

Número óptimo de cavidades num molde de injeção

Introdução

A CAVIMOLDE é uma empresa situada na região da Marinha Grande, que se dedica à construção de moldes para injeção de peças plásticas. Os seus clientes são maioritariamente empresas fabricantes de brinquedos em diversas partes do mundo. Os contactos directos são raros, realizando-se a maior parte dos negócios através de agentes intermediários. Em consequência, os negócios são incertos e imprevisíveis.

I – Abordagem estratégica

A Direcção da empresa tem meditado sobre o assunto e é de opinião que a situação é indesejável, pois que, não permite, por um lado gerar curvas de experiência por cliente e aproveitar a experiência acumulada de casos anteriores e, por outro lado, desenvolver relações de parceria, o que contribuiria para uma desejável fidelização dos clientes.

Com o desenvolvimento verificado no sector de componentes para a indústria automóvel, a CAVIMOLDE começou também a ser consultada por algumas das empresas deste sector. Invariavelmente, porém, não se verificavam adjudicações. Foi então que a Direcção da CAVIMOLDE decidiu pedir a colaboração do Eng.º Salvador. Este, que trabalha como consultor, grangeou uma imagem de grande competência pela sua capacidade de integrar nas suas análises as perspectivas estratégica, económica e técnica.

Durante a primeira reunião com a Direcção, tornou-se claro que a CAVIMOLDE teria que procurar diferenciarse dos seus concorrentes. Em termos de qualidade, preço e prazo de entrega, a CAVIMOLDE considerava-se perfeitamente concorrencial, isto é, igual a muitos outros dos seus concorrentes. Contudo, quando se passou em revista a dimensão “Serviço ao Cliente” da vertente Qualidade, o Eng.º Salvador lançou uma ideia que iria revelar-se prática de sucesso daí em diante na CAVIMOLDE.

Com efeito, os moldes eram sempre especificados e muitas vezes o número de cavidades iguais era fixado pelos clientes. Outras vezes era escolhido pela CAVIMOLDE. Este dimensionamento era realizado sem que um tivesse em conta os recursos que iriam ser utilizados pelo outro (de produção do molde por parte da CAVIMOLDE e de produção das peças por parte do cliente). Se se procurasse, numa perspectiva integrada, otimizar o conjunto destes recursos, conseguir-se-iam decerto soluções mais económicas.

Por outro lado, a atitude assumida pela CAVIMOLDE de procurar servir o cliente não só com a melhor solução técnica mas também com a melhor solução económica, seria interpretada por cada cliente como um serviço de valor acrescentado prestado pela CAVIMOLDE, o que aumentaria a competitividade desta. Na prática esta atitude implicaria um acompanhamento estreito dos clientes (começando por aqueles que oferecem maiores perspectivas futuras) no sentido de conhecer com antecedência as suas necessidades e trabalhar em conjunto na busca

das melhores soluções (engenharia simultânea ou concorrente). Esta atitude activa opôr-se-ia à atitude passiva tradicional de aguardar pelas consultas.

Após uma análise aos pedidos de orçamento pendentes, a Direcção da CAVIMOLDE identificou o caso de uma empresa, a INJECTA, a qual, em seu entender, ofereceria maior abertura e disponibilidade para lançar um caso piloto. O caso desta empresa iria consistir na determinação do nº ideal de cavidades moldantes a executar num molde destinado à obtenção de peças, consideradas relativamente simples. Desde logo, a Direcção prontificou-se para contactar a INJECTA para lhe expor os objectivos e abrir um canal de comunicação directa com o Eng.º Salvador.

O Eng.º Salvador despediu-se após ter combinado uma próxima reunião com o Eng.º Serra, responsável pelo Projecto. A estes, juntar-se-ia mais tarde o Eng.º Feliz responsável pela Produção da INJECTA, passando os três a compor a equipa deste projecto

II – Abordagem técnico-económica

Nessa reunião concluiu-se que se estava perante um problema que, na perspectiva técnica, permitia soluções alternativas. Cada uma destas alternativas, porém, apresentava custos diferentes, quer de construção do molde (lado do fornecedor) quer de exploração (lado do cliente). Assim, na perspectiva económica, tornou-se claro que uma daquelas alternativas (correspondente a um determinado nº de cavidades N) apresentaria concerteza o menor custo total, ou, o que é o mesmo, proporcionaria peças com o menor custo unitário possível.

Os custos considerados relevantes para a análise foram os seguintes:

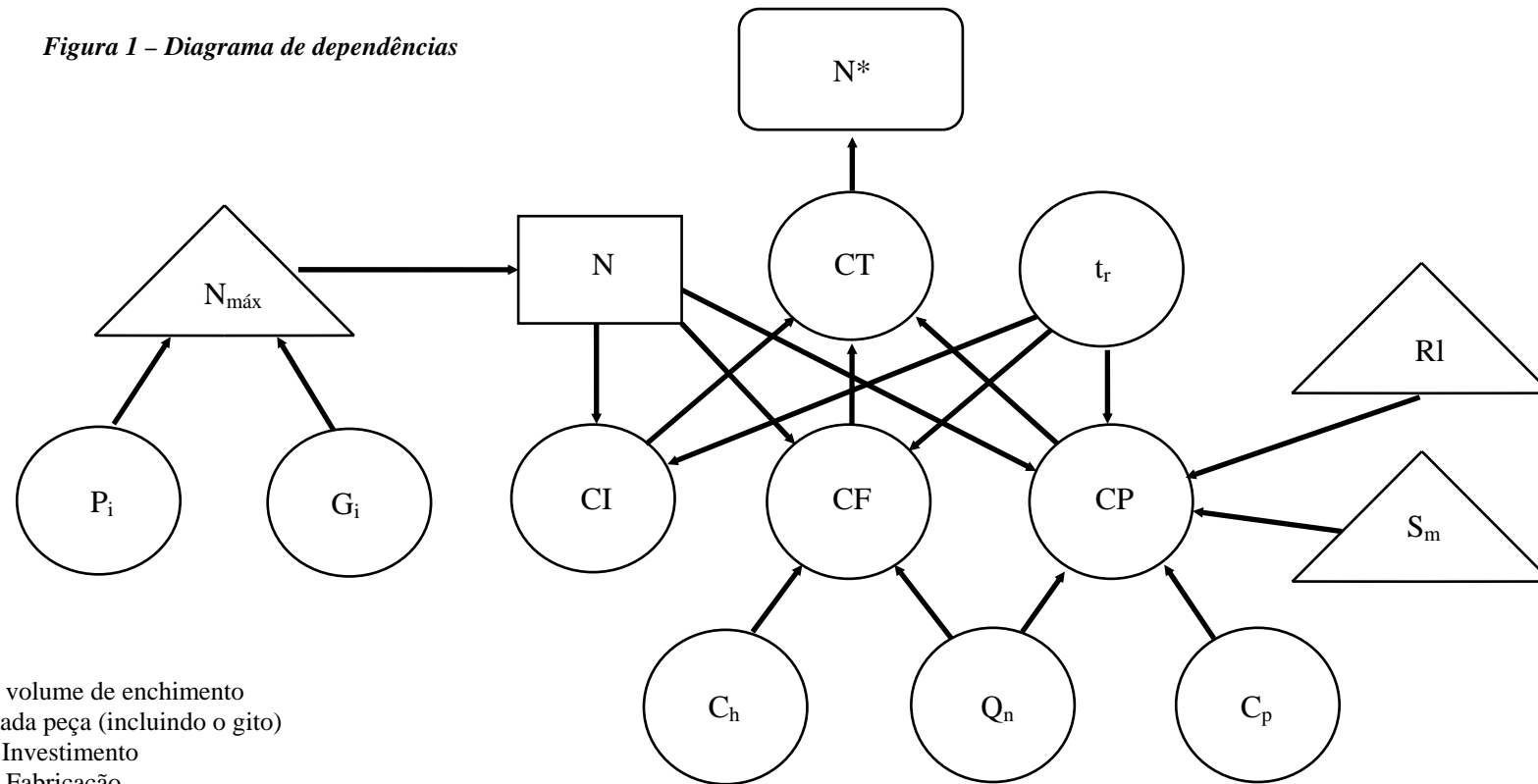
- Custo de construção do molde (investimento a realizar pela INJECTA);
- Custo de fabricação das peças;
- Custo de manutenção do molde;
- Custo de posse do *stock* (produção antecipada pela INJECTA de forma a desacoplar a cadência da sua prensa do ritmo de distribuição do seu novo produto);
- Custo de preparação da prensa (onde a INJECTA realizará a produção das peças que integrarão o seu novo produto).

Era necessário começar por recolher todos os dados que permitissem a quantificação daqueles custos, após o que se realizaria o cálculo de optimização. Após alguma reflexão, o Eng.º Salvador definiu o diagrama de dependências que se pode observar na Figura 1 na próxima página. Este diagrama mostra a lógica do raciocínio a seguir, identificando todos os dados necessários recolher, a natureza de cada variável (objectivo, decisão ou intermédia), as dependências de cada variável e ainda todas as restrições que limitam as soluções possíveis.

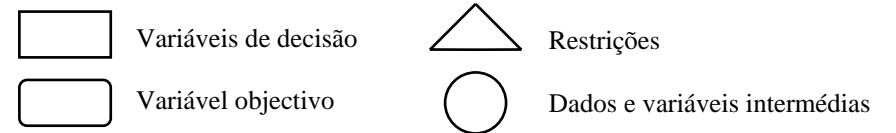
Alguns contactos posteriormente realizados pelo Eng.º Salvador com a CAVIMOLDE e com a INJECTA, destinaram-se a confirmar as seguintes hipóteses:

- Se as dimensões, tolerâncias e outras exigências de qualidade podiam ser respeitadas por um molde multicavidades;
- Se os meios de produção existentes na CAVIMOLDE permitiam construir um molde multicavidades fiável;

Figura 1 – Diagrama de dependências



Pi - Limite do volume de enchimento
 Gi - Peso de cada peça (incluindo o gito)
 CI - Custo do Investimento
 CF - Custo de Fabricação
 CP - Custo de Preparação
 CT - Custo Total
 Ch - Custo horário da prensa
 Qn - Produção necessária no ano n
 Cp - Custo de preparação da prensa
 RI - Regime laboral
 Sm - *Stock* médio
 N* - Número óptimo económico de cavidades
 N - Número de cavidades (genérico)
 Nmáx - Número máximo de cavidades tecnicamente viável
 tr - Taxa de referência



- Se a INJECTA possuía a máquina de injeção apropriada ao molde;
- Se era possível uma repartição simétrica das cavidades sobre a face de trabalho do molde;
- Se o prazo de entrega desejado pela INJECTA era compatível com o prazo de fabricação de um molde multicavidades;
- Se o ritmo de produção (injeção) para estas peças era compatível com as previsões/venda da INJECTA.

Uma vez confirmados todos estes pontos e obtidos alguns dados quantitativos, o Eng.º Salvador ficou em condições de calcular os vários custos relevantes.

1 – Custos relevantes

Os raciocínios e os modos de obtenção dos dados adoptados pela equipa, foram os seguintes:

1.1 – Custo de construção do molde (investimento) (CI)

Foi necessário estimar o seu custo para todas as alternativas tecnicamente viáveis.

Sendo conhecidos: Limite do volume de enchimento: $P_i = 6.000$ g/unid
 Peso de cada peça (incluindo o gito): $G_i = 200$ g/unid

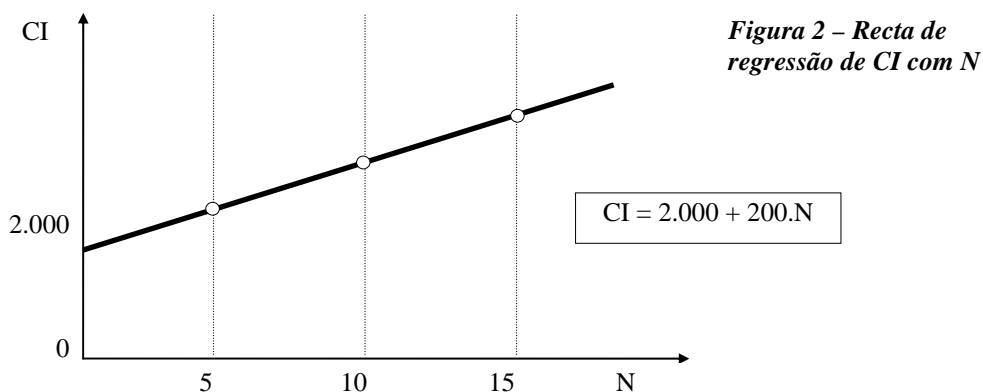
O molde poderia, teoricamente, comportar um número de cavidades entre um mínimo de 1 e um máximo de $6.000/200 = 30$ cavidades. Decidiu-se, porém, não ir além de 20 cavidades por várias razões de ordem prática. Será então $N = 1, 2, 3, \dots, 20$.

O custo do molde (CI) foi depois estimado pelo Eng.º Serras para três alternativas: 5, 10 e 15 cavidades (arbitradas uniformemente no intervalo 1 a 20), tendo concluído pela existência de uma relação directa e aproximadamente linear do custo com o número de cavidades (N).

- Custo do molde com 5 cavidades = 3.000 c
- Custo do molde com 10 cavidades = 4.000 c
- Custo do molde com 15 cavidades = 5.000 c

A análise de regressão linear forneceu a seguinte expressão:

$$CI = 2.000 + 200.N \quad (c) \quad (1)$$



Este custo constitui um valor presente (ou actual), pelo que deve ser anualizado.

$$\begin{aligned} CI_a &= (2.000 + 200.N) \times (A/P;10;3) \\ CI_a &= 804,23 + 80,42.N \quad (\text{c/ano}) \end{aligned} \quad (2)$$

A taxa de referência foi fixada em 10%, correspondente ao valor mínimo que o Eng.º Salvador julgou razoável como aplicação alternativa (depósitos a prazo + pequeno prémio de risco) dos capitais permanentes da INJECTA. O prazo de 3 anos corresponde à vida esperada do produto no qual a peça a fabricar pela INJECTA vai ser integrada.

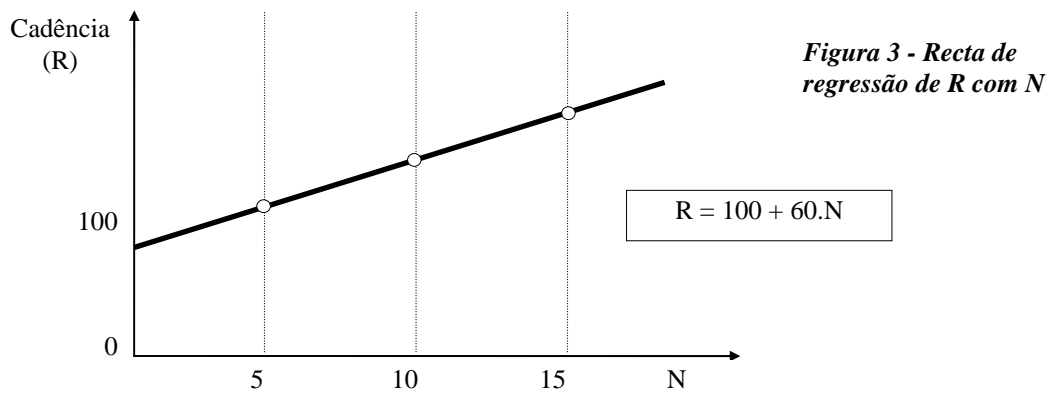
1.2 – Custo de Fabricação das Peças (CF)

O Eng.º Feliz estimou as cadências prováveis da prensa onde o molde irá funcionar, para três alternativas: 5, 10 e 15 cavidades, tendo concluído pela existência de uma relação directa e aproximadamente linear da cadência (R) com o nº de cavidades (N).

- Cadência para 5 cavidades = 400 unid/hora
- Cadência para 10 cavidades = 700 unid/hora
- Cadência para 15 cavidades = 1.000 unid/hora

A análise de regressão linear forneceu a seguinte expressão:

$$R = 100 + 60.N \quad (\text{unid/hora}) \quad (N= 1, 2, 3, \dots, 20) \quad (3)$$



O Eng.º Feliz informou também o custo horário da prensa $C_h = 6$ c/hora.

A INJECTA informou as suas previsões de venda do seu produto que vai integrar a peça, como sendo:

Ano 1	$Q_1 = 50.000$	unid
Ano 2	$Q_2 = 30.000$	unid
Ano 3	$Q_3 = 20.000$	unid

O custo anual de fabricação no ano n é dado por:

$$CF_i = Q_n \times C_h / (100 + 60.N)$$

Os custos anuais de fabricação em cada ano, serão então:

Ano 1	$CF_1 = 50.000 \times 6 / (100 + 30.N) = 300.000 / (100 + 60.N)$	c
Ano 2	$CF_2 = 30.000 \times 6 / (100 + 30.N) = 180.000 / (100 + 60.N)$	c
Ano 3	$CF_3 = 20.000 \times 6 / (100 + 30.N) = 120.000 / (100 + 60.N)$	c

Estes custos são custos futuros, pelo que têm que ser actualizados antes de serem anualizados.

O custo de fabricação actual equivalente é dado por:

$$CF_p = 1 / (100 + 60.N) \cdot [300.000 \times (P/F;10;1) + 180.000 \times (P/F;10;2) + 120.000 \times (P/F;10;3)]$$

$$CF_p = 511.656 / (100 + 60.N)$$

E o custo de fabricação anual equivalente é:

$$CF_a = 511.656 / (100 + 60.N) \times (A/P;10;3)$$

$$CF_a = 205.740 / (100 + 60.N) \quad \text{c/ano} \quad (4)$$

1.3 – Custo de manutenção do molde (CM)

A equipa de trabalho concluiu que o custo de manutenção é tipicamente composto por duas partes: uma fixa e outra variável. A parte variável é proporcional ao desgaste verificado em cada cavidade, ou seja, ao nº de peças a injectar e não ao nº de cavidades do molde (N). Como tal, não constitui um custo relevante, sendo desprezado da análise. Quanto à parte fixa (proporcional à frequência de paragens para intervenção), foi considerada de valor diminuto, pelo que, foi também desprezado da análise.

1.4 – Custo de posse do stock (CS)

O Eng.º Feliz informou que a política da INJECTA será, em princípio, produzir de forma a manter permanentemente um *stock* de segurança correspondente a 1 dia de consumo (vendas) e um *stock* operacional de 5 dias.

Espera também que o consumo seja regular, não se prevendo quaisquer picos importantes.

O custo de posse é calculado pelo produto seguinte:

$$\text{Quantidade média de peças a manter em stock} \times \text{Custo unitário marginal de fabricação (matéria prima + energia + consumíveis)} \times \text{Taxa de posse}$$

O primeiro factor será igual para qualquer valor de N. O segundo factor também não depende de N. O terceiro factor é igual ao custo de oportunidade dos capitais permanentes da INJECTA, o qual também não depende dos valores que N possa tomar.

Notar que, o Eng.º Salvador raciocinou em termos de custo marginal e não de custo total (fixo + variável), na acepção contabilística. Nestas condições, o custo de posse não constitui um custo relevante, sendo também desprezado da análise.

1.5 – Custo de preparação da prensa (*set-up*) (CP)

Em termos marginais, o custo de *set-up* é calculado pela soma das seguintes parcelas:

Despesas efectivas

- Consumíveis (limpeza e lubrificantes);
- Energia (aquecimento de moldes, manutenção da temperatura em fornos ou estufas, etc.);
- Resto de matéria prima usada na série anterior (desde que não aproveitável);
- Primeiras peças da nova série fora de especificações (antes da estabilização de todos os parâmetros de fabrico);

Oportunidades perdidas (normalmente proporcionais à duração da paragem para *set-up* e a considerar somente quando a máquina constitui um estrangulamento, ou de outra forma, quando a capacidade se encontra totalmente vendida - situação em que produção perdida significa vendas perdidas, pois não pode ser adiada).

- Margem de contribuição para o lucro (produto da quantidade vendida perdida pela diferença entre o preço unitário líquido de venda e o custo unitário *standard*);
- Margem de contribuição para cobertura dos custos fixos (produto da quantidade de vendas perdida pelo custo unitário fixo);

O Eng.º Feliz informou que a prensa não constituirá um estrangulamento de produção. Assim sendo, não se verificarão custos de oportunidade. Informou, contudo, que as despesas efectivas totalizarão aproximadamente 10.000\$00 por *set-up* (C_p). Este custo de preparação (CP) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$CP = C_p \cdot Q_n / L_n \quad (5)$$

Em que L_n representa a dimensão média do lote de fabrico e Q_n representa o consumo da peça, ambos no ano n .

Consideremos agora a figura seguinte. Nesta encontra-se representada a evolução temporal do volume do *stock* da peça a fabricar. A prensa funciona intermitentemente, isto é, pára logo que o nível de *stock* máximo SM é atingido (correspondente ao consumo de duas vezes o *stock* operacional médio SO mais 1 dia de *stock* de segurança SS, ou seja, $2 \times 5 + 1 = 11$ dias) e arranca logo que o nível de *stock* de segurança é atingido. Consideremos ainda que o ritmo de consumo Q se mantém aproximadamente constante num horizonte relativamente curto (poucas semanas ou poucos ciclos).

O Eng.º Feliz informou ainda que o regime de trabalho previsto para a prensa é de 46 sem/ano x 5 dias/sem x 8 h/dia.

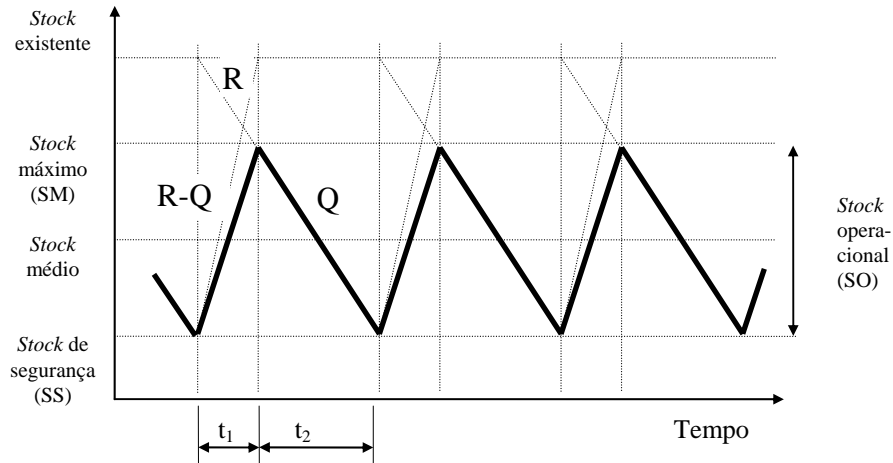


Figura 4 – Evolução previsional do stock de peças produzidas pela prensa. Durante o período t_1 o stock cresce ao ritmo de produção R menos o ritmo de consumo Q . Durante o período t_2 o stock diminui ao ritmo do consumo Q

Da figura 4 deduz-se a seguinte relação geométrica:

$$SO \times Q_n / 5 \times 46 = L_n \times (1 - Q_n/R) \quad (6)$$

Em que q_n é o ritmo horário médio de consumo no ano n e R , conforme vimos atrás na expressão (3), é o ritmo médio de produção.

Desta expressão podemos deduzir o valor de L_n em cada ano, o qual, uma vez substituído na fórmula (6), nos permite calcular o custo de preparação em cada ano CP_n .

$$CP_n = 230 - Q_n/8 \times 1/R$$

Os custos anuais de preparação em cada ano, serão então:

Ano 1	$CP_1 = 230 - 50.000/8 \times 1/(100 + 60.N) = 230 - 6.250/(100 + 60.N)$	c
Ano 2	$CP_2 = 230 - 30.000/8 \times 1/(100 + 60.N) = 230 - 3.750/(100 + 60.N)$	c
Ano 3	$CP_3 = 230 - 20.000/8 \times 1/(100 + 60.N) = 230 - 2.500/(100 + 60.N)$	c

Estes custos são custos futuros, pelo que têm que ser actualizados antes de serem anualizados. O custo de preparação actual equivalente é dado por:

$$CP_p = 230 \times [(P/F;10;1) + (P/F;10;2) + (P/F;10;3)] - [6.250 \times (P/F;10;1) + 3.750 \times (P/F;10;2) + 2.500 \times (P/F;10;3)] \times 1/(100 + 60.N)$$

$$CP_p = 572 - 10.660/(100 + 60.N)$$

E o custo de preparação anual equivalente é:

$$CP_a = (572 - 10.660/(100 + 60.N)) \times (A/P;10;3)$$

$$CP_a = 230 - 4.286,3/(100 + 60.N) \quad \text{c/ano} \quad (7)$$

Conforme se pode concluir da análise desta expressão, o Cp_a é muito pouco sensível a N e apresenta um valor máximo igual a 230 c/ano.

1.6 – Custo total

O Eng.º Salvador calculou finalmente o custo total $CT_a = CI_a + CF_a + CP_a$, tendo resultado:

$$CT_a = 1.034,23 + 80,42.N + 201.454/(100 + 60.N) \quad \text{c/ano} \quad (8)$$

1.7 – Número óptimo económico de cavidades

Para encontrar o valor de N a que corresponde o menor valor de CT_a , podemos considerar a função como contínua (embora de natureza discreta, a função será tratada como sendo contínua e o resultado será aproximado ao inteiro imediatamente mais próximo), derivar a equação em ordem a N, igualar o resultado a 0 e calcular as suas raízes.

$$dCT/dN = 80,42 - 201.454 \times 60 / (100^2 + 2 \times 100 \times 60 \times N + 60^2 \times N^2) = 0$$

De onde se deduz: $N = 4,8 \cong 5$ cavidades

Porém, este cálculo é complicado e obriga ao conhecimento de cálculo diferencial e da fórmula resolutive das equações do 2º grau.

Uma forma mais expedita de resolução consiste em seguir um método iterativo. Para isso construímos um quadro com todos os valores possíveis de N (1, 2, 3,...20) e calculamos o valor do custo total CT para cada uma das hipóteses. Obteremos assim:

N	CT	
1	2.374	
2	2.111	
3	1.995	
4	1.948	
5	1.940	mínimo
6	1.955	
7	1.985	
8	2.025	
9	2.073	
10	2.126	
·	·	
20	2.798	

Conforme podemos observar o CT será mínimo para um número de cavidades igual a 5. Será pois esta a nossa conclusão $N = 5$

III – Análise de sensibilidade

Conforme podemos observar no quadro do ponto anterior, se admitirmos um acréscimo de custo de, por exemplo 5%, em relação ao custo mínimo, deixamos de ter a recomendação rígida de 5 cavidades (ponto óptimo económico), número que poderá não convir sob o ponto

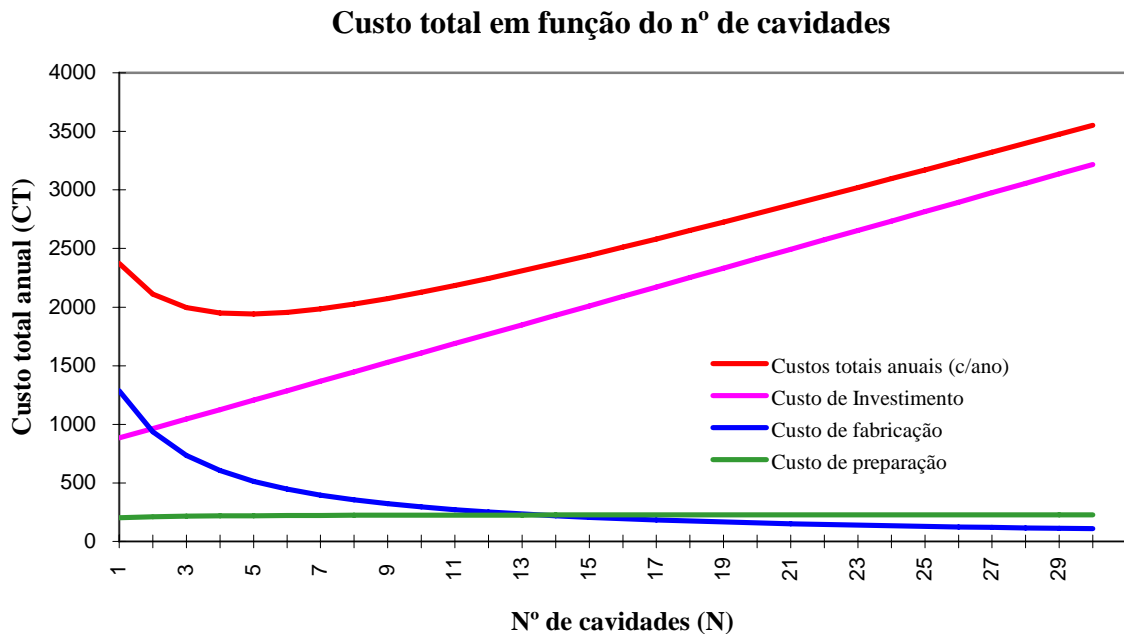
de vista técnico (normalmente selecciona-se um número par de cavidades) - e passamos a ter um intervalo óptimo económico de valores de N.

$$\begin{aligned} \text{CT mínimo} &= 1.940 \text{ c/ano} \\ 1,05 \times 1.940 &= 2.037 \text{ c/ano} \end{aligned}$$

De onde se deduz que o intervalo óptimo económico é: $3 < N < 8$

Sob o ponto de vista técnico é indiferente escolher 4, 6 ou 8 cavidades. Sob o ponto de vista económico, já assim não acontece. Com efeito, podemos ver no quadro de sensibilidade quais os valores de CT para cada uma destas alternativas e concluir que o CT é o menor para $N = 4$ cavidades.

A figura seguinte representa de forma gráfica os resultados obtidos atrás.



Rui Assis
Abril/1997
rassis@netcabo.pt