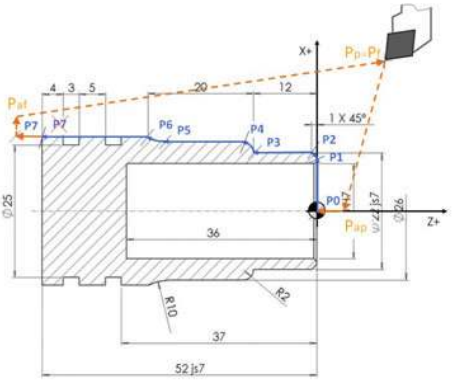
Divisão em elementos simples de contorno

Numeração da sequência dos pontos terminais de cada elemento do contorno



Definição das trajetórias e deslocamentos da ferramenta

Elemento geométrico	Ponto	(X; Z)
POS	PP	(50; 50)
POS	Pap	(0; 3)
LIN	P0	(0; 0)
LIN	P1	(20; 0)
LIN	P2	(22; -1)
LIN	P3	(22; -12)
CCW	P4	(26; -14) R2
LIN	P5	(26; -27,641)
CW	P6	(28; -32) i 10 k 0
LIN	P7	(28; -55)
POS	Paf	(32; -55)
POS	Pf	(50; 50)



Cálculo e determinação do valor das coordenadas.

Listagem dos pontos.

Programação torno

6

6.1 › Funções elementares

Este capítulo pretende dar um conhecimento básico de programação CNC e suas aplicações em Torno. Não pretende ser um estudo aprofundado de todas as gamas de uso da máquina, mas uma visão geral de potenciais situações que possam surgir aos programadores CNC.

A formatação do programa é um elemento importante da programação CNC. Cada indivíduo irá formatar os seus programas de forma diferente. No entanto, o programa precisa ser consistente e eficiente. Por exemplo: num bloco de programa CN, a máquina vai ler as coordenadas dos eixos Z ou X em qualquer ordem, mas para ser consistente, deve-se escrever primeiro a coordenada X, e depois a Z.

6.1.1 › Definição do ponto-zero da peça

O ponto-zero da peça é definido pelo programador e é a partir deste que são definidas as coordenadas do programa. Recomenda-se a colocação do ponto zero da peça de tal forma que se possam facilmente transformar as medidas do desenho da peça em valores de coordenadas.

Os movimentos da ferramenta são realizados no plano XZ, sendo que o eixo Z coincide com o eixo da árvore principal e o X é a medida do raio ou diâmetro e aumenta à medida que o diâmetro aumenta.

As duas posições mais utilizadas para definir o ponto-zero da peça são o topo da peça mais próximo da face da bucha de aperto ou o topo mais afastado desta (figura 6.1).

se torneiam inclinações ou raios surgem desvios na superfície, em resultado da posição relativa entre a aresta de corte da ferramenta e o seu ponto de referência obtido na calibração.

Durante o torneamento de contornos com inclinações e raios este desvio pode ser compensado através da utilização da função de compensação automática do raio da ferramenta.

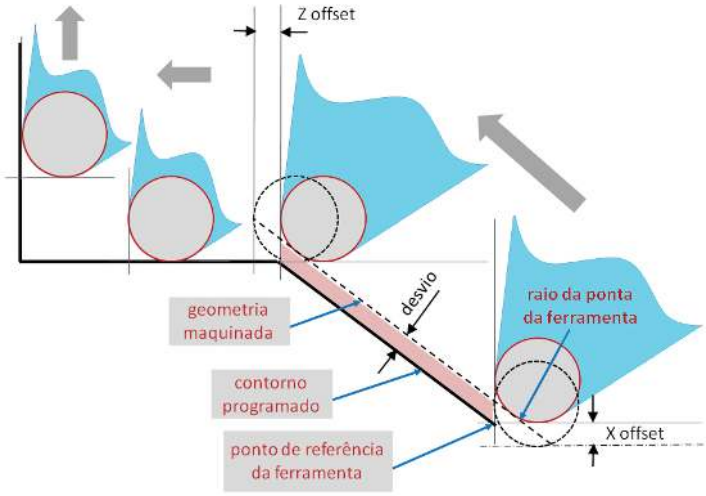


Figura 6.2 › Desvio entre contorno programado e geometria obtida no caso de inclinações

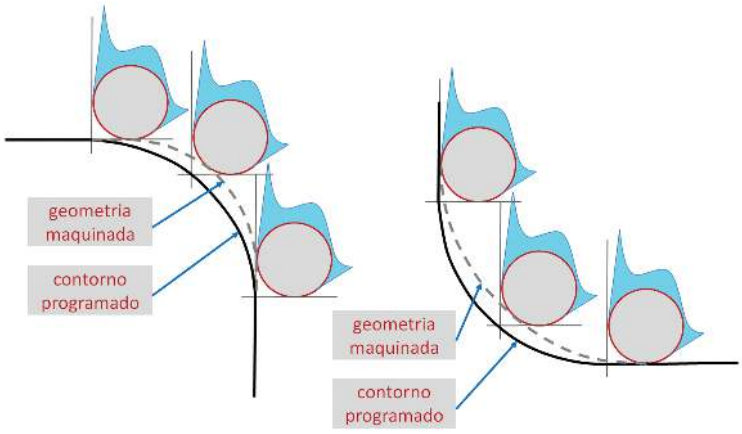
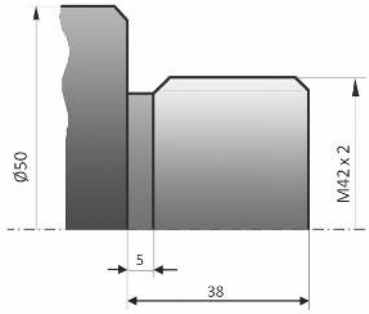


Figura 6.3 › Desvio entre contorno programado e geometria obtida no caso de raios internos e externos

6.3.8 › Ciclo de roscagem

São ciclos que permitem a abertura de roscas a buril paralelas ou progressivas de diferentes passos e diâmetros, bastando para o efeito indicar os respetivos parâmetros característicos da rosca, como por exemplo o seu passo, a altura, o seu comprimento, etc.

G76 – Ciclo de roscagem (exemplo - Fanuc OT)



O 1000	G76 – CICLO DE ROSCAGEM
G21 ...	P020060 ---- Ângulo da rosca/âng. de saída
T0101	| |--------- % do passo para saída
G97 S1000 M3	|---------- N.º de passagens de acabamento
G0 X32 Z4 M8	Q100 – Profundidade mínima por passagem
G76 P020060 Q100 R0.05	R 0.05 – Sobreespessura para acabamento
G76 X21.548 Z-36 P1226 Q300 F2.0	X 21.548 – Diâmetro interior da rosca
G00 X32 Z4 M9	Z-36 – Comprimento da rosca
...	P1226 – Profundidade da rosca (em raio)
M30	Q300 – Profundidade da 1.ª passagem
	F2.0 – Passo da rosca

6.4 › Corretores (*offsets*)

É dado pela distância entre os diversos pontos de referência de cada uma das ferramentas e o seu ponto de assento. Para se obter o valor correto deste corretor, no caso dos Tornos, o operador deverá indicar ao controlo da máquina elementos como o comprimento e a dimensão transversal da ferramenta.

A determinação das medidas das ferramentas é feito por um trabalho prévio a que se designa de calibração das ferramentas e consiste na recolha de todos os elementos referentes a cada uma das ferramentas e na indicação desses elementos ao controlo.

Nota:

› O assunto da calibração de ferramentas foi tratado no capítulo 1.5.5, 1.5.6 e 1.5.7

Programação de centro de maquinagem

7

7.1 › Funções elementares

7.1.1 › Sistemas de eixos

Os centros de maquinagem dispõem no mínimo de três eixos (X, Y e Z), sendo que o eixo Z coincide com a árvore principal da máquina.

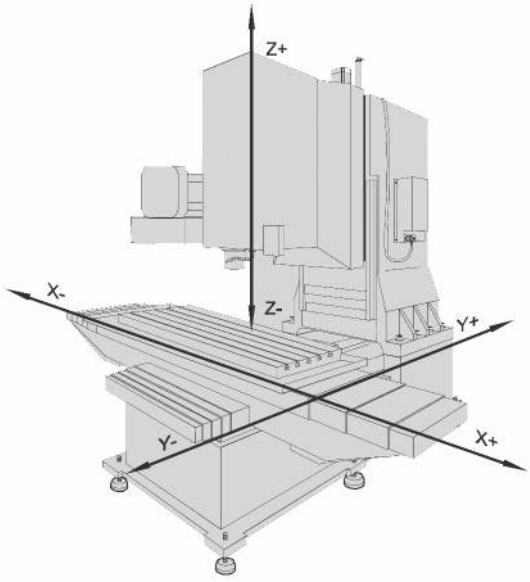


Figura 7.1 › Sistema de eixos de um centro de maquinagem vertical de 3 eixos

7.2.4 › Sistemas de trabalho e corretores de posição

Os termos G54, G55, G56, G57, G58, G59 permitem fixar diferentes posições de origem do sistema de trabalho. A programação de um destes códigos irá selecionar uma nova origem do referencial de trabalho, cujo posicionamento em relação ao ponto-zero da máquina deverá ser inserida na Tabela de *Offsets*.

Assim, designa-se por corretor de posição, o valor atribuído à distância entre o ponto-zero da máquina e o ponto-zero da peça, e é normalmente estabelecido quando se posiciona pela primeira vez a peça na máquina ou após o realinhamento dos eixos.

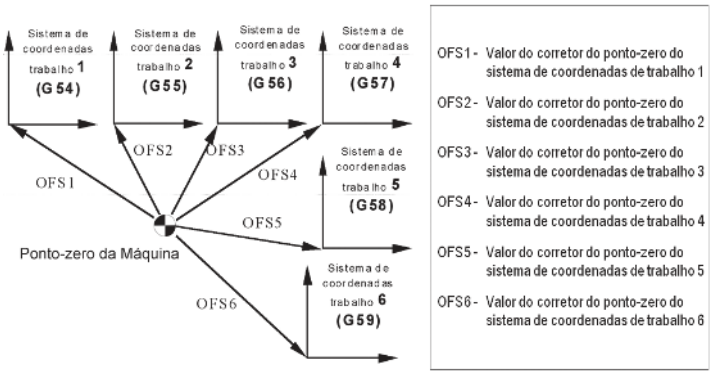


Figura 7.4 › Sistemas de coordenadas de trabalho (adaptado do manual Fanuc)

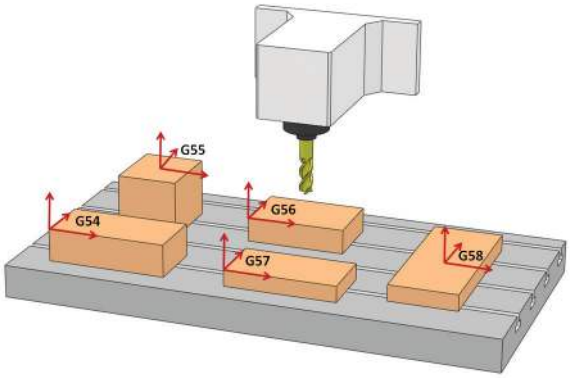


Figura 7.5 › Exemplificação da utilização dos sistemas de coordenadas de trabalho

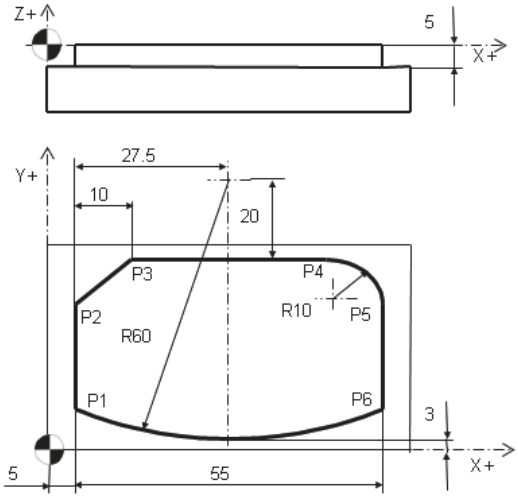
7.2.5 › Compensação do raio da ferramenta

A compensação do raio da ferramenta é utilizada para compensar o posicionamento do eixo da ferramenta face ao contorno programado. A programação de contornos com geometrias complexas pode envolver substanciais cálculos trigonométricos devido à existência de ângulos, linhas tangentes aos arcos,

7.2.7 › Exemplo de programação com compensação do raio

Programação de um contorno com compensação do raio

Exercício para fresadora com controlador Fanuc 0M



O 2000		
N10	G28 G91 X0 Y0 Z0	Ponto de segurança / Ponto-zero da máquina
	G90 G00	
	T01 M06	Chamada da ferramenta
	G54 G00 X-20. Y-20.S1500 M03	Sist. de trab. / Ponto de início / Rotação da árvore
	G43 Z3. H01	Compensação do comprimento da ferramenta
	M08	Ligar óleo de refrigeração
	G01 Z-5. F200	Profundidade de corte
N80	G41 D11 X5. Y5 F500	Compensação do raio da fresa / Início do contorno
	Y33.	
	X15. Y43.	
	X50.	
	G02 X60. Y33. R10.	
	G01 Y9.673.	
	G02 X5. I-27.5 J53.327	Cálculo do I e J (ver pág. 106)
	X-5.	
	G40 D00 X-20. Y-20.	Cancelar compensação do raio / Fim do contorno
	G00 Z3.	Plano de segurança
	G28 G91 Z0	Ponto Z zero
	G49 H00	Cancelar compensação do comprimento
	M30	Fim de programa

Programação de sub-rotinas

8

8.1 › Conceitos sobre sub-rotinas

8.1.1 › Introdução às sub-rotinas

Até ao momento, o nível da programação descrita fica-se pela simples elaboração manual de programas, em que todas as operações executadas durante a maquinagem de determinada peça têm de ser previstas ordenadamente e posteriormente inseridas no programa CN.

A programação CN de uma peça complexa pode originar um número muito elevado de instruções, fazendo com que toda a programação se torne demasiado extensa, com consequente vulnerabilidade ao aparecimento de erros. Por outro lado, podem ocorrer cálculos matemáticos mais ou menos complexos cuja solução depende de consulta de tabelas ou do uso de calculadora.

Como já vimos anteriormente, por vezes existe uma ou várias operações que podem ser repetidas durante a execução de uma mesma peça. Para evitar, que de cada vez que quiséssemos repetir uma operação, tivéssemos de a programar novamente, pode-se recorrer a um processo onde a programada operação (ou operações) que pretendemos repetir é feita individualmente.

Esta forma de programação consiste em, durante a elaboração do programa CN, no momento onde aparece a operação que é necessário repetir, introduzir uma instrução que vai chamar os blocos que definem essa operação e que foram, para o efeito, programados separadamente. Após a execução destes, o comando volta ao bloco imediatamente a seguir àquele onde recebeu a instrução de chamada da operação, e continua normalmente o resto do programa.

Ao conjunto de blocos que definem uma operação individualmente, com possibilidade de serem chamados uma ou várias vezes, designa-se por sub-rotina.

Uma sub-rotina pode ser programada para fazer exatamente a mesma operação de maquinagem, incluindo comprimentos, profundidades de corte, avanços, velocidades de corte, etc. Com a introdução

As variáveis comuns podem ser divididas em dois grupos:

› **Variáveis «100» – #100 até #149** – São variáveis temporais, usadas essencialmente para cálculos, podendo o seu valor variar durante a execução do programa. O seu valor é colocado a zero quando se desliga a máquina.

› **Variáveis «500» – #500 até #531** – São variáveis de referência cujo valor mantém-se fixo ao longo da execução do programa. Ao contrário das anteriores, ficam armazenadas em memória, mantendo-se inalteráveis mesmo quando a máquina é desligada.

c) Variáveis de Sistema

São definidas como variáveis com uma função específica, não podendo ser utilizadas como variáveis comuns.

Exemplo:

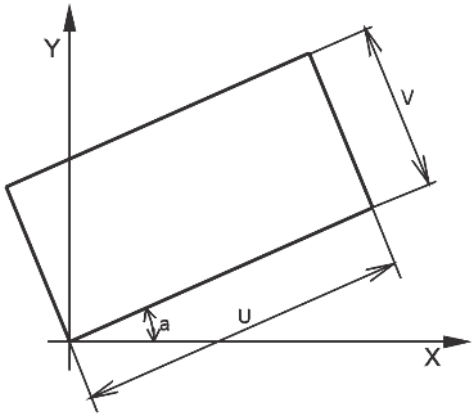
Relógio (Informação) – Através das variáveis #3011 e #3012 é possível obter a informação do ano, mês, dia, hora, minuto e segundo.

Tipo	Variáveis do sistema
Ano, Mês, Dia	#3011
Hora, Minuto, Segundo	#3012

Para a data, 20 de maio de 1997 ⇒ #3011 = 19970520

Para a hora, 16: 17: 05 ⇒ #3012 = 161705

Exemplo: Retângulo



Introdução à fresagem de alta velocidade

9

9.1 › Breves conceitos

Este livro centra-se na tecnologia CNC, conhecida como "convencional" e na programação manual, mas esta seria uma obra incompleta se não apresentasse umas noções das tecnologias mais recentes, nomeadamente a maquinagem a alta velocidade e a programação automática assistida por computador, vulgarmente designada por programação CAM *(Computer Aided Manufacturing)*.

A maquinagem de alta velocidade (MAV), igualmente designada pela terminologia anglo-saxónica HSM *(High Speed Machining)* teve a sua origem na indústria aeronáutica, devido à necessidade de remover grandes volumes de material, normalmente alumínio, de componentes complexos no menor espaço de tempo possível. As capacidades das máquinas MAV, foram posteriormente aproveitadas para trabalhar os aços duros (50-58 HRc), necessários para a indústria de moldes e matrizes, que conjuntamente com a possibilidade de se obter excelentes superfícies de acabamento, produziu um enorme impato em todo o setor.

Por exemplo, a quantidade de trabalho executado por eletroerosão foi significativamente reduzido, assim como o polimento manual, que em alguns casos foi completamente eliminado. Naturalmente, algumas operações continuam a ser feitas por eletroerosão, mas o fabrico de elétrodos de cobre ou grafite é outra das aplicações que beneficiam das vantagens da MAV.

Hoje existem diferentes aplicações para os equipamentos MAV como: a eletrónica, a ótica e a tecnologia médica, onde a maquinagem de alta velocidade é usada para produzir diversos elementos pequenos e muito complexos.

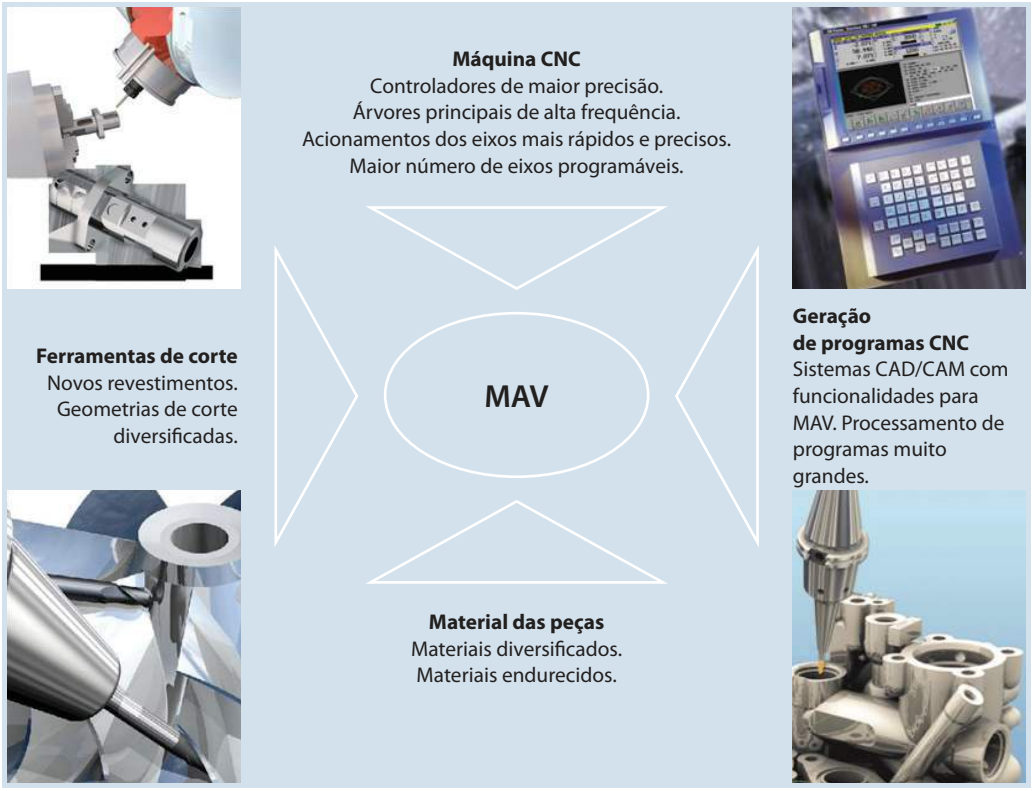


Figura 9.1 › Alterações introduzidas pela tecnologia MAV

O desenvolvimento de novos carbonetos sinterizados e materiais cerâmicos utilizados nas ferramentas de corte aumentou as potenciais velocidades de corte. Este desenvolvimento conduziu à construção de "árvores de alta velocidade" munidas com novos sistemas de rolamentos com lubrificação, progressos no sistema de refrigeração da árvore e estruturas das máquinas-ferramenta mais rígidas, para possibilitar a aplicação de altas velocidades de corte. A alta produtividade, eliminação de vibrações e o aumento da vida útil da ferramenta foram os principais objetivos destes desenvolvimentos.

Como resultado, no atual estado de desenvolvimento tecnológico das máquinas, o fator mais determinante na limitação da velocidade de avanço em contorno é definido pelos requisitos de precisão do perfil. A reprodução com precisão de uma geometria complexa resulta de combinação de fatores cuja complexidade aumenta proporcionalmente com o número de eixos utilizados na produção da peça.

São várias as vantagens da utilização da tecnologia MAV, mas esta não deve ser introduzida sem uma conveniente adequação dos meios e recursos.

A programação CAD/CAM

10

10.1 › O processo CAD/CAM/CNC

Para se manterem rentáveis e competitivas num mercado cada vez mais globalizado, as empresas devem examinar todos os aspetos relacionados com o projeto e o fabrico. A automatização pode desempenhar um papel importante no encurtar de prazos de fabricação, melhorar o desempenho da qualidade e tornar o processo mais consistente. Automatizar a programação CNC de peças complexas é uma das áreas que pode gerar algumas economias significativas. Os processos manuais de programação CNC apresentam risco de erro muito elevado pois dependem fortemente da competência do responsável pela elaboração do programa peça, mesmo recorrendo a sistemas de programação interativos ou de programação conversacional.

Os sistemas de programação automática, normalmente designados por sistemas CAD/CAM/CNC, podem desempenhar um papel muito importante não só na minimização do erro, como encurtar prazos de fabricação e melhorar a qualidade, tornando o processo mais consistente. Automatizar a programação CNC de peças complexas pode gerar economias significativas.

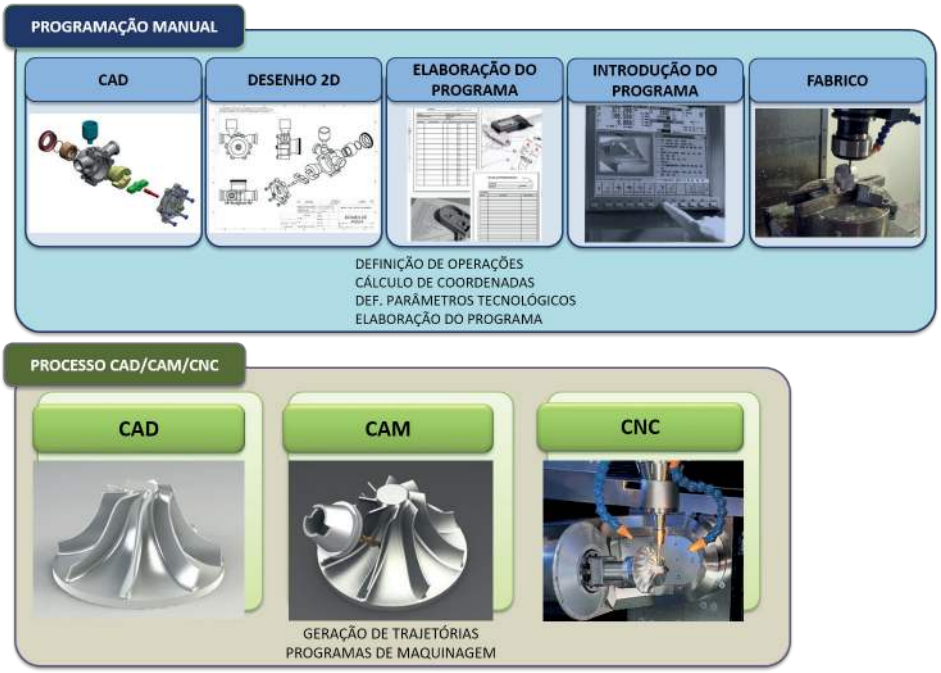


Figura 10.1 › O processo CAD/CAM/CNC versus a programação manual

A utilização de sistemas CAM possibilita que as peças obtidas possam apresentar uma complexidade muito elevada e bastante superior à programação manual e possibilita igualmente o processamento de uma maior quantidade de informação, nomeadamente programas CN mais extensos, utilizados na realização de operações de maquinagem multieixos (operações de 3, 4, 5 e mais eixos). A utilização da tecnologia MAV veio tornar quase imprescindível o recurso à programação CAM.

O processo CAD/CAM é totalmente automático, em termos de manipulação da informação e o modelo 3D que foi inicialmente concebido no CAD, é programado e fabricado unicamente com base em informações digital e sem ação direta do homem durante o processo, diminuindo a probabilidade de erro de origem humana e permitindo que a peça maquinada reproduza mais fielmente o projeto inicial.

O sistema CAD/CAM, deve ser selecionado a pensar na maioria dos trabalhos habituais da empresa, mas verificando se é suficientemente flexível para lidar com qualquer outra eventualidade. Para avaliar a instalação de um sistema de CAD/CAM e os benefícios daí decorrentes devem-se considerar fatores como: facilidade de uso, confiabilidade e desempenho consistente, automatismos para concretização de grande parte do trabalho tipificado e o grau de flexibilidade para a programação de casos excecionais.

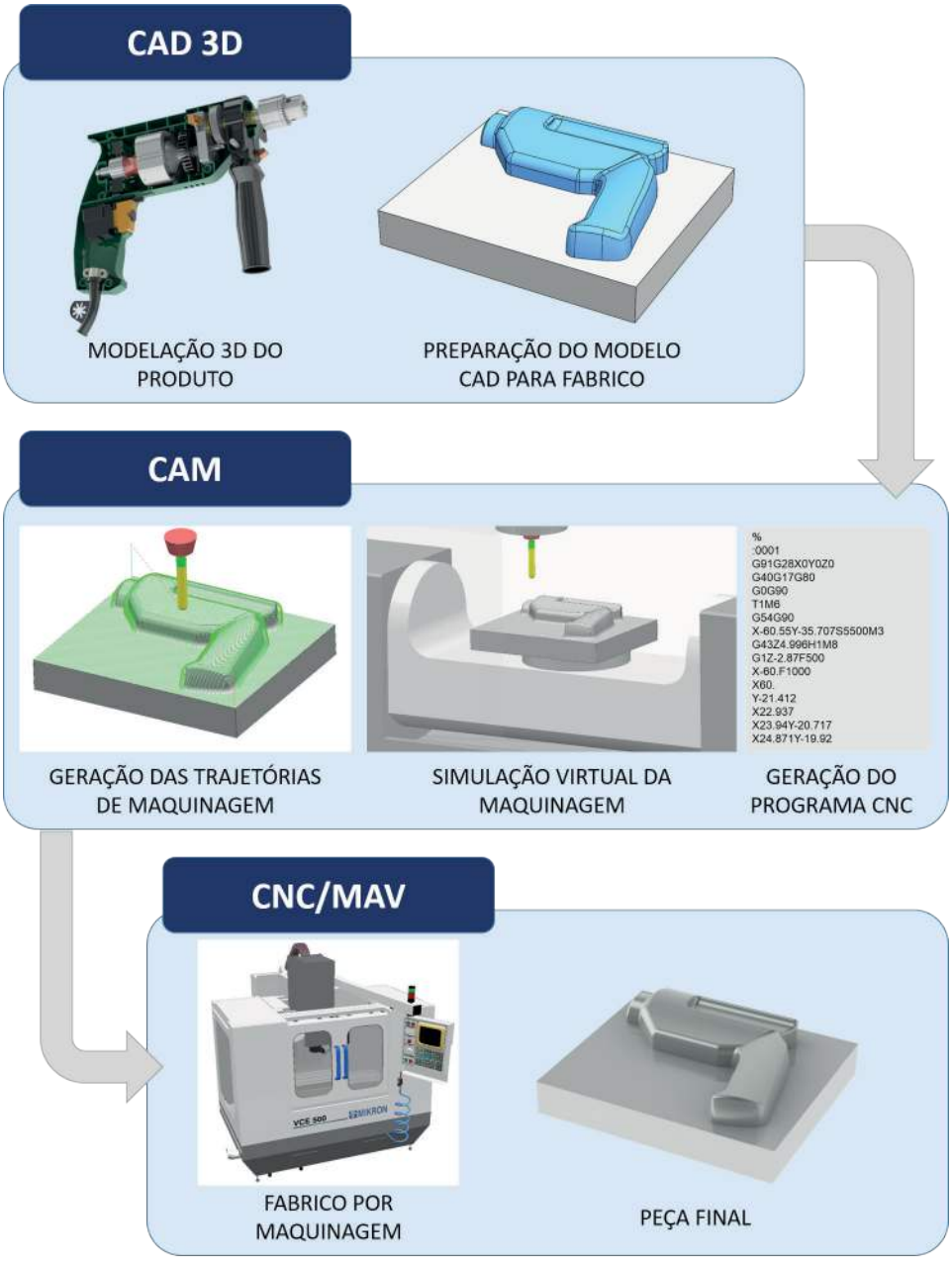


Figura 10.2 › As principais fases do processo CADCAMCNC

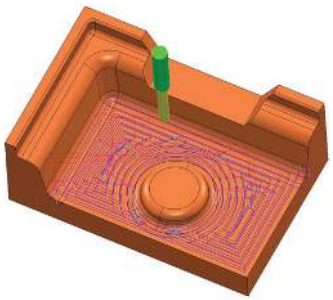
Desbaste em *offset*

Esta estratégia permite trajetórias mais curtas e rápidas;

As condições de corte mantêm-se praticamente constantes durante o fresamento;

Permite programar um sentido de corte único (concordante preferencialmente) sem provocar grande descontinuidade no corte;

Melhora a vida útil da ferramenta.



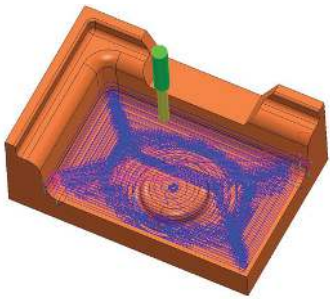
Desbaste trocoidal ou cicloides

Esta estratégia realiza trajetórias com ranhuras superiores ao diâmetro da ferramenta, através de movimentos semicircunferenciais em XY;

As condições de corte mantêm-se constantes durante toda a operação o que melhora a vida útil da ferramenta;

Utiliza um sentido de corte único (concordante preferencialmente);

Permite maiores volumes de material removido por unidade de tempo.



Desbaste em mergulho ou *plunge*

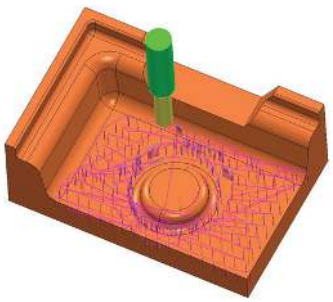
Nesta estratégia a ferramenta executa trajetórias de penetração vertical (semelhante à furação);

Exige máquinas com elevada rigidez, para absorver os esforços da operação;

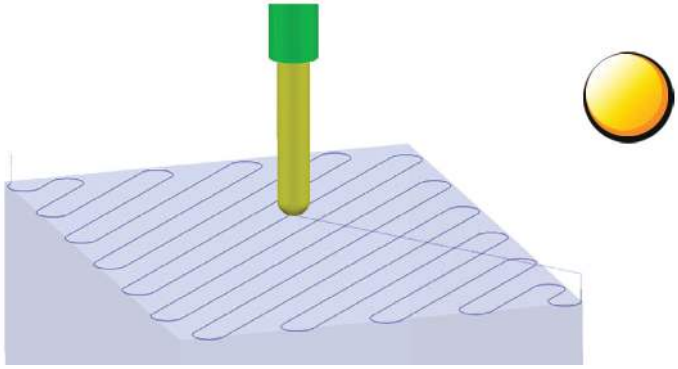
As condições de corte mantêm-se constantes;

Permite programar um sentido de corte único;

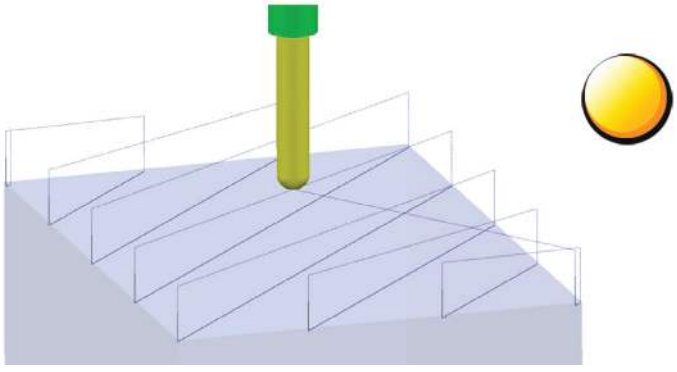
Permite maiores volumes de material removido.



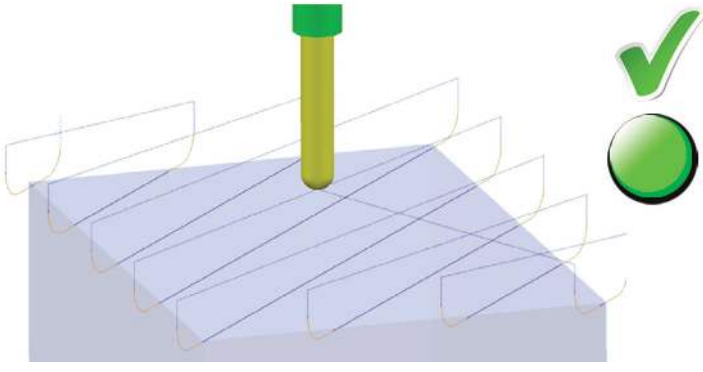
Ligação direta com arco (corte bidirecional)



Ligação com entrada em mergulho (corte unidirecional)



Ligação com entrada tangencial (corte unidirecional)



(cortesia Norcam)

Controlo de processo em máquinas CNC

11

11.1 › Conceitos e fundamentos

Quando uma empresa implementa um sistema de qualidade, esta deve ser capaz de integrar uma filosofia de qualidade de cima para baixo em todos os seus setores de forma completa e que englobe cada operação realizada na empresa. Essa abordagem da qualidade requer disciplina em toda a empresa e traduz-se em eficiência.

Os sistemas de qualidade permitem melhorar a eficiência geral dos sistemas produtivos, através de uma produção disciplinada, uma melhoria contínua do processo e sistemas de verificação e controlo exigentes. Promovem a melhoria dos processos de produção, considerando como ponto de partida a obtenção de um produto mais rápido sem erros e deste modo melhorar os prazos de entrega.

Um dos principais fatores de competitividade das empresas industriais está no seu processo produtivo. A Metrologia inserida no contexto do processo de produção atua como sensor, monitorizando e controlando as variáveis e os atributos dos produtos. A Qualidade e Produtividade têm um forte impacto na competitividade das empresas, através da melhoria de desempenho dos processos, da qualidade dos produtos e na redução de custos.

A Metrologia Industrial tem por função fomentar a qualidade na produção, atuando no processo, através da implementação de sistemas de controlos metrológicos que acrescentem benefícios nomeadamente reduzindo o número de peças rejeitadas e os custos com o trabalho e retrabalho relacionados com a obtenção de produtos conformes.

O controlo de qualidade é um requisito fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa e está fortemente relacionado com a metrologia industrial, envolvendo um conjunto de operações de medição que têm como objetivo assegurar que os produtos fabricados pela empresa cumprem as especificações técnicas e funcionais definidas no projeto.

O controlo da qualidade e a metrologia industrial estão fortemente relacionados. Cada produto deve atender plenamente as especificações técnicas definidas no projeto, para que seja capaz de cumprir

com qualidade as funções para as quais foi concebido. O controlo da qualidade envolve um conjunto de operações de medição que têm como função assegurar que os produtos fabricados pela empresa atendem plenamente às especificações técnicas.

Vejamos:

Controlo dimensional realizado depois da produção

› Os custos de produção já realizados
› Custos de rejeição ou de re-trabalho elevados.
› Difícil deteção de todas as inconformidades
› Difícil deteção da origem do defeito.

Controlo dimensional realizado durante a produção

› Deteção precoce do defeito, pois é possível efetuar o controlo em cada etapa do trabalho.
› Redução dos custos de rejeição ou re-trabalho
› Melhoria contínua do processo.

Nos processos produtivos que envolvem a maquinagem, alguns dos aspetos dos sistemas de controlo de qualidade que podem e devem ser implementados, são:

› Sistemas automáticos de calibração de ferramentas
› Sistemas automáticos de centragem e posicionamento de peças
› Sistemas de controlo dimensional e geométrico durante o processo

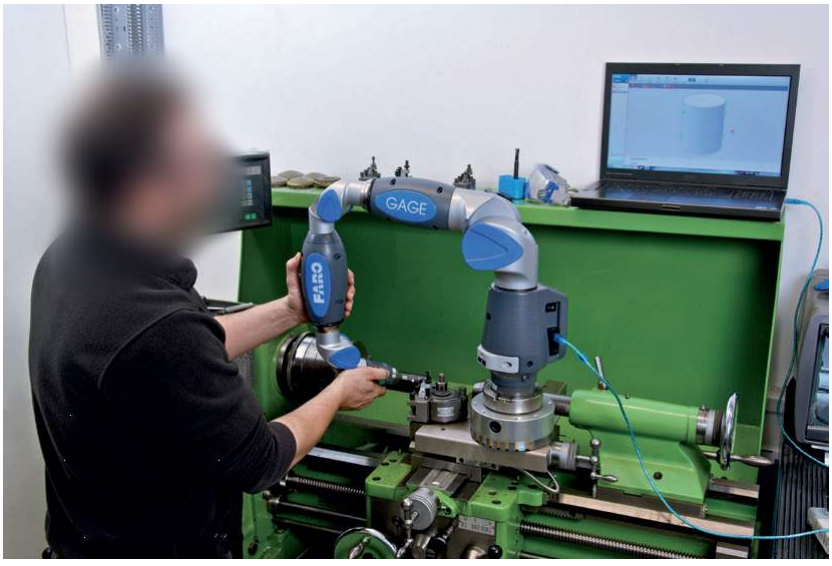


Figura 11.1 › Controlo dimensional durante o processo (cortesia FARO Technologies, Inc.)

circularidade na sua seção transversal, no entanto é necessário garantir que os desvios de fabricação não prejudicam a montagem e o seu funcionamento perfeito, daí a justificação da necessidade das especificações de tolerância geométrica da peça e respetivo o controle geométrico.

11.4.2 › Tolerância geométrica

As tolerâncias geométricas estabelecem quais são os limites dentro dos quais as dimensões e formas geométricas podem variar sem comprometer o funcionamento e intercambiabilidade das peças.

Os desvios podem ser macrogeométricos, como desvios de retilismo, planeza e dimensões nominais, ou desvios microgeométricos como rugosidade e aspereza.

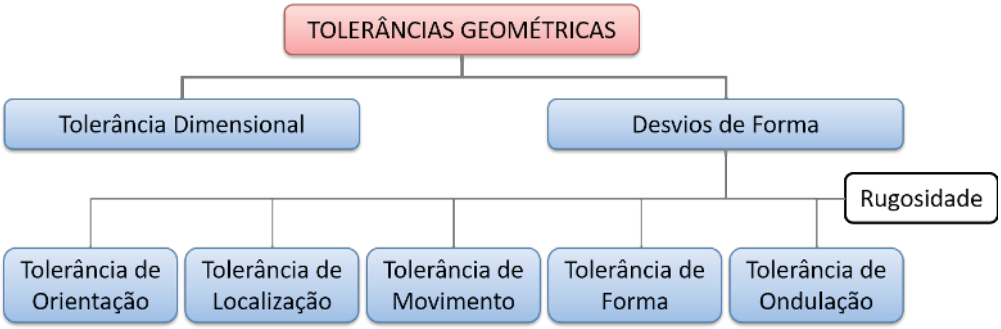


Figura 11.5 › Tipos de tolerâncias que compõem as tolerâncias geométricas

11.4.3 › Toleranciamento GD&T

O toleranciamento GD&T é uma linguagem universal de símbolos. Os símbolos GD & T servem para descrever de modo preciso e lógico a forma da peça, de modo que esta possa ser fabricada e controlada com precisão.

O toleranciamento GD&T expressa-se num quadro de controlo da característica. O quadro de controlo da característica respeita um conjunto de regras, e a sua representação encontra-se dentro de quadros retangulares, divididos em duas ou mais casas. Na primeira divisão (a partir da esquerda) encontra-se sempre a característica geométrica, de seguida encontra-se o valor da tolerância e no final, as letras que indicam uma ou mais referências em relação às quais é medido o toleranciamento (referência especificada). Este quadro encontra-se ligado à peça por uma linha com uma seta que aponta para o elemento toleranciado.

Tecnologia de eletroerosão

12

12.1 › Introdução

O processo de eletroerosão é um método de maquinagem não convencional que tem assumido um papel relevante em diferentes setores da produção, nomeadamente em aplicações que utilizam materiais difíceis de maquinar e em situações de pormenor em que se torne impraticável o corte por arranque de apara, quer por torneamento, quer por fresamento ou por outro processo.

A grande vantagem deste processo é o facto dos materiais poderem ser maquinados mesmo depois de endurecidos, conseguindo-se um grande rigor dimensional. Permite executar formas complicadas, interiores ou exteriores, com ou sem saída, assim como permite a obtenção de arestas vivas, em qualquer peça desde que esta seja condutora de corrente elétrica, independentemente da sua dureza.

Entre os processos não convencionais como o laser, o corte por jato de água, ultrassons, etc, o processo de maquinagem por eletroerosão é, sem dúvida, o mais conhecido e divulgado. A indústria de moldes e ferramentas é um dos seus maiores campos de aplicação.

elétrodo, já que o desgaste de uma maneira geral é mais elevado na peça do que no elétrodo. A figura 10.2 ilustra o princípio de funcionamento da eletroerosão por penetração.

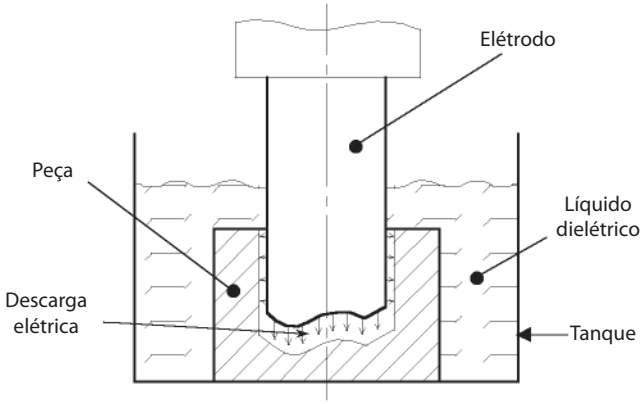
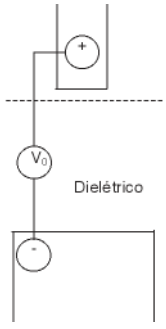
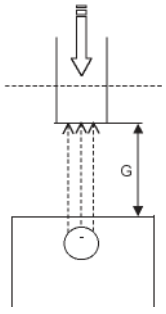
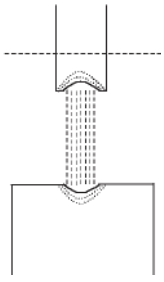
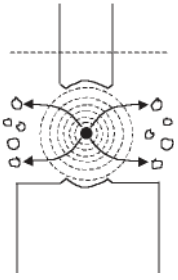
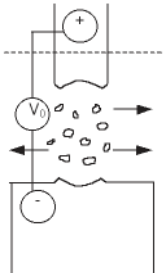


Figura 10.2 › Esquema de funcionamento da eletroerosão por penetração

12.2.1 › As fases da operação

Durante uma operação de eletroerosão podemos identificar as seguintes fases:

1	2	3	4	5
Energização	Ionização	Descarga	Remoção explosiva	Lavagem desionização
				
Ambos os polos são submetidos a uma determinada tensão inicial, mas não existe passagem de corrente	O elétrodo aproxima-se da peça, até à distância do «gap» ponto onde o dielétrico se torna condutor.	Através do «gap» forma-se uma coluna para a passagem de corrente e dá-se a descarga que dura uns microssegundos. A temperatura desenvolvida é tal que provoca a fusão do metal.	Ocorre a explosão entre o elétrodo e a peça e forma-se uma cratera nas suas superfícies. São expelidas partículas metálicas, iões, gases, etc.	Após as partículas terem sido expelidas, a zona do «gap» é lavada sendo reposta a tensão inicial para nova descarga.

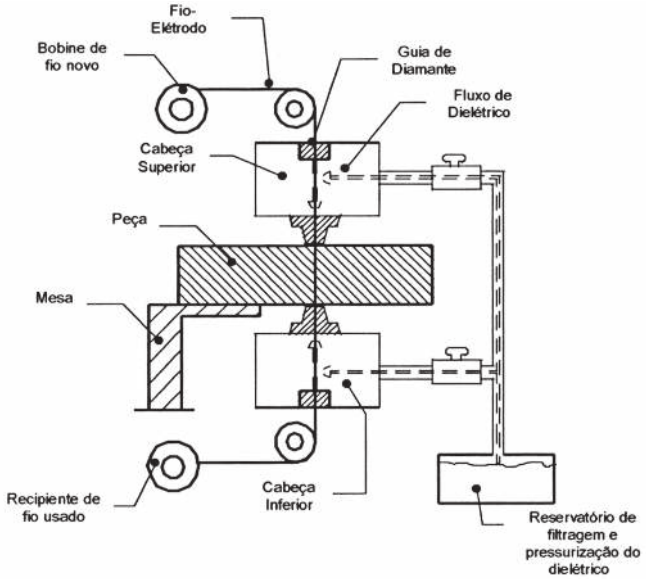


Figura 10.8 › Diagrama da eletroerosão por fio

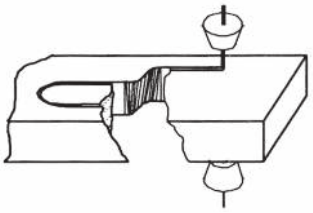


Figura 10.9 › Corte de peça por eletroerosão por fio

12.6 › Vocabulário empregue em eletroerosão

ASPIRAÇÃO – Designação do sistema de limpeza em que a circulação do líquido dielétrico dentro do *gap* é feita por depressão.

CAPACIDADE EROSIVA – Quantidade de material retirado da peça por unidade de tempo (mm^3 / min). Também pode designar-se por *taxa de remoção de material*.

CONTAMINAÇÃO – Estado de poluição no interior do *gap*, devido a partículas de metal erodidas ou resíduos provenientes da decomposição por pirólise dos hidrocarbonetos do dielétrico.

CRATERA – Cavidade aberta, por uma só descarga ou faísca, na superfície erodida.

Anexos

Lista de funções G – Controlador FANUC 0T					
Sistema					
A	B	C	Função	Modal	N/Modal
G00	G00	G00	Movimento Rápido de Posicionamento	*	
G01	G01	G01	Interpolação Linear (movimento de corte)	*	
G02	G02	G02	Interpolação Circular - sentido dos ponteiros do relógio	*	
G03	G03	G03	Interpolação Circular - sentido contrário aos ponteiros	*	
G04	G04	G04	Temporização - compasso de espera		*
G10	G10	G10	Atribuição de valores		*
G20	G20	G70	Unidades em Sistema Inglês	*	
G21	G21	G71	Unidades em Sistema Métrico	*	
G22	G22	G22	Ativar Leitura do Valor de Limite de Curso	*	
G23	G23	G23	Desativar Leitura do Valor de Limite de Curso	*	
G25	G25	G25	Desativar Detetor de Mudança da Velocidade da Árvore	*	
G26	G26	G26	Ativar Detetor de Mudança da Velocidade da Árvore	*	
G27	G27	G27	Retorno e Verificação do Ponto de Referência Máquina		*
G28	G28	G28	Retorno ao Ponto de Referência Máquina		*
G30	G30	G30	Retorno aos 2.º, 3.º e 4.º Pontos de Referência		*
G31	G31	G31	Função de Salto		*
G32	G33	G33	Roscagem		*
G34	G34	G34	Roscagem de Passo Variável	*	
G36	G36	G36	Compensação Automática da Ferramenta - eixo X		*
G37	G37	G37	Compensação Automática da Ferramenta - eixo Z		*
G40	G40	G40	Cancelar Compensação do Raio da Ferramenta	*	

Lista de funções G – Controlador FANUC 0M			
Código	**Função**	**Modal**	**N/Modal**
G00	Movimento Rápido de Posicionamento	*	
G01	Interpolação Linear (movimento de corte)	*	
G02	Interpolação Circular - sentido dos ponteiros do relógio	*	
G03	Interpolação Circular - sentido contrário aos ponteiros do relógio	*	
G04	Temporização - compasso de espera / Comando de Posicionamento		*
G05	Ciclo de Maquinagem de Alta Velocidade		*
G09	Comando de Posicionamento		*
G10	Atribuição de valores		*
G11	Cancelar Modo de Atribuição de valores		*
G15	Cancelar Sistema de Coordenadas Polares	*	
G16	Ativar Sistema de Coordenadas Polares	*	
G17	Selecionar Plano de Trabalho XY	*	
G18	Selecionar Plano de Trabalho ZX	*	
G19	Selecionar Plano de Trabalho YZ	*	
G20	Unidades em Sistema Inglês	*	
G21	Unidades em Sistema Métrico	*	
G22	Ativar Leitura do Valor de Limite de Curso	*	
G23	Desativar Leitura do Valor de Limite de Curso	*	
G27	Retorno e Verificação do Ponto de Referência Máquina		*
G28	Retorno ao Ponto de Referência Máquina		*
G29	Regressar do Ponto de Referência Máquina		*
G30	Retorno ao 2.º Ponto de Referência		*
G31	Função de Salto		*
G33	Roscagem		*
G39	Inserir Compensação em Arco nos Cantos		*
G40	Cancelar Compensação do Raio da Ferramenta	*	
G41	Compensação do Raio da Ferramenta à Esquerda	*	
G42	Compensação do Raio da Ferramenta à Direita	*	
G43	Compensação do Comprimento da Ferramenta - sentido positivo	*	
G44	Compensação do Comprimento da Ferramenta - sentido negativo	*	
G45	Aumentar Corretor da Ferramenta		*
G46	Reduzir Corretor da Ferramenta		*
G47	Aumentar Corretor da Ferramenta em Dobro		*
G48	Reduzir Corretor da Ferramenta em Metade		*
G49	Cancelar Compensação do Comprimento da Ferramenta	*	

Código	Função	Modal	N/Modal
G50	Cancelar Função de Escala	*	
G51	Ativar Função de Escala	*	
G52	Sistema Local de Coordenadas	*	
G53	Selecionar Sistema de Coordenadas Máquina	*	
G54	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 1	*	
G55	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 2	*	
G56	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 3	*	
G57	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 4	*	
G58	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 5	*	
G59	Selecionar Coordenadas de Trabalho - Sistema 6	*	
G60	Posicionamento Unidirecional		*
G61	Modo de Posicionamento	*	
G62	Velocidade de Avanço Constante em Cantos	*	
G63	Modo de Roscagem Rígida	*	
G64	Modo de Contorno	*	
G65	Chamada de Função Macro		*
G66	Ativar de Função Macro Modal	*	
G67	Cancelar Função Macro Modal	*	
G68	Ativar Rotação do Sistema de Coordenadas	*	
G69	Cancelar Rotação do Sistema de Coordenadas	*	
G73	Ciclo Fixo de Furação Rápida por incrementos	*	
G74	Ciclo Fixo de Roscagem Esquerda com Macho	*	
G76	Ciclo Fixo de Mandrilagem Fina	*	
G80	Cancelar Ciclo Fixo	*	
G81	Ciclo Fixo de Furação Direta	*	
G82	Ciclo Fixo de Escariar / Mandrilagem com mandril	*	
G83	Ciclo Fixo de Furação por incrementos	*	
G84	Ciclo Fixo de Roscagem com Macho	*	
G85	Ciclo Fixo de Mandrilagem	*	
G86	Ciclo Fixo de Mandrilagem	*	
G87	Ciclo Fixo de Mandrilagem por detrás	*	
G88	Ciclo Fixo de Mandrilagem	*	
G89	Ciclo Fixo de Mandrilagem	*	
G90	Sistema de Coordenadas Absolutas	*	
G91	Sistema de Coordenadas Relativas	*	

Carlos Relvas

4.ª Edição

CONTROLO NUMÉRICO COMPUTORIZADO

Conceitos Fundamentais

Sobre a obra

O livro Controlo Numérico Computorizado – Conceitos Fundamentais aborda um conjunto de temas centrados nos fundamentos tecnológicos e na programação CNC manual e automática (CAM) relacionada com principais processos de maquinagem, como a furação, o torneamento, a fresagem e a electroerosão. Esta nova versão, foca igualmente, aspetos relativos à maquinagem de alta velocidade e ao processo CAD/CAM/CNC e introduz a metrologia 3D como apoio ao controlo de processo.

O texto foi elaborado de modo a poder ser utilizado como manual de apoio, não só no ensino como na formação profissional apresentando aspetos relativos à operação dos equipamentos e exemplos de programação em diversos tipos de controladores. A sua abordagem pretende definir a tecnologia de maquinagem CNC como o paradigma de iniciação para todos que ingressam nesta área tecnológica, sem esquecer os que, já exercendo a profissão, e que podem encontrar neste livro algumas ajudas preciosas para os problemas do seu dia-a-dia.

Sobre o autor

Carlos Relvas é Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Aveiro, onde exerce como Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica. É responsável pelo Laboratório de Desenvolvimento de Produto desde 2008 e foi o primeiro diretor do curso de Mestrado em Engenharia e Design de Produto da Universidade de Aveiro, criado em 2011.

Iniciou a sua atividade profissional em 1982, tendo passado por algumas empresas onde tomou contacto com o controlo numérico. Em 1987 ingressou no CINFU onde instalou uma secção totalmente equipada com máquinas CNC e no ano seguinte deu início à formação na área de controlo numérico. Em 1996 ingressou no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Tem desenvolvido atividade científica e pedagógica na área de conceção e modelação 3D, materiais e processos de fabrico, engenharia e desenvolvimento de produto e fabrico aditivo. É autor e coautor de 4 livros técnicos, tem mais de 40 artigos publicados em revistas internacionais e mais de 100 outras publicações e comunicações em congressos.

Parceiro de Comunicação

robótica

Também disponível em formato *e-book*

ISBN: 978-989-892-716-3

9 789898 927163

www.**engebook**.pt

engebook