

# UTILIZAÇÃO DE QFD (DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE) NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS SÓLIDOS

SILVA, G. F. B. L. e <sup>(1)</sup>; MALYNOWSKYJ, A. <sup>(2)</sup>; MOURÃO, M. B. <sup>(3)</sup>

Escola Politécnica da Universidade São Paulo (POLI/USP) <sup>(1)</sup>

Caixa Postal 25 – Cidade Industrial – 32210-902 – Contagem – MG – Brasil

Fone (31) 3368-1491; Fax (31) 333-5567

Centro Universitário Lusíada (UNILUS) <sup>(2)</sup>

Rua Armando Salles de Oliveira, 150 – 11050-071 – Santos – SP – Brasil

Fone (13) 3235-1311; Fax (13) 3221-4488

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI/USP) <sup>(3)</sup>

Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 – Travessa 2, Bloco A, Sala A2-14 – 05508-900 – São Paulo – SP – Brasil

Fone (11) 3091-5316; Fax (11) 3091-5719

{guilhermelenz, pesquisa}@magnesita.com.br <sup>(1)</sup>; maly@cosipa.com.br <sup>(2)</sup>; mbmourao@usp.br <sup>(3)</sup>

## Resumo

O QFD (Desdobramento da Função Qualidade) é uma ferramenta poderosa no desenvolvimento de produtos pela tradução dos desejos e necessidades dos clientes em requisitos de engenharia, eliminando etapas, retrabalhos, diminuindo o custo e o tempo no desenvolvimento.

Em função da complexidade que envolve a reciclagem dos resíduos gerados durante as operações de produção e transformação do aço em usinas siderúrgicas integradas (variedades de resíduos, geração, características físico-químicas, destinação, legislação ambiental incidente, composição química, entre outros) foi utilizada a técnica de QFD como uma ferramenta complementar no projeto de aglomerados obtidos a partir de resíduos sólidos.

A avaliação técnica da concorrência foi determinada através de teste semi-industrial com briquetes de resíduos da Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST nos conversores LD da aciaria #2 da COSIPA.

**Palavras-chave:** QFD. Reciclagem. Resíduos Siderúrgicos.

## 1 INTRODUÇÃO

Em uma usina integrada brasileira, cada tonelada de aço (produto acabado) gera, aproximadamente, 200 kg de resíduos sólidos ricos em ferro (25-85% em massa), ou seja, levando-se em conta o atual parque siderúrgico nacional, temos: 3,10<sup>6</sup> t/ano.

Em geral, os resíduos sólidos, ricos em ferro, apresentam-se nas seguintes classes/formas e porcentagens [1] (em massa):

pós → 10%; finos → 50%;  
lamas → 20%; carepas → 20%.

Atualmente tais resíduos recebem a seguinte destinação:

- a) Aproximadamente 6% das lamas são comercializadas e 14% destinadas à áreas de acumulação;
- b) Pós, finos e carepas retornam à sinterização.

Embora a reciclagem da maior parte (80%) dos resíduos sólidos ricos em ferro via sinterização seja uma prática siderúrgica comum, todavia, devido principalmente às características granulométricas dos mesmos (uma alta porcentagem de particulados com granulometria inferior a 0,105 mm), tal prática não é a mais recomendada, por diminuir a permeabilidade da carga e conseqüentemente a produtividade da sinterização.

A reciclagem por meio de pelotização/briquetagem destes resíduos parece ser uma rota atraente, pois:

- a) Flexibiliza a reciclagem conjunta de quase totalidade de resíduos sólidos gerados

- durante a produção e transformação do aço;
- Pode-se utilizar como redutor coque ou seus subprodutos;
  - O produto pode ser um ferro esponja, ou metal líquido;
  - Diminui a demanda de matérias primas e insumos externos;
  - Promove um ganho econômico e ambiental (internalização dos impactos ambientais);
  - Por simples desintegração ou eventual moagem e/ou classificação se obtém uma matéria-prima apta à pelletização/briquetagem;
  - Promove a busca de um desenvolvimento mais sustentável do negócio.

Contudo, para a reciclagem dos resíduos gerados, torna-se necessário sua transformação em novos produtos mais adequados aos processos industriais.

## 2 EMPREGO DE QFD (DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE) – DIMENSÃO DA QUALIDADE; NO PROJETO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

O método QFD foi inicialmente criado no Japão, e na versão japonesa é caracterizado por se dividir da seguinte forma: QFD no sentido amplo = QFDr no sentido restrito + QD desdobramento da qualidade. Nos EUA há duas versões que contemplam apenas o desdobramento da qualidade QD; sendo esta, a abordagem utilizada neste trabalho[2].

O método QFD pode ser aplicado tanto aos produtos (bens ou serviços) da empresa como produto (intermediário) entre cliente e fornecedor interno. Ultimamente novas aplicações de QFD tem sido desenvolvidas como: ferramenta para a tomada de decisão, de vantagem competitiva, engenharia de valor, dentre outras [3, 4, 11].

A sigla QFD que indica Desdobramento da Função Qualidade é uma metodologia indicada para operacionalizar o “planejar a qualidade” [5] - tipo de melhoria que exige inovação. Na figura 1, apresentada a seguir são, mostradas as 8 etapas do planejamento da qualidade.



Figura 1 – As oito etapas do planejamento da qualidade[5].

Basicamente o QFD possui duas finalidades específicas:

- Auxiliar o processo de desenvolvimento do produto, buscando, traduzindo e transmitindo as necessidades e desejos do cliente;
- Garantir a qualidade durante o processo de desenvolvimento do produto.

Logo, o QFD pode ser definido como “uma forma de comunicar sistematicamente a informação relacionada com a qualidade e de se explicitar ordenada e sistematicamente o trabalho relacionado com a obtenção da qualidade”. O QFD visa buscar, traduzir e transmitir as exigências dos clientes em características da qualidade do produto por intermédio de desdobramentos sistemáticos, iniciando com a determinação da “voz do cliente”, passando pelo estabelecimento de funções, mecanismos, componentes, processos, matérias-primas e estendendo-se até o estabelecimento dos valores dos parâmetros de controle dos processos. A figura 2 apresenta o desdobramento das 4 dimensões de um produto (aglomerado à base de resíduos/subprodutos siderúrgicos).

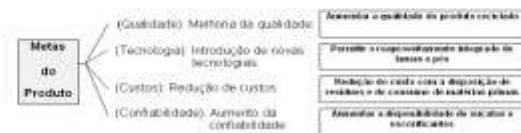


Figura 2 – Dimensões da qualidade para a reciclagem de resíduos/subprodutos siderúrgicos[6].

Os benefícios e diferenças operacionais do QFD [7,8] em relação ao projeto tradicional, são:

- Redução do tempo de desenvolvimento;
- Redução do número de mudanças no projeto;
- Redução da reclamação de clientes;
- Redução dos custos/perdas;
- Aumento da comunicação entre departamentos;
- Maior possibilidade de atendimento a exigência do cliente;
- Desdobra a “voz do cliente” enfocando o que é importante ao invés de “a voz do projetista” onde tudo é importante;
- Reduz a variabilidade;
- Otimiza o projeto do produto e do processo.

## 3 DESDOBRAMENTO DA QUALIDADE NO PROJETO DE RECICLAGEM

Partindo do objetivo da reciclagem que é a transformação dos subprodutos gerados durante o processamento/transformação integrada do aço em produtos a serem novamente utilizados como matérias primas em outros processos, foi empregado a metodologia do QFD no projeto de um aglomerado obtido a partir de subprodutos siderúrgicos.

A figura 3, apresenta a configuração padrão (“casa da qualidade”) utilizada para o desdobramento da qualidade[9].



Figura 3 – Desdobramento da qualidade - Modelo conceitual típico: “Casa da qualidade”.

#### 4 PROJETO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS SÓLIDOS

Qualquer projeto de reciclagem enfocando os resíduos gerados nas várias etapas do processamento do aço em usina integradas ou semi integradas é complexo seja pela magnitude da geração ou pela variabilidade de tipos e composições químicas. Basicamente, do ponto de vista das tecnologias existentes tem-se o processo de sinterização, a pelletização ou a briquetagem dos resíduos como operações convenientes para a transformação destes em produtos ou insumos.

Tendo em vista esta complexidade intrínseca do projeto de reciclagem, foi aplicado a metodologia do QFD em conjunto com ferramentas de tomada de

decisão multicriterial (AHP - Analytical Hierarchy Process) e programação linear visando projetar o produto e o processo de reciclagem de resíduos gerados na COSIPA[10].

A Construção da Matriz do Desdobramento da Qualidade

Visando construir a matriz de desdobramento da qualidade, será seguido de forma simplificada, os passos do fluxograma do procedimento para elaboração desta matriz como descrito por Yoji Akao [2,12]. A figura 4 apresenta o resumo da matriz construída.

- a) Determinar a mercadoria/produto a se considerar;
- b) Converter os dados primitivos para os itens exigidos;
- c) Elaborar a tabela do desdobramento da qualidade exigida;
- d) Extrair as características da qualidade a partir da qualidade exigida;
- e) Elaborar a tabela de desdobramento das características da qualidade;
- f) Transformar em matriz a tabela de desdobramento da qualidade exigida e a tabela de desdobramento das características da qualidade;
- g) Elaborar a matriz da qualidade;
- h) Elaborar a qualidade planejada;
- i) Estabelecer a qualidade projetada.

Legenda:  
(Relacionamentos)  
Forte  
Média  
Fraca  
(Correlações)  
intensa  
média  
fraca  
insignificante

Etapa	Características da Qualidade			Qualidade Planejada								
	1º Nível	2º Nível	3º Nível	Prop. Mecânicas	Resistência à Compressão	Friabilidade	Waglom.	g/kg	Prop. Físicas	Tamanho médio / forma	Porosidade	(%)
Operação	Ser fácil de transportar	Ser prático de transportar	Utilizar pás carregadeira	○	○				○			
Produção			Possibilitar o uso de correias transportadoras		○					○		
(...)			Possibilitar o uso de eletroímãs	○	○							
Manutenção		Resistência à operação de transporte	Resistência ao impacto durante o carregamento	○	○						○	
Projeto			Resistência mecânica no manuseio	●	○							
Meio Ambiente		(...)										
Qualidade Projetada		Importância absoluta	Peso absoluto	$X_{2,b}$	$X_{3,b}$	(...)	$X_{n-2,b}$	$X_{n,b}$				
		Importância relativa	Peso relativo	$f_1 \cdot X_{2,b}$	$f_2 \cdot X_{3,b}$	(...)	$f_{n-1} \cdot X_{n-2,b}$	$f_n \cdot X_{n,b}$				

Figura 4 – Resumo do desdobramento da qualidade do produto: Aglomerado (briquetes/pelotas) obtido a partir da reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos

#### PROJETO DE AGLOMERADOS UTILIZANDO A METODOLOGIA AHP/PL (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS E PROGRAMAÇÃO LINEAR)

Na a definição das composições de misturas dos aglomerados projetados, foram otimizados através de programação linear as misturas de resíduos; tendo

como condições de contorno parâmetros definidos no desdobramento das características de qualidade (teor

de ferro total, teor de ganga, umidade, teor de fósforo e enxofre, entre outros) da matriz de QFD.

O processo de otimização utilizou como função objetivo o produto entre o “ranking” obtido pela metodologia de tomada de decisão multicriterial - AHP (Analytical Hierarchy Process) e a proporção de resíduo empregada. As figura 7 e 8 apresentam a filosofia do processo de otimização e o desdobramento da matriz AHP para a construção do “ranking” de cada resíduo.

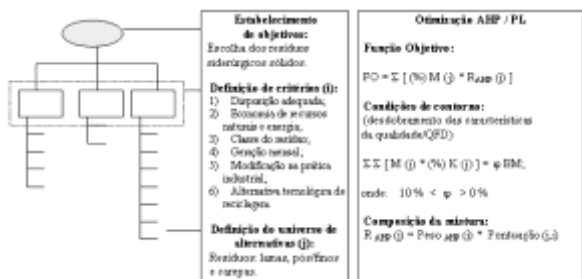


Figura 7 - Filosofia do processo de decisão multicriterial usando AHP e otimização usando programação linear.

Matriz AHP		1)	2)	3)	4)	5)	6)	Peso relativo (Peso AHP)
Meio Ambiente	1) Disponibilidade adequada	1	X <sub>1,2</sub>	X <sub>1,3</sub>	X <sub>1,4</sub>	X <sub>1,5</sub>	X <sub>1,6</sub>	7,06
	2) Economia de recursos naturais e energia	(1/n <sub>1,2</sub> )	1	X <sub>2,3</sub>	X <sub>2,4</sub>	X <sub>2,5</sub>	X <sub>2,6</sub>	2,65
	3) Classe do resíduo	(1/n <sub>1,3</sub> )	(...)	1	X <sub>3,4</sub>	X <sub>3,5</sub>	X <sub>3,6</sub>	40,34
	4) Origem mineral				1	X <sub>4,5</sub>	X <sub>4,6</sub>	5,85
Processo	5) Modificação na prática industrial					1	X <sub>5,6</sub>	35,74
	6) Alternativa tecnológica de reciclagem						1	8,35

Figura 8 – Matriz de priorização -metodologia AHP.

## 6 ANÁLISE DA QUALIDADE PLANEJADA E PROJETADA

A análise da qualidade planejada e projetada foi obtida através das caracterizações físico-químicas e do teste semi-industrial realizado com briquetes produzidos na Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST que foram utilizados na substituição do sínter adicionado no cálculo do balanço térmico do sistema de controle estático dos conversores da aciaria #2. As tabelas 1 e 2 resumem os resultados da caracterização química e do teste semi-industrial.

Tabela 1 - Caracterização química dos briquetes.

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe tota	S (enxofre)	P (fósforo)	C (carbono)	Basicidade básica BB	Dimensão média (mm)
2,31	9,74	0,55	69,20	0,03	0,07	2,33	4,21	50

Tabela 2 - Resumo do teste semi-industrial.

N.º de Corridas	Carga média de briquetes por corrida (kg)	Temperatura média da gema (°C)	STC (103 kg de briquetes)	Resíduo	Total de briquetes utilizado (kg)	(%) P de gema (média)	(%) P de fim de soprão / aço vazado
24	1368,7	1281	-0,2 vazado	3	32547,8	0,0008	0,0196

## 7 CONCLUSÕES

A utilização do QFD como ferramenta complementar no projeto de reciclagem de resíduos

siderúrgicos sólidos se apresentou como um instrumento de integração do método de otimização linear através da definição das condições de contorno obtidas pelo desdobramento das características da qualidade.

Os desdobramentos gerados possibilitaram o inter-relacionamento com a metodologia de tomada de decisão multiobjetivo (AHP) e a otimização das misturas.

Os testes com briquetes da CST nos conversores da aciaria da COSIPA indicam a possibilidade de reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos por meio da utilização dos briquetes como substitutos de material refrigerante para controle do balanço térmico (modelo estático) nos conversores LD da aciaria #2 da COSIPA.

## 8 AGRADECIMENTOS

Em um projeto de reciclagem, utilizando QFD, temos que agradecer a um grande número de pessoas, não só àquelas que participaram da construção da “qualidade desejada”, das ponderações e pontuações da matriz de qualidade; mas também à equipe dos conversores da aciaria #2 e dos setores administrativos da COSIPA que auxiliaram na condução e logística dos testes semi-industriais.

Ao PADCT/FINEP, a Companhia Siderúrgica Paulista e Escola Politécnica da USP pela viabilização deste trabalho.

Em especial, ao eng. João Chiabi, gerente da aciaria CST, pela viabilização administrativa e apoio para a remessa dos briquetes à COSIPA.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. NASCIMENTO, R.C.; LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. ; CAPOCCHI, J. D. T et alli. – Caracterização de Resíduos Sólidos de Aciaria a Oxigênio visando Reciclagem por Auto-Redução – XXIX Seminário de Redução de Minério de Ferro, Belo Horizonte / MG – dez. 1998.

[2]. YOJI AKAO – Introdução ao Desdobramento da Qualidade (Manual de Aplicação do Desdobramento da Função Qualidade) – vol. 1 ; Editora FCO – Belo Horizonte / MG, 1996.

[3]. ROBERT F. HALES – Quality Function Deployment as a Decision Making; (<http://BobHales@proactdev.com> - 07/09/1999).

[4]. DEAN, EDWIN; Comprehensive QFD, from the perspective of Competitive Advantage - (<http://mijuno.larc.nasa.gov.qfc/qfd/cqfd.html> - 05/08/1999).

[5]. LIN CHIH CHENG et al. - QFD – Planejamento da Qualidade – Editora FCO – Belo Horizonte / MG, 1995.

[6]. LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. – Reciclagem de Lamas de Aciaria Utilizando Técnicas de QFD (Desdobramento da Função Qualidade) – Trabalho interno: Semana de Meio Ambiente da Aciaria da COSIPA – Jun. 1999.

[7]. DAVID, L. GOETSCH et al. – Desplique de la Función de Calidad. (Quality Function Deployment) – Introduction to Total Quality – Ed Merrill, 1998.

- [8]. COHEN, LOU - Quality Function Deployment - How to make QFD work for you; Addison Wesley, 1996.
- [9]. YOJI AKAO – Quality Function Deployment - QFD Integrating Customer Requirements into Product Design. - Productivity Press, 1990.
- [10]. LENZ E SILVA, GUILHERME F.B. et alli. – Análise Cinética da Reciclagem das Lamas de Aciaria a Oxigênio na Forma de Pelotas Auto-redutoras Obtidas por Técnicas de Otimização Linear e Metodologia AHP – XXXI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória; maio de 2000.
- [11]. BODE, JÜRGEN; FUNG, RICHARD Y. K. - Cost Engineering with Quality Function Deployment, *Computsind. engng.* vol. 35, n\_ 3-4, pp 587-590; 1998.
- [12]. AOHFUJI, TADASHI; ONO, MICHITERU, AKAO, YOJI - Métodos de Desdobramento da Qualidade ( Manual de Aplicação do Desdobramento da Função Qualidade - QFD) ; Ed. FCO; vol. 2; 257 p. 1997.

## 10 LISTA DE SÍMBOLOS

**FO** : Função objetivo; modelo matemático a ser otimizado, sujeito às condições de contorno (restrições), definidas pelo desdobramento das características da qualidade;

**M(j)** : (%) de massa do resíduo (j) na composição da mistura otimizada;

**R<sub>AHP</sub> (j)** : "Ranking" obtido pela ponderação entre o PesoAHP e o desdobramento do critério (i) aplicado a cada resíduo (j);

**k(j)**: Teor da espécie química contida no resíduo (j);

$\varphi$  : Fator de deslocamento do balanço de massa em relação a uma dada composição padrão;

**Peso AHP (i)** : Resultado do vetor da matriz de priorização AHP;

**Pontuação (j,i)** : Valor obtido no desdobramento do resíduo (j) no critério (i);

**X<sub>a,b</sub>** : Nota entre a comparação, duas a duas, para a tomada de decisão multicriterial entre os critérios de priorização (i);

**STE** : Equivalente térmico em sucata.

---

## THE USAGE OF QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT) IN THE RECYCLING OF SLUDGES

### Abstract

The QFD (Quality Function Deployment) is a power tool to design of new products using the translating of customers, needs and wants into engineering requirements; cutting steps, reworks, lowering cost and time of development.

COSIPA used QFD (quality function deployment) as a complementary tool on design of products using steelworks by-products due the intrinsic complexity of this projects (type, generation, chemistry composition, waste disposal area, environmental regulation, and so on). and made a semi-industrial test using CST briquets at LD converter to valuation of this material.

**Keywords:** QFD. Recycling. Steelworks by-Products.

