



18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

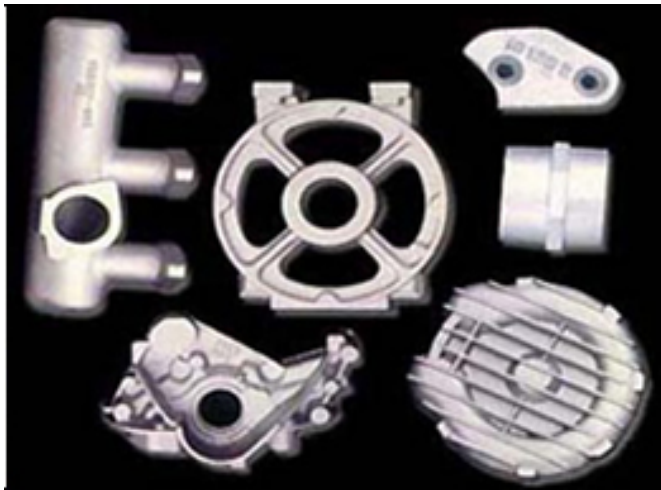
Dimensionamento de lotes em fundições de pequeno porte com múltiplos fornos

Franklina Toledo¹, Victor Camargo²,
Nathan Oliveira¹ e Viviane Tonaki¹

¹Universidade de São Paulo ²Universidade Federal Triângulo Mineiro



Processo fundição de pequeno porte



Chegada de pedidos de peças: podem ser de diferentes ligas.



Processo fundição de pequeno porte



Escolha da liga a ser fundida

Escolha das peças a serem vazadas a partir dessa liga



Processo fundição de pequeno porte



Fabricação/seleção dos
moldes

Processo fundição de pequeno porte



Vazar os moldes

Fonte: <http://www.infoescola.com/quimica/fundicao/>

Descrição do problema

- O problema da programação da produção em fundições consiste em determinar quais ligas devem ser fundidas e, para cada liga, quais peças serão produzida.

Objetivo do problema estudado

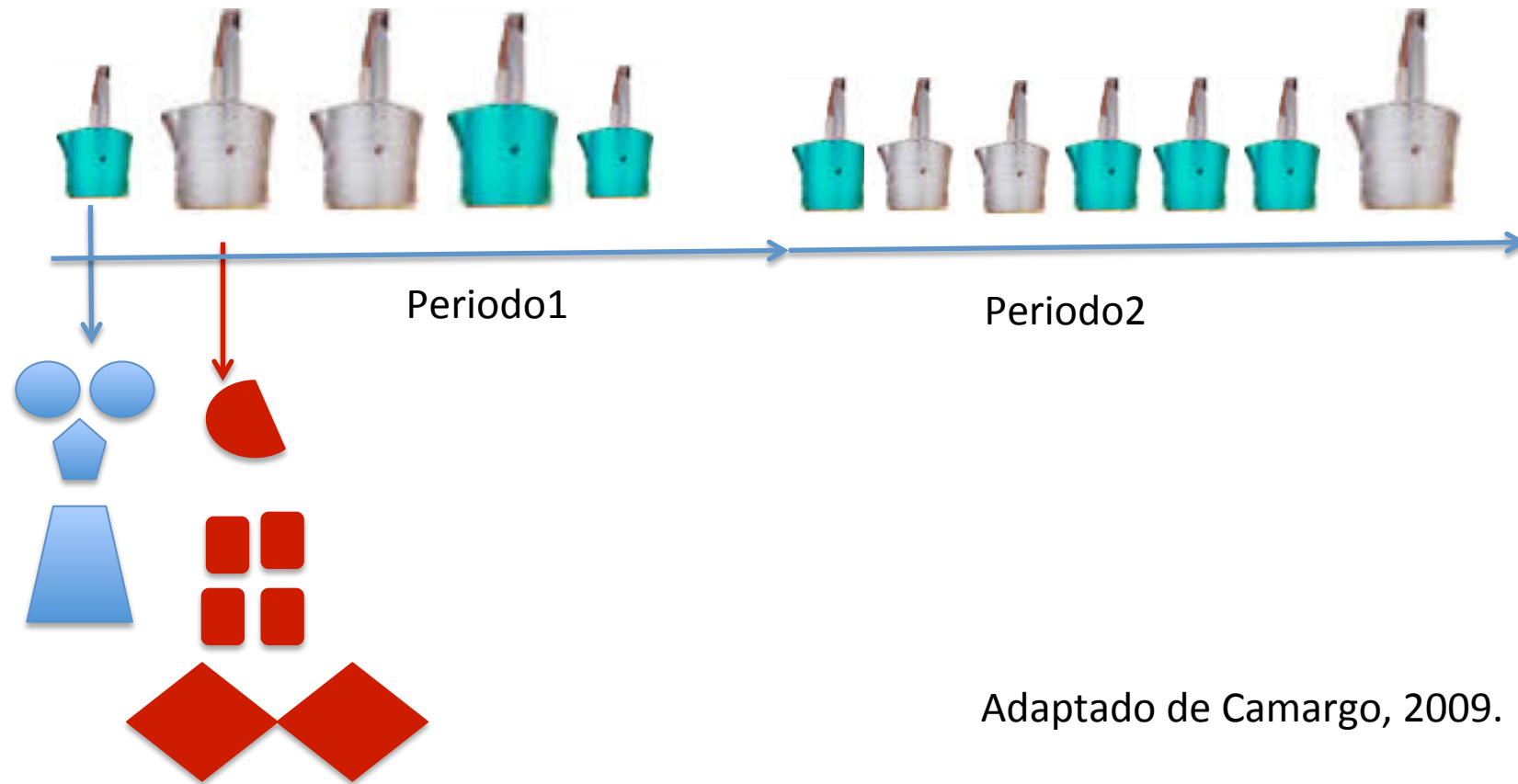
- Minimizar os custos de estoque e de atraso em atender a produção dos itens demandados
- Ambiente produtivo
 - diferentes ligas
 - várias peças
 - vários fornos
 - horizonte de planejamento

Ambiente produtivo

- cada forno
 - capacidade (em kg)
 - tempo de fusão (em horas)
- Horizonte de planejamento
 - em dias
 - capacidade de produção em horas (expediente)

Problema estudado

Lotes de peças para diferente ligas (fornadas) e diferentes fornos



Adaptado de Camargo, 2009.

Literatura

- Heurística de Silva e Morábito (2004)
- Navarenho e Camargo (2014) – modelo dois estágios

Modelo proposto

$$\text{Min} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$\begin{aligned} I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} \\ = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Modelo proposto

Minimizar os custos de atraso e de estoque

$$\text{Min} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$\begin{aligned} I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} \\ = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Modelo proposto

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it}) \\ \text{s.a} \quad & \end{aligned}$$

Balanco de estoque

$$\begin{aligned} I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} \\ = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \end{aligned}$$

$$i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f}$$

$$k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp}$$

$$t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1$$

$$\eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+$$

$$i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0$$

$$i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\}$$

$$k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Modelo proposto

$$\text{Min } \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} \\ = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Capacidade do
forno

Modelo proposto

$$\text{Min } \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$\begin{aligned} I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} \\ = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \end{aligned} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Capacidade do período

Modelo proposto

$$\text{Min } \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Fusão de uma liga em um forno por subperíodo

Modelo proposto

$$\text{Min } \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{N}} (b_{it} \cdot B_{it} + h_{it} \cdot I_{it})$$

s.a

$$I_{i,t-1} + \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{i\eta f} + B_{it} = d_{it} + I_{it} + B_{i,t-1} \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i \cdot X_{i\eta f} \leq \text{cap}_f \cdot L_{k\eta f} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\eta \in \mathcal{L}_t} u_f \cdot L_{k\eta f} \leq \text{exp} \quad t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{f \in \mathcal{F}} L_{k\eta f} \leq 1 \quad \eta \in \mathcal{L}$$

$$I_{i0} = 0, B_{i0} = 0$$

$$X_{i\eta f} \in \mathbb{Z}_+ \quad i \in \mathcal{N}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

$$I_{it}, B_{it} \geq 0 \quad i \in \mathcal{N}; t \in \mathcal{T}$$

$$L_{k\eta f} \in \{0, 1\} \quad k \in \mathcal{K}; \eta \in \mathcal{L}; f \in \mathcal{F}$$

Fusão de uma liga em um forno por subperíodo

n. Subperíodos é estimado

Resultados

- Dados baseados em dados reais de um fundição de pequeno porte com dois fornos capacidade 140kg e 380kg (tempo de fusão 0,8 e 1 hora – período com 10 horas)

Exemplo	Itens	Ligas	Períodos
1	398	37	5
2	26	11	1
3	40	15	2
4	111	14	3
5	29	11	2
6	168	27	5
7	109	29	5
8	90	20	4
9	114	21	5

Resultados

Proposta 2 fornos x planejamento 1 forno (CPLEX 12.5 – TL 1 hora)

Ex.	Dois Fornos				Um único forno				Economia (%)
	F.O.	Desvio (%)	T (s)	Perda (Kg)	F.O.	Desvio (%)	T (s)	Perda (Kg)	
1	4.140.830	0,4	TL	15	4.137.259	0,3	TL	10	-0,09
2	0	0,0	0	1.045	68	0,0	1	2.413	–
3	28.333	0,0	1	1.367	28.474	0,0	3	3.067	0,50
4	59.159	5,2	TL	1.618	59.381	0,8	TL	2.564	0,37
5	7.675	0,0	112	2.329	7.675	0,0	10	3.389	0,00
6	834.871	3,0	TL	4.147	837.493	3,1	TL	6.591	0,31
7	803.179	7,4	TL	2.997	820.403	6,3	TL	7.019	2,10
8	707.385	2,2	TL	1.754	706.956	0,8	TL	3.423	-0,06
9	840.939	2,1	TL	2.323	841.239	2,1	TL	2.626	0,04
Média		2,3		1.955		1,5		3.456	0,39

$$Economia = 100 \cdot \frac{FO_{1forno} - FO_{2fornos}}{FO_{1forno}}$$

Resultados

Proposta x Simulação da política da empresa

Ex.	Modelo Proposto		Simulação da Prática	
	F.O.	Perda (Kg)	F.O.	Perda (Kg)
1	4.140.830	15	4.630.160	4.607
2	0	1.045	68	2.413
3	28.333	1.367	49.739	3.130
4	59.159	1.618	91.506	3.390
5	7.675	2.329	25.401	3.395
6	834.871	4.147	1.242.410	6.591
7	803.179	2.997	1.313.720	8.047
8	707.385	1.754	1.006.510	3.457
9	840.939	2.323	1.034.170	4.241
Média		1.955		4.363

Considerações finais

- Os resultados mostraram que considerar os dois fornos no planejamento gera resultados melhores tanto quanto aos custos quanto a utilização dos fornos
- Seria interessante buscar alternativas aos softwares comerciais (heurísticas)
- Considerar o tempo de troca de fornos



18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

Obrigada!