

## ANÁLISE ATRAVÉS DE IMAGENS DE RAIOS X DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÁS EÓLICAS EM CIMENTO PORTLAND

M. A. Marques<sup>1</sup>; M. M. Bini<sup>2</sup> e M. L. P. Antunes<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>UNESP/Campus Experimental de Sorocaba

<sup>1,2</sup>NATEL – Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Controle e Automação

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Ambiental

Av. Três de Março, 511 – CEP: 18087-180. Sorocaba/SP, Brasil.

[marciomq@sorocaba.unesp.br](mailto:marciomq@sorocaba.unesp.br)

### RESUMO

*Os resíduos gerados pelas fábricas de pás eólicas podem ser reaproveitados na incorporação em cimento Portland com o objetivo de utilizá-los na construção civil sem fins estruturais. Através de imagens de raios X, fazemos uma avaliação da distribuição espacial desses resíduos para verificar a viabilidade do emprego desta técnica no estudo da sua incorporação. Foram fabricados corpos de prova seguindo as normas da ABNT-NBR 5738 e utilizando a relação em massa areia, pedriscos e cimento 3:2:1. A mesma relação foi utilizada na confecção de argamassa com resíduo substituindo parte do pedrisco pelo resíduo na proporção 10%, 20% e 50%. Foram obtidas imagens de raios X dos corpos cilíndricos em duas projeções: frontal e superior. As imagens demonstraram que a distribuição do resíduo é homogênea, compatível com o que se deseja neste tipo de incorporação e que pode proporcionar uniformidade nos resultados de testes de resistência à compressão.*

**Palavras-chave:** raios X, cimento Portland, imagens, incorporação, resíduo.

### INTRODUÇÃO

De maneira geral, todo processo industrial caracteriza-se pelo uso de insumos (matérias-primas, água, energia etc.) que são submetidos à transformação e geram produtos e resíduos. Os resíduos podem ser entendidos como a matéria-prima que passou pelo processo produtivo consumindo energia e mão de obra, porém nenhum valor foi agregado, e devem ser descartados de modo adequado, com custo de

tratamento, transporte e disposição final (1). Os resíduos gerados podem ser sólidos, líquidos ou gasosos.

Após tratamento, os líquidos são despejados em rios e mares, os gasosos são lançados na atmosfera, podendo causar a poluição do ar e das águas. Já os resíduos sólidos podem ser destinados a aterros. Porém, em sua grande maioria são armazenados em áreas próprias da empresa, destinados a lixões, descartados às margens de estradas ou em terrenos baldios, comprometendo a qualidade ambiental e de vida da população.

Com o crescimento populacional e o grande consumo gerado pela humanidade, tem-se procurado regulamentar, através da legislação, o descarte dos resíduos e assim minimizar os danos causados.

Cabe aqui destacar um resíduo que é gerado em grande quantidade pelas indústrias de Sorocaba e região: os resíduos das indústrias de fabricação de pás eólicas para aerogeradores. Esses resíduos, devido ao considerável volume gerado, necessitam de grande espaço para a sua disposição de forma correta, acarretando um custo alto para essas indústrias. Com o crescimento do mercado eólico brasileiro e a abertura de mercados estrangeiros, houve um grande aumento na produção de pás para as turbinas eólicas. As sedes das duas únicas indústrias que atuam no segmento de usinas eólicas se localizam na cidade de Sorocaba, no estado de São Paulo. Um dos desafios dessas indústrias é a destinação de seus resíduos. Informações internas dos fabricantes de pás eólicas dão conta que cada pá tem cerca de 7 toneladas e na sua fabricação são gerados de 10% a 15% de resíduos. Como um aerogerador tem três pás, cada um pode gerar até 3 toneladas de resíduos (2).

Os aerogeradores fabricados possuem, geralmente, uma torre, três pás idênticas, um rotor e um estator. A fabricação das pás eólicas 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. Nesse processo, a fibra de vidro é impregnada pela resina epóxi em estado líquido que com o passar do tempo muda para o estado sólido, em um processo chamado de reação de cura. Esses materiais são considerados, normalmente, como não-recicláveis e seus resíduos possuem como alternativa o aterramento.

No caso dos resíduos gerados pelas fábricas de pás eólicas para aerogeradores de Sorocaba, eles podem ser reaproveitados na incorporação em cimento Portland. O interesse é utilizá-los na construção civil como blocos sem fins estruturais para construção de muros, guias, calçadas, pisos etc. Os corpos confeccionados devem obedecer às normas técnicas brasileiras e as suas propriedades relativas à resistência, compressão, absorção de água e distribuição espacial dos resíduos nestes corpos devem ser avaliadas (3).

Devido a importância de se conhecer as propriedades dos corpos produzidos com a incorporação de resíduos de pás eólicas, este trabalho faz uma avaliação através de imagens de raios X de sua distribuição espacial para verificar a viabilidade do emprego desta técnica no estudo da incorporação de resíduos para futuramente, em conjunto com outras pesquisas que estão sendo realizadas, verificar a relação desta distribuição com as propriedades mecânicas dos corpos produzidos.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização do Resíduo**

Na fabricação das pás eólicas, utiliza-se resina epóxi para impregnar a fibra de vidro. Essa resina, pelo processo de cura, muda para o estado sólido. Uma grande quantidade da resina que não é utilizada se transforma em resíduo que é descartado pela indústria de pás eólicas. Nesse trabalho, foram utilizadas essas sobras de resina.

Primeiramente a resina epóxi que é descartada em grandes pedaços foi quebrada em fragmentos menores com o auxílio de um ponteiro e uma marreta. Logo após a quebra, foi utilizado um moinho de facas modelo Mak-250 da Kie Máquinas e Plásticos, com uma tela 12,7 mm de granulometria, para produzir o agregado a ser incorporado no cimento Portland. A Figura 1 mostra o resíduo bruto (A), depois de quebrado em fragmentos menores (B) e após ter sido triturado com a utilização do moinho de facas (C).



**Figura 1:** Resíduo (resina epóxi).

Foi feita uma análise granulométrica utilizando 250 g de resina triturada, um agitador Solo-Test e um conjunto de peneiras de diferentes aberturas: 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 2,00 mm; e 1,18 mm.

Acoplando-se as peneiras em ordem decrescente de diâmetro da parte superior para a inferior, adicionou-se 250 g do resíduo triturado e este foi mantido sob agitação durante 5 minutos. Por fim, cada peneira foi pesada em uma balança semi-analítica (Marte®  $\pm 0,01$ ) obtendo-se a massa da resina retida nas diferentes peneiras.

### **Confecção dos Corpos de Prova de Cimento Portland**

Os corpos de prova (CPs) foram produzidos utilizando-se moldes confeccionados em PVC conforme a Norma NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto (4).

Foram produzidos 4 lotes com diferentes porcentagens de resina epóxi triturada. No primeiro lote, de concreto puro (0%), utilizou-se um traço de 3:2:1, areia, pedrisco e cimento, respectivamente, em relação ao volume. Nos demais lotes foram utilizados o mesmo traço, entretanto houve uma substituição de parte do pedrisco pela resina epóxi em porcentagem pré-definida relacionada na Tabela 1.

**Tabela 1** – Proporção em volume dos CPs confeccionados.

<b>Lote</b>	<b>Cimento (L)</b>	<b>Areia (L)</b>	<b>Pedra (L)</b>	<b>Resíduo (L)</b>
<b>Lote 1 (0%)</b>	1,046	2,093	3,14	-
<b>Lote 2 (10%)</b>	1,046	2,093	2,826	0,314
<b>Lote 3 (20%)</b>	1,046	2,093	2,512	0,628
<b>Lote 4 (50%)</b>	1,046	2,093	1,57	1,57

Cada lote foi constituído de 3 corpos idênticos. Os agregados dos corpos de prova eram areia, brita, cimento Portland e resina epóxi triturada, com exceção do Lote 1, no qual não há presença da resina epóxi, pois ele foi usado como referência para os outros lotes.

No final da cura de 24 horas, foi determinada a massa dos corpos em uma balança eletrônica Micheletti MIC 100. Depois se iniciou a cura final, onde os corpos foram colocados em bacias com água por 28 dias, segundo a NBR 5738.

A Figura 2 mostra o molde de PVC e o corpo de prova produzido.

**Figura 2:** Molde de PVC e corpo de prova.

### **Obtenção das Imagens de Raios X**

Como os corpos de prova possuem um formato cilíndrico com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, foram obtidas imagens na projeção frontal utilizando um equipamento de raios X industrial X-ray Philips MG/450 com uma distância foco/filme de 3,5 m e dois conjuntos de parâmetros, como mostra a Tabela 2. Utilizou-se dois

conjuntos de parâmetros para que fosse possível obter uma penetração maior dos raios X na parte central dos corpos de prova.

As imagens foram então obtidas utilizando um aparelho de radiografia computadorizada CR 30-X AGFA.

**Tabela 2** – Parâmetros utilizados no aparelho de raios X.

<b>Parâmetros</b>	<b>Conjunto 1</b>	<b>Conjunto 2</b>
Voltagem (kVp)	83	130
Corrente (mA)	2	10
Tempo (s)	10	10

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise Granulométrica do Resíduo

A Tabela 3 apresenta a porcentagem em massa encontrada em cada peneira utilizada no processo.

**Tabela 3** – Análise granulométrica do resíduo de pás eólicas.

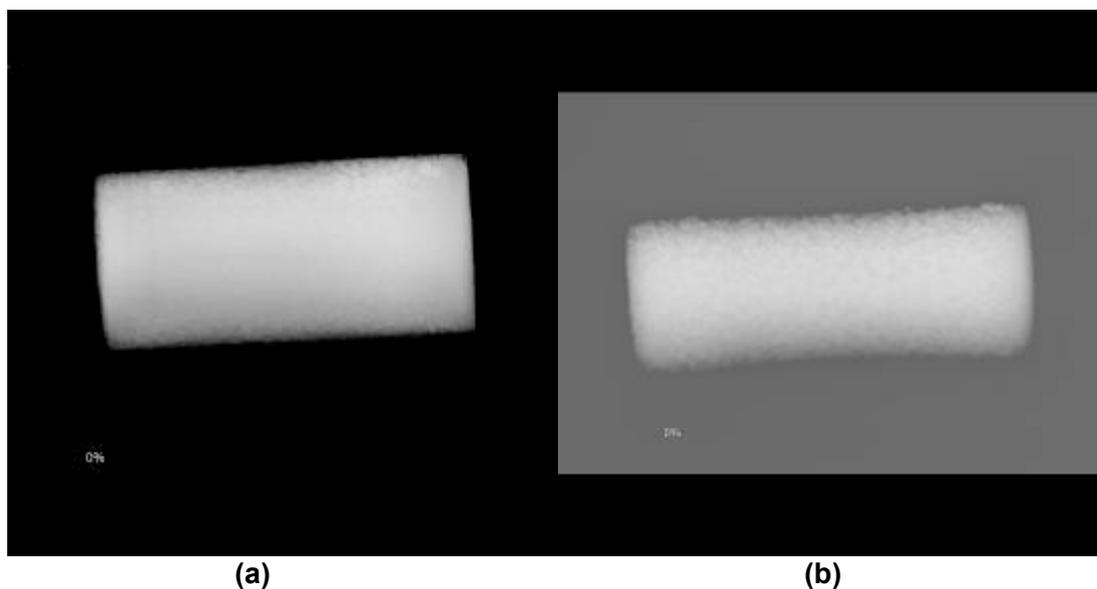
<b>Peneira</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
> 9,5 mm	3,6
9,5 mm – 4,75 mm	80,4
4,75 mm – 2,36 mm	14,6
2,36 mm – 2,00 mm	0,4
2,00 mm – 1,18 mm	0,8
< 1,18 mm	0,1

Analisando-se os valores da Tabela 3 e juntamente com a NBR 7225, pode-se concluir que o resíduo é semelhante a um pedrisco, que compreende entre 9,5 a 2,40 mm (5).

Nota-se ainda que o aumento da concentração de resíduo incorporado no material leva a uma redução na massa dos corpos de prova.

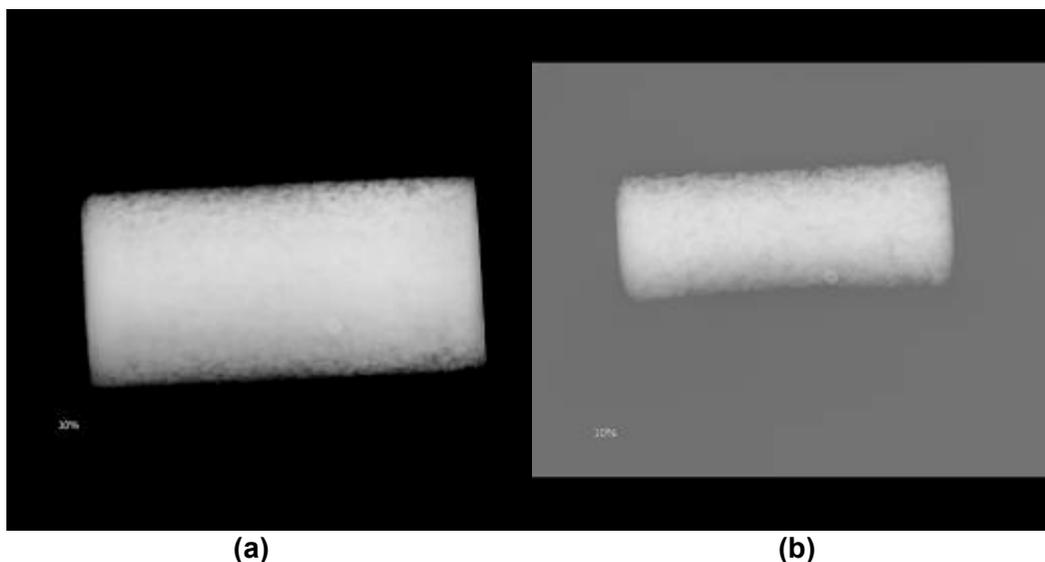
### **Análise das Imagens de Raios X**

As Figuras 3a e 3b mostram as imagens de raios X obtidas utilizando-se, respectivamente, os parâmetros dos Conjuntos 1 e 2 da Tabela 2 para os corpos de prova com concreto puro, ou seja, sem resíduo e que servem como referência.

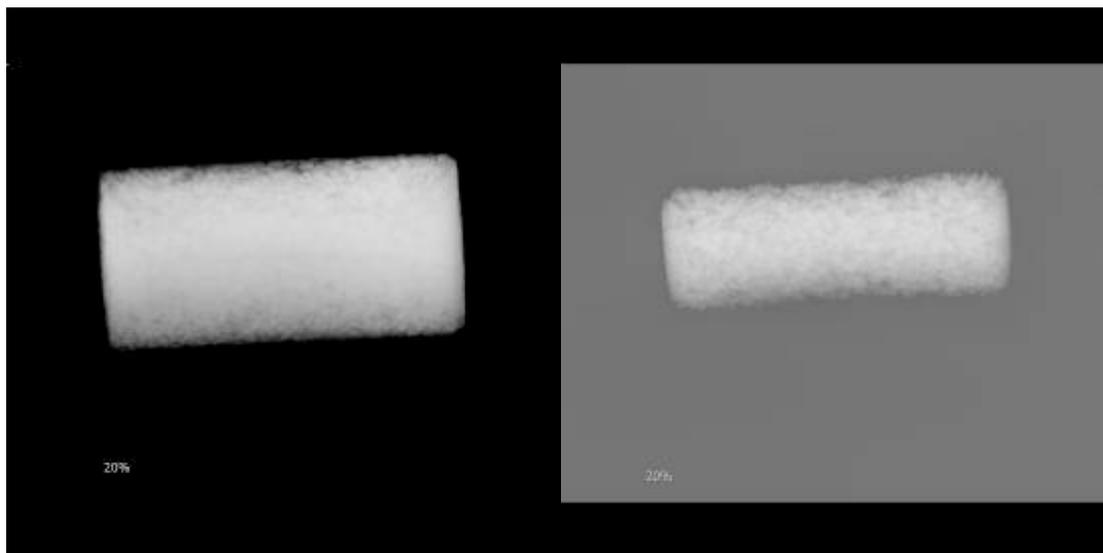


**Figura 3:** Imagens dos CPs com concreto puro.

As imagens de raios X obtidas utilizando-se os parâmetros do Conjunto 1 da Tabela 2 para os corpos de prova com 10%, 20% e 50% de resíduo são mostradas, respectivamente, nas Figuras 4a, 5a e 6a. Já as Figuras 4b, 5b e 6b mostram as imagens de raios X obtidas utilizando-se os parâmetros do Conjunto 2 da Tabela 2 para os corpos de prova com, respectivamente, 10%, 20% e 50%.



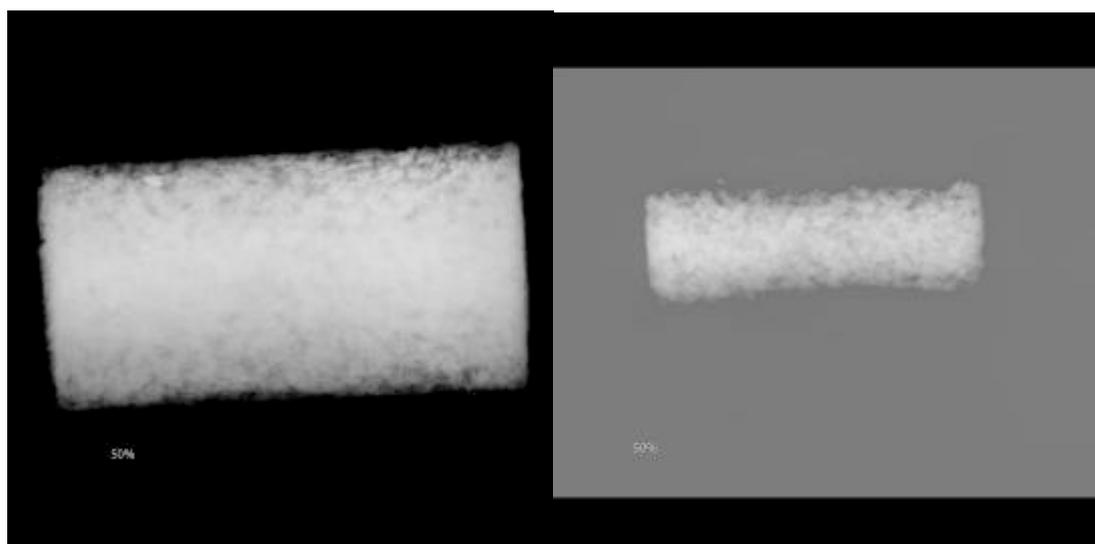
**Figura 4:** Imagens dos CPs com 10% de resíduo.



(a)

(b)

**Figura 5:** Imagens dos CPs com 20% de resíduo.



(a)

(b)

**Figura 6:** Imagens dos CPs com 50% de resíduo.

Pode-se verificar nas imagens das Figuras 3a, 4a, 5a e 6a (projeção frontal) que a distribuição do resíduo e pedriscos nas bordas dos CPs é homogênea. Por outro lado, esta distribuição começa a ser mais visível na parte central quando utilizamos a proporção de 20 e 50% de resíduo.

Observando as Figuras 3b, 4b, 5b e 6b pode-se notar com mais nitidez que a distribuição do resíduo e pedriscos nos CPs é homogênea. Além disso, como a voltagem aplicada no tubo de raios X foi bem maior do que a utilizada para obter as

imagens anteriores (Figuras 3a, 4a, 5a e 6a), pode-se concluir que realmente os resíduos tiveram uma distribuição homogênea nos CPs pois, as imagens mostram uma penetração muito maior do que no caso da Figura 3b cujo corpo de prova foi produzido sem resíduo agregado.

## CONCLUSÕES

As imagens da projeção frontal mostram que tanto as bordas quanto a parte central dos corpos de prova foram bem penetradas pelos raios X, inclusive para o corpo de prova sem resíduo. Assim, podemos concluir que a distribuição do resíduo é homogênea, o que pode proporcionar uniformidade nos resultados de testes de resistência à compressão que serão realizados futuramente. Também pode ser visto nas imagens, que a forma utilizada para a incorporação do resíduo resulta na sua distribuição uniforme, compatível com o que se deseja neste tipo de incorporação.

Já para a projeção superior, devido a grande altura do corpo de prova, ainda será necessário um estudo dos parâmetros que deverão ser utilizados no equipamento de raios X para tentar melhorar a qualidade das imagens.

Além disso, métodos de processamento digital de imagens poderão ser aplicados nas imagens para auxiliar a visualização e a diferenciação entre o resíduo incorporado e os pedriscos.

Finalmente, podemos concluir que a incorporação de resíduo leva à produção de corpos de prova mais leves do que os mesmos sem resíduo, indicando que esse material pode gerar concretos mais leves e de interesse na construção civil, além de ser uma boa alternativa para a destinação desse resíduo.

## AGRADECIMENTOS

FUNDUNESP e RENG/PROPe-UNESP.

## REFERÊNCIAS

- (1) BRAGA, Benedito et.al. ***Introdução à engenharia ambiental – o desafio do desenvolvimento sustentável***. 2. ed., São Paulo: Editora Pearson, 2002.
- (2) LARSEN, K. Recycling Wind Turbine Blades. ***Renewable Energy Focus***, v.9, n.10, p.70-73, 2009.

(3) MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

(4) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 5738/1994 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, 1994.

(5) IUDICE Mineração. [on line]. Disponível em: [http://iudice.com.br/info\\_tec.html](http://iudice.com.br/info_tec.html). Acesso em 15 de fevereiro de 2011.

### **ANALYSIS BY X-RAY IMAGES OF WIND BLANDES WASTE INCORPORATED IN PORTLAND CEMENT**

#### **ABSTRACT**

*The wind blandes wastes can be reused in the incorporation in Portland cement, to be used in non-structural constructions. This work shows X-rays images to assessment the space distribution of the wastes in the cement and to evaluate the use of this methodology. Cylindrical specimens were produced according to ABNT-NBR 5738 standards. The mass relation of sand, pebbles and cement was 3:2:1 and 10%, 20% and 50% of waste was incorporated in cement specimens. Frontal and upper projections were obtained in X-Rays images. The images showed that the distribution of the waste is homogeneous, consistent with what was intended in this type of incorporation, which can provide uniformity in test results of compressive strength.*

**Key-words:** X-rays, Portland cement, images, incorporation, waste.