

III-086 - MODELAGEM DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS PARA AEROGERAADORES EM CIMENTO PORTLAND (CP II)

Felipe Sanches Stark⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental da UNESP – Campus Experimental de Sorocaba.

Luiza Amalia Pinto Cantão

Licenciada em Matemática pela UNESP – Campus de Bauru, Mestre em Matemática Aplicada pela UNESP – Campus de São José do Rio Preto e Doutor em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP. Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Ambiental da UNESP – Campus Experimental de Sorocaba

Maria Lucia Pereira Antunes

Física pelo Instituto de Física da USP – S.P. Mestre em Física Nuclear pelo Instituto de Física da USP/SP. Doutora em Ciências pelo Instituto de Física da USP. Professora Assistente Doutora do curso de graduação em Engenharia Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UNESP de Sorocaba.

Juliana Soares Lisboa

Engenharia Ambiental pela UNESP – Campus Experimental de Sorocaba. Coordenadora de Projetos da H2O Engenharia.

Endereço⁽¹⁾: Av. Três de Março, 511 - Sorocaba – São Paulo - SP - CEP: 18087-180 - Brasil - Tel: (15) 32383400 - e-mail: felipestark@grad.sorocaba.unesp.br.

RESUMO

O resíduo em pó de pás eólicas é gerado durante o processo de furação das extremidades da pá que serão fixadas no rotor da torre eólica. Na planta industrial estudada, com uma produção mensal de aproximadamente 32 pás eólicas, são gerados de 0,4 a 0,6 m³/dia de resíduo.

No estudo dos dados do resíduo, verificou-se este como uma mistura de polímeros, com predominância de resina epóxi. O resíduo se enquadra na Classe II-a não inertes (NBR 10.004 de 2004, da ABNT) devendo ser destinado a um aterro específico para tal fim, o que demanda custos adicionais ao processo produtivo; além de contribuir em eventuais acidentes que podem ocasionar sua dispersão ou carreamento de substâncias agregadas a ele (principalmente em casos de má operação ou conservação dos aterros). Desta problemática, a criação de um modelo de *otimização* sobre dados empíricos para a reutilização deste resíduo na confecção de argamassa, com a substituição do agregado miúdo por esse resíduo, é importante, pois auxilia na melhor gestão do resíduo sendo uma ferramenta para o analista da área ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Modelagem, Resíduo Aero geradores, Argamassa, Cimento *Portland*.

INTRODUÇÃO

Industrialização e geração de resíduos

A industrialização ocorrida durante os últimos dois séculos trouxe melhorias significativas na geração de bens e serviços, por vezes melhorando a qualidade e a expectativa de vida do ser humano. Entretanto, muitos processos foram pensados como um sistema fechado e estático de entrada de matéria-prima e saída de um produto útil, sendo na verdade uma visão simplificada do processo produtivo.

Dentre as problemáticas que envolvem qualquer cadeia produtiva, a geração de resíduos sólidos tem sido alvo de estudos científicos e de políticas públicas específicas. Essa geração ocorre durante o processo produtivo ou após o uso do produto final. Tais resíduos são dispostos muitas vezes de maneira errada, em locais inapropriados ou ainda com bons estados de reaproveitamento de suas partes (ocasionando a perda permanente do material no meio). Segundo [3] a “situação do manejo de resíduos sólidos no país é preocupante, principalmente no que diz respeito à questão da disposição final, uma vez que 63,6% dos municípios brasileiros utilizam lixões como forma de disposição dos resíduos sólidos urbanos, 18,4% utiliza aterros controlados e 13,8% dispõem os resíduos em aterros sanitários”. É óbvio que quando o assunto são os resíduos industriais, a

questão é mais preocupante, pois se tratam de materiais reativos com maior potencial de ocasionar dano ao meio ambiente se dispostos de maneira irregular.

As classes mais comuns de resíduos sólidos são quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem. De acordo com a NBR 10.004 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- Classe I – Perigosos: apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- Classe II - a – Não inertes: são os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos da Classe I –Perigosos – ou Classe III – Inertes.
- Classe II - b – Inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, 10.006 e 10.004 (listagem nº 8 – Anexo H).

Para cada classe há um aterro específico. Entretanto, apesar deste fato significar uma destinação dita correta, os aterros ainda podem oferecer riscos quando não instalados ou operados corretamente e a geração de resíduos não é minimizada, apenas distribuída espacialmente.

Uma das maneiras de reduzir a disposição dos resíduos nos aterros está nos processos de reutilização destes, geralmente precedidos de estudos de viabilidade.

A energia eólica e seu potencial crescimento

A busca por novas fontes energéticas renováveis é um tema certo na discussão atual no contexto de mudanças climáticas, atribuídas ao excesso dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, e da maior demanda energética requerida pelo crescimento populacional e industrial.

Uma das alternativas para dar variabilidade à matriz energética dos países que buscam fontes renováveis é a energia eólica. A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200 GW, lembrando que o Brasil possui um energético total (soma das matrizes hidrelétricas, termelétricas etc.) de aproximadamente 103 GW.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. O custo dos equipamentos, um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas, representando uma força de implantação e aumento do uso dessa forma de conversão energética.

O uso deste tipo de energia apresenta um impacto ambiental negativo menor em comparação com outras fontes, como a termelétrica, todavia, durante a fabricação dos rotores e pás, o surgimento de resíduos não aproveitáveis ocorre.

Neste trabalho, serão discutidos os resíduos das pás, pois outros componentes (estrutura da torre, rotores elétricos, parafusos e linhas de transmissão) são compostos na maioria por metais, com melhor apreço quanto à reciclagem (econômico e processual), sendo também materiais de melhor controle, uma vez que o composto estudado está na forma de pó.

Por se tratarem de peças que devem ser leves e resistentes aos esforços físicos e às agressões químicas, as pás são compostas por fibras de longas cadeias, ou seja, polímeros que fornecem flexibilidade e resinas que aumentam a resistência mecânica e química. A fabricação da pá eólica se dá através da laminação de grandes moldes que contém entre outros componentes, fibra de vidro, resina epóxi, madeira balsa, espuma PVC e um componente catalisador.

Para a fixação das pás na torre de sustentação são feitos furos na extremidade em que as primeiras terão contato com a segunda (Figura 1), sendo desses gerado o resíduo.

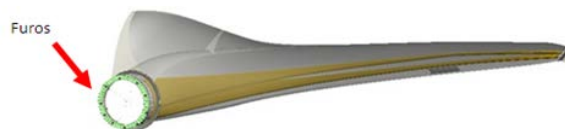


Figura 1: Pá eólica e os furos os quais o pó residual é gerado.

No estudo de caso, a empresa fabricante das pás eólicas possuía em 2010 uma produção mensal de 32 pás, sendo gerados de 2 a 3 tambores de resíduo provenientes dos furos (0,4 a 0,6 m³/dia, respectivamente). O resíduo se enquadra na Classe II - a, devendo ser destinado a um aterro específico para tal fim, o que demanda custos adicionais ao processo fabril.

A agregação dos resíduos das pás em argamassas

Segundo [2], “A incorporação de resíduo em argamassa pode ser feita através da substituição de parte do agregado miúdo por resíduo. Para tanto se faz necessária a confecção de corpos de prova de argamassa baseada em normas técnicas”... “A ABNT é a responsável no Brasil por preparar e divulgar normas técnicas que são utilizadas no mercado como padrão de referência. No caso do estudo dos cimentos Portland as normas técnicas definem as características e propriedades mínimas que estes devem apresentar além de métodos de ensaio para a verificação da conformidade das exigências estabelecidas pelas respectivas normas”, a saber:

- ABNT - NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.
- ABNT - NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão - para a realização do método de ensaio de resistência à compressão.
- ABNT - NBR 9778/87: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica.

Uma das razões para a escolha da incorporação do resíduo em outro composto (argamassa) é a grande movimentação do mercado da construção civil no país. Somente em julho de 2010, foram vendidas 5,2 milhões de toneladas de cimento no mercado interno, sendo no período janeiro a julho deste ano vendido um total de 32,8 milhões de toneladas [6]. Por se tratar de um dos componentes da produção de argamassa, o cimento ocasiona uma demanda nos outros itens como areia fina, pedrisco, cal e água também elevada.

A substituição da areia fina seria de vantagem não só para o gerador do resíduo, que deixaria de depositá-lo em aterros específicos como também: reduziria a demanda por areia, que ocasiona sérios problemas na sua extração; e aumentaria a vida útil dos aterros em si, dado que o pó não necessitaria mais ser disposto.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a criação de um modelo de *otimização* sobre dados empíricos para a reutilização deste resíduo na confecção de argamassa, com a substituição do agregado miúdo por esse resíduo, integrando algumas características físicas ao modelo final.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados para a construção do modelo foram obtidos de [2], sendo estes, a saber: porcentagem de resíduo no agregado miúdo (%), as resistências à compressão para cada traço de resíduo os dias de cura recomendados pela ABNT (Tabela 1), a absorção dos corpos de prova (CPs) em (%), índice de vazios dos CPs (%), massa específica seca em cada traço (g/mL) e massa saturada em cada traço (g/mL) (Tabela 2).

Tabela 1: Dados da determinação de absorção de água por imersão do estudo.

CPs com Resíduo	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica seca (g/mL)	Massa específica saturada (g/mL)
0%	13,12	21,90	1,67	1,89
10%	16,08	26,27	1,63	1,90
20%	11,99	19,06	1,59	1,78

Tabela 2 - Forças de resistência à compressão para o lote (volumétrico) de Corpos de Provas (CPs).

Tempo de Cura (dias)	CPs com 0% Média σ (Mpa)	CPs com 10% Média σ (Mpa)	CPs com 20% Média σ (Mpa)
3	1,41 \pm 0,37	1,23 \pm 0,13	1,00 \pm 0,23
7	2,89 \pm 0,37	2,12 \pm 0,31	2,01 \pm 0,05
28	4,98 \pm 0,44	3,39 \pm 0,30	2,99 \pm 0,58

Durante o estudo prévio, verificou-se que a substituição do resíduo deveria ser volumétrica, pois como se pode ver na Tabela 3, há diferença significativa entre a areia e o resíduo em pó.

Tabela 3: Densidades e granulometrias da areia e do resíduo

Característica	Areia	Resíduo
Faixa granulométrica	2 mm - 75 μ m	2,0 mm - 200 μ m
Densidade (g/mL)	1,54	0,42

Desta tabela e do estudo de [2] há a conclusão que a substituição volumétrica é mais apropriada que a substituição mássica dos componentes, uma vez que o volume de resíduo ao agregado miúdo é aproximadamente 3 vezes superior para a mesma massa (dificultando a mistura em água, com densidade de 1 g/mL). Estes resultados só influenciaram na conversão de substituição volumétrica ou mássica de acordo com a unidade trabalhada.

Segundo o trabalho de [2] um traço que apresenta a proporção em massa padrão da argamassa é: uma parte de cimento, três partes de areia e 0,6 partes de água à mistura (1:3:0,6). Este traço será o utilizado no modelo, isto é, ele obedecerá esta proporção dos componentes em massa.

Para verificação da relação entre o tempo de cura e a resistência, a cada concentração de resíduo com os valores médios e extremos apresentados, fez-se a regressão linear (coeficiente r) para cada valor. O único valor abaixo de 0,9 (correlação positiva ótima – enquanto uma variável cresce a outra também) foi para o valor mínimo dos CPs 20% de resíduo. Esse resultado preliminar é um teste para verificar a consistência dos dados para aplicação na modelagem por Programação Linear, fazendo parte da metodologia.

Posteriormente, fez-se a regressão linear para os parâmetros concentração e resistência (para cada período de cura em separado). Os resultados abaixo de -0,9 (correlação negativa ótima – enquanto uma decresce a outra cresce) foram nos tempos de cura de 3 e 7 dias para o valor mínimo do intervalo de compressão, e no dia 28 para o valor médio do intervalo. Mesmo assim, os coeficientes de correlação, segundo [4] ainda ficam na faixa do *razoável*.

O intervalo de confiança serviu para a construção de um gráfico com as resistências presentes no intervalo de desvio padrão pela quantidade de resíduo utilizado na substituição. Assim, a resistência máxima é a média observada mais a soma com o desvio padrão, a mínima segue de forma análoga, bem como a média.

Em seguida, averiguaram-se as melhores correlações lineares em uma matriz de correlação e a partir desta, em seguida ajustaram-se os dados por funções lineares, entre as características físicas e entre estas e resíduo, com auxílio do *software Excel® 2010*.

Com as funções lineares, valores desejados das características e a função custo, o modelo final resultou em um problema linear com minimização da função objetivo (função custo).

O problema é resolvido através do Método Simplex com solver do *software Excel® 2010*.

RESULTADOS

Uma função linear pode ser ajustada de um modo satisfatório aos valores de resistência observadas no tempo de cura de 28 dias (tempo final dos testes pela ABNT), para tanto, foram ajustadas as funções para cada valor médio, máximo, mínimo e as porcentagens de resíduo (Figura 2).

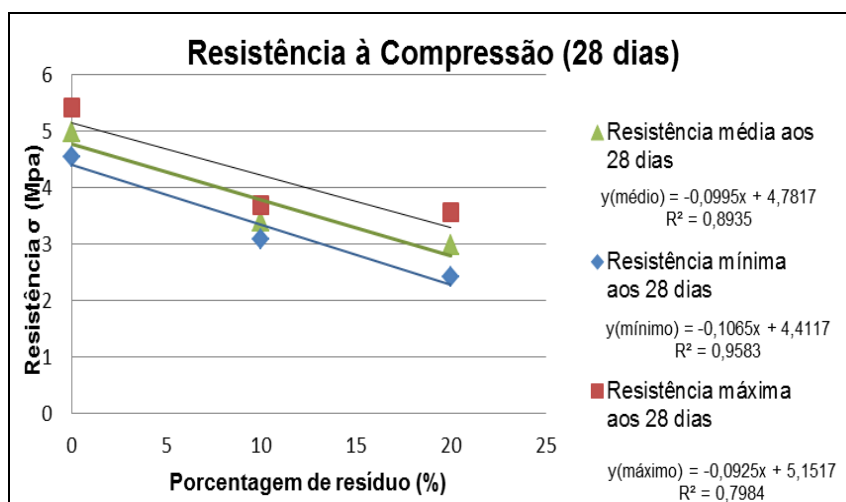


Figura 2: Ajuste linear da resistência em função da quantidade de resíduo.

As correlações entre resíduo e características estão na Tabela 4.

Tabela 4: Correlação da porcentagem de resíduo e cada característica de absorção.

CPs com Resíduo	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica seca (g/mL)	Massa específica saturada (g/mL)
0	13,12	21,9	1,67	1,89
10	16,08	26,27	1,63	1,9
20	11,99	19,06	1,59	1,78
Correlação (% resíduo x dados)	-0,2675	-0,3909	-1	-0,8260

Verifica-se que as correlações lineares mais evidentes foram entre a quantidade de resíduo e as massas específicas, sendo que a correlação observada com a massa específica seca foi simplesmente -1, ou seja, 100% de correlação negativa, dizendo que quando a quantidade de resíduo é substituída, a massa seca dos corpos de prova caiu de maneira linear. O mesmo ocorre com a massa específica saturada, entretanto o que se observa é que apesar desta ter seu valor diminuído, a absorção também diminuiu; o que de fato ressalta que houve menos absorção de água dada a natureza polimérica do resíduo.

Na matriz de correlação entre as características físicas (Tabela 5), podemos associar uma função da quantidade de resíduo que resultará de uma massa específica saturada ($r = -0,8260$). Essa massa específica pode ser obtida para uma absorção máxima requisitada (para o caso será estipulada uma absorção de no máximo 16% e no mínimo 13%) para um índice de vazios ($r = 0,8417$ entre *massa específica saturada* e *índice de vazios*) calculado com base na absorção apresentada ($r = 0,9914$ entre *absorção* e *índice de vazios*).

Tabela 5: Correlação entre as características.

Matriz das Correlações	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica seca (g/mL)	Massa específica saturada (g/mL)
Absorção (%)	1	0,9914	0,2675	0,7640
Índice de Vazios (%)	--	1	0,3909	0,8417
Massa específica seca (g/mL)	--	--	1	0,8260
Massa específica saturada (g/mL)	--	--	--	1

Os gráficos dos ajustes entre *absorção* e *índice de vazios* (Figura 3), entre *massa específica saturada* e *índice de vazios* (Figura 4) e entre *massa específica saturada* e *massa de resíduo* (Figura 5) foram gerados a partir dos dados da tabela 4.

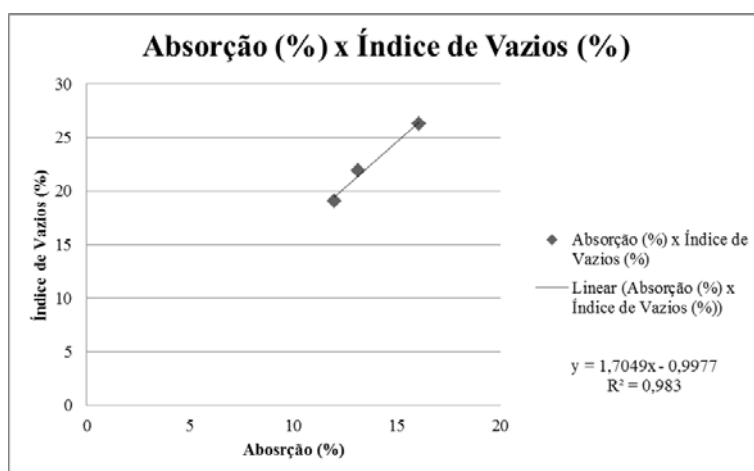


Figura 3: Ajuste Linear para índice de vazio em função da absorção.

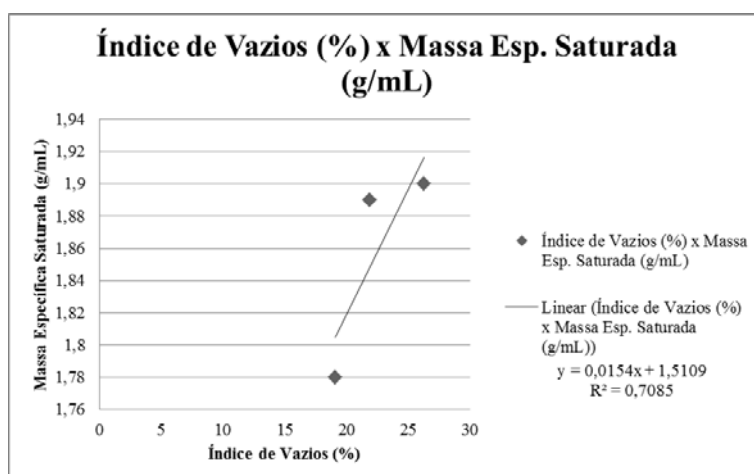


Figura 4: Ajuste Linear para massa específica saturada e índice de vazios.

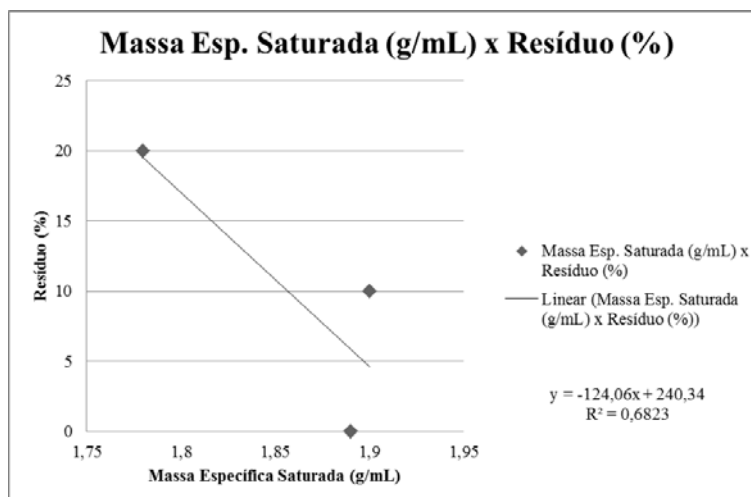


Figura 5: Ajuste Linear para massa específica saturada e resíduo.

Como o modelo foi proposto em gramas, para facilitar a operação do processo, realizou-se a conversão da porcentagem de resíduo para gramas deste. Modificaram-se os valores do eixo das ordenadas e a função ajustada (Figura 6).

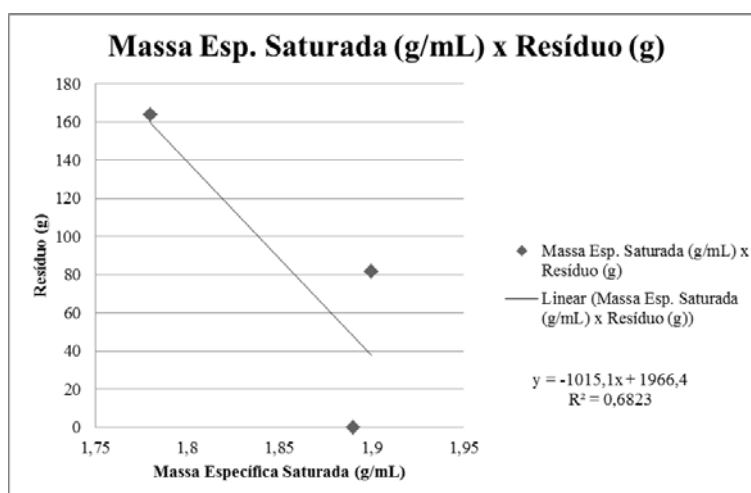


Figura 6: Ajuste Linear para massa específica saturada e resíduo, em gramas.

Com as funções encontradas em cada ajuste, o modelo foi formalizado sendo descrito a seguir.

Descrição das variáveis do modelo

A seguir, tem-se cada variável do modelo (x_j , $j = 1: 5$) para as características que mais se relacionam com o resíduo, e as restrições às quais são participantes.

A função objetivo $f(x)$ será construída com as variáveis de areia e resíduo, para cada 1000g de cimento (o resultado é em massa). O cimento e a água serão colocados como constantes na proporção, não fazendo parte do processo.

- x_1 – areia (g).
- x_2 – resíduo (g).

Para cada 1000 g de cimento, usa-se 3000 g de areia e 600 g de água. Sendo assim, o volume ocupado por 3000 g de areia é de 1,948 L (1948,0519 mL), a substituição de resíduo neste volume dará a massa do resíduo, contudo o volume total da fração miúda não poderá se alterar (assim como o volume total da mistura). Deste modo, a massa de cada parte vezes o inverso da densidade resulta em seu volume:

$$0,6493x_1 + 2,3809x_2 = 1948,0519$$

A porcentagem de x_2 máxima (quando a resistência é 0,1 Mpa) é retirada da função ajuste da Figura 2 para o ajuste de resistência mínima, sendo 40% de substituição volumétrica (teórica). Ou seja:

$$2,3809x_2 \leq 779,2207$$

A porcentagem mínima de x_2 (quando a resistência é 4 Mpa) é retirada do ajuste de resistência máxima da Figura 1, sendo 13% . Assim:

$$2,3809x_2 \geq 253,2467$$

- x_3 – absorção (%).
- x_4 – índice de vazios (%).

Para uma determinada absorção (x_3), o número de vazios é dado pelo ajuste da Figura 3, como:

$$x_4 - 1,7049x_3 = 0,9977$$

Como a correlação foi de 0,98 para esse ajuste, a função ficará sob a forma de equação. Lembrando que o intervalo de variação da absorção (x_3) será fixado entre 13 - 16%. Tem-se:

$$13 \leq x_3 \leq 16$$

- x_5 – densidade saturada (d_s).
- Para um determinado número de vazios, a densidade saturada é dado pelo ajuste do gráfico 3, como:

$$x_5 - 0,0154x_4 = 1,5109$$

- Como o erro deste ajuste foi de aproximadamente 0,7 será criada duas restrições com uma faixa de valores maior e menor em 15% do valor médio.

$$x_5 - 0,0154x_4 \leq 1,7375$$

$$x_5 - 0,0154x_4 \geq 1,2842$$

- Relação entre densidade saturada (x_5) e resíduo em massa (x_2) pode ser obtida pela conversão do gráfico 4 para gramas do resíduo (gráfico 5). Como o erro deste ajuste foi de aproximadamente 0,68 será criada duas restrições com uma faixa de valores maior e menor em 20% do valor médio.

$$x_2 + 1015,1x_5 \leq 2359,6$$

$$x_2 + 1015,1x_5 \geq 1573,1$$

- A função custo total será o custo em reais para cada grama dos componentes. A areia custa para o usuário em média 100 reais/m³ ou 6,4935.10⁻⁵ reais/g, enquanto o resíduo custa 20 reais/m³ ou 4,7619.10⁻⁵ reais/g (custo do manuseio e transporte da empresa de pás até a mistura, se o material fosse gratuito). Obtém-se então:

$$f(\mathbf{x}) = 6,4935 \times 10^{-5} x_1 + 4,7619 \times 10^{-5} x_2$$

Modelo formalizado

O modelo do problema de mistura é dado como:

$$\text{Minimizar } f(\mathbf{x}) = 6,4935 \times 10^{-5} x_1 + 4,7619 \times 10^{-5} x_2 \quad \text{equação (1)}$$

$$\text{Sujeito a : } 0,6493 x_1 + 2,3809 x_2 = 1.948,0519 \quad \text{equação (2)}$$

$$2,3809 x_2 \leq 779,2207 \quad \text{equação (3)}$$

$$2,3809 x_2 \geq 253,2467 \quad \text{equação (4)}$$

$$x_3 \leq 16,00 \quad \text{equação (5)}$$

$$x_3 \geq 13,00 \quad \text{equação (6)}$$

$$x_4 - 1,7049 x_3 = 0,9977 \quad \text{equação (7)}$$

$$x_5 - 0,0154 x_4 \leq 1,7375 \quad \text{equação (8)}$$

$$x_5 - 0,0154 x_4 \geq 1,2842 \quad \text{equação (9)}$$

$$x_2 + 1015,1 x_5 \leq 2359,6 \quad \text{equação (10)}$$

$$x_2 + 1015,1 x_5 \geq 1573,1 \quad \text{equação (11)}$$

$$x_j \geq 0, \text{ para } j = 1:5 \quad \text{equação (12)}$$

As restrições têm como definições:

- Equação (2) – trata da proporção dos materiais;
- Equações (3) e (4) – tratam da resistência
- Equações (5), (6), (7), (8), (9) e (10) – trata da amarração do modelo, entre as variáveis x_3 , x_4 e x_5 , especialmente nas equações (10) e (11) nas quais entra a variável do resíduo.
- Equação (12) – trata dos elementos do modelo que devem ser positivos.

SOLUÇÃO DO MODELO

A solução encontrada para o modelo está na Tabela 6.

Tabela 6: Mínimo da função do modelo final.

Característica	Variáveis	Solução
Areia	x_1	1800,14
Resíduo	x_2	327,28
Absorção	x_3	13
I. Vazios	x_4	21,17
D. Saturada	x_5	1,61
Modelo	Função Custo	
Objetivo - Min	$6,4935 \times 10^{-5} x_1 + 4,7619 \times 10^{-5} x_2$	0,13

Apesar da modificação, o modelo ficou estável, apresentando mesmo valor da função objetivo, R\$ 0,13 para o custo da mistura de resíduo e argamassa. O custo máximo da mistura dentro das restrições deste modelo é de 0,17 reais, configurando a solução a seguir (Tabela 7).

Tabela 7: Máximo da função do modelo modificado.

Característica	Variáveis	Solução
Areia	x_1	2610,2
Resíduo	x_2	106,37
Absorção	x_3	13
I. Vazios	x_4	21,17
D. Saturada	x_5	1,61
Modelo	Função Custo	
Objetivo - Max	$6,4935 \times 10^{-5} x_1 + 4,7619 \times 10^{-5} x_2$	0,17

Note que a diminuição do valor do resíduo ocasiona um aumento significativo no valor da mistura do agregado miúdo (cerca de 30% no valor). Por fim, o custo sem adição de resíduo pode ser obtido pela retirada da restrição de mínimo de substituição de resíduo (equação 3) e pelo acréscimo do pedido de maximização da função objetivo, o resultado é de R\$ 0,19 (Tabela 8).

Tabela 8: Custo do agregado miúdo sem adição de resíduo.

Característica	Variáveis	Solução
Areia	x_1	3000,23
Resíduo	x_2	0
Absorção	x_3	13
I. Vazios	x_4	21,17
D. Saturada	x_5	1,61
Modelo	Função Custo	
Objetivo - Max	$6,4935 \times 10^{-5} x_1 + 4,7619 \times 10^{-5} x_2$	0,19

Se a economia parece pouca pelos valores obtidos com e sem substituição, é que a mistura condiz a 1000 g de cimento. Contudo, se for considerada uma tonelada de cimento, ter-se-á uma economia de aproximadamente R\$ 60,00 no agregado miúdo para a substituição da Tabela 6, ou R\$ 20,00 na recomendação da resposta da Tabela 7.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a verificação do modelo foi possível restringir as variáveis físicas da argamassa, mesmo que ainda não ofereçam toda a confiança nos níveis de densidade saturada, absorção e índice de vazios. Deste modo, as alterações nos limites do modelo podem ser realizadas de acordo com o exigido por um operador que pode determinar um custo fixo para o agregado miúdo e conhecer previamente as características esperadas para a argamassa final.

Uma sugestão a ser feita diz respeito para testes de CPs com 35 – 40% de resíduo e para mais testes com as mesmas concentrações, podendo ser interessantes para se verificar a segurança e resistência nos testes da ABNT, e retificar o modelo proposto.

O incremento com novos CPs em variações diferentes poderia aumentar a confiança das relações lineares e dizer se é possível, ou não, aproximar o modelo por relações deste tipo, sendo o caso encontrado em algumas aproximações deste estudo, de maneira até razoável [4].

Fica ainda a premissa de que é viável realizar a reciclagem do resíduo, mediante um estudo mais completo, na argamassa; assim, almeja-se uma melhor gestão deste resíduo e de outros que possam se valer de metodologia operacional e de *otimização* como este, de modo a alcançar todos os benefícios defendidos neste estudo.

AGRADECIMENTOS

RENGE/PROPe/UNESP e à PROEX pela Bolsa de Apoio Acadêmico e Extensão BAAE I.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas Nacional da Energia Elétrica, 3ª Edição, 2008. Disponível em: <www.aneel.gov.br> Acesso em: 10 - 09 - 2010.
2. LISBOA, J. S. Estudo da incorporação de resíduos da fabricação de pás eólicas para aerogeradores em cimento Portland. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental – UNESP Sorocaba, 2010.
3. MESQUITA, J. M. Gestão integrada de resíduos sólidos nº1. Rio de Janeiro: IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2007.
4. MILONE, G. Estatística Geral e Aplicada. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
5. NUNES, D. B. Rotina para a Otimização Experimental de Misturas. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre: 1998.
6. SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Venda de Cimento – resultados preliminares de Julho 2010. Disponível: <www.snic.com.br> Acesso em: 10 - 09 - 2010.