

# APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO E DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL EM UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO <sup>1</sup>

Rodrigo Ferraz de Andrade Flores da Silva <sup>2</sup>

Marcelo Kruger <sup>3</sup>

Marcus Vinicius Figueira dos Reis <sup>4</sup>

Leonardo Barboza Trindade <sup>5</sup>

Rodrigo Nazareth Borges <sup>6</sup>

Bruno Augusto Batista Ribeiro <sup>7</sup>

Joaci Gonçalves de Oliveira <sup>8</sup>

Geraldo Ildeu Lara <sup>9</sup>

## Resumo

O uso de diques e barragens pode alterar as características do escoamento no interior de um distribuidor de maneira positiva ou negativa, de acordo com a posição e dimensão dos mesmos. A integração da ferramenta de otimização modeFrontier com a mecânica dos fluidos computacional através do software ANSYS CFX permite avaliar, de forma automatizada, as possíveis configurações de barragens no interior do distribuidor em busca dos melhores padrões do escoamento, em relação aos parâmetros de interesse. Inicialmente o domínio de projeto foi analisado utilizando-se técnicas simples de DOE (*Design of Experiment*). Com os resultados obtidos, construiu-se uma superfície de respostas do problema, na qual foi empregado o algoritmo de otimização, que retorna os pontos ótimos (virtuais) visando maximizar parâmetros como tempo de residência e volumes característicos. Por fim, os pontos ótimos foram novamente avaliados para validar os resultados.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Distribuidores; Dinâmica dos fluidos computacional; Otimização.

## USE OF OPTIMIZATION TOOLS AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ON A CONTINUOUS CASTING TUNDISHES

### Abstract

The use of weirs and baffles in a continuous casting tundish may improve or decline the flow pattern according to their position and dimensions. The integration of the optimization tool modeFrontier with computational fluid mechanics analyses by ANSYS CFX allow one to automatically inspect the possible configurations of a baffle inside a tundish, searching for a better flow pattern inside as a function of a set of design parameters. Initially the design space was analyzed through a simple DOE (Design Of Experiments) technique, which allowed a response surface to be created. Next, a multi-objective algorithm was applied on this surface, using residence time and characteristic volumes as objective functions, selecting a few virtual designs. Lastly, virtual designs were evaluated, to validate the process.

**Key words:** Computational fluid dynamics, Optimization; Continuous casting; Tundishes.

---

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS

<sup>3</sup> Eng. Mecânico, Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS

<sup>4</sup> Eng. Mecânico, M. Sc., Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS

<sup>5</sup> Físico, Dr., Science Technology and Engineering - STE

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico, M. Sc., Centro de Pesquisas da Magnesita SA

<sup>7</sup> Engenheiro Químico, Centro de Pesquisas da Magnesita SA

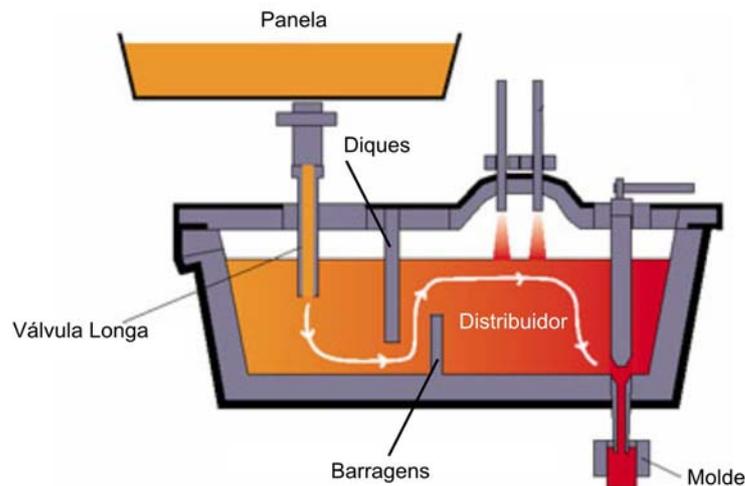
<sup>8</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Companhia Siderúrgica Paulista

<sup>9</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Departamento de Assistência Técnica da Magnesita SA

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de diques e barragens em distribuidores de lingotamento contínuo desempenha um papel fundamental na remoção de impurezas do metal fundido, pois, em geral, proporciona um aumento no tempo de residência médio e no volume pistonado do escoamento no interior do equipamento. Este aumento promove uma maior flotabilidade e conseqüentemente uma maior coleta de inclusões na escória, garantindo assim uma melhor qualidade do aço produzido. <sup>(1)</sup>

O posicionamento incorreto de barragens e diques pode, entretanto, prejudicar a qualidade do material produzido, criando regiões de recirculação que irão contribuir para a solidificação prematura e indesejada do aço, comprometendo assim o processo de lingotamento, <sup>(2)</sup> representado esquematicamente na Figura 1.



**Figura 0.** Desenho esquemático de um distribuidor de lingotamento contínuo.

O dimensionamento e posicionamento de diques e barragens consiste, portanto, numa etapa importante do projeto de distribuidores, enquanto que a não linearidade das equações envolvidas na determinação do escoamento dificulta a execução desta tarefa.

A utilização de técnicas de Mecânica de Fluidos Computacional (CFD) neste processo tem assumido um papel cada vez mais expressivo, devido a sua grande flexibilidade em relação aos métodos convencionais (experimentos em laboratório, confecção de protótipos, etc), e o constante desenvolvimento tecnológico no setor da informática.

A análise individual de configurações específicas de diques e barragens não permite, entretanto, uma conclusão a respeito da influência dos parâmetros de projeto sobre a eficiência do distribuidor, fazendo com que muitas vezes o projeto siga um processo empírico, aonde as simulações numéricas são utilizadas apenas para verificação das soluções propostas.

A utilização de algoritmos de otimização mostra-se, portanto, desejável no projeto de diques e barragens para distribuidores de lingotamento contínuo, uma vez que a não linearidade das equações envolvidas trás uma complexidade no estabelecimento de uma relação entre os parâmetros de projeto e o desempenho do distribuidor, dificultando o encontro do ponto ótimo de operação.

No presente trabalho técnicas de otimização são empregadas na determinação das posições e alturas de barragens, de maneira a garantir uma melhor condição de operação do distribuidor, de acordo com os critérios apresentados nas seções seguintes.

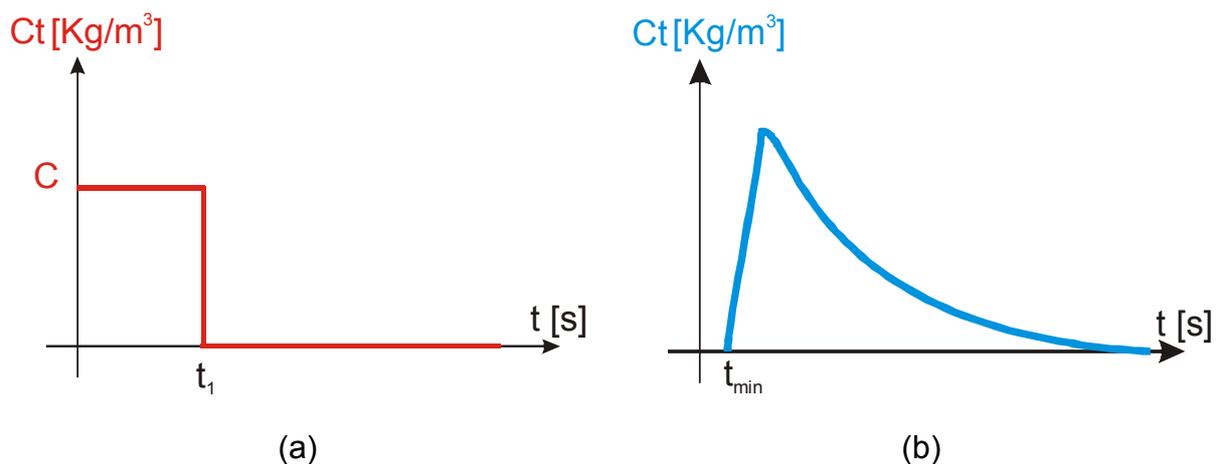
Em função do elevado recurso computacional exigido para uma única análise de CFD, o processo de otimização aqui adotado propõe a utilização de superfícies de resposta criadas a partir de um conjunto de configurações (DOE), com o objetivo de acelerar o processo de otimização.

Entre os resultados, são apresentados, além das superfícies de resposta, análises estatísticas como a matriz de correlação, que indica a dependência entre os parâmetros do projeto e as variáveis de interesse, e a comparação entre os melhores resultados obtidos pelo otimizador com soluções empíricas propostas inicialmente.

## 2 MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O primeiro passo na aplicação de um processo de otimização é reconhecer as características de funcionamento que devem ser aperfeiçoadas, denominadas de funções objetivo, e os parâmetros de projeto que serão analisados para se atingir este objetivo, dando origem ao domínio de projeto (*design space*).

Como apresentado anteriormente, o aumento de eficiência desejado no distribuidor com o projeto de diques e barragens se traduz no aumento do tempo de residência médio do escoamento, sem favorecer, entretanto, a formação das regiões de recirculação do material.



**Figura 0.** Injeção de um pulso de traçador na entrada do domínio (a), que permite a obtenção da DTR (b)

A análise do tempo de residência é realizada com a inspeção da curva de distribuição do tempo de residência (DTR), obtida através do monitoramento da concentração de um traçador nas saídas do distribuidor, após a injeção do mesmo na entrada do domínio na forma de um pulso, conforme ilustrado na figura 2-1.

A partir da DTR são criadas relações que permitem quantificar a eficiência de uma determinada configuração de barragens, e que serão utilizadas como funções objetivo no processo de otimização.

A primeira relação utilizada é o Volume Pistonado, que representa a relação entre o tempo mínimo e o tempo teórico de residência, de acordo com a equação (1):

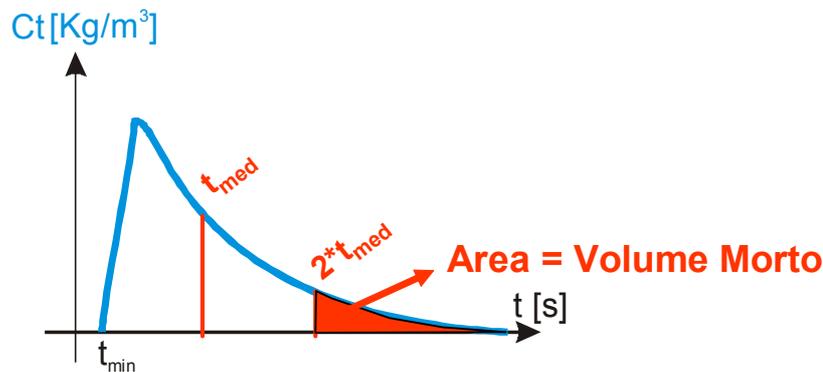
$$V_{\text{pistonado}} (\%) = \frac{t_{\min}}{t_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (1)$$

Aonde o tempo mínimo ( $t_{\min}$ ) representa o tempo no qual 2% da massa de traçador deixou o domínio, e o tempo teórico ( $t_{\text{teórico}}$ ) representa o valor teórico de residência calculado a partir da razão entre o volume do distribuidor e vazão de entrada.

Para aumentar a eficiência do distribuidor deve-se procurar por configurações que maximizem o volume pistonado, garantindo assim que o tempo mínimo de residência seja grande o suficiente para propiciar a flotabilidade e remoção das inclusões.

A segunda relação criada a partir da DTR para quantificar a eficiência do distribuidor está relacionada às regiões de recirculação, que estão associadas com o material que permanece no distribuidor por um tempo excessivamente longo, podendo ocasionar a solidificação do material, ou contribuir para a não homogeneidade do aço produzido entre duas panelas consecutivas.

A existência de regiões de recirculação é caracterizada na DTR pela longa extensão da curva após o valor do tempo médio de residência. Com o objetivo de quantificar a extensão destas regiões cria-se o conceito de Volume morto, que representa a área do gráfico onde o tempo de residência é maior a duas vezes o tempo médio de residência, de acordo com a Figura 2.

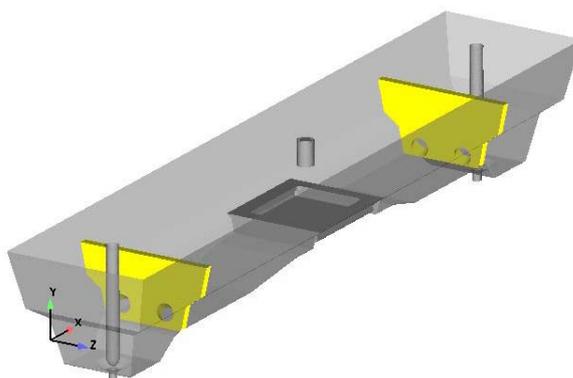


**Figura 0.** Ilustração do método de obtenção do Volume morto.

Ao contrário do volume pistonado, para otimizar as condições de operação do distribuidor deseja-se que os valores do volume morto permaneçam nos valores mais baixos possíveis.

Após determinar as funções objetivo, as quais desejamos maximizar ou minimizar no problema de otimização, deve-se determinar quais os parâmetros de projeto serão avaliados no processo de otimização, e quais parâmetros irão permanecer constantes.

O distribuidor considerado neste estudo apresenta inibidor de turbulência, sistema Yes, tampão, e uma barragem posicionada entre o tubo longo e os veios, de acordo com a Figura 3.



**Figura 1.** Distribuidor considerado no estudo de otimização.

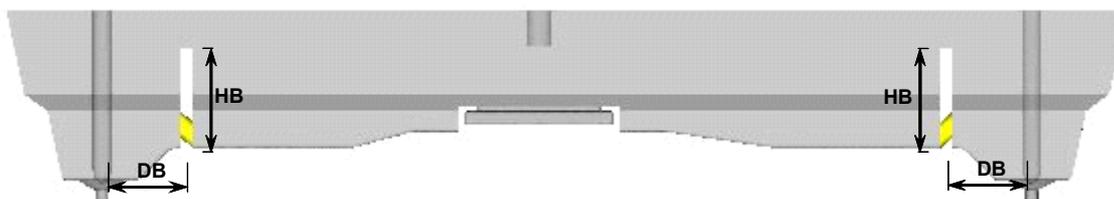
Por se tratar de uma geometria real, o estudo se concentra na determinação das melhores posições e altura das barragens, permanecendo fixos, portanto, as geometrias do distribuidor, inibidor de turbulência, tampão e válvula longa.

Existe ainda uma assimetria entre os veios e a válvula longa, o que exige a inclusão de ambos os veios nas análises, obtendo-se, portanto, uma curva de distribuição de tempo de residência (DTR) para cada veio. As relações apresentadas para as funções objetivo também são aplicadas em ambos os veios.

Uma característica inerente aos processos de otimização é que o número de variáveis incluídas no estudo está diretamente relacionado com o número de análises necessárias para resolução do problema. Como as análises de CFD envolvidas em cada configuração exigem um grande esforço computacional, uma redução do número de variáveis acarretaria numa redução do número de análises, e conseqüentemente numa redução do tempo necessário para conclusão do processo de otimização.

Assim sendo, o posicionamento das barragens é simplificado de maneira que ambas possuam os mesmos parâmetros construtivos, ao invés de possuírem posicionamentos independentes.

Os parâmetros considerados neste caso são altura da barragem (HB) e distância da barragem (DB) em relação ao veio, conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 2.** Parâmetros utilizados no posicionamento das barragens: Altura (HB) e Distância (DB).

A largura das barragens assim como a posição dos furos de passagem não é alterada nas simulações.

## 2.1 Abordagem Numérica

A maioria dos algoritmos de otimização voltados para problemas com múltiplas funções objetivo exige um grande número de análises para convergência do processo.

No caso específico do distribuidor de lingotamento contínuo, aqui considerado, a análise de uma única configuração, esquematizada na figura 2-5, pode consumir algumas dezenas de horas de processamento, tornando indesejável a aplicação direta de algoritmos de otimização.

Para contornar este problema, optou-se pela construção de uma superfície de resposta para cada função objetivo do problema, criada através de um conjunto de soluções obtidas a partir de um DOE (*Design of Experiments*). Desta maneira, os algoritmos de otimização não irão avaliar as funções objetivo a partir de uma análise de CFD, mas sim do valor correspondente na superfície de resposta.

O processo de otimização consiste, portanto, na determinação de um DOE, a partir do qual são construídas as superfícies de resposta. As superfícies de resposta são, então, utilizadas para alimentar o algoritmo de otimização, que irá encontrar as melhores configurações de barragens, denominadas de projetos virtuais, por incluir o possível erro de discretização das superfícies. Por fim os projetos virtuais são avaliados por uma análise completa de CFD, para validar os resultados encontrados.

Na construção do DOE foram gerados 25 configurações de barragens, que descrevem uniformemente o domínio de projeto considerado, isto é, 5 valores de altura e distância de barragem uniformemente distribuídos entre os valores máximos e mínimos destas variáveis.

Cada configuração incluída no DOE é então resolvida de acordo com o esquema apresentado na Figura 5.

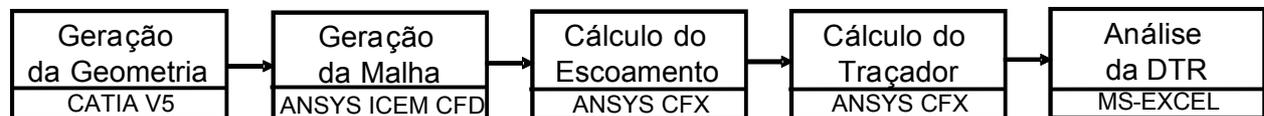


Figura 3. Processo de Avaliação de uma configuração de barragens do distribuidor.

Inicialmente os valores de altura e distância das barragens são inseridos no *software* Catia, responsável pela geração paramétrica da geometria. Em seguida a geometria é enviada ao gerador de malha ANSYS ICEM CFD, onde uma malha não estruturada com discretização das camadas limites nas fronteiras é gerada.

O campo de velocidades no interior do distribuidor é, então, calculado através de uma análise de CFD utilizando-se o *software* ANSYS CFX. Este resultado é usado como solução inicial para a simulação transiente do processo de injeção do traçador, do qual se extrai a curva DTR. A DTR é então exportada ao MS-Excel, onde são calculados os volumes característicos para cada veio. A sincronização e interação entre os processos representados na Figura 5 é realizada pelo *software* modeFrontier.

A partir destes resultados são construídas as superfícies de resposta, utilizando o método de Kriging,<sup>(3)</sup> disponível no *software* modeFrontier. As superfícies de resposta são então utilizadas pelo algoritmo de otimização MOGA-II (*Multi-Objective Genetic Algorithm*),<sup>(4)</sup> disponível no mesmo programa e responsável por encontrar os projetos virtuais que apresentem os melhores valores de volume morto e pistonado.

Cria-se então um novo DOE com os valores de altura e distância relativos aos projetos virtuais, e este novo DOE é mais uma vez analisado pelo processo ilustrado

na Figura 5, validando assim os resultados encontrados através de uma análise completa de CFD.

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados resultados estatísticos, como a matriz de correlação, superfícies de resposta obtidas a partir do método DOE, e a comparação entre os melhores resultados obtidos com o processo de otimização com uma solução empírica proposta inicialmente.

O primeiro resultado obtido é a matriz de correlação, apresentada na Tabela 1. Esta matriz representa a correlação entre as variáveis de projeto com as funções objetivo.

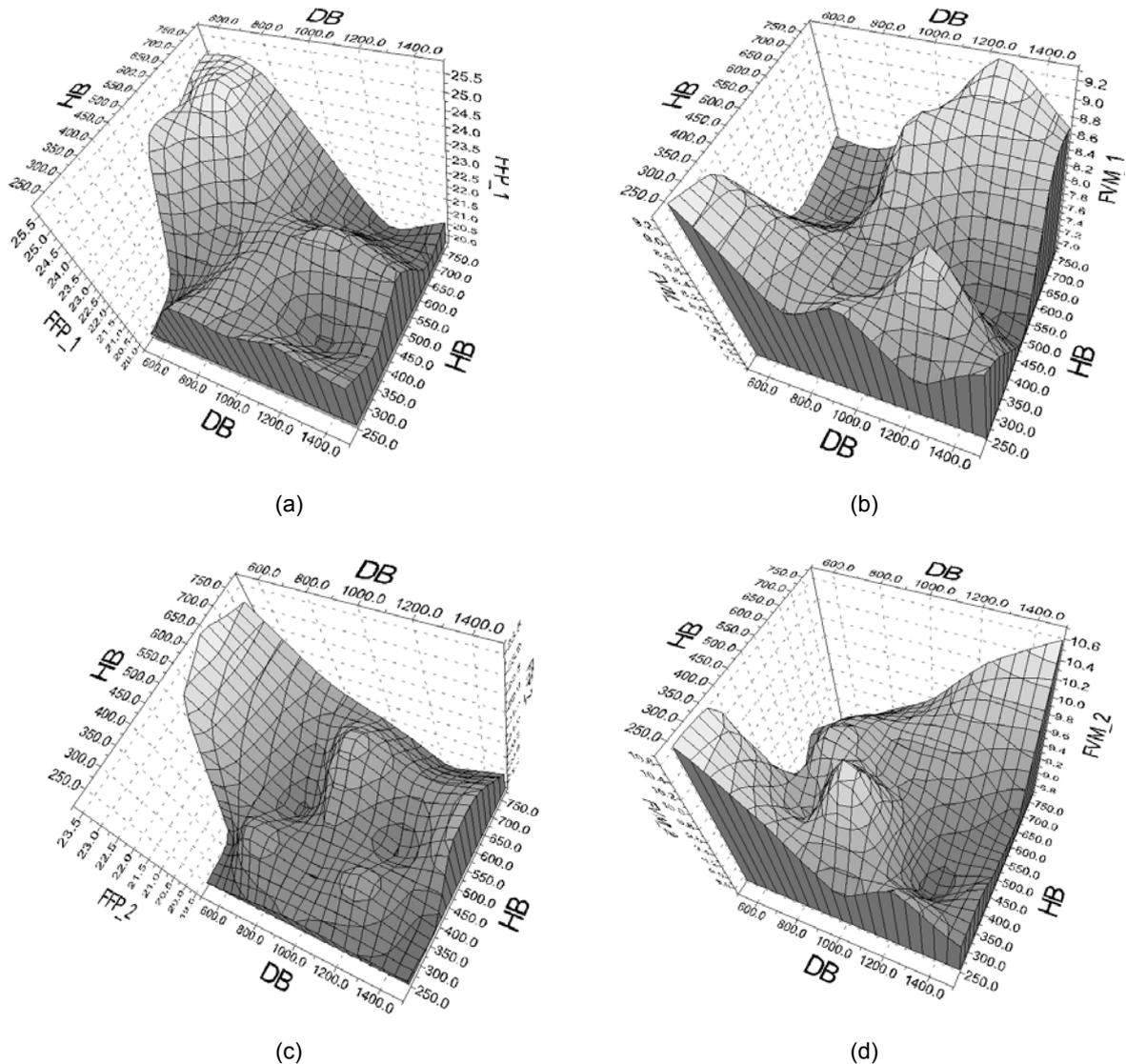
**Tabela 1.** Matriz de Correlação entre as variáveis de projeto e as funções objetivo, obtidas a partir da Tabela 2-solução do DOE. O valor de cada célula representa a correlação entre as variáveis indicadas nas linhas e colunas, variando entre -1 (azul) e 1 (vermelho).

	DB	HB	V <sub>Pistonado 1</sub>	V <sub>Pistonado 2</sub>	V <sub>Morto 1</sub>	V <sub>Morto 2</sub>
DB	1.00	0.00	-0.46	-0.36	-0.10	-0.11
HB	0.00	1.00	0.27	0.45	0.06	-0.08
V <sub>Pistonado 1</sub>	-0.46	0.27	1.00	0.57	-0.66	-0.43
V <sub>Pistonado 2</sub>	-0.36	0.45	0.57	1.00	-0.15	-0.62
V <sub>Morto 1</sub>	-0.10	0.06	-0.66	-0.15	1.00	0.45
V <sub>Morto 2</sub>	-0.11	-0.08	-0.43	-0.62	0.45	1.00

Através da Tabela 1 percebe-se um indicativo de correlação entre a altura da barragem e os volumes pistonados, indicando que um aumento da altura, com distância constante, está relacionado com um aumento do volume pistonado. Nota-se ainda uma correlação inversa entre a distância da barragem e os volumes pistonados em ambos os veios, indicando que uma redução da distância pode provocar um aumento dos mesmos.

Finalmente, verifica-se uma forte correlação inversa entre os volumes pistonados e mortos de cada veio, indicando que uma redução do volume pistonado pode promover o aumento de volume morto.

A partir dos resultados iniciais pode-se construir ainda as superfícies de resposta para cada função objetivo, representadas na Figura 6:



**Figura 6.** Superfícies de resposta para volume pistonado nos veios 1(a) e 2(c) e volumes mortos para os veios 1(b) e 2(d).

Os gráficos apresentam o comportamento das funções objetivo em função das duas variáveis de projeto: DB e HB. As funções objetivo são apresentadas nos eixos verticais, com os nomes de FFP (volume pistonado) e FVM (morto). Os subíndices 1 e 2 indicam qual veio está sendo analisado.

Percebe-se, nas superfícies de resposta, a corroboração das conclusões tiradas a partir da matriz de correlação, isto é, os volumes pistonados tendem a aumentar com o acréscimo da altura das barragens e diminuição das distâncias a partir dos veios, enquanto o volume morto apresenta comportamento inverso.

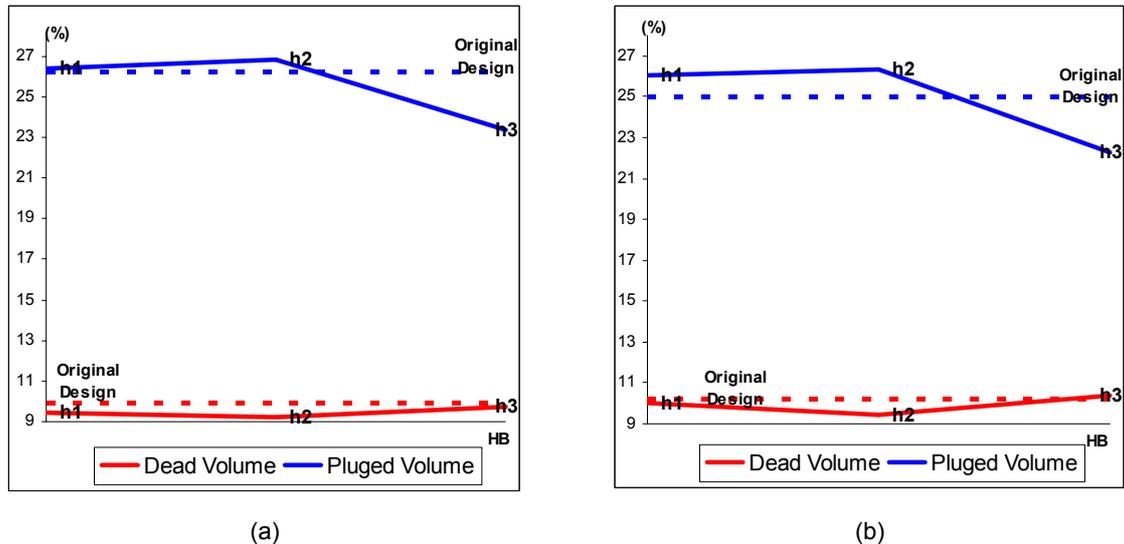
Mesmo com a forte indicação de que as melhores configurações encontram-se nas regiões de menor distância e maior altura, resolveu-se continuar o processo de otimização, aplicando o algoritmo MOGA nas superfícies de resposta acima, visando encontrar os pontos com maior volume pistonado em ambos os veios.

Originalmente o processo de otimização utilizaria duas funções objetivo: minimização de volume morto e maximização do volume pistonado. A matriz de correlação indica, entretanto, uma forte correlação entre os dois volumes. Assumindo-se que o aumento do volume pistonado estará relacionado com a

redução de volume morto, apenas uma função objetivo pode ser utilizada, isto é, maximizar o volume pistonado.

Os melhores resultados obtidos neste processo encontram-se na menor distância (DB) considerada.

Na Figura 7 são apresentadas a variação dos volumes característicos em função da altura para esta distância, e a comparação com a configuração empírica proposta inicialmente.



**Figura 7.** Comparação entre os volumes característicos obtidos com o otimizador (linha contínua) e aqueles referentes a configuração original (linha tracejada). Valores para o veio 1 (a) e veio 2 (b).

### 3 CONCLUSÕES

A influência do posicionamento e dimensionamento de barragens em distribuidores de lingotamento contínuo foi analisada, aplicando-se técnicas de DOE e otimização.

Percebeu-se a melhoria da eficiência do projeto à medida em que as barragens eram posicionadas próximas aos veios. Verificou-se ainda que o aumento da altura das barragens só consegue melhorar as condições de operação até um determinado valor, com conseqüente queda de performance após este valor.

Observou-se ainda a forte correlação entre o volume pistonado e o volume morto, permitindo a utilização de uma função de objetivo única por veio, neste caso a maximização do volume pistonado.

### REFERÊNCIAS

- 1 MAZUMDAR D., GUTHRIE, R. I. L. **ISIJ International**, Vol. 39, No. 6, 1999, pp. 524-547.
- 2 KEMENY F, HARRIS DJ, MCLEAN A, MEADOWCROFT TR, YOUNG JD. In: Proc. Conf. Continuous Casting of Steel, pp.232-245, 1981.
- 3 Jeong, S., Murayama, M. and Yamamoto, K., "Efficient Optimization Design Method Using Kriging Model," *Journal of Aircraft*, Vol. 42, 2005, pp.413-420.
- 4 D.Quagliarella, J.Periaux, C.Poloni, "Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science", John Wiley & Sons, England, 1997