

Análise e Otimização dos Custos das Matérias-Primas na Produção de Aço-ligas: Um Estudo de Caso

Rubens Huamanchumo Gutierrez

Resumo:

Este trabalho apresenta um estudo desenvolvido pelo autor junto a uma empresa siderúrgica no Peru, e que fabrica vários tipos de aço orientados ao consumo doméstico e internacional. O objeto do estudo foi minimizar o custo da mistura de matérias-primas para produzir cada lote de aço líquido programado nos fornos elétricos. Este trabalho insere-se num programa geral de redução de custos que a empresa começou no final de 1998, visando adequar-se a novos patamares competitivos nos seus mercados de atuação. Daí a procura por uma drástica diminuição nos altos custos de fabricação de aço na empresa. Para a solução deste problema utilizou-se a Programação Linear (PL), e foi preciso fazer algumas considerações especiais para sua correta formulação. O estudo lidou com dezoito (18) variáveis de decisão, quinze (15) restrições sem contar as de não negatividade, e abrangeu dois (2) tipos de aço-ligas mais vendidos destinados para a planta de laminados. A mistura ótima encontrada permitiu uma poupança média de US\$ 25,11 por tonelada de aço líquido. Em alguns tipos de aço a poupança por tonelada de aço líquido foi de US\$ 40 aproximados. A poupança anual desta solução superou os 5,1 milhões de dólares. Um estudo amplo abrangeu também a análise de sensibilidade dos preços dos materiais em questão, que integram a solução ótima e dos que não integram a solução ótima.

Palavras-chave:

Área temática: MENSURAÇÃO E GESTÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DAS MATERIAS-PRIMAS NA
PRODUÇÃO DE AÇO-LIGAS.
UM ESTUDO DE CASO**

Ruben Huamanchumo Gutierrez, D.Sc.

UFF– Univ. Federal Fluminense – Professor Mestrado TPP/CTC– rubenhg@uol.com.br
Rua Henrique Cordeiro, 120 Bloco I, Apto. 405 – Barra da Tijuca / RJ –CEP22.631-040

Área Temática (8): MENSURAÇÃO E GESTÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA

ANALISE E OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DAS MATERIAS-PRIMAS NA PRODUÇÃO DE AÇO-LIGAS. UM ESTUDO DE CASO

Área Temática (8): MENSURAÇÃO E GESTÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA

RESUMO:

Este trabalho apresenta um estudo desenvolvido pelo autor junto a uma empresa siderúrgica no Peru, e que fabrica vários tipos de aço orientados ao consumo doméstico e internacional.

O objeto do estudo foi minimizar o custo da mistura de matérias-primas para produzir cada lote de aço líquido programado nos fornos elétricos. Este trabalho insere-se num programa geral de redução de custos que a empresa começou no final de 1998, visando adequar-se a novos patamares competitivos nos seus mercados de atuação. Daí a procura por uma drástica diminuição nos altos custos de fabricação de aço na empresa. Para a solução deste problema utilizou-se a Programação Linear (PL), e foi preciso fazer algumas considerações especiais para sua correta formulação. O estudo lidou com dezoito (18) variáveis de decisão, quinze (15) restrições sem contar as de não negatividade, e abrangeu dois (2) tipos de aço-ligas mais vendidos destinados para a planta de laminados.

A mistura ótima encontrada permitiu uma poupança média de US\$ 25,11 por tonelada de aço líquido. Em alguns tipos de aço a poupança por tonelada de aço líquido foi de US\$ 40 aproximados. A poupança anual desta solução superou os 5,1 milhões de dólares.

Um estudo amplo abrangeu também a análise de sensibilidade dos preços dos materiais em questão, que integram a solução ótima e dos que não integram a solução ótima.

1. INTRODUÇÃO.

Este é um estudo que desenvolvimos junto a uma Siderúrgica localizada no Peru, durante um ano. A produção dos vários tipos de aço desta siderúrgica orienta-se ao consumo do mercado nacional peruano e também internacional. As aço-ligas estudadas 08B-LAC e 08B-LAF pertencem aos produtos "laminados em quente" que constituem o 70% das vendas desta firma e abrangem chapas grossas (para maquinário, equipamentos e diversas estruturas), bobinas, tubulações etc.

Foi verificado que a mistura da matéria-prima (componentes) da sucata de fábrica, nacional, importada, ferro esponja etc. e as suas quantidades apresentam-se atualmente custosas. Por questões de preço o custo por tonelada de sucata importada é o mais significativo (na faixa de 60 a 70 dólares americanos). O custo da carga metálica significa atualmente entre 58 e 64% do custo de produção de cada lote de aço líquido.

O processo de fabricação de aço líquido nos fornos elétricos da firma analisada, abrange as seguintes etapas claramente definidas: Carga (mistura de matérias-primas de entrada necessárias para produzir um lote de um tipo de aço líquido programado nos Fornos elétricos), Fusão, Afino e Colada (vide DIAZ [4]). Na etapa de Afino, por falta de uma mistura inicial adequada (matérias-primas de entrada), o custo de cada lote em

produção está fora de controle, o que aumenta sensivelmente o custo conforme é necessário adicionar as *ferroligas* para atingir as especificações do lote programado. Estas *ferroligas* são muito custosas e elevam sensivelmente o custo de produção do lote.

Deve-se ter presente que o aço contém os elementos ferro e carbono além dos elementos Ni, Cr, Mo etc., que segundo seu conteúdo permitem obter vários tipos de aço. Portanto, no modelo matemático se procura preferente e exclusivamente o conteúdo de elementos de liga presentes no produto final (aço líquido), conteúdo que segue às normas padronizadas de produção de aço segundo seus tipos.

2. OBJETIVO.

O objetivo deste trabalho é otimizar o custo da mistura das matérias-primas de entrada (carga) para produzir um lote de um tipo de aço líquido programado nos Fornos Elétricos. Isto significa que devem determinar-se as matérias-primas que deverão compor a carga ótima (componentes) e suas quantidades ótimas em que devem empregar-se para formar a mistura a ser carregada nos fornos, esta carga deve estar associada a um custo mínimo ótimo [4], [6] e [7]. Os tipos de aço em este estudo são os seguintes dois (2) tipos de aço destinados para a Planta de Laminados: 08B-LAC, 08B-LAF.

Para a solução deste problema, este foi adaptado para o formato analítico da Programação Linear (PL). Logicamente, primeiro verificou-se que estas relações de matéria-prima - produto, se ajustam de forma natural às restrições matemáticas lineares. Logo após a formulação adequada, explicada a continuação, utilizamos o LINDO para encontrar as soluções ótimas, e seguidamente as validamos por técnicas econômico-financeiras

3. ASPECTOS TEÓRICOS DA MODELAGEM POR PROGRAMAÇÃO LINEAR

Um problema de programação linear é formulado da seguinte forma:

(P) minimizar $x_0 = \mathbf{c}\mathbf{x}$

sujeito a $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$$

onde $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e de posto composto, $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ o vetor de decisão.

O problema dual (D) do problema primal (P) é então:

(D) maximizar $y_0 = \mathbf{b}^t\mathbf{y}$

sujeito a $\mathbf{A}^t\mathbf{y} + \mathbf{s} = \mathbf{c}$

$$\mathbf{s} \geq \mathbf{0}.$$

onde $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ é o vetor dual das restrições de igualdades de (P) e $\mathbf{s}$ é o vetor de folga.

Na década de 40 [10], o método denominado simplex foi desenvolvido para resolver o programa linear (P), que envolve a busca de uma sequência de pontos extremos da seguinte região viável $\{\mathbf{x}: \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\}$ mas a sua complexidade de resolução é exponencial.

Na década de 80, um outro algoritmo de resolução do problema (P), denominado o método de pontos interiores, foi introduzido por Karmarkar [8]. Esse algoritmo alcança a solução ótima através de uma sequência de pontos interiores do conjunto viável, isto é, pontos $x > 0$ que satisfazem $Ax = b$. A complexidade de resolução deste algoritmo é polinomial sendo portanto mais eficiente que o método simplex, especialmente para problemas de grande porte.

Entre os diferentes métodos de pontos interiores temos o algoritmo primal afim de escalonamento, o algoritmo dual afim de escalonamento, o algoritmo primal – dual, o algoritmo preditor – corretor, ver Portugal, et alii [11] e vide Resende e Veiga [12]

4. A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.

O número de matérias-primas que compõem esta carga atualmente, são 18 (vide seção 5.3.) e podemos agrupá-los assim: "*carga metálica*", "*carga não-metálica*" e *suplementos*.

O que procuramos neste problema é determinar a quantidade ótima de cada matéria-prima que permita reduzir o custo por cada lote de aço líquido. Para facilitar temos agrupado no quadro No. 1. todos os dados necessários para formular este modelo matemático de PL.

4.1. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE DECISÃO (X_j e C_j) PARA O CÁLCULO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CUSTO DO LOTE DE AÇO-LIGAS

4.1.1. CUSTOS UNITÁRIOS DOS INSUMOS : C_j

Na última fila do quadro No. 1, figuram os custos (US\$/Ton) associados a cada insumo X_j . Obtidos do relatório mensal de Custos de Produção de Fornos elétricos 1995 a 1998

4.1.2. DISPONIBILIDADE DE ELEMENTOS QUÍMICOS NOS INSUMOS X_j

As variáveis de decisão X_j são às matérias-primas (insumos) empregadas na carga de material para produzir um lote de aço-líquido pela via forno-elétrico. No mencionado quadro se indicam 18 matérias-primas, uma para cada variável de decisão X_j , conforme [4], [6] e [7]

4.1.2.1. DISPONIBILIDADE DO ELEMENTO QUÍMICO FERRO NA CARGA PRINCIPAL METÁLICA. Todas as matérias-primas X_j que proporcionam o elemento químico Ferro (Fe) à aço-liga (vide Avner [1]), do quadro No. 1 : Recuperação Ferrosa X_1 , Sucata importada X_2 , Sucata Nacional X_3 , Sucata de Fábrica X_4 , Ferro Esponja (Pellets) X_5 , e "Arrabio Sólido" X_6

4.1.2.2. DISPONIBILIDADE DE CARBONO E CAL NA CARGA PRINCIPAL NÃO-METÁLICA. Esta carga agrega Carbono e Cal, vide AVNER [1], a este processo, do quadro No.1 : Coque X_7 , "Caliza" X_8 , e Cal Cálcica X_9

4.1.2.3. DISPONIBILIDADE DE OUTROS ELEMENTOS QUÍMICOS ADICIONAIS. Os seguintes insumos provêm elementos químicos que ajudam a obter as especificações padrão para os diferentes tipos de aços que se produzem. Os diversos tipos de aço tem performances diferentes tanto a tração, compressão, torção etc. Assim

estes elementos são muito importantes, vide AVNER [1], na composição final do aço, mas ao mesmo tempo são muito caros. Do quadro No.1. : Minério de Manganês X_{10} , Alumínio X_{11} , Ferro-Manganês Padrão X_{12} , Ferro-Silício ao 75% X_{13} , Cálcio-Silício (Ca-Si) X_{14} , Ferro-Silício-Manganês X_{15} , Espato Flúor X_{16} , Ferro-Cromo X_{17} , e Ferro-Manganês (refinado) X_{18}

4.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS INSUMOS (MATÉRIA-PRIMA) : a_{ij}

Os coeficientes a_{ij} para $i = 2$ até $i = 15$ representam a composição química dos insumos utilizados na fabricação de aço. Esta composição química está expressada na percentagem em peso de cada elemento controlável (i) presente em cada matéria-prima. Assim, do quadro No. 2 o elemento $a_{2,3}$ igual a 0,8 representa o 0,8% em peso do carbono, que contém na sua estrutura química a sucata nacional. Da mesma forma se fez com os demais elementos (coeficientes) dos tabuleiros iniciais.

5. O MODELO DE MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DO LOTE DE AÇO LÍQUIDO PRODUZIDO EM FORNOS ELÉTRICOS, A PARTIR DA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DOS MATERIAIS-DE-ENTRADA.

Com base nas características do problema de minimizar o custo, discutido linhas acima, formalizamos a função objetivo desse problema de problema linear, da seguinte forma :

5.1. FUNÇÃO OBJETIVO.

Cada matéria-prima utilizada na fabricação de aço líquido, gera um custo particular cujo valor depende da quantidade de insumo utilizado e do seu preço ($C_j \cdot X_j$)

O custo total (X_0) das matérias-primas para a produção de aço líquido programado pode expressar-se como a soma dos custos parciais de cada insumo empregado ($C_j \cdot X_j$), e como procura-se que o custo seja o mais reduzido possível, quer dizer, o mínimo, então a função objetivo é minimizar X_0 , ou

$$\text{Minimizar } X_0 = 100 X_1 + 171,95 X_2 + 98 X_3 + 100 X_4 + 111,3 X_5 + 88 X_7 + 15,6 X_8 + 71,14 X_9 + 56,5 X_{10} + 725,03 X_{11} + 697,12 X_{12} + 870,48 X_{13} + 1545,28 X_{14} + 1412,06 X_{15} + 200,91 X_{16} + 2185,45 X_{17} + 1483,15 X_{18}$$

Em geral, o "j-ésimo" insumo (matéria-prima) origina um custo de $C_j \cdot X_j$, onde :

$$C_j = \frac{\text{Custo (\$) do "j-ésimo" insumo}}{\text{Fração em peso do "j-ésimo" insumo, Respeito ao peso da carga total}}, \text{ e}$$

$$X_j = \text{Fração em peso do "j-ésimo" insumo, Respeito ao peso da carga total}$$

Por exemplo, em nosso problema, cada fração em peso (respeito da carga total) de sucata gera um custo de 100 dólares (C_1); quer dizer, X_1 frações em peso de sucata nacional, significa um custo de $100 X_1$ dólares. De igual forma X_2 frações em peso de sucata importada implicam num custo de 171,95 dólares. Vide custos no quadro No. 1.

Devido a que todos os insumos são usados em cada uma das 13 qualidades produzidas, esta equação é válida para cada uma das duas (2) qualidades em estudo.

- 5.2. TAMANHO DE LOTE. Esta relação é válida para os cinco tipos analisados.

Como X_j representa a fração em peso do "j-ésimo" insumo, respeito do peso total da carga e considerando que a soma das frações de um todo é igual à unidade, obtemos :

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_{18} = 1 \quad (\text{Restrição No. 1})$$

- 5.3. REQUERIMENTOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS (i) NA AÇO-LIGA.

Cada tipo de aço é uma liga com várias propriedades de uso (tração, compressão, torção etc.) que dependem dos elementos químicos que configuram a liga. Estes elementos já estão padronizados em quantidade e qualidade para cada tipo de aço-liga. A porcentagem de cada elemento depende do tipo de aço programado. Por exemplo para os tipos de aço-ligas em estudo, devemos controlar que a porcentagem de entrada de Carbono para um aço 08B-LAC esté compreendida na faixa de 0,72% a 0,77% , e para um aço 16D a faixa permitida é de 0,80% a 0,84%.

Em geral, a porcentagem em peso do "i-ésimo" elemento da liga presente em cada fração em peso do "j-ésimo" insumo é igual ao produto de $a_{ij} X_j$. Ou seja, $a_{ij} X_j$ é a porcentagem do "i-ésimo" elemento de liga.

5.3.1. EXIGÊNCIA DE CARBONO NA AÇO-LIGA (em %). Esta exigência pode ser obtida a partir das seguintes matérias-primas integrantes da carga inicial: A Recuperação Ferrosa (j =1) contém 1% de Carbono (a_{11}) e por tanto "X" frações em peso de Recuperação Ferrosa, contém 1,0% X_1 de Carbono. De forma similar, a Sucata Nacional (j = 3) contém 0,8% de carbono (a_{13}) e consequentemente, "X" frações em peso de sucata de fábrica contribui com 0,8% X_3 de Carbono.

Para produzir um aço 08B LAC, o conteúdo de carbono não deve ser menor a 0,72%, ou seja:

$$X_1 + 0 X_2 + 0,8 X_3 + 0,1934 X_4 + 0,655 X_5 + 4 X_6 + 85 X_7 + 0 X_8 + 0 X_9 + 0 X_{10} + 0 X_{11} + 7,5 X_{12} + 0,1 X_{13} + 1 X_{14} + 1,5 X_{15} + 0 X_{16} + 6,75 X_{17} + 1,5 X_{18} \geq 0,72$$

Nem maior a 0,77%, ou seja (restrição 3) :

$$X_1 + 0 X_2 + 0,8 X_3 + 0,1934 X_4 + 0,655 X_5 + 4 X_6 + 85 X_7 + 0 X_8 + 0 X_9 + 0 X_{10} + 0 X_{11} + 7,5 X_{12} + 0,1 X_{13} + 1 X_{14} + 1,5 X_{15} + 0 X_{16} + 6,75 X_{17} + 1,5 X_{18} \leq 0,77$$

- 5.3.2. EXIGÊNCIA DE MANGANÊS (i=4 e i=5) NA AÇO-LIGA (em %)

De acordo com a análise anterior, a soma das contribuições de Manganês ($a_{2j} X_j$) que contribui cada "j-ésimo" insumo (vide quadro No. 2.), representa o conteúdo percentual em peso de entrada de Manganês presente na carga. Para o caso do aço-liga 08B-LAC, o conteúdo de Manganês não deve ser menor de 0,27%, quer dizer (restrição 4) :

$$0 X_1 + 1,65 X_2 + 0,5 X_3 + 0,6834 X_4 + 0 X_5 + 1 X_6 + 0 X_7 + 0 X_8 + 0 X_9 + 40 X_{10} + 0 X_{11} + 77 X_{12} + 0,4 X_{13} + 0 X_{14} + 66,5 X_{15} + 0 X_{16} + 0 X_{17} + 82,5 X_{18} \geq 0,27$$

Nem maior a 0,42%, ou seja : (**) (restrição 5)

$$0 X_1 + 1,65 X_2 + 0,5 X_3 + 0,6834 X_4 + 0 X_5 + 1 X_6 + 0 X_7 + 0 X_8 + 0 X_9 + 40 X_{10} + 0 X_{11} + 77 X_{12} + 0,4 X_{13} + 0 X_{14} + 66,5 X_{15} + 0 X_{16} + 0 X_{17} + 82,5 X_{18} \leq 0,42$$

5.3.3. EXIGÊNCIA DE ENXOFRE (i = 6) NA AÇO-LIGA (em %)

A diferença do conteúdo de Carbono e Manganês, o conteúdo percentual em peso de entrada deste elemento não deve exceder de um máximo rigorosamente controlado, devido a que a presença por cima destes limites resulta prejudicial para o tipo de aço programado. Consequentemente, o controle do limite superior do conteúdo percentual em peso de entrada destes elementos resultam na restrição "menor ou igual que". Assim a restrição ao conteúdo de enxofre no aço O8B-LAC formulou-se assim :

$$0,05 X_1 + 0 X_2 + 0,025 X_3 + 0,0433 X_4 + 0,015 X_5 + 0,05 X_6 + 0,6 X_7 + 0,5 X_8 + 0,1 X_9 + 0,5 X_{10} + 0 X_{11} + 0,05 X_{12} + 0,025 X_{13} + 0,07 X_{14} + 0,4 X_{15} + 0,1 X_{16} + 0,06 X_{17} + 0,02 X_{18} \leq 0,045 \text{ (restrição 6)}$$

5.3.4. EXIGÊNCIA DE OUTROS ELEMENTOS METÁLICOS NA AÇO-LIGA (em %)

Utilizando o quadro No.1, se formulam similarmente as restrições correspondentes para os elementos Si, P, Al, Cu, Ni, Cr, Sn, e Mo (vide quadro No.2) onde se formula o problema completo para cada um dos cinco tipos de aço em estudo)

5.3.5. EXIGÊNCIA DE CALCIO NA AÇO-LIGA (em %)

Neste processo é necessário eliminar as impurezas, as quais conseguem-se evacuar na escoria (neste caso se trabalha com escoria simples que elimina principalmente fósforo e enxofre). Para facilitar a formação de escória altamente básica, é necessário o cálcio. Por esta razão se requer um conteúdo percentual mínimo de cálcio de 1,6% em peso da carga total de materiais no forno elétrico. Do quadro No. 2., a restrição resultante para uma aço-liga em estudo é :

$$0 X_1 + 0 X_2 + 0 X_3 + 0 X_4 + 0,4286 X_5 + 0 X_6 + 0 X_7 + 36,75 X_8 + 60,71 X_9 + 0,028 X_{10} + 0 X_{11} + 0 X_{12} + 0 X_{13} + 30 X_{14} + 0 X_{15} + 0 X_{16} + 0 X_{17} + 0 X_{18} \geq 1,6$$

Na formulação destes 2 tipos de aço, se incluem as variáveis de folga e as variáveis artificiais (vide quadro inicial). Uma variável de folga usada em uma restrição (<) representa o Déficit do lado esquerdo sobre o lado Direito da restrição. Em nosso trabalho se agregam variáveis de folga $S_3, S_5, S_6, \dots, S_{14}$ E se especifica também, as variáveis artificiais $R_2, R_4,$ e R_{15} , necessárias para aplicar a técnica de dois fases do algoritmo Simplex. Vide quadro No.2.

Uma variável de folga empregada em uma restrição ($\geq$) representa o excedente do lado esquerdo sobre o lado direito. Por exemplo o excesso de Carbono na restrição No. 2.

Finalmente, a formulação matemática para cada tipo de aço-liga só difere no valor dos b_i , quer dizer, alguns tipos de aços diferem de outros pelo conteúdo percentual dos elementos de liga. No quadro No.2 se tem agregado as colunas do lado direito para cada tipo

6. RESULTADOS OBTIDOS COM O USO DESTE MODELO DE OTIMIZAÇÃO.

O resumo dos resultados obtidos com esta modelagem do custo mínimo, resultou assim :

QUADRO No. 3 : RESULTADOS GERAIS							
			ÓTIMO				
			ENCONTRADOS				RANGOS DE SENSIBILIDADE NAS VARIÁVEIS BÁSICAS DE :
		$X_o =$	92,19539	92,19539	08B-LAC / 08B-LAF		
j	Insumo (X_j)	Preço Unitário	08B-LAC	08B-LAF	Limite Inf.	Custo/Ton.	Limite Sup.
1	Recuperação Ferrosa	100,00	0	0			
2	Sucata Importada	171,95	0	0			
3	Sucata Nacional	98,00	0,767142	0,767142	98,00	98,00	98,00
4	Sucata de Fábrica	100,00	0	0			
5	Ferro Esponja	111,31	0	0			
6	Arrabio Sólido	88,00	0	0			
7	Coque	75,00	0,00125	0,00125	75,00	75,00	75,00
8	Caliza	15,60	0	0			
9	Cal Cálcica	71,14	0,231051	0,231051	71,14	71,14	71,14
10	Mineral de Manganês	56,50	0	0			
11	Aluminio	725,93	0	0			
12	Ferro-Manganês STD	697,12	0	0			
13	Ferro Silício ao 75%	870,48	0,000557	0,000557	- INFINITO	870,48	870,48
14	Calcio Silício	1545,28	0	0			
15	Ferro-Silício-Manganês	1412,06	0	0			
16	Espato Fluor	200,91	0	0			
17	Ferro-Cromo	2185,45	0	0			
18	Ferro-Manganês (Refinado)	1483,15	0	0			
			1	1			

6.1. MISTURA ÓTIMA PARA O TIPO DE AÇO-LIGA 08B-LAC

De acordo com as informações do quadro No. 3 a mistura ótima para a qualidade 08B-LAC é a seguinte tanto em fração em peso do lote, quanto em quilos :

INSUMO j	% do peso total	Kg.	US\$
Sucata Nacional	76,7142%	26.850,00	2.631,30
Coque	0,1250%	43,75	3,2812
Cal cálcica	23,1051%	8.086,75	575,2938
Ferro-Silício ao 75%	0,0557%	19,50	16,9700
	100%	35.000,00	3.226,8450

Estes percentagens são em peso e, correspondem a uma parte do peso da carga total para um lote. A mistura ótima permitiu obter um custo igual a 92,195392 \$/ton. As que multiplicadas por 35 toneladas (peso total de cada lote inicial) representam um valor de 3.226,84 \$/lote para este tipo de aço-liga programada.

- 6.2. MISTURA ÓTIMA PARA O TIPO DE AÇO-LIGA 08B-LAF. O custo mínimo por tonelada da mistura ótima é de 92,195389 US\$. O custo total do lote de 35 toneladas é de 3.226,8405 US\$. A mistura ótima para a qualidade 08B-LAF tanto em fração em peso do lote, quanto em quilos é a seguinte :

INSUMO j	% do peso total inicial	Kg.	US\$
Sucata Nacional	76,7142%	26.850,00	2.631,30
Coque	0,1250%	43,75	3,2812
Cal cálcica	23,1051%	8.086,75	575,2938
Ferro-Silício ao 75%	0,0557%	19,50	16,9700
	100%	35.000,00	3.226,8450

- 6.3. VALIDAÇÃO DOS RECURSOS LIMITADOS NO MERCADO FORNECEDOR

Verificou-se também que estas misturas ótimas não afetariam o fornecimento anual destas matérias-primas para a empresa. Para tanto calculou-se a percentagem de saturação das quantidades anuais fornecidas à empresa normalmente, dos itens que não podem ser adquiridos ilimitadamente no mercado.

INSUMO j	Toneladas Disponíveis por ano do insumo j	Toneladas a empregar do insumo j	% saturação das toneladas disponíveis
Sucata Nacional	180.000	152.024,3	84,46
Sucata de Fábrica	62.752	43.326,3	69,04
Ferro Esponja	90750	7.983,5	8,79
Cal cálcica	45.000	30.755,8	68,34

- 6.4. VIABILIDADE ECONÔMICA. Para efeitos da avaliação econômica, checkou-se os custos antes e depois da implementação da nova mistura modelada e descrita

nesta pesquisa, encontrando uma poupança média ponderada de US\$ 25,11 por tonelada de aço-liga líquido. A poupança anual desta solução superou os 5,1 milhões de dólares.

7. CONCLUSÕES.

As misturas ótimas obtidas pelo modelo, são válidas entanto que os preços unitários dos insumos não excedam os limites listados no quadro No.3

As misturas ótimas das aço-ligas 08B-LAC e 08B-LAF são muito sensíveis a qualquer variação nos preços dos insumos aqui chamados de Sucata nacional, Coque, e Cal Cállica.

Os insumos (X_j) que foram descartados da mistura ótima foram os seguintes:

- A Sucata Nacional importada, ficou descartada das dois aço-ligas em estudo. A razão principal é seu alto preço unitário.
- O Ferro Esponja ficou descartado das aço-ligas com destino a laminados.
- A Recuperação Ferrosa, e do Arrábio Sólido, devido à sua composição e preço
- As seguintes ferro-ligas, alumínio, calcio-silício, Espato-Fluor, Ferro-Cromo, e Ferro Manganês (Refinado) devido aos seus altos custos "proibitivos".
- A cal cálcica participa regularmente em todas as qualidades analisadas. Esta participação é congruente com seu preço e contribuição para tirar a escória do forno elétrico. De outro lado, a caliza não participa em nenhuma proporção nestes dois tipos de aço-liga.

Os seguintes insumos participantes da matéria-prima analisada, Recuperação Ferrosa, Sucata Nacional, Arrabio sólido e Caliza, para tornar-se elegíveis na mistura ótima devem diminuir de preço aos patamares sugeridos no quadro seguinte.

Neste quadro a coluna "Preço Atrativo Médio" é o preço limite máximo que se deve pagar por uma tonelada do insumo j , para que o insumo este incluído na mistura ótima. No caso, o insumo $j = 1$ deve cair de preço 86,63 US\$ para atingir o preço máximo de US\$13,37 que é o limite entre pertencer à mistura ótima ou não pertencer a esta. Claro tudo isto Ceteris Paribus, quer dizer se todo se manter igual e apenas o preço deste insumo ficar em análise.

J	INSUMO j	PREÇO ATUAL US\$/Ton.	PREÇO ATRATIVO MÉDIO	QUANTO O PREÇO DEVE CAIR?
1	Recuperação Ferrosa	100,00	13,37	86,63
2	Sucata Importada	171,95	85,13	86,82
6	Arrábio sólido	88,00	-37,94	125,94
8	Caliza	15,60	-127,02	142,62

Sob as condições nas quais o modelo se desenvolveu, os resultados foram considerados excelentes pela nossa equipe e pela diretoria da empresa.

8. RECOMENDAÇÕES.

- Verificar que os insumos que se comprem, sucatas etc., se ajustem aos padrões exigidos
- Controlar mais de perto ao pessoal que opera os guindastes no pátio de sucatas, para que cada tipo de sucata sempre seja colocada no local designado para cada uma delas. Deve-se evitar "confundir" as sucatas umas com outras.

- Exercer maior controle na pesagem e carregado dos insumos para a mistura.
- Botar em funcionamento a guilhotina e a compactadora de sucata para facilitar a pesagem dos mencionados insumos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Avner, Sydney H. - *Introducción a la metalurgia física*. MacGraw-Hill 7a Ed. Mexico, 1989
- [2] Cheung , R. e Powell, W., “Models and Algorithms for Distribution Problems with uncertain Demands”, **Transportation Science**, v. 30, n. 1, pp. 43- 59, 1996.
- [3] Clements, Dale W. and Reid, Richard - Analytical MS/OR tools applied to a plant closure - *Interfaces* 24:2 Mar 1994 pp:1-12
- [4] Diaz A et alii - A dynamic scheduling and control system in an ENSIDESA steel Plant - *Interfaces* 25:1 Sep. 1991 pp: 53-62.
- [5] El-najdawi, M.K. e Stylianou, C.A "Expert support system: integrating AI technologies". *Communications of the ACM*, 36, 12, 55-65 (1993).
- [6] Gopal P. Sinha et alii - Strategic and Operational Management with optimization at Tata steel - *Interfaces* 25:1 Jan 1995 pp: 6-19
- [8] Karmarkar, N., “A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming”, **Combinatoria**, v. 4, pp. 373 – 395, 1984.
- [9] Marin I., Palma R.J.^a e Lara C.A. - La programación Linear en el proceso de Decisión. Ed. Macchi S.A 9ª Ed. 1997. Bs.As.
- [10] Orden, Alex - Linear Programming from the '40s to the '90s - *Interfaces* 23:5 Sep 1993 pp:2-12
- [11] Portugal, L., Bastos, F., Júdice, J., Paixão, J. e Terlaky, T., “An Investigation of Interior point Algorithms for the Linear Transportation Problems”, **SIAM Journal of Scientific Computing**, v. 17, n. 5, pp. 1202 – 1223, 1996.
- [12] Resende, M. e Veiga, G., “An Implementation of the Dual Affine Scaling Algorithm for Minimum Cost Flow on Bipartite Uncapacitated Networks”, **SIAM Journal on Optimization**, v. 3, n. 3, pp. 516 – 537, 1993.
- [13] Siderurgica del Perú - "*Informes e Programas*" Chimbote, Peru - 1995,1996, 1997, 1998
- [14] Turban, E. *Decision support and expert system: management support systems*, Macmillan, New York, USA, 1993.