

9. Referências Bibliográficas

ABDUL-RAZAQ, T. POTTS, C. **Dynamic Programming State-Space Relaxation for Single-Machine Scheduling.** J. Opnl. Res. Soc. 39, 141-152, 1988.

ARONSON, R. B. **Presetting: Prelude to Perfection.** **Manufacturing Engineering.** Dearborn, vol.124, n.2, p.86- 91, fev, 2000.

BAGCHI, U. **Due Date or Deadline Assignment to Multi-Job Orders to Minimize Total Penalty in the One Machine Scheduling Problem.** Presented at the ORSA/TIMS Joint National Conference, St. Louis, 1987.

BAGCHI, U.; Y. CHANG; R. SULLIVAN. **Minimizing Absolute and Squared Deviations of Completion Times With Different Earliness and Tardiness Penalties and a Common Due Date.** Naval Res. Logist. Quart. 34, 739-751, 1987.

BAGCHI, U.; SULLIVAN, R.; CHANG, Y. **Minimizing Mean Absolute Deviation of Completion Times About a Common Due Date.** Naval Res. Logist. Quart. 33, 227-240, 1986.

BAKER, K.; CHADOWITZ, A. **Algorithms for Minimizing Earliness and Tardiness Penalties With a Common Due Date.** Working Paper No. 240, Amos Tuck School of Business Administration, Dartmouth College, Hanover, N.H, 1989.

BAKER, K. R.; SCUDDER, G. D. **Sequencing with Earliness and Tardiness Penalties: A Review.** Operations Research, v. 38, p. 22–36, 1990.

BUSTAMANTE, L. M. **Minimização do Custo de Antecipação e Atraso para o Problema de Sequenciamento de uma Máquina com Tempo de Preparação Dependente da Sequência: Aplicação em uma Usina Siderúrgica.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

Catálogo de Ferramentas para torneamento, 2011: Produzido por SANDVIK COROMANT. Disponível em http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/MC_2009_Klick_POR_A.pdf. Acesso em 04 jul. 2011.

CHENG, T. **An Algorithm for the CON Due Date Determination and Sequencing Problem.** Comp. Opns. Res. 14, 537-542, 1987.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica.** Vol III, 2ª Ed., McGraw-Hill, 1986.

EMMONS, H. **Scheduling to a Common Due Date on Parallel Common Processors.** Naval Res. Logist. Quart. 34, 803-810, 1987.

FRY, T. ARMSTRONG, R. BLACKSTONE, J. **Minimizing Weighted Absolute Deviation in Single Machine Scheduling.** IEEE Trans. 19, 445-450, 1987.

FRY, T. DARBY-DOWMAN, K. ARMSTRONG, R. **Single Machine Scheduling to Minimize Mean Absolute Lateness.** Working Paper, College of Business Administration, University of South Carolina, Columbia, 1988.

GAREY, M. TARJAN, R. WILFONG, G. **One- Processor Scheduling With Symmetric Earliness and Tardiness Penalties.** Math. Opns. Res. 13, 330-348, 1988.

GOMES JÚNIOR, A. C. **Problema de Sequenciamento em uma Máquina com Penalidades por Antecipação e Atraso: Modelagem e Resolução.** Dissertação de Mestrado. UFMG, 2007.

HALL, N.; KUBIAKS, W.; SETHI, S. **Deviation of Completion Times About a Restrictive Common Due Date.** Working Paper 89-19, College of Business, The Ohio State University, Columbus, 1989.

HALL, N.; POSNER, M. **Weighted Deviation of Completion Times About a Common Due Date.** Working Paper 89-15, College of Business, The Ohio State University, Columbus, 1989.

KIM, Y. D. **Minimizing Total Tardiness in Permutation Flowshops.** European Journal of Operational Research, v. 85, p. 541–555, 1995.

MANNE, A. S. **On the Job-shop Scheduling Problem.** Operations Research, v. 8, p. 219–223, 1960.

MORTON, T.E.; PENTICO, D.W. **Heuristic Scheduling Systems.** Ed. John Willey e Sons, 1993.

PANWALKAR, S.; SMITH, M.; SEIDMANN, A. **Common Due Date Assignment to Minimize Total Penalty for the One Machine Scheduling Problem.** Opns. Res. 30, 391-399, 1982.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems.** Ed. Springer, 3rd Ed., 2008

QUADDUS, M. **A Generalized Model of Optimal Due-Date Assignment by Linear Programming.** J. Opnl. Res. Soc. 38, 353-359, 1987.

RAGHAVACHARI, M. **A V-Shape Property of Optimal Schedule of Jobs About a Common Due Date.** Eur. J. Opnl. Res. 23, 401-402, 1986.

RENISHAW. **Inovative laser tool setting technology provides accuracy, flexibility and robust operation.** News from Renishaw, United Kingdom, p.1-10, 2003.

SEIDMANN, A.; PANWALKAR, S.; SMITH, M. **Optimal Assignment of Due-Dates for a Single Processor Scheduling Problem.** Int. J. Prod. Res. 19, 393-399, 1981.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Cadeia de suprimentos: projeto e gestão.** Porto Alegre: Bookman, 2003.

SIMON, A. T. **Condições de utilização da tecnologia CNC: Um estudo para máquinas ferramenta de usinagem na indústria brasileira.** 2001. 150p. Dissertação (Mestrado em Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SOUZA, M. J. **Inteligência Computacional para Otimização.** Notas de aula 2011/1 do Departamento de Computação, UFOP, <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>. acesso em 07 Out, 2011

STAFFORD-JR, E. F.; TSENG, F. F.; GUPTA, J. N. D. **Comparative Evaluation of MILP Flowshop Models.** Journal of Operational Research Society, v. 56, p. 88–101, 2005.

SUNDARARAGHAVAN, P.; AHMED, M. **Minimizing the Sum of Absolute Lateness in Single- Machine and Multimachine Scheduling.** Naval Res. Logist. Quart. 31, 325-333, 1984.

SZWARC, W. **Single Machine Scheduling to Minimize Absolute Deviation of Completion Times From a Common Due Date.** Naval Res. Logist. 36, 663-673, 1989.

WAGNER, H. M. **An Integer Programming Model for Machine Scheduling.**
Naval Research Logistics Quarterly, v. 6, p. 131–140, 1959.

WINKERSON, L.J.; IRWIN, J.D. **An Improved Algorithm for Scheduling Independent Tasks,** AIEE Transactions, Vol3, No. 3, 1971.

YANO, C. KIM, Y. Algorithms for Single Machine **Scheduling Problems Minimizing Tardiness and Earliness.** Technical Report #86-40, Department of Industrial Engineering University of Michigan, Ann Arbor, 1986

Apêndice A: Levantamento dos dados

A.1. Dados dos Tempos de Processamento (t_j)

As estimativas dos tempos de processamento, t_j , de cada fase foram feitas a partir da simulação da Usinagem através do *software* GibbsCAM.

A máquina em estudo é um torno CNC, marca ROMI, modelo ATOC-9. Foi feita a simulação de 10 peças, onde cada peça, com exceção da peça 3, possui 2 fases de usinagem, ou seja, há a necessidade de virar a peça para executar as outras operações. Dessa forma, de acordo com a peça e com a fase, define-se A_B como sendo a fase B da peça A.

Como parâmetros de corte para o *software*, foi necessário recorrer a um catálogo de ferramentas e conforme o material da peça usinada e sua respectiva dureza, foi especificada a velocidade de corte correspondente, bem como avanço e profundidade de corte recomendadas.

De acordo com CHIAVERINI (1986), tanto o Aço ABNT 4340, quanto o Aço ABNT 8620 são classificados como aço-liga, com baixo teor em liga. Dessa forma, consultando o catálogo Sandvik (2011), para a classe de material CG4215, as velocidades de corte indicadas para aços baixa liga e endurecidos e temperados, com dureza de 275 HB (Brinell) são: 300-210-155 metros/minuto, com avanços de 0,1-0,4-0,8 milímetros/rotação, respectivamente. Será adotada a velocidade intermediária de 210 metros/minuto, com o avanço de 0,4 milímetros/rotação. Para os aços baixa liga e endurecidos e temperados, com dureza de 350 HB (Aço ABNT 8620), estão disponíveis as velocidades de corte de: 240-170-125 metros/minuto, com avanços de 0,1-0,4-0,8 milímetros/rotação, respectivamente. Analogamente, será utilizada a velocidade intermediária de 170 metros/minuto, com o avanço de 0,4 milímetros/rotação.

Analogamente, para o Aço Inox AISI 304 - Aço inoxidável austenítico, a Classe de material é CG 2025, a velocidade de corte recomendada é 175 m/min, e o avanço recomendado é 0,4 mm/rot. Para o Aço Inox AISI 410- Aço inoxidável martensítico, tem-se: Classe CG 1125, velocidade de corte e avanço

recomendados são, respectivamente, 110 m/min e avanço 0,2 mm/rot. A Tabela 11 resume as velocidades de corte e avanços recomendados para cada peça.

Tabela 11 – Velocidades de corte recomendadas para cada peça

Peça	Matéria-Prima	Dureza (HB)	Dimensões Matéria-Prima	Classe	V para desbaste (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	Aço ABNT 4340	270-310	Ø157 x 2000	CG 4215	210	0,4
2	Aço ABNT 4340	270-310	(Ø121,5 x 218)+Ø165 x 85	CG 4215	210	0,4
3	Aço ABNT 4340	270-300	(Ø50,8 x 181.3)	CG 4215	210	0,4
4	Aço ABNT 4340	255-285	Ø185 x 170	CG 4215	210	0,4
5	Aço ABNT 8620	330-370	Ø40 x 305	CG 4215	170	0,4
6	Aço ABNT 4340	270-300	Ø32 x 692	CG 4215	210	0,4
7	Aço Inox AISI 304	-	(Ø56 - Ø36) x 500	CG 2025	175	0,4
8	Aço ABNT 4340	270-310	(Ø180 - Ø120) x 105	CG 4215	210	0,4
9	Aço Inox AISI 410 ou 420	270-300	Ø40 x 265	CG 1125	110	0,2
10	Aço ABNT 4340	270-310	Ø330,2 x 210	CG 4215	210	0,4

Fonte: Autor

Cabe ressaltar que para as operações de desbaste de roscas e para as furações, as velocidades de corte são diferentes das apresentadas acima, porém também foram coletadas em catálogos referentes a tais operações.

Com isso, os dados de saída do *software* foram Folhas de Processo, como a exemplificada na Figura 41, de onde se extrai os tempos de processamentos de todas as operações, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Tempos de processamento (t_j)

Peça_Fase	Trabalho	Tempo de Processamento (t_j) (min:seg)	Tempo de Processamento (t_j) (min)
1_1	1	4:15	4.25
1_2	2	26:15	26.25
2_1	3	17:49	17.82
2_2	4	10:46	10.77
3_1 ⁴	5	5:07	5.12
4_1	6	13:40	13.67
4_2	7	15:26	15.43
5_1	8	1:09	1.15
5_2	9	8:44	8.73
6_1	10	1:12	1.20
6_2	11	8:05	8.08
7_1	12	3:08	3.13
7_2	13	15:24	15.40
8_1	14	16:35	16.58
8_2	15	0:31	0.51
9_1	16	5:24	5.40
9_2	17	4:06	4.10
10_1	18	57:32	57.53
10_2	19	47:29	47.48

Fonte: Autor

⁴ A peça 3 não possui uma segunda fase, ou seja, não existe 3_2.



 PUC/Rio Departamento de Engenharia Industrial		Torno - Folha de Processo								
		Nome:		Programador						
		Data / Hora:		8/15/2011 17:57						
Produto:		Material:		ACO INOXIDAVEL		AISI 304				
Peça nº / Nome:		Peca_7_1.vnc		Máquina:		Ato c 9 - Mach 9 - Arsenal de Guerra.pst				
Desenho / Cj:		Sem Conjunto		Programa:		Peca_7_1.txt				
Ponto de Troca		X:	0	Z:	0	Tempo:	0:03:08	Diretório: C:\Dissertação\Peca_7_1.vnc		
Tamanho do Bloco com relação ao Zero Peça (X, Z)				Medidas em:		Milímetros				
Zmin	-505.00	Zmax	0.00	Comp. Z:		505.00				
Xmin	-28.00	Xmax	28.00	Diâmetro		56.00				
GEOMETRIA ACABADA DA PEÇA										
		OP	Ferr.	Descrição	Comentário OP.	Raio	VC	AV	Tempo	
		1	1	KNUX 16 04 05R11	Faceamento	0.2	210	0.40	0.85	
		2	2	KNUX 16 04 05R11	Desbaste Interno	0.2	210	0.4	0.99	
		3	3	Bedame 2 mm	Desbaste Saida de Rosca	0.05	210	0.4	1.01	
		4	4	Ferramenta de Rosca Metrica	Rosca M40 x 1,5	0	100	1.5	0.27	

Figura 41 – Exemplo de Folha de Processo

Fonte: Autor

A.2. Dados dos Tempos de Preparação de Máquina(S_{ij})

Os dados dos tempos de preparação de máquina, S_{ij} , foram estimados baseados nas seguintes características de Usinagem:

- (a) Comprimento da peça e tipo de usinagem, que implica ou não o uso de luneta⁵ ou uso de contra-ponto;
- (b) Geometria da peça, que implica no tipo de castanha utilizada para fixar a peça;
- (c) Peso da peça, o que pode exigir o uso de um guincho mecânico; e
- (d) Número de ferramentas a ser utilizada em cada fase de Usinagem.

De acordo com Zoller & Davis Tools apud SIMON (2001), o tempo de preparação em um torno CNC de uma ferramenta pré-ajustada (que utiliza o *presetter*⁶) é de 2,58 minutos, sendo assim, o tempo total para a preparação da máquina para uma operação que necessite de 5 ferramentas será de 12,90 minutos.

O tempo de instalação da luneta e do contra-ponto são, respectivamente, 10 e 12 minutos e o tempo de troca entre os modelos da castanha é de 14 minutos.

Para colocar uma peça que necessite do guincho mecânico, estima-se que o tempo necessário é de 4 minutos.

Dessa forma, para se preparar a máquina de uma fase que não necessite de luneta nem contra-ponto, para uma fase que precise desses componentes, serão necessários 22 minutos. Se nessa mesma fase inicial, estiver sendo usada a castanha tipo 1 e a próxima fase for utilizar a castanha tipo 2, acrescentar-se-á 14

⁵ **Lunetas** são conjuntos mecânicos utilizados em tornos universais de cabeçote fixo para dar estabilidade na **usinagem de eixos delgados**, ou seja, onde a relação “comprimento/diâmetro” é muito grande. A peça é fixada entre o meio de sujeição da peça, no lado do fuso principal, e o contra-ponto no lado oposto.

⁶ *Presettters* são dispositivos utilizados para fazer a pré-ajustagem das ferramentas e a detecção de quebra em centros de usinagem CNC (RENISHAW, 2003). Funciona com um simples mecanismo de toque do tipo “*probe*” ou com sistemas de laser, que registram não apenas o comprimento da ferramenta, como também o diâmetro e sua superfície (ARONSON, 2000).

minutos aos 22 iniciais, somando 36 minutos. Além disso, se for necessário transportar a peça com o guincho mecânico para se retirar a peça da fase inicial e colocar a peça para a fase final deste exemplo, teremos um acréscimo de 4 minutos por fase, finalizando em um tempo de 42 minutos, faltando ainda somar 2,58 minutos por ferramenta necessária na fase seguinte. A Tabela 13 mostra as características de cada fase que implicarão no tempo de preparação de máquina. A Tabela 14 mostra os tempos de preparação de máquina.

Tabela 13 – Características de preparação de máquina

Peça_Fase	Luneta	Contra-ponto	Tipo de castanha	Necessita de guincho mecânico	Nº de ferramentas utilizadas
1_1	Sim	Não	1	Sim	5
1_2	Sim	Sim	1	Sim	5
2_1	Não	Não	1	Sim	9
2_2	Não	Sim	1	Sim	2
3_1	Não	Não	2	Não	8
4_1	Não	Sim	1	Não	3
4_2	Não	Não	1	Não	6
5_1	Sim	Não	2	Não	3
5_2	Não	Sim	2	Não	4
6_1	Sim	Não	2	Não	2
6_2	Não	Sim	2	Não	3
7_1	Sim	Não	2	Não	4
7_2	Sim	Sim	2	Não	4
8_1	Não	Não	1	Não	5
8_2	Não	Não	1	Não	2
9_1	Sim	Não	2	Não	4
9_2	Sim	Sim	2	Não	5
10_1	Não	Não	1	Sim	5
10_2	Não	Não	1	Sim	2

Fonte: Autor

Tabela 14 – Tempos de Preparação de Máquina (S_{ij})

	1_1	1_2	2_1	2_2	3_1	4_1	4_2	5_1	5_2	6_1	6_2	7_1	7_2	8_1	8_2	9_1	9_2	10_1	10_2
1_1	0	36.90	36.90	42.90	35.90	33.90	27.90	29.90	41.90	29.90	41.90	29.90	35.90	27.90	27.90	29.90	35.90	36.90	36.90
1_2	36.90	0	42.90	36.90	41.90	27.90	33.90	35.90	35.90	35.90	35.90	35.90	29.90	33.90	33.90	35.90	29.90	42.90	42.90
2_1	47.22	53.22	0	47.22	40.22	38.22	32.22	46.22	46.22	46.22	46.22	46.22	52.22	32.22	32.22	46.22	52.22	41.22	41.22
2_2	35.16	29.16	29.16	0	28.16	14.16	20.16	34.16	22.16	34.16	22.16	34.16	28.16	20.16	20.16	34.16	28.16	29.16	29.16
3_1	43.64	49.64	37.64	43.64	0	34.64	28.64	26.64	26.64	26.64	26.64	26.64	32.64	28.64	28.64	26.64	32.64	37.64	37.64
4_1	28.74	22.74	22.74	16.74	21.74	0	13.74	27.74	15.74	27.74	15.74	27.74	21.74	13.74	13.74	27.74	21.74	22.74	22.74
4_2	30.48	36.48	24.48	30.48	23.48	21.48	0	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48	35.48	15.48	15.48	29.48	35.48	24.48	24.48
5_1	24.74	30.74	30.74	36.74	13.74	27.74	21.74	0	19.74	7.74	19.74	7.74	13.74	21.74	21.74	7.74	13.74	30.74	30.74
5_2	39.32	33.32	33.32	27.32	16.32	18.32	24.32	30.32	0	22.32	10.32	22.32	16.32	24.32	24.32	22.32	16.32	33.32	33.32
6_1	22.16	28.16	28.16	34.16	11.16	25.16	19.16	13.16	17.16	0	17.16	5.16	11.16	19.16	19.16	5.16	11.16	28.16	28.16
6_2	36.74	30.74	30.74	24.74	13.74	15.74	21.74	27.74	7.74	19.74	0	19.74	13.74	21.74	21.74	19.74	13.74	30.74	30.74
7_1	27.32	33.32	33.32	39.32	16.32	30.32	24.32	18.32	22.32	10.32	22.32	0	16.32	24.32	24.32	10.32	16.32	33.32	33.32
7_2	33.32	27.32	39.32	33.32	22.32	24.32	30.32	24.32	16.32	16.32	16.32	16.32	0	30.32	30.32	16.32	10.32	39.32	39.32
8_1	27.90	33.90	21.90	27.90	20.90	18.90	12.90	18.90	26.90	26.90	26.90	26.90	32.90	0	12.90	26.90	32.90	21.90	21.90
8_2	20.16	26.16	14.16	20.16	13.16	11.16	5.16	11.16	19.16	19.16	19.16	19.16	25.16	5.16	0	19.16	25.16	14.16	14.16
9_1	27.32	33.32	33.32	39.32	16.32	30.32	24.32	18.32	22.32	10.32	22.32	10.32	16.32	24.32	24.32	0	16.32	33.32	33.32
9_2	35.90	29.90	41.90	35.90	24.90	26.90	32.90	26.90	18.90	18.90	18.90	18.90	12.90	32.90	32.90	18.90	0	41.90	41.90
10_1	36.90	42.90	30.90	36.90	29.90	27.90	21.90	27.90	35.90	35.90	35.90	35.90	41.90	21.90	21.90	35.90	41.90	0	30.90
10_2	29.16	35.16	23.16	29.16	22.16	20.16	14.16	20.16	28.16	28.16	28.16	28.16	34.16	14.16	14.16	28.16	34.16	23.16	0

Fonte: Autor

A.3. Penalidades por Antecipação e Atraso (α_j , β_j)

Como apresentado na seção 1.2.1, a penalidade por antecipação, α_j , leva em consideração o custo de se manter uma peça pronta em estoque e a penalidade atraso, β_j , é um custo proporcional a $T_j = \max\{0, C_j - d_j\}$, que leva em consideração a ordem que as peças devem ficar.

A Tabela 15 apresenta os valores dos pesos das penalidades por antecipação e atraso para cada fase.

Tabela 15 – Penalidades por Antecipação e Atraso

Peça_Fase	Trabalho	Penalidade por Antecipação (α_j)	Penalidade por Atraso (β_j)
1_1	1	50	10
1_2	2	50	10
2_1	3	40	40
2_2	4	40	40
3_1	5	20	30
4_1	6	30	50
4_2	7	30	50
5_1	8	20	10
5_2	9	20	10
6_1	10	20	10
6_2	11	20	10
7_1	12	10	10
7_2	13	10	10
8_1	14	30	20
8_2	15	30	20
9_1	16	10	30
9_2	17	10	30
10_1	18	40	50
10_2	19	40	50

Fonte: Autor

As penalidades por antecipação, α_j , são estimadas de acordo com o tamanho da peça e do material da mesma, o que implicará num maior custo para proteger a peça contra oxidação. Dessa forma, os valores de α_j são:

- Peça 1: 50
- Peça 2 e Peça 10: 40
- Peça 3, Peça 5 e Peça 6: 30
- Peça 4 e Peça 8: 20
- Peça 7 e Peça 9: 10

As penalidades por atraso, β_j , são estimadas de acordo com os grupos a que elas pertencem, como mostrado na Figura 42, sendo assim, os valores de β_j para cada grupo de peças são:

- Grupo 1: 50
- Grupo 2: 40
- Grupo 3: 30
- Grupo 4: 20
- Grupo 5: 10

A.4. Data Prometida (d_j)

Conforme apresentado em 1.2.1, as datas prometidas foram estimadas levando em consideração a lista de materiais (*Bill of Materials* – BOM) do produto, conforme Figura 42. Cabe ressaltar que as peças selecionadas compõem apenas uma amostragem das principais peças de todo o Produto Final.

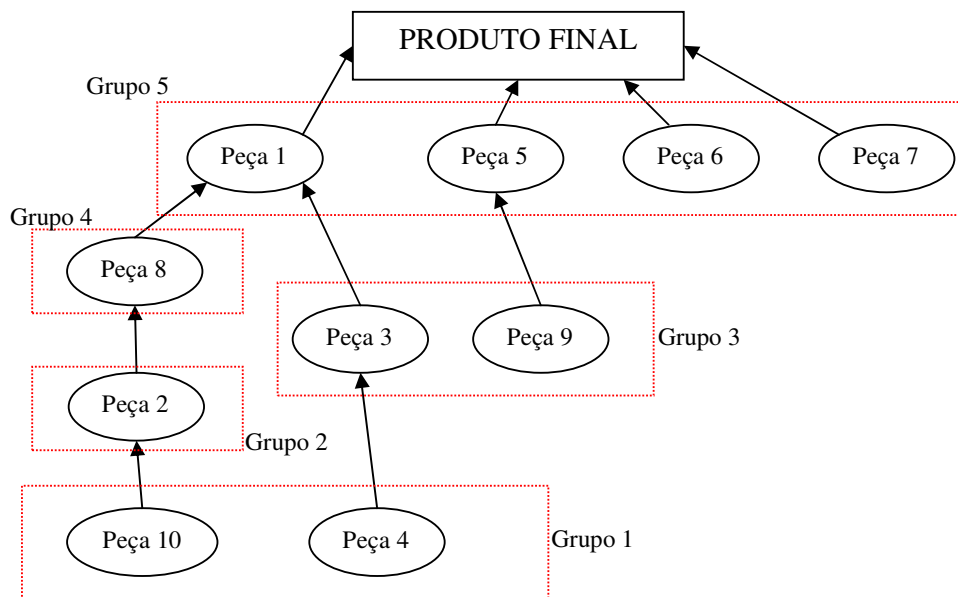


Figura 42 – Lista de Materiais (*Bill Of Materials-BOM*)

Fonte: Autor

Conforme apresentado na Figura 42, as peças foram reunidas em grupos, de acordo com sua posição na Lista de Materiais. Para cada grupo de peças será definida uma data prometida a fim de garantir a montagem do Produto Final:

- Grupo 1: 100 min
- Grupo 2: 150 min
- Grupo 3: 250 min
- Grupo 4: 400 min
- Grupo 5: 600 min

Utilizando essa metodologia, as datas prometidas das fases de cada peça são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Datas Prometidas (d_j)

Trabalho	Peça_Fase	Data Prometida (d _j) (minutos)
1	1_1	600
2	1_2	600
3	2_1	150
4	2_2	150
5	3_1	250
6	4_1	100
7	4_2	100
8	5_1	600
9	5_2	600
10	6_1	600
11	6_2	600
12	7_1	600
13	7_2	600
14	8_1	400
15	8_2	400
16	9_1	250
17	9_2	250
18	10_1	100
19	10_2	100

Fonte: Autor