

Novas Alternativas para Sucata de Empresas de Distribuição de Eletricidade

Sandro D. Mancini, Bruno F. Gianelli, Vladimir X. Bastista, Luciane L. Rodrigues, Haroldo L. Hasegawa e Alexandre M. Silva

Resumo – Isoladores de porcelana bem como abraçadeiras usadas e descartadas que estavam no pátio de resíduos da AES Eletropaulo foram coletadas e submetidas a ensaios para verificar a qualidade dos materiais descartados. Os mesmos ensaios foram realizados para produtos novos, visando estabelecer se eventuais diferenças poderiam ser atribuídas ao uso do produto. Os resultados indicaram que tanto o aço das abraçadeiras bem como a porcelana e o esmalte dos isoladores podem ser considerados similares aos materiais dos produtos novos, o que sugere que algumas alternativas são bastante promissoras para aplicações por parte das próprias empresas geradoras destes resíduos: britagem dos isoladores para uso em pisos de subestações, uso dos isoladores íntegros na contenção de encostas e taludes e decapagem/galvanização das abraçadeiras (pois o revestimento de zinco foi realmente comprometido durante o uso) e sua reutilização.

Palavras-chave –porcelana, aço galvanizado, reutilização, reciclagem, gestão de resíduos.

I. INTRODUÇÃO

Pesquisa realizada no pátio de resíduos de uma empresa de distribuição de eletricidade mostrou que 69% dos resíduos não perigosos descartados no ano de 2009 dizem respeito a resíduos metálicos, como fios, cabos e peças em geral [1]. O restante 31% dizem respeito a uma série de produtos, dos quais destaca-se a porcelana de isoladores, chaves e para-raios com um total de 9,5% de todos os resíduos gerados pela empresa. Em que pese o ótimo mercado existente para os materiais metálicos, destaca-se a grande quantidade,

quase 39% de todos os resíduos, e o preço relativamente baixo da sucata ferrosa [1]-[2].

A porcelana dos isoladores, chaves e para-raios trata-se de um material extremamente durável [3]-[5], o que contrasta com sua presença relativamente numerosa em pátios de resíduos de empresas de eletricidade [1]-[2]. A Figura 1 apresenta a forma de acondicionamento de isoladores de porcelana e de vidro com ferragens na AES-Eletropaulo. Observa-se que boa parte está visualmente bastante parecida com uma peça nova, o que sugere a possibilidade de reutilização. Porém, geralmente as porcelanas dos isoladores são destinadas a locais de disposição final como aterros sanitários e aterros de resíduos inertes, devido a seu preço baixo no mercado de recicláveis. Isso ocorre devido à impossibilidade de obtenção de um material reciclado com propriedades próximas do material original [5]-[6].



Figura 1 – Caixa com “Isoladores de Porcelana ou Vidro com Ferragem”

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pela Pró-Reitoria de Extensão Universitária da UNESP – bolsas BAAE I.

S. D. Mancini e A.M. Silva trabalham na ‘Universidade Estadual Paulista – Campus de Sorocaba’ (e-mails: mancini@sorocaba.unesp.br; amsilva@sorocaba.unesp.br).

B. F. Gianelli trabalha no ‘Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus de Itapetininga’ (email: brunogianelli@gmail.com).

V. X. Batista trabalha na ‘AES-Eletropaulo’ (email: vladimir.xavier@AES.com).

L. L. Rodrigues trabalha na ‘Faculdade de Tecnologia de Sorocaba’ (e-mail: lulopesrodrigues@gmail.com).

H. L. Hasegawa trabalha na ‘Universidade de Sorocaba’ (email: haroldo_hasegawa@yahoo.com.br).

Já para os metais, existe a possibilidade de obtenção de um material reciclado com propriedades bastante semelhantes ao material original [7]-[9]. Porém, para peças de aço galvanizado descartadas, até mesmo a reciclagem (onde a peça vai ser fundida para novamente ser obtida e depois galvanizada) parece uma solução exagerada. Por exemplo, nos pátios de resíduos de empresas de distribuição de eletricidade são encontradas várias abraçadeiras de postes nas quais talvez uma nova galvanização seja suficiente para garantir novo emprego.

Dessa maneira, este trabalho tem por objetivo apresentar resultados sobre alternativas tecnológicas propostas para resíduos de porcelana e de aço galvanizado, baseados em ensaios realizados de propriedade da sucata e de algumas eventuais aplicações. Assim, se adotadas as medidas propostas para estas aplicações, poderia-se contribuir para que a

empresa internalizasse esses resíduos, diminuindo a compra de novas peças e a quantidade encaminhada para unidades de disposição final como aterros.

Este trabalho é um dos frutos do projeto “Caracterização dos Materiais Descartados das Redes e Avaliação do Potencial de Reciclagem”, de código ANEEL 0390-005/2007, concluído em fevereiro de 2011. O projeto foi executado pela Universidade Estadual Paulista – Campus Experimental de Sorocaba com a interveniência da Fundação para o Desenvolvimento de Bauru, sob o patrocínio da AES Eletropaulo.

II. METODOLOGIA

Amostras de isoladores de porcelana e de abraçadeiras de postes feitas em aço galvanizado descartadas no pátio de resíduos da AES Eletropaulo foram coletadas durante pesquisa de campo. Foram obtidos do almoxarifado da empresa similares sem uso. A Figura 2 apresenta uma fotografia de uma abraçadeira nova, como a utilizada para os experimentos.



Figura 2 – Abraçadeira de poste.

A porcelana (tanto o biscoito – parte interna, quanto o esmalte – parte externa) de isoladores tipo poste de 15 kV de cores cinza e marrom foi submetida aos seguintes ensaios para comparação:

- Difração de raios-X em difratômetro Siemens, modelo D 5005, com tubo de cobre com potência de 40kVx40mA, da Universidade Federal de São Carlos. A finalidade deste ensaio foi verificar eventuais diferenças na composição dos isoladores. As amostras foram lavadas com água deionizada, secas em estufa a 110 °C por 24 horas, moídas num almofariz e passadas em peneira de mesh 325. Raios-X na faixa de 2θ (entre 5° e 100°) a 0,33° por minuto foram incididos na amostra e a reflexão dos mesmos permitiu a confecção de espectros com os quais foram identificadas as fases presentes nas amostras. A identificação das fases foi realizada com o auxílio do programa DIFRAC plus, cuja base de dados é centrada no sistema JCPDS.
- Imersão de isoladores usados por 16 horas em solução de azul de metileno (1% em água deionizada), para verificação de eventual impregnação do corante e comprometimento visual do esmalte de amostras usadas (p.ex., desenho de uma trinca);
- Ângulo de contato do esmalte e do biscoito, para a verificação de eventuais tendências hidrofílicas (prejudiciais à função de isolamento elétrica) nos componentes do material usado. Os ensaios de ângulo de contato e energia de superfície foram realizados em goniômetro Ramé-Hart, modelo 100-00, no Laboratório de Plasmas Tecnológicos da UNESP-Sorocaba. Foram depositadas gotas de água deionizada e realizadas 20 medições do ângulo de contato entre a gota e a superfície de cada amostra;
- Porosimetria por intrusão de mercúrio em porosímetro de mercúrio Aminco USA com pressão de enchimento a 5000 psi, da Universidade Federal de São Carlos, visando verificar a existente de porosidade aberta no biscoito do isolador. Esta porosidade aberta, em caso de comprometimento do esmalte, poderia representar eventuais falhas de isolamento da peça, o que caracterizaria sua impossibilidade de utilização. Antes do ensaio, as amostras foram colocadas num banho ultrassônico contendo água deionizada por 2 minutos, lavadas em seguida com água deionizada e secas em estufa a 120°C por 24 horas. O mercúrio pressionado tenta entrar nos poros da amostra e, conseguindo, tem-se que o volume dos poros abertos é igual ao volume de mercúrio penetrado. Por esta razão, antes da análise porosimétrica houve a retirada de gás da amostra.

Além da reutilização, porcelana foram propostas duas possibilidades, a partir da visualização de dois tipos de resíduos em formas diferentes. Cerca de 210 toneladas de porcelana podem ser obtidas a partir da desmontagem da estrutura que contém ferragem e que é relativamente valiosa em termos de reciclagem. A desmontagem e a posterior venda dessa ferragem geraria um resíduo geralmente quebrado que, se fosse convenientemente britado, poderia obter granulometria semelhante às britas utilizadas nos pisos de subestações. Só a AES Eletropaulo comprou em 2009 um total de 213 toneladas de brita para suas 145 subestações, quantidade semelhante à que poderia ser obtida com a sucata de porcelana. Em que pese essa semelhança, questionou-se se essa britagem seria compensatória em termos ambientais. Para responder ao questionamento, foi feita então uma Avaliação do Ciclo de Vida de um tipo de isolador. Escolheu-se o isolador cerâmico mais consumido na empresa (cerca de 64 mil peças por ano), no caso tipo poste cinza de 15 kV, além da quantificação dos impactos ambientais de um cenário hipotético considerando a britagem de isoladores descartados.

Para realizar tal avaliação e o estudo comparativo entre o cenário atual dos isoladores cerâmicos (descarte em aterro) e o cenário proposto (material substituído à brita), empregou-se o software SIMAPRO (versão 7.2), a base de dados ECOINVENT e o método de análise ECO-INDICATOR 99.

A Figura 3 apresenta uma fotografia de um isolador deste tipo coletado no pátio de resíduos da AES Eletropaulo.



Figura 3 - Isolador cerâmico tipo poste, classe de tensão 15 KV, com ferragem metálica.

Em 2009 a AES Eletropaulo gerou cerca de 160 toneladas de porcelanas intactas, ou seja, com peças inteiras. Dado o fato de que algumas peças apresentam tamanho semelhante às rochas utilizadas para a confecção de gabiões para a contenção de encostas, está sendo estudada a aplicação das peças intactas em parcelas de solo gramado de cerca de 4m², comparadas com solo sem a colocação dos isoladores. As parcelas foram protegidas na parte superior para se evitar contribuições que não fossem das águas pluviais e auxiliar no monitoramento (sistema “silt-fence”). A Figura 4 apresenta a fotografia da montagem do experimento.



Figura 4 - Uso de isoladores em estudos de controle de perda de solo, (A) a montagem das parcelas, com isoladores (esquerda) e sem isoladores (direita) (B) detalhe do uso dos isoladores na parcela de controle.

Peças novas e descartadas de abraçadeiras de aço galvanizado foram submetidas aos seguintes ensaios:

- Microscopia eletrônica de varredura em microscópio Quanta Inspect S FEI, acoplado à dispositivo de energia dispersiva (EDS) INCA x-sight – Oxford, pertencentes à empresa INA - Schaeffler do Brasil em Sorocaba. A idéia deste ensaio era verificar eventuais falhas no revestimento galvanizado das abraçadeiras;

- Espectrometria de emissão ótica por centelha, em espectrômetro ARL 3460 do Grupo Labmat, de Piracicaba. A aplicação de voltagem de 8 kV à amostra gera luminosidade posteriormente separada e identificada, identificando e quantificando elementos como carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre, cromo, níquel, molibdênio, cobre, alumínio, vanádio, nióbio, titânio, tungstênio, chumbo e boro. A intenção deste ensaio foi verificar eventuais diferenças nas composições das abraçadeiras novas e usadas após lixamento, ou seja, eliminando-se o revestimento galvanizado;
- Microscopia ótica para verificação de diferenças microestruturais nas amostras de abraçadeiras novas e usadas embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas superficialmente com solução a 3% de ácido nítrico e em etanol (Nital). Este ensaio foi realizado no microscópio ótico Olympus BX51M do Grupo Labmat, de Piracicaba;
- Microdureza Vickers, em microdurômetro Buehler do Grupo Labmat, de Piracicaba, para verificar eventuais diferenças em termos de comportamento mecânico das abraçadeiras usadas em relação às novas. O ensaio consistiu em pressionar a pirâmide de diamante com carga de até 1 kgf na face da amostra, em 3 pontos, e manter a pressão por 15 segundos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Isoladores de Porcelana

A Figura 5 apresenta as curvas de raios-X obtidas no ensaio de difração por raios-X para as amostras do biscoito dos isoladores de porcelana cinza e marrom, novo e usado.

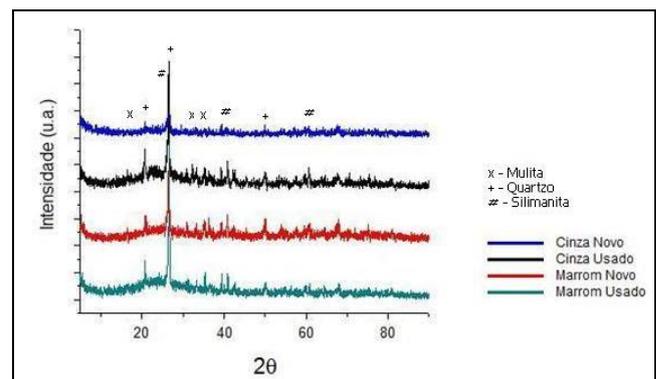


Figura 5 - Espectros obtidos por difração de raios-X para as amostras cerâmicas.

Observa-se pelas curvas de raios-X da Figura 5 níveis apreciáveis de ruído, o que mostra a provável presença de fases amorfas (vítreas) provenientes da reação de sinterização da sílica (SiO₂) e dos fundentes (sódio e potássio, principalmente) contidos na massa cerâmica.

Este fato também fornece um forte indício que ocorreu a sinterização via fase líquida durante a queima do produto, o que confere elevada densidade e baixa porosidade, características necessárias para as cerâmicas de isoladores.

Foram identificadas pelo programa do equipamento as fases de quartzo, sillimanita e mulita em todas as amostras. A fase de quartzo (SiO_2) possui estrutura hexagonal, a do tipo sillimanita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5/\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) e mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) possuem estrutura ortorrômbica. Como os difratogramas são semelhantes, conclui-se que não houve alterações significativas nas amostras do biscoito com o uso. Não se verificaram também diferenças importantes entre as amostras marrom e cinza, portanto provavelmente estes dois materiais podem ser misturados numa eventual recuperação conjunta.

Não foi observada penetração do mercúrio nos poros de todas as amostras de biscoito dos isoladores cinza e marrom, novo e usado. Ou seja, as amostras não apresentaram porosidade aberta. Este resultado já era esperado para isoladores elétricos, pois a umidade eventualmente absorvida nos poros compromete as características de isolamento. Através destes resultados da parte interna da cerâmica (biscoito), verifica-se que o esmalte cumpriu a sua função, protegendo o isolador de ataques físicos e químicos. Observou-se que o uso dos isoladores cerâmicos provavelmente não afetou a sua porosidade, uma vez que as amostras usadas também não apresentaram porosidade aberta.

A Figura 6a apresenta o comportamento de uma gota de água depositada na superfície de uma amostra de porcelana durante o ensaio de ângulo de contato. Comportamento semelhante foi observado também para a amostra usada, bem como para as amostras metálicas. A título de comparação, a Figura 6b apresenta o comportamento de uma gota de água depositada na superfície de uma amostra de polímero, no caso silicone de isoladores usados. Enquanto que nas amostras metálicas e cerâmicas nota-se a atração da água pela superfície (característica hidrofílica), observa-se na superfície polimérica um comportamento hidrofóbico, com a água mostrando uma tendência de repulsão à superfície.

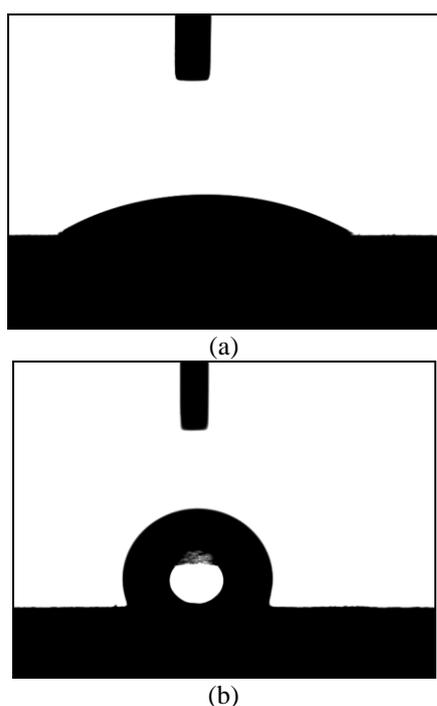


Figura 6 - Imagem das gotas depositadas sobre a superfície do isolador durante o ensaio de ângulo de contato: (a) biscoito da cerâmica cinza nova e (b) de polímero (silicone) usado.

Os resultados dos ensaios de ângulo de contato das amostras do biscoito e esmalte dos isoladores cerâmicos estão apresentados na Tabela 1. Verifica-se pelos resultados de ângulo de contato que todas as amostras cerâmicas possuem característica hidrofílica (ângulo de contato menor que 90°). Esta característica explicada pela composição química do material, que é constituído por cadeias inorgânicas, ou seja, que possuem comportamento polar e por conseqüência, afinidade pela água. Além disso, as superfícies esmaltadas das cerâmicas possuem aditivos inorgânicos, que colaboram com o comportamento hidrofílico [10].

Tabela 1. Resultados de ângulo de contato para as amostras do biscoito e esmalte dos isoladores cerâmicos.

Amostra		Ângulo de contato ($^\circ$)	
Cinza	Biscoito	Nova	$77,39 \pm 9,33$
		Usada	$53,46 \pm 13,45$
	Esmalte	Nova	$58,97 \pm 2,06$
		Usada	$47,95 \pm 2,23$
Marrom	Biscoito	Nova	$60,22 \pm 18,45$
		Usada	$31,31 \pm 5,49$
	Esmalte	Nova	$42,29 \pm 5,02$
		Usada	$89,04 \pm 10,89$

Embora os valores de desvios padrão possam ser considerados altos e inviabilizem o estabelecimento de tendências precisas, nota-se que as médias dos valores de ângulo de contato são maiores para as amostras de produtos novos. A única exceção é o esmalte da amostra usada de cerâmica marrom. A diminuição dos valores de ângulo de contato pode ter origem em eventuais impregnações durante o uso, apesar das amostras terem sofrido uma limpeza superficial anteriormente ao ensaio. O mais provável, até pelo armazenamento pouco cuidadoso dos isoladores descartados (uns sobre os outros em gaiolas metálicas) é que existam ranhuras no esmalte, o que também, assim como a deposição de inorgânicos, tenderia a aumentar a hidrofobicidade [10]-[11].

O teste impregnação por azul de metileno mostrou que mesmo as amostras utilizadas não apresentaram trincas apreciáveis em sua superfície. Houve a preocupação de se considerar fissuras e trincas que eventualmente poderiam ocorrer nos isoladores após o uso. Isto porque, após o descarte, os isoladores são manipulados sem cuidado e geralmente acondicionados em caixas metálicas que, durante a movimentação, causam o contato de um isolador contra o outro e destes com a caixa, o que facilita o aparecimento de trincas superficiais. Assim, isoladores retirados das redes e acondicionados em plástico-bolha e transportados em caixas de papelão também foram testados e forneceram resultados semelhantes aos dos isoladores manipulados sem cuidado após o descarte.

As Figuras 7a e 7b apresentam fotografias do ensaio, obtidas da parte superior e em vista lateral de isoladores cinzas manipulados e armazenados de acordo com os procedimentos da empresa. Como já comentado, não foram observadas diferenças significativas destas amostras com as manipuladas de acordo com o solicitado para a pesquisa: envelopamento em plástico-bolha e transporte em caixa de papelão para evitar que os isoladores se chocassem uns contra os outros e contra as paredes da caixa que os armazenava.



(a)



(b)

Figura 7: Aspecto final do isolador cerâmico após teste de imersão em uma solução de 1% de azul de metileno por 16 horas: (a) vista superior e (b) vista lateral de isolador cinza usado.

Portanto, tais resultados indicam que os isoladores mantiveram as suas características físico-químicas e o tempo de uso sob condições de intempéries não afetou suas características em comparação a um isolador novo (sem uso). A manipulação e o acondicionamento após o descarte, apesar de não protegerem o isolador, não se mostraram preponderantes em causar mais trincas nos produtos descartados.

Logo, pelos resultados das caracterizações, conclui-se que a utilização dos isoladores em parcelas de controle de erosão pode ser bastante promissora, assim como sua britagem e uso em subestações.

Os resultados preliminares dos ensaios de contenção de taludes com os isoladores podem ser considerados promissores. Dada a ocorrência de chuvas apenas em algumas épocas do ano e da intenção de que fossem dados reais, estes ensaios costumam ser longos, normalmente durante cerca de um ano para que se explorem todas as variações climáticas possíveis. Porém, após alguns dias instalados, já foi possível notar diferenças sensíveis entre as duas parcelas, uma vez que três eventos de chuva forte ocorreram no local. O fato de o isolador ter densidade alta confere que cada peça desta tenha o peso suficiente para aliviar o efeito de enxurradas e amenizar o processo de perda de solo em encostas de comprimento não muito extenso, caracterizando uma real prática de conservação do solo.

O isolador utilizado para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é o mesmo dos ensaios de impregnação de por solução de azul de metileno (Figura 7) e tem massa de cerca de 5,70 kg e é constituído de uma base metálica (ferro fundido) colada com cimento portland à um corpo cerâmico. Este corpo cerâmico é produzido a partir da mistura e processamento de quartzo, feldspato, caulim e argila e deve apresentar baixa porosidade, pois isso lhe confere uma alta resistência dielétrica e mecânica, assim como uma baixa perda decorrente da dissipação do calor [12].

A Tabela 2 apresenta a massa das principais matérias-primas empregadas na produção do isolador citado e a distância entre os fornecedores e um dos principais fabricantes deste isolador. Já a Tabela 3 reproduz o consumo energético e de água durante o seu processo de fabricação.

Tabela 2. Matérias-Primas sólidas do isolador cerâmico e a distância média do fornecedor para o produtor.

Matéria-Prima	Massa no Isolador Cerâmico (kg)	Distância Fornecedor-Fábrica (km)
Base metálica	0,58	200
Cimento Portland	0,09	200
Quartzo	1,51	185
Feldspato	1,26	2684
Caulim	1,00	205
Argila	1,26	2980

Tabela 3. Consumo energético e de água por quilograma de corpo cerâmico.

Item	Gasto por Isolador Fabricado (kg)
Gás Natural	2.175 kcal
Energia Elétrica	0,64 kWh
Água	2,25 L

Observa-se pelas Tabelas 2 e 3 que as matérias-primas estão relativamente distantes da fábrica (de 200 a quase 3 mil quilômetros), o que impacta no consumo de combustível (e na consequente emissão de efluentes gasosos, por exemplo) para trazê-las. Ainda, nota-se o grande impacto que existe na fabricação de um isolador em termos energéticos e de gasto de água. Dessa maneira, o descarte desses produtos após o uso representa um enorme desperdício de recursos naturais e, como é preciso que essas peças sejam repostas pelas empresas de distribuição de eletricidade, há a necessidade de fabricação de novas peças, novamente gastando mais matéria-prima e energia.

Na fabricação desses isoladores cerâmicos emprega-se a massa plástica, obtida a partir da adição de água, em teores de aproximadamente 20%, às matérias-primas. Tal ação permite obter uma forma passível de ser processada por torneamento, para a obtenção do formato do produto acabado [3-4].

O processo de fabricação consiste das seguintes etapas principais:

- Peneiramento, lavagem e homogeneização das matérias-primas;
- Filtro-prensagem para retirada de excesso de água;
- Extrusão à vácuo da massa cerâmica;
- Torneamento para obtenção da forma final do produto acabado;

- Secagem em estufa a 100°C;
- Esmaltação por imersão;
- Sinterização do corpo cerâmico;
- Colagem da parte metálica ao corpo cerâmico com o uso de cimento portland.

Vale ressaltar que o processo de sinterização do corpo cerâmico, neste fabricante, ocorre em fornos do tipo túnel a 1.300°C, com ciclos de 30 horas. A queima ou sinterização consiste na coalescência das partículas de cerâmica, o que fornece a resistência mecânica adequada à aplicação final [3-4].

Anteriormente à sinterização, peças defeituosas (sobras de processo e outros refugos) são perfeitamente recicláveis e geralmente reincorporadas à linha de produção. Porém, produtos sinterizados, como os isoladores cerâmicos descartados são de difícil reciclagem, pois durante seu processo de fabricação podem ocorrer vários fenômenos, como a coalescência dos grãos, perda de massa, transformações de fases, mudanças cristalográficas, formação de uma segunda fase ou até mesmo de uma fase vítrea [3-4].

Se não totalmente irreversíveis, muitos desses fenômenos são de reversibilidade difícil ou improvável, o que torna a reciclagem de cerâmicas, visando a produção do produto original, também improvável. No entanto, materiais cerâmicos sinterizados são geralmente rígidos e sua moagem quebra-os em tamanhos variados, inclusive semelhantes à areia e brita, podendo substituir essas matérias-primas naturais em algumas aplicações [5].

A Figura 8 apresenta um resumo da Avaliação do Ciclo de Vida considerando o descarte dos isoladores e a compra da brita (ISOL CERA + BRITA S/ REUSO), ou seja o cenário. Este é comparado com um cenário sugerido, em que a distribuidora de eletricidade faça a britagem de seus isoladores descartados e os reaproveita como brita nos pisos de suas próprias subestações (ISOL CERA + BRITA C/ REUSO). São informados na Figura os principais impactos ambientais envolvidos em cada um dos cenários.

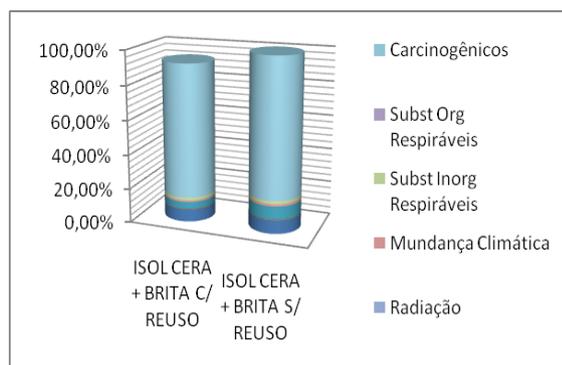


Figura 8. Estudo comparativo de Avaliação do Ciclo de Vida de isoladores cerâmicos com e sem processo de reciclagem.

Analisando os dados provenientes da ACV expostos na Figura 8, observa-se que o grande impacto ambiental nos dois casos é a geração de produtos carcinogênicos, responsável por 81% no caso do cenário atual e 78% no cenário proposto, seguido de combustíveis fósseis (8% e 7%, respectivamente) e ecotoxicidade (7,5% e 4%, respectivamente).

Ainda é possível notar pela Figura 8 que o impacto do isolador cerâmico sem o processo de reciclagem é superior

se comparado ao cenário alternativo de reciclagem e emprego como brita. Em média, o ganho na redução de impacto foi de 8,5%.

Através da análise dos dados obtidos, é possível observar também uma redução de 50% no impacto de disposição em aterros no cenário proposto, justificável pelo não aterramento da brita pós-uso neste cenário. Também foi observada uma possível redução de 16% no impacto decorrente do transporte, tendo em vista as menores distâncias percorridas entre o isolador britado (cenário proposto) e a brita comercial (cenário atual) até a empresa. Entretanto, é constatada pouca variação no consumo de energia (eletricidade e gás), pois a energia necessária para a moagem do isolador cerâmico é praticamente equivalente ao da moagem da brita.

No entanto, devido à não extração do cascalho para obtenção da brita, pode ocorrer uma redução de 15% no uso da terra, o que contribui para a redução das emissões tanto para a atmosfera quanto para a água, em 15% e 48%, respectivamente.

B. Abraçadeiras Metálicas

A composição química das amostras obtidas através da análise de raios-X está apresentada na Tabela 4, sendo que na usada foram analisadas a superfície que ficou exposta às intempéries (externa) e a superfície que ficou em contato com o poste (interna). Serão feitas para os metais as mesmas considerações que para as cerâmicas: a deposição de elementos provenientes da deposição ambiental é possível, porém pouco provável devido à limpeza realizada nas amostras anteriormente ao ensaio, que os removeria.

Tabela 4. Composição química em porcentagem relativa em peso das amostras da abraçadeira.

Elementos	Nova	Usada	
		Em contato com o poste	Exposta à intempéries
Zinco	90,15%	26,11%	65,38%
Carbono	4,49%	-	6,97%
Oxigênio	3,92%	45,07%	22,76%
Chumbo	1,00%	-	-
Alumínio	0,45%	12,54%	1,29%
Silício	-	9,60%	2,01%
Ferro	-	4,57%	0,49%
Enxofre	-	0,90%	1,09%
Fósforo	-	0,40%	-
Titânio	-	0,29%	-

A Figura 9 apresenta as imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras nova e usada da abraçadeira, sendo que na usada também foram analisadas a superfície que ficou exposta à intempéries (externa) e a superfície que ficou em contato com o poste (interna).

Verifica-se pela Figura 9 que a amostra nova mostrou uma textura mais homogênea, diferente das usadas. Uma primeira análise da Tabela 4 apontaria para a identificação da amostra como tendo como elemento metálico principal o zinco. Porém, a microscopia eletrônica de varredura trata-se de uma análise eminentemente superficial e o fato de ter sido detectado o elemento ferro nas amostras usadas indica que o material é um metal ferroso galvanizado (recoberto com zinco) e que esse revestimento se perdeu, ao menos em parte, durante o uso. Essa perda do revestimento e exposição do

ferro ao ambiente, sujeito à corrosão, é provavelmente o motivo da retirada da abraçadeira do poste, pois com o tempo o metal pode perder as propriedades mecânicas necessárias para a função. Em que pese o fato de que a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) via MEV ser uma análise semi-quantitativa, chama a atenção que na abraçadeira em contato com o poste há uma presença de ferro bem maior (e de zinco menor), o que sugere uma degradação maior da superfície original.

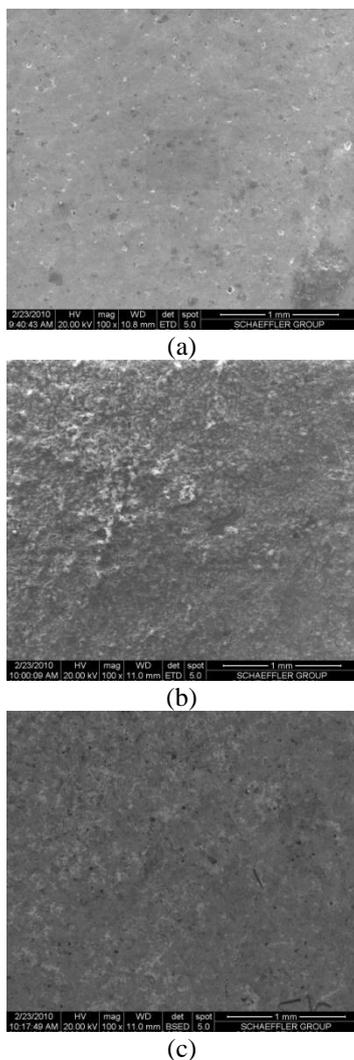


Figura 9. Imagens obtidas por MEV da superfície de amostras de abraçadeira (aumento de 3.000 vezes): (a) nova, (b) usada, superfície em contato com o poste e (c) usada, superfície exposta à intempéries.

Elementos como silício, enxofre, fósforo e titânio foram detectados nas amostras usadas, ou seja, aquelas nas quais mediu-se o metal que foi recoberto e não o do recobrimento, podem ser considerados como elementos de liga. Desta maneira, desconsidera-se a hipótese da detecção destes pela deposição ambiental, assim como do alumínio e do carbono, que apareceram também na amostra nova (Tabela 5, Figura 9).

A presença de chumbo (1,00% p/p), metal conhecido por sua toxicidade, só foi detectada na amostra nova, o que sugere que o recobrimento pode não ter sido aplicado quimicamente mas sim por imersão à quente. Nestes banhos, o chumbo é normalmente empregado, pois melhora a fluidez do zinco fundido.

A Tabela 5 apresenta os resultados de composição química, obtidos pelo ensaio de espectrometria de emissão ótica por centelha, das amostras de abraçadeira. O restante para completar 100% é atribuído ao elemento ferro, porém esta aproximação gera resultados não precisos, pois o equipamento não detecta todos os elementos.

Tabela 5. Resultados da composição química obtidos pelo ensaio de espectrometria de emissão ótica por centelha para as amostras nova e usada da abraçadeira.

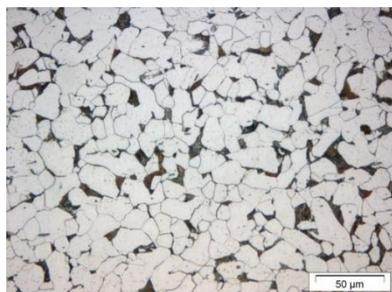
Elementos	Nova	Usada	
		Em contato com o poste	Exposta à intempéries
% em peso			
Carbono	0,110	0,030	0,020
Silício	0,160	0,020	0,020
Manganês	0,670	0,240	0,250
Fósforo	0,014	0,006	0,002
Enxofre	0,016	0,029	0,015
Cromo	0,040	-	-
Níquel	0,050	0,010	-
Molibdênio	0,010	-	-
Cobre	0,150	0,010	0,010
Alumínio	0,005	0,070	0,082
Vanádio	0,002	0,001	0,001
Chumbo	0,002	-	0,001
Boro	-	0,001	-
Total	1,229	0,417	0,401

Pelos resultados da Tabela 5, observa-se que o procedimento de lixamento/polimento realizado eliminou qualquer vestígio do recobrimento de zinco proveniente da galvanização. A análise das composições permite afirmar que é um aço carbono de baixa liga. Como já comentado, define-se aço como uma liga de ferro com no mínimo 0,008% e no máximo 2,11% de carbono, bem como outros elementos adicionados [5]-[6]. Já os aços carbono são comumente definidos como ligas que possuem em sua composição apenas quantidades limitadas de carbono, silício, manganês, cobre, enxofre e fósforo, sendo presentes outros elementos em quantidades residuais. Todos os elementos reportados na Tabela 5 provavelmente são oriundos da matéria prima e/ou do processo de fabricação do aço. A diminuição ainda maior dos teores ou retirada por completo são geralmente complexas e normalmente não acrescentam propriedades, razão pela qual são deixados na composição do aço.

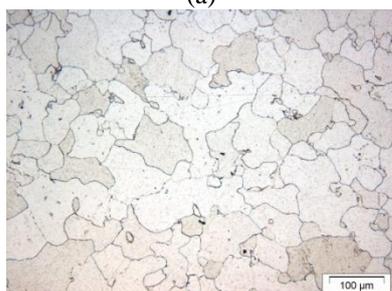
Como as amostras usadas foram retiradas da mesma abraçadeira, era esperado que a composição do metal das mesmas fossem tão similares quanto mostradas na Tabela 5. As diferenças provavelmente se referem a locais da amostra onde houve uma segregação de soluto (qualquer elemento de liga que não o ferro) diferente de outro. Já a amostra nova apresenta composição bem diferente, justamente pelo fato de ser tratar de uma outra abraçadeira, eventualmente feita por fabricantes e matérias-primas diferentes. Enquanto as amostras usadas apresentam um teor total de elementos de liga de aproximadamente 0,4% a amostra nova apresentou mais que o dobro, cerca de 1,23% (o restante é considerado como ferro). Ainda assim, não se pode afirmar que uma ou outra composição é mais ou adequada para uma abraçadeira, pois ambos os materiais provavelmente cumprem os requisitos mecânicos necessários.

A Figura 10 apresenta as imagens obtidas por microscopia ótica das amostras nova e usada da abraçadeira, sendo

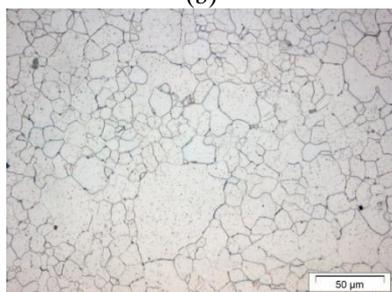
que na usada foram analisadas a superfície que ficou exposta às intempéries (externa) e a superfície que ficou em contato com o poste (interna).



(a)



(b)



(c)

Figura 10. Imagens obtidas por microscopia ótica de amostras de abraçadeira: (a) nova (obtida originalmente com aumento de 500 vezes); (b) usada, superfície em contato com o poste (obtida originalmente com aumento de 200 vezes) e (c) usada, superfície exposta às intempéries (obtida originalmente com aumento de 3.000 vezes).

Observam-se pela Figura 10 micrografias bastante coerentes com os resultados da Tabela 5. Isto porque nas amostras usadas predomina a matriz bem clara, característica da ferrita, fase cristalográfica do ferro em que há a solubilidade de no máximo 0,008% de carbono. O restante se transforma em carbonetos de ferro (cementita, Fe_3C), dispostos na forma de lamelas negras na matriz ferrítica. Como a quantidade de carbono nessas amostras é muito pequena (0,02 a 0,03%), em relação à quantidade de carbono da abraçadeira nova, são poucas regiões pretas na estrutura. Já na amostra nova, com uma quantidade de carbono bem superior (0,11%) é nítida a presença de vários grãos praticamente pretos, formados por lamelas de cementita muito próximas umas das outras no aumento observado. À essa estrutura, perlítica (matriz ferrítica com lamelas de cementita), está associada a estrutura ferrítica (grãos brancos), ainda predominante [7]-[9]. Os grãos das amostras novas mostraram-se mais homogêneos que os das amostras usadas, mas são parecidos em termos de tamanho.

A Tabela 6 apresenta os resultados de dureza (na realidade microdureza, pois a carga aplicada foi menor que 1 kgf) das amostras das abraçadeiras.

Tabela 6. Resultados de dureza das amostras de abraçadeiras.

Amostra		Dureza (HV)
	Nova	$147,0 \pm 5,0$
Usada	Face em contato com o ambiente	$120,0 \pm 2,5$
Usada	Face em contato com o poste	$119,3 \pm 0,9$

Observa-se pela Tabela 5 novamente uma diferença entre as amostras nova e usada, sendo que a nova apresenta dureza superior, de 147 HV, enquanto nas usadas os valores ficam em torno de 120 HV. Estes resultados estão bastante coerentes com os resultados de espectrometria de emissão ótica por centelha (Tabela 5) e de metalografia (Figura 10), que apontaram uma concentração de carbono maior na amostra nova. O carbono é conhecido como o elemento endurecedor do ferro, ou seja, colocado muitas vezes intencionalmente à liga com o objetivo de melhorar algumas propriedades, notadamente o módulo de rigidez e a dureza [7]-[9]. Dessa maneira, não se pode atribuir as diferenças nesta propriedade mecânica ao uso do material.

Assim, todos os resultados obtidos para as abraçadeiras metálicas, incluindo os de dureza, indicam que o uso não degradou o aço e sim somente o revestimento e ainda, parcialmente. Nesse contexto, a reciclagem pode ser considerada uma opção exagerada em termos de gastos de recursos naturais, quando comparada com a possibilidade de somente galvanizar a abraçadeira usada, após a decapagem que se faz necessária. Isso porque na reciclagem a abraçadeira deverá ser fundida, vazada, trabalhada mecanicamente e posteriormente galvanizada novamente.

Pesquisas bibliográficas realizadas em várias bases de dados revelaram uma série de estudos sobre a gestão e o gerenciamento de resíduos elétricos e eletrônicos. Porém, ao se ler atentamente esses estudos, observa-se que tratavam-se de estudos sobre peças utilizadas pela população em geral, em especial computadores descartados, como os publicados por Babu et al (2007, Manomaivibool (2009) e Veenstra et al (2010) [13]-[15].

IV. CONCLUSÕES

Pelos resultados das caracterizações realizadas com os produtos descartados comparativamente com os similares novos, conclui-se que o descarte desses resíduos (no caso dos isoladores de porcelana) assim como a reciclagem das abraçadeiras, constituem-se opções que geram mais impactos ambientais que outras opções possíveis e de custo relativamente baixo. Comprovou-se que os isoladores podem ser britados e utilizados em pisos de subestações, substituindo a brita comprada pelas empresas que distribuem eletricidade. Uma avaliação de ciclo de vida concluiu que esta opção é 8,5% menos impactante que a atual, que remete esses resíduos (após a venda para sucateiro) para aterros licenciamentos para o recebimento desses resíduos. Outra opção testada e com resultados preliminares bastante promissores, é a utilização dos isoladores cerâmicos íntegros em parcelas de solo para controle de erosão, e podem eventualmente prote-

ger o ativo da companhia, como torres de distribuição. Já para as abraçadeiras, a sua separação após a retirada do poste, decapagem e nova galvanização aparentemente seria suficiente para a obtenção de produtos tão bons quanto os que estão sendo adquiridos pelas companhias distribuidoras de eletricidade.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pela ajuda na obtenção de resultados às alunas de Engenharia Ambiental da Unesp de Sorocaba Anna Carolina Gomes da Silva, Amanda de Alcântara Etruri, Bruna Hinojosa de Sousa, Camila Silva Franco, Juliana Ziviani, Natalia Nogueira, Gabriela Antoniol, Mariana Favero, Marina Schiave Rodrigues, Raquel Montognoli e Vanesa Alves Mantovani. Agradecem ainda à empresa Amara e à João Milanezi Neto. Da AES gostariam de agradecer, entre outros, à Leandro Forti, André Alves, Denise F. Mendes, Silma Carmelo e Sonia Hermsdorff.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. L. Rodrigues, “Caracterização de materiais descartados de redes de distribuição de eletricidade para fins de reciclagem”, Dissertação de Mestrado, Progr. Ciênc. & Tec. Mat., Univ. Estadual Paulista, 2010.
- [2] S. D. Mancini, B. F. Gianelli, V. X. Batista, L. L. Rodrigues, A. M. Silva and H. L. Hasegawa, “Oportunidades de Melhoria na Gestão de Resíduos em Empresas Distribuidoras de Eletricidade: o caso da AES-Eletropaulo”, *Rev. P&D ANEEL*, n. 4, no prelo.
- [3] W. D. Kingery, H.K Bowen and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [4] F. H. Norton, *Introdução à Tecnologia Cerâmica*, São Paulo: Edgard Blucher, 1973.
- [5] K.F. Portella, A. Joukoski, R. Franck, and R. Derksen. Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto. *Cerâmica*, vol. 52, pp. 155-167, Sep. 2006.
- [6] H. Hasegawa, A.M. Silva, B.F. Gianelli, J. Morales and M. Favero, “Reaproveitamento de isoladores cerâmicos retirados de redes de distribuição elétrica”, in *Anais 2011 26º Congr. Bras. Engenharia Sanitária e Ambiental*, no prelo.
- [7] S. R. Rao, *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*, Oxford: Elsevier, 2006.
- [8] R. Abbaschian, L. Abbaschian e R. E. Reed-Hill, R.E, *Physical Metallurgy Principles*, 4th ed, Stanford: Cengage Learning, 2009.
- [9] V. Chiaverini, *Aços e Ferros Fundidos*, 7ª Ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- [10] A. L. G. Prette, “Desenvolvimento de esmaltes cerâmicos: aplicação em isoladores elétricos de alto desempenho”, Dissertação de Mestrado, Progr. Ciê & Eng. Mat., Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [11] B. F. Gianelli, “Caracterização do efeito corona em isoladores poliméricos do tipo bastão submetidos à poluição salínica”, Dissertação de Mestrado, Progr. Ciênc. & Tec. Mat., Univ. Estadual Paulista, 2008.
- [12] E. Ozel, G. Unluturk and S. Turan, “Production of brown pigments for porcelain insulator applications”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, n°26, pp. 35–40, 2006.
- [13] B.R. Babu, A.K. Parande, and C.A. Basha, “Electrical and electronic waste: a global environmental problem,” *Waste Manage. Res.*, vol. 25, pp. 307-318, Aug. 2007.
- [14] P. Manomaivibool. “Extended producer responsibility in a non-OECD context: The management of waste electrical and electronic equipment in India,” *Resour. Conserv. Recy.*, vol. 53, pp. 136-144, Jan. 2009.
- [15] A. Veenstra, C. Wang, W. Fan, and Y. Ru, “An analysis of E-Waste flows in China,” *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, vol. 47, pp. 449-457, May 2010.