



## Estudo da Incorporação de Resíduo de Fabricação de Pás Eólicas para Aerogeradores em Cimento Portland

M. P. M. Bini<sup>a</sup>, M. L. P. Antunes<sup>b</sup>, L. Sottovia<sup>c</sup>

a. UNESP, Campus Sorocaba, NATEL – Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas, Sorocaba, S.P., marcosbini@hotmail.com

b. UNESP, Campus Sorocaba, NATEL – Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas, Sorocaba, S.P., malu@sorocaba.unesp.br

c. UNESP, Campus Sorocaba, NATEL – Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas, Sorocaba, S.P., liviasottovia@yahoo.com.br

### Resumo

Os diversos resíduos gerados pelas indústrias representam um grande desperdício de matéria-prima, além de representarem potenciais riscos à sociedade e ao meio ambiente. A incorporação de resíduos em outros processos é uma forma de minimizar os danos ambientais, além de reduzir o desperdício e propiciar uma produção mais limpa. Cabe destacar um resíduo gerado em grande quantidade pelas indústrias de Sorocaba: o resíduo das indústrias de fabricação de pás eólicas para aerogeradores. Esse resíduo, devido ao grande volume gerado, necessita de grande espaço para a sua disposição, acarretando um custo alto para essas indústrias. Uma forma alternativa para o descarte desse resíduo é a incorporação em matriz de cimento Portland. Nessa perspectiva, este trabalho teve como objetivo incorporar resíduos da produção de pás eólicas em matriz de cimento, estudando as propriedades mecânicas e ampliando o conhecimento sobre o comportamento desse novo material. Foram feitos vários ensaios para caracterização do resíduo: ensaio de molhabilidade, Infravermelho, análise granulométrica e determinação da densidade e notou-se que o resíduo é hidrofílico e apresenta uma granulometria semelhante ao pedrisco e uma densidade menor do que esse. Nos ensaios de resistência a compressão notou-se uma queda na resistência mecânica dos corpos de prova a medida que se aumenta a concentração de resíduo. Os corpos de prova não apresentam uma alta resistência, porém de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, o concreto renovável, pode ser utilizado para a fabricação de blocos leves de concreto não estrutural. Portanto a reutilização dos resíduos das pás eólicas na construção civil pode ser uma boa alternativa para a destinação desse resíduo.

**Palavras-chave:** Cimento Portland, Resíduo, Caracterização

### 1 Introdução

Com o crescimento da demanda por tecnologia, houve o aumento da geração de resíduos provindos da produção industrial, provocando grandes problemas ambientais. Tais resíduos precisam ser dispostos corretamente como uma medida para o controle da poluição. Uma ação assim demanda dinheiro, tecnologia, energia e espaço físico (BRAGA, 2002).

A norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – define resíduos sólidos e semi-sólidos como aqueles remanescentes que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Segundo o Decreto – Lei n° 488/85 de 25 de Novembro de 1985, o detentor de resíduos, qualquer que seja a sua natureza e origem, deve promover a sua recolha, armazenagem, transportes e eliminação ou utilização de tal forma que não ponham em perigo a saúde humana nem causem prejuízo ao meio ambiente. Assim, toda a indústria tem responsabilidade pelo seu resíduo, cabendo a ela destiná-lo corretamente.

A incorporação de resíduos em outros processos é uma forma de minimização de danos ambientais, pois prolonga a vida útil de aterros, diminuindo a necessidade de novos espaços destinados a esse fim, reduz o desperdício, já que esses resíduos se constituem em matéria-prima e reduz os custos de deposição permitindo uma produção mais limpa.

Neste contexto, a construção civil é sem dúvida um dos setores que mais pode utilizar resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos, tornando-se uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos.

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 grande 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-SP. 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 cada aerogerador tem três pás, cada um pode gerar até 3 toneladas de resíduos.

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 catalizador. Nesse processo, a fibra de vidro é impregnada pela resina epoxi em estado líquido que com o passar 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.

Em vista disso, este trabalho apresenta um estudo sobre a incorporação do resíduo epoxi em cimento Portland. Para isso, foi feita a caracterização desse resíduo, através de ensaios de molhabilidade, espectroscopia no Infravermelho de reflexão total interna, densidade e de granulometria. Ele foi testado como parte integrante do agregado grosso e através de ensaios baseados em normas técnicas foi avaliado o desempenho mecânico dos corpos de prova confeccionados com esse resíduo, verificando-se como as diferentes concentrações do mesmo influenciam em suas propriedades.

## **2 Metodologia**

### *Resíduo utilizado*

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 vira resíduo que é descartado pela indústria de pás eólicas. Nesse trabalho, foram utilizadas essas sobras de resina. Primeiramente a resina epóxi foi quebrada em pedaços 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.

#### *Caracterização do resíduo*

##### *Ensaio da Molhabilidade*

Foi realizado um ensaio de molhabilidade do resíduo após a sua preparação. Para esse ensaio, os pedaços da resina epóxi analisada, sofreu um tratamento em uma Cuba de Ultra-Som CRISTÓFOLI por 10 minutos em meio aquoso para retirar todas as impurezas.

Os ensaios foram realizados utilizando-se um Goniômetro Ramé-Hart 100-00 e o software Rame-Hart Imaging 2001 (Fig. 1). Dessa maneira, foi possível analisar o ângulo de contato de uma gota d'água com a resina epóxi. Dependendo do valor desse ângulo, identifica-se a condição da resina como mais hidrofílica ou mais hidrofóbica (BURKARTER, 2006).



Fig. 1 – Goniômetro utilizado nos ensaios de molhabilidade

##### *Infravermelho*

A espectroscopia no infravermelho de reflexão total atenuada (FTIR/ATR), conhecida por espectroscopia de reflexão total interna, foi utilizada para caracterizar a resina epóxi curada. Esse método foi utilizado devido à dificuldade de manuseio da resina, devido à solubilidade limitada.

Os ensaios foram realizados no LaPTec, Laboratório de Plasmas Tecnológicos da UNESP, utilizado-se um espectrofotômetro Jasco FTIR-410, juntamente com o software Ftir.

##### *Análise Granulométrica*

Foi feita uma análise granulométrica utilizando 250g 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.

Acoplado-se as peneiras em ordem decrescente de diâmetro da parte superior para a inferior adicionou-se 250g do resíduo triturado e este foi mantido sob

agitação durante 5 minutos. Por fim, cada peneira foi pesada em uma balança semi-analítica (Marte® ± 0,01) obtendo-se a massa da resina retida nas diferentes peneiras.

#### *Determinação da Densidade*

Determinou-se a densidade aparente (D) do resíduo. Com uma proveta graduada de 100 mL, água deionizada e uma balança semi-analítica (Martel® ± 0,01), foi possível calcular a densidade da resina através da Eq 1.

$$D = \frac{m}{V} \quad (1)$$

#### *Confecção dos corpos-de-prova de cimento Portland*

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

Foram produzidos 4 lotes com diferentes porcentagens de resina epóxi triturada. O primeiro lote, de concreto puro (0%), utilizou-se um traço de 3:2:1, areia, pedrisco e cimento, respectivamente, em relação ao volume. Os 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 corpos-de-prova 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, apenas no Lote 1 que 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, aonde os corpos foram colocados em bacias com água por 28 dias, segundo a NBR 5738.

#### *Ensaio de compressão*

Os ensaios foram realizados no laboratório da Supermix Concreto S/A em Sorocaba, utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC®. Antes do ensaio, os corpos passaram por um faceamento para que não haja nenhuma irregularidade na superfície do corpo-de-prova, como mostra na Fig. 2.



Fig. 2 – Faceamento do corpo-de-prova

A leitura na prensa hidráulica EMIC® é fornecida em tonelada-força (tf) e para o cálculo da pressão são utilizadas as equações 2 e 3. Através de uma curva de calibração relaciona-se a força aplicada com a compressão exercida (PINTO, 2005).

$$P = F/A \quad (2)$$

Onde:

P – Pressão (Kgf/cm<sup>2</sup>)

F – Força (Kgf)

A – Área do topo do corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>)

O valor médio usado para o valor da área do topo dos corpos-de-prova foi 73,97cm<sup>2</sup>.

E a transformação em mega pascal (MPa) usa-se a Eq. 3 (PORTAL DO CONCRETO, 2010).

$$f_{ck} = P/10,1972 \quad (3)$$

Onde:

f<sub>ck</sub>' – Resistência Característica do Concreto à Compressão em MPa (Mega Pascal)

### 3 Resultados e Discussões

#### *Ensaio de molhabilidade*

Os fragmentos de resina epóxi apresentam duas faces diferentes, uma lisa e uma rugosa, sendo então necessário realizar o teste da molhabilidade nessas duas faces. Na Fig. 3, encontram-se os valores das médias dos ângulos de cada face do resíduo.

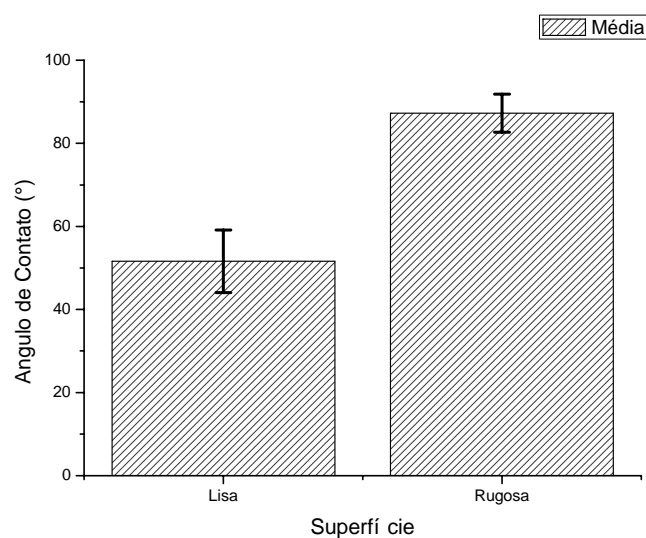


Fig. 3 – Média e desvio padrão do ângulo de contato da gota com a resina epóxi

A Fig. 4 mostra uma gota d'água em contato com a resina na superfície lisa. As Fig. 5 e 6 mostram a gota d'água em contato com a superfície rugosa.



Fig. 4, 5 e 6 – Forma da gota d'água sobre as superfícies lisa, rugosa e rugosa respectivamente

Para face lisa, nota-se um ângulo bem abaixo de  $90^\circ$  e a superfície rugosa apresenta um ângulo bem próximo de  $90^\circ$ . Quanto menor for o ângulo, maior a resina é hidrofílica e acima de  $90^\circ$  a resina já é considerada hidrofóbica (BURKARTER, 2006).

Através da caracterização do resíduo da fabricação de pás eólicas, pode-se observar que a resina epóxi, quando triturada no moinho de facas, ela possui dois tipos de faces, onde vão interferir na molhabilidade com o concreto. Com os resultados pode-se afirmar que a resina é hidrofílica, pois as duas médias ficaram abaixo de  $90^\circ$ , o limitante.

#### *Infravermelho*

No LaPTec obteve-se o espectro de reflectância no infravermelho da resina epóxi. Esse espectro encontra-se na Fig. 7.

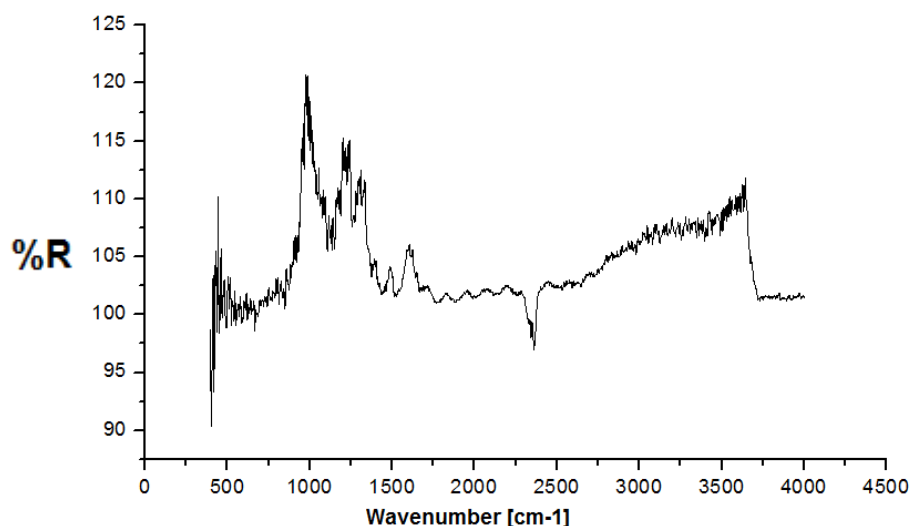


Fig. 7 – Gráfico de Refletância do Infravermelho na Resina Epóxi curada

Analisando-se o espectro da Fig. 7, juntamente com o trabalho de ROMÃO et al. 2007, identificaram-se as principais faixas do infravermelho da resina epóxi: 3504  $\text{cm}^{-1}$  (n OH), 1247  $\text{cm}^{-1}$  (n CO aromático), 1857  $\text{cm}^{-1}$  (n CO aromáticos), 915  $\text{cm}^{-1}$  (n grupo epóxi).

#### *Análise Granulométrica*

Na Tabela 2, encontra-se a massa e a porcentagem encontrada em cada peneira utilizada no processo.

Tabela 2 – Granulometria da resina epóxi

<b>Peneira</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
> 9,5 mm	8,955	3,6
9,5 mm – 4,75 mm	201,089	80,4
4,75 mm – 2,36 mm	36,464	14,6
2,36 mm – 2,00 mm	1,063	0,4
2,00 mm – 1,18 mm	1,949	0,8
< 1,18 mm	0,295	0,1

Analisando-se os valores da Tabela 2 e, juntamente, com a NBR 7225, pode-se concluir que a resíduo é semelhante a um pedrisco, que compreende entre 9,5 a 2,40 mm (Iudice Mineração, 2011).

#### *Densidade Aparente*

A Tabela 3 apresenta os valores das massas da resina epóxi, juntamente com a variação do volume quando se introduziu tal massa na proveta. A densidade foi calculada através da Eq 1.

Tabela 3 – Densidade aparente da resina epóxi

Teste	Massa (g)	$\Delta V$ (mL)	Densidade
<b>1</b>	2.35	2	1.18
<b>2</b>	3.72	3	1.24
<b>3</b>	5.28	4	1.32
<b>4</b>	6.43	5	1.28
<b>5</b>	8.38	6.5	1.29
<b>6</b>	9.75	8	1.22

Obteve-se uma densidade aparente média de 1,25g/mL. Sendo este valor inferior ao do pedrisco que tem uma densidade de 1,8 g/mL (BASF, 2011).

#### *Corpos de prova de cimento Portland*

Depois da cura de 24 horas os corpos foram pesados. Suas massas encontram-se na Tabela 4. Nota-se que com a substituição do pedrisco pela resina, há uma diminuição da massa dos corpos.

Tabela 4 – Massas dos corpos-de-prova

Corpo	0%	10%	20%	50%
<b>1</b>	3,38	3,20	3,00	2,82
<b>2</b>	3,36	3,28	3,00	2,84
<b>3</b>	3,40	3,24	3,12	-
<b>Média (.10<sup>3</sup>)</b>	(3,38+0,02)g	(3,24+0,04)Kg	(3,04+0,06)Kg	(2,83+0,01)Kg

O acréscimo de resíduo leva a produção de corpos de concreto mais leves, uma vez que a massa dos mesmos diminuem. Observa-se uma diminuição maior que 15% na redução da massa, quando se comparam o lote 0% com o lote 50% de resíduo. Essa redução da massa é devido a diferença de densidade entre o pedrisco e a resina.

#### *Ensaio de compressão*

Com os valores obtidos nos ensaios de compressão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de Compressão em corpos-de-prova de 10x20 cm

% de Resíduo	Tf	Compressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	fck (Mpa)	fck <sub>Médio</sub> (Mpa)
0%	7,06	95,44	9,36	8,42
	6,19	83,68	8,21	
	5,80	78,41	7,69	
10%	4,61	62,32	6,11	6,00
	4,70	63,54	6,23	
	4,27	57,73	5,66	
20%	4,27	57,73	5,66	6,02
	4,86	65,70	6,44	
	4,49	60,70	5,95	
50%	3,32	44,88	4,40	4,10
	2,87	38,80	3,80	



É possível observar que com o aumento da concentração da resina epóxi, há uma diminuição na resistência.

Como se nota na Fig. 8 o valor médio da resistência dos lotes produzidos com 10 e 20% de resíduo são bastante próximos. Para esses lotes a redução da resistência chega a 28,7% da resistência do lote sem resíduo. E a resistência do lote de 50% de resíduo cai pela metade. No entanto, quando compara-se os limites de exigências mecânicas determinados pela ABNT-11578, notou-se que todos os lotes são concretos de baixa resistência mecânica ( $>20$  MPa), até mesmo o lote sem resíduo.

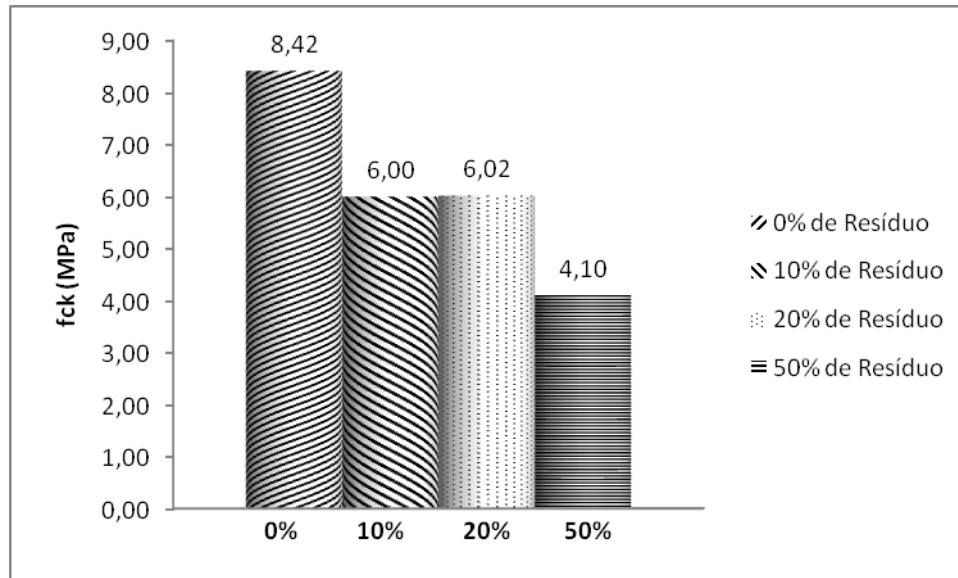


Fig. 8– Valor médio da resistência a compressão de cada lote

A resistência a compressão diminui com o aumento do resíduo incorporado aos corpos.

#### 4 Conclusão

O Resíduo gerado na fabricação de pás eólicas é hidrofílico, como pode ser observado nos ensaios de molhabilidade, o que parece facilitar o contato desse material com o cimento.

Os corpos de prova produzidos com a resina apresentam massa inferior a do concreto produzido somente com pedrisco devido a menor densidade da resina epóxi. Esta pode ser uma vantagem, uma vez que se produz um concreto mais leve e de grande interesse na construção civil.

A incorporação do resíduo, produz concretos com uma menor resistência a compressão. Quando comparado com o lote referência, observa-se que a incorporação de 10 a 20% de resíduo reduz em cerca de 28% a resistência dos corpos.

Os corpos de prova não apresentam uma alta resistência, porém de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, o concreto renovável, pode ser utilizado para a fabricação de blocos leves de concreto não estrutural. Portanto a reutilização dos resíduos das pás eólicas na construção civil pode ser uma boa alternativa para a destinação desse resíduo.

Agradecimento: UNESP/Programa Renove Engenharia (RENGE).

## 5 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7225: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 77p.

BASF, The Chemical Company. [on line]. Disponível em <[http://www.piresatazcadista.com.br/pdf/SET\\_45.pdf](http://www.piresatazcadista.com.br/pdf/SET_45.pdf)>. Acessado em Fevereiro/2011.

BRAGA, Benedito et.al. **Introdução à Engenharia Ambiental – O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2<sup>a</sup> Ed. Editora Pearson São Paulo. 2002. 216-227p.

BRASIL. Decreto n. 488, de 25 de novembro de 1985. **Resíduos Sólidos**.

BURKARTER, E. **Construção de imagens por padrões hidrofóbico/ hidrofílico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Paraná, 2006.

Iudice Mineração. [on line]. Disponível em <[http://iudice.com.br/info\\_tec.html](http://iudice.com.br/info_tec.html)>. Acessado em Fevereiro/2011.

Romão, B M V; Diniz, M F; Azevedo, V L L; Pardini, L C; Dutra, R C L & Burel, F – **Characterization of the curing agents used in epoxy resins with TG/FT-IR technique**. Polímeros vol.16 no.2 São Carlos, 2006.

PINTO, C. A. **Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados**. 2005. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PORTAL DO CONCRETO. [on line]. Disponível em <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/fck.html>>. Acessado em Janeiro/2011.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2<sup>a</sup> Ed. Editora Edgard Bleecher LTDA. 1989. 409-422p.

WOBLEN. [on line]. Disponível em <<http://www.wobben.com.br>> acessado em Janeiro/2011.