

# CONTRIBUIÇÕES DA TECNOLOGIA DE METAIS AMORFOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL<sup>1</sup>

*Edwin Auza Villegas<sup>2</sup>*

## **Resumo**

A produção industrial de metais e ligas metálicas envolve processos que consomem grandes quantidades de energia. A situação é ainda mais crítica quando são usadas as vias pirometalúrgicas. As tecnologias convencionais de fabricação de metais produzem materiais com estruturas cristalinas, tal o caso do aço, o cobre, o alumínio, etc. e as suas ligas. Os processos empregados para produzir esse tipo de estrutura utilizam maiores quantidades de energia do que os processos para produzir metais e ligas metálicas amorfos. Este fato, ligado a uma extensa variedade de aplicações e com claras possibilidades de reciclagem ou reaproveitamento dos resíduos, coloca hoje, às tecnologias de materiais amorfos, numa posição estratégica e promissora em face às necessidades ambientais de nosso planeta. Um estudo recente mostra em que dimensões estas tecnologias podem contribuir para a redução de problemas ambientais tais como o aquecimento global, a degradação dos recursos naturais, etc. O presente trabalho oferece uma revisão teórica sobre o potencial dos benefícios ambientais que podem ser obtidos pelo uso e implantação de produtos industriais fabricados com materiais amorfos, com os conseqüentes impactos positivos na questão do desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento sustentável; Aquecimento global; Metais amorfos.

## **CONTRIBUTIONS OF AMORPHOUS METALS TECHNOLOGY TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

## **Abstract**

Making metals and metal alloys is a high energy consuming process. This is even more critical when pyrometallurgical routes are used. Conventional metal-making technologies produce metals with crystalline structures as are the cases of steel, copper, aluminum, etc., and their alloys. The established processes to produce this type of structures are more energy consuming than the processes that produce amorphous metals and alloys. This fact, plus a reasonable variety of applications of these materials and recycling or reutilizing their wastes is setting amorphous materials at the edge of new and promising applications in face of the environmental adjustments that our planet needs today. A recent study on the environmental benefits obtained by replacing iron-silicon by amorphous metal cores in industrial electrical transformers shows how the use of these materials can help to reduce global warming and other sustainable development issues. The present paper offers a theoretical review on the possible environmental benefits that can be obtained by using amorphous metals in many commercial and industrial applications.

**Key words:** Sustainable development; Environmental control; Recycling and reusing; Amorphous materials.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Ph.D., Professor associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG*

## 1 INTRODUÇÃO

É um fato observado que muitas peças e equipamentos metálicos ou partes ou componentes destes sofrem degradação diante do uso prolongado, inadequado ou exposição acidental ao meio ambiente. Observa-se freqüentemente que os produtos da degradação de materiais metálicos são formados por substâncias com potencial tóxico, o que não permite sua reciclagem ou reaproveitamento sem antes passarem por processos de limpeza e inertização.

Assim, em face aos novos delineamentos e restrições ambientais, não será mais possível, num futuro próximo, a produção ou utilização de materiais que geram subprodutos de natureza agressiva ao meio ambiente. As tendências mostram que os processos produtivos deverão contemplar também as possíveis vias de aproveitamento dos subprodutos gerados. Neste contexto, observa-se a nível mundial, uma crescente tendência na implantação de tecnologias de produção de materiais metálicos amorfos. Indica-se, que pela sua estrutura atômica particular, esses materiais possuem propriedades comerciais atrativas e os subprodutos gerados na sua fabricação ou uso são de natureza inerte, ou possuem elevados potenciais de reaproveitamento.

O presente trabalho envolve uma discussão dos possíveis benefícios ambientais decorrentes do uso desses materiais.

## 2 DESENVOLVIMENTO DOS MATERIAIS AMORFOS

Um *metal amorfo* é um material metálico que possui uma estrutura atômica desordenada, contrariamente aos metais cristalinos nos que os átomos obedecem a ordenamentos estruturais perfeitos.<sup>(1,2)</sup> Daqui que os metais e ligas amorfos sejam conhecidos como materiais *não-cristalinos*. Os metais amorfos possuem uma textura vítrea característica tal como pode ser observado na Figura 1.

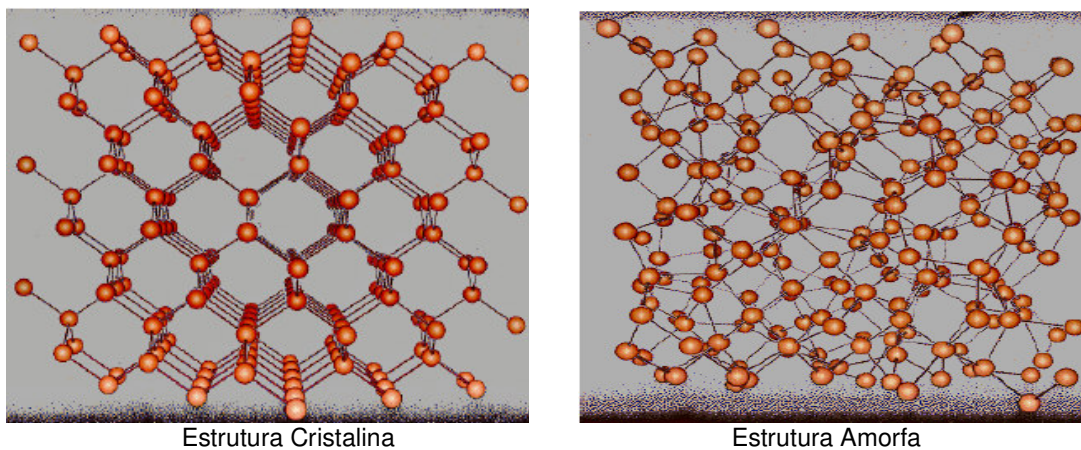


**Figura 1.** Aspecto característico de um material amorfo

É especialmente importante considerar as claras diferenças existentes entre estes dois estados visto que isto define comportamentos diferenciados diante de interações com o meio ambiente. Inicialmente, pelo comportamento característico similar ao dos materiais vítreos, as primeiras ligas metálicas amorfas foram chamadas de vidros metálicos ou metais vítreos.

## 2.1 Ligas Metálicas Amorfas Vs. Ligas Cristalizadas

A maior parte dos metais e ligas metálicas, incluindo o aço, possuem uma estrutura cristalina. Como pode ser observado na Figura 2, todos os sólidos cristalinos contêm defeitos estruturais que podem ser provenientes de deslocamento dos planos atômicos, inclusões de átomos ou impurezas na rede cristalina, ou simplesmente vazios deixados pela migração de átomos para fora das células atômicas.



**Figura 2.** Estrutura interna de um material cristalino e um material amorfo

Pode-se observar, porém, que existe uma organização ordenada e repetida que é o que confere a estrutura cristalina para o material. Pelo contrário, e como pode ser observado na figura acima, as estruturas vítreas, como são as das ligas amorfas, não possuem um ordenamento estrutural. Nestas os átomos estão estreitamente empilhados e distribuídos de forma não uniforme que é o que confere a estrutura amorfa ao material.

Visto que nos materiais amorfos não existem planos atômicos estruturados, os átomos estão aderidos à estrutura vítrea o que faz com que o deslocamento de grupos de átomos seja impossível. Uma consequência direta deste travamento atômico é a natureza extremamente dura e rígida desses materiais possuindo, no entanto, módulos de elasticidade elevados.

Esta combinação de dureza e elasticidade dos materiais vítreos é um fator importante numa diversa variedade de aplicações. De fato, muitos estudos comparativos entre as ligas amorfas e cristalizadas tem sido realizados nas duas últimas décadas com a finalidade de estabelecer as vantagens decorrentes do uso dos materiais amorfos.

## 3 PROPRIEDADES

Normalmente um material amorfo não é um metal puro, porém uma liga metálica com composição definida. Estas ligas contêm átomos de tamanhos significativamente diferentes, o que conduz a um índice baixo de *volume livre no estado fundido*.<sup>(2)</sup> Isto faz com que as *viscosidades* sejam várias ordens de magnitude mais elevadas do que as de ligas metálicas convencionais. Estas altas viscosidades não permitem que os átomos da rede se movimentem com suficientes velocidades de maneira a formar estruturas atômicas ordenadas.

O estabelecido anteriormente significa que para estes materiais adquirirem baixos volumes livres e elevadas viscosidades e densidades de empacotamento, a relação entre os raios atômicos dos componentes deve ser significativamente diferente, usualmente maior do que 12%.<sup>(3)</sup> A combinação dos componentes, nessas proporções, deve resultar em calores de fusão negativos inibindo-se a nucleação de cristais prolongando-se, portanto, o tempo que a fase metálica líquida permanece no estado super-resfriado.

Observa-se que mesmo quando as taxas de resfriamento são lentas, a obtenção de uma estrutura amorfa depende da mistura de três ou mais componentes o que leva a uma pequena formação de unidades cristalinas complexas com elevada energia potencial.<sup>(4)</sup>

Estes tipos de estruturas são caracterizadas também por baixos *coeficientes de compressão* durante o resfriamento o que as leva a possuírem resistências elevadas à *deformação plástica*. Observa-se, também, que a falta de ordenamento atômico é caracterizado pela ausência de contornos de grãos, que são pontos fracos característicos nos materiais cristalinos. Isto traz como resultado, nos materiais amorfos, melhores *resistências à corrosão e erosão*.<sup>(5)</sup>

Na maior parte dos estudos realizados até agora, tem-se enfatizado que as ligas amorfas possuem melhores propriedades do que as ligas cristalinas correspondentes, ou ligas de metais nobres. Observou-se, por exemplo, num estudo realizado pela empresa Liquidmetal,<sup>(6)</sup> que as ligas fabricadas por ela, possuem uma estrutura atômica amorfa o que permite módulos de elasticidade e limites convencionais de elasticidade superiores aos das ligas de Ti de alta performance. O processo opera com uma etapa de resfriamento rápido que permite a formação de uma tira fina de Au-Si a qual permanece com estrutura amorfa na temperatura ambiente. Estas tiras de metal amorfo são usadas em núcleos de transformadores elétricos com a finalidade de reduzir as perdas por transmissão elétrica. Comparados com ligas metálicas cristalinas, as ligas amorfas são mais resistentes à deformação permanente por impacto e mais elásticas e resilientes.

### **3.1 Propriedades Magnéticas e Elétricas<sup>(7,8)</sup>**

Através dos anos de evolução da tecnologia de materiais amorfos, foi-se observando a estreita dependência entre as propriedades físicas e a microestrutura. Aços elétricos convencionais, por serem magneticamente orientados, têm stress elástico bem menor que metais amorfos. Esses por não serem, a priori, magneticamente orientados e terem elevado stress elástico introduzido durante o processo de fabricação, devem ser necessariamente recozidos. O recozimento na presença de um campo magnético longitudinal melhora significativamente suas propriedades magnéticas, tais como indução de saturação, força coerciva, perdas ativas e potência de excitação, promovendo o relaxamento estrutural do material.

A ausência de contornos de grão, nas estruturas amorfas, contribui para facilitar a sua magnetização e desmagnetização com perdas muito pequenas de *histerese*. Isto faz com que esses materiais sejam extremamente apropriados para a construção de núcleos para transformadores de energia elétrica.

Ligas amorfas onde são misturadas as propriedades vítreas de metalóides tais como B, Si e P, com metais ferrosos tais como Fé, Co e Ni, exibem excelentes propriedades ferromagnéticas, baixas coercitvidades e elevadas resistências elétricas. Observou-se, também, que propriedades magnéticas e elevadas permeabilidades (da ordem de 1.850 Gauss) podem ser induzidas em ligas do tipo

Fé-BSi através de adições de pequenas quantidades de metais nobres, tais como Mn, Ni e Cr, usualmente na faixa de 0,01% a 0,04%.<sup>(9)</sup>

## 4 USOS E APLICAÇÕES

Uma das principais aplicações das ligas metálicas amorfas é na fabricação de núcleos de transformadores de distribuição de energia elétrica. Nas últimas décadas, o valor relativo de energia elétrica aumentou dramaticamente. Por isso, o uso racional de energia tornou-se estratégia básica para conter os gastos. As perdas associadas com distribuição são de particular interesse para as concessionárias e o uso de núcleos de metais amorfos nos transformadores de distribuição é uma das alternativas encontradas para a melhoria de eficiência. Esta é, quem sabe, a principal aplicação dos aços amorfos na atualidade.

Uma propriedade dos materiais amorfos que permite processamentos de produção simples como por exemplo através de moldagem por injeção que é característico dos polímeros é o seu comportamento vítreo característico, o que faz que, sob aquecimento, exibam um fluxo dinâmico suave e regular. Como resultado desta propriedade várias ligas tem sido comercializadas para uso em equipamentos esportivos (golfe e tênis), dispositivos médicos (ortopédicos) e estojos e protetores de componentes eletrônicos<sup>(10)</sup> as quais são aplicadas nas superfícies por deposição na forma de espumas ou gels. O artigo *A Guide to Applications of Amorphous Metals*<sup>(11)</sup> discute amplamente uma série de aplicações das ligas amorfas fabricadas por empresas envolvidas tais como a Metglas Inc., Allied Signal etc. São expostos aspectos tais como a formação da estrutura amorfa, fabricação de vidros metálicos e a produção de núcleos para diferentes tipos de transformadores de alta frequência.

Outra aplicação importante envolve a fabricação de revestimentos anticorrosivos com a finalidade de proteger as superfícies, principalmente de materiais metálicos, do ataque químico dos diversos agentes corrosivos existentes na intempérie. Quem sabe o aspecto mais elaborado e rico em informações, nos estudos de formação de revestimentos anticorrosivos feitos com ligas amorfas, esteja relacionado com a diversidade de métodos de aplicação e formação desses. Assim existem estudos onde é discutida a eficiência de formação e estabilidade de revestimentos formados por ligas amorfas de Fe-BSi ou Fe-BSi-X aplicados por técnicas de spray térmico ou deposição de vapor,<sup>(5,12)</sup> revestimentos de alta densidade por deposição de gás atomizado,<sup>(13)</sup> plasma gasoso e placagem por laser<sup>(14)</sup> etc.

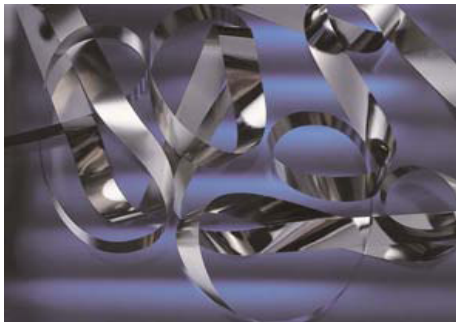
## 5 TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO

São relatadas, na literatura moderna, várias técnicas metalúrgicas para a fabricação de ligas com estruturas amorfas. Quanto à tecnologia de fabricação das diversas formas, tiras, lâminas ou folhas, fios e núcleos de materiais amorfos, observa-se que existem várias patentes registradas cujas técnicas diferem muito pouco no seu procedimento.<sup>(15)</sup>

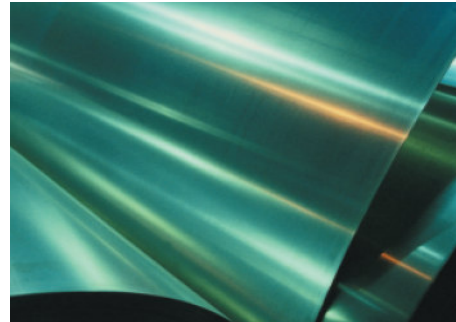
### 5.1 Produção de Tiras e Folhas

Tiras e folhas de material amorfo, de natureza dúctil, são produzidas a partir de ligas cristalinas que são de difícil processamento usando operações metalúrgicas

de laminação. As tiras e folhas de ligas amorfas são de extraordinária beleza tal como pode ser apreciado na seguinte figura:



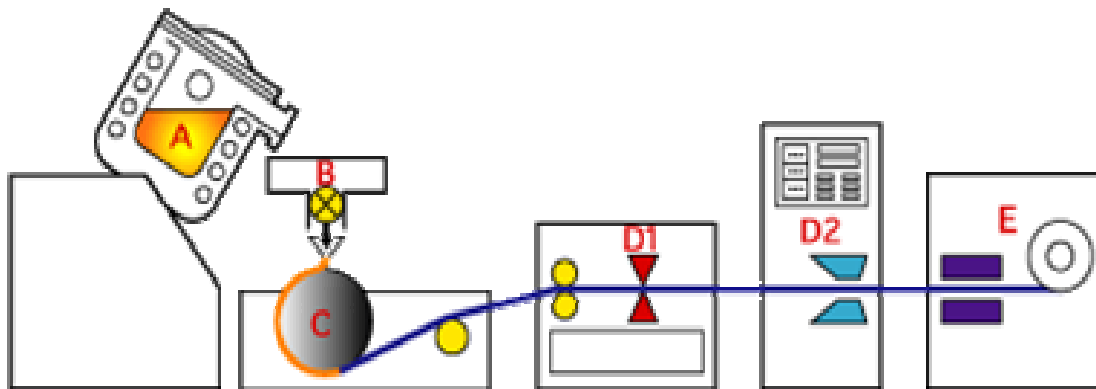
**Tiras**



**Folha**

**Figura 3.** Tiras e folhas de material amorfo

Observa-se que as tecnologias de processo usadas pelas principais empresas produtoras de ligas amorfas envolvem procedimentos similares de produção de tiras e folhas, com algumas diferenças que não são significativas. Um procedimento padrão simples envolve a fundição e vazamento contínuos do metal líquido em dispositivos pré-moldados seguidos de uma operação de resfriamento ultra-rápido, tal como é ilustrado na seguinte figura:



**Figura 4.** Procedimento Industrial para a Produção de Tiras Amorfas.<sup>(16)</sup>

Observe, na anterior figura, a seguinte seqüência de operações:

As matérias-primas são misturadas e carregadas no forno de indução A com a finalidade de promover a fusão da carga;

1. o metal fundido é transferido para um acumulador B de onde é liberado na forma de um fluxo fino e controlado para um molde rotativo C;
2. neste molde é realizada uma solidificação ultra-rápida do metal com taxas de resfriamento de aproximadamente  $10^6$  °/s, para formar as tiras de metal amorfo;
3. dimensões das tiras, tais como largura e espessura, são medidas utilizando instrumentos on-line (D1,D2);
5. Finalmente as tiras amorfas são rebobinadas no rolo rebobinador E.

## 6 CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Uma das principais metas das indústrias modernas é a preservação do meio ambiente. Observa-se que, no presente momento, o crescimento industrial é regulado por princípios e ações que envolvem considerações direcionadas à preservação ambiental e ao alcance das metas do Desenvolvimento Sustentável. Neste sentido, o setor industrial começa a enxergar a fabricação e uso de materiais ecologicamente sustentáveis como a única saída de um possível caos ecológico e ambiental. A indústria de produção de materiais amorfos se enquadra, na maior parte dos casos, dentro desses direcionamentos de preservação ambiental. Neste contexto deve ressaltar-se o seu comportamento químico não-reativo diante de interações com o meio ambiente.

### 6.1 Redução de Impactos Ambientais pelo Uso de Transformadores Elétricos de Núcleo Amorfo

As principais produtoras de ligas amorfas para uso em transformadores de energia elétrica indicam que os seus produtos, tal como enviados e utilizados nos transformadores, não apresentam nenhum risco ecológico segundo os protocolos da RCRA- Resource Conservation & Recovery Act que é a instituição que define os índices de risco ambiental dos materiais na América do norte e Europa. Indica-se também, que os resíduos de processamento são reaproveitados quase na sua totalidade.

Num estudo realizado pela Hitachi Metals,<sup>(17)</sup> foi reportado que das 264.000 t de resíduo industrial geradas em 2005, com 40% de sucatas, 241.000 foram reaproveitadas e 15.000 foram para disposição final. A taxa de reaproveitamento foi de 94,3% e espera-se atingir 98% a partir de 2008. As escórias foram principalmente reaproveitadas como material para a construção de estradas e como agregado para concreto. Pós e poeiras contendo Ni, Co, Cr ou W foram reaproveitados na fabricação de aços especiais.

Quanto ao aspecto de poluição atmosférica, quase todas as empresas interessadas tem realizado levantamentos sobre os impactos decorrentes da geração de emissões gasosas com potencial de efeito estufa. A maior parte dos estudos têm sido dirigidos à liberação do gás carbônico CO<sub>2</sub> que é o que participa em maior proporção do aquecimento global. Neste contexto, os estudos mais completos e criteriosos tem sido realizados pelo centro de informações nomeado como Leonardo Energy.<sup>18)</sup> Administrada pelo *European Copper Institute* e seus 11 escritórios na Europa, a iniciativa Leonardo Energy é dedicada ao estabelecimento de centros de informação com a finalidade de servir a todas as pessoas físicas e jurídicas envolvidas com energia elétrica. O seu Website contém um acervo muito rico de informações relacionadas com aspectos gerais e específicos de energia e meio ambiente.

Este centro tem efetuado vários estudos no mundo inteiro relacionando o potencial de redução nas perdas energéticas devido ao uso de transformadores de núcleo amorfo com os ganhos ambientais expressos na forma de quantidades equivalentes de CO<sub>2</sub>. A Tabela 1 mostra os resultados de estudos realizados nos principais países geradores de gases de carbono.<sup>(19)</sup> Estes estudos mostram os potenciais de redução de impacto ambiental, em termos de CO<sub>2</sub> gerado, devido à substituição de transformadores convencionais por transformadores de núcleo amorfo, nos diferentes países.

**Tabela 1. Impactos na Geração de CO<sub>2</sub><sup>(18)</sup>**

País	Perda anual nos Transformadores  TWh	Potencial de Redução anual  TWh	Redução anual de gás CO <sub>2</sub>  t x 10 <sup>6</sup>
USA	141	84	60
Com-EU	55	22	9
Japão	44	31	12
China	33	18	13
Índia	6	3	3
Austrália	6	3	3
TOTAL	286	161	100

Observe que a redução anual de gases de efeito estufa pode ser da ordem de 100 milhões de t se esses países chegarem a adotar a tecnologia de transformadores amorfos nas redes de distribuição de energia elétrica.

Um estudo complementar indica que, por exemplo, um transformador de núcleo amorfo de alta eficiência de 100 kVA com carga de 25%, contribui numa redução de ao redor de 37 t de emissões de gases de efeito estufa num período de vida média de 30 anos. Igualmente um transformador industrial de alta eficiência, por exemplo, de 1,6 MVA (50% carga) reduz 400 t de gases estufa em 30 anos.<sup>(20)</sup>

Nestes estudos também foi abordado o aspecto de consumo de recursos energéticos tais como petróleo, gás natural, etc. A Tabela 2 mostra os resultados referentes ao consumo anual desses recursos quando utilizados transformadores convencionais de baixa e alta eficiência (AA' e CC') comparados com transformadores de núcleo amorfo (NA). Relaciona-se, na tabela, o *consumo de energia primária*, que é um dos principais índices usados para quantificar os impactos ambientais. Observe que na tabela são também relacionados outros aspectos importantes que descrevem impactos ambientais; entre esses, a geração de resíduos sólidos e emissões atmosféricas.



**Tabela 2.** Utilização de recursos, geração de resíduos e emissão de gases para três tipos de transformadores – operação:8760 hs<sup>(20)</sup>

Parâmetro	Transformador AA'	Transformador CC'	Transformador NA
Consumo de energia primária  GJ	19.750	15.061	11.439
Petróleo em bruto  t	31	24	19
Carvão bruto  t	153	117	89
Lignita  t	217	165	125
Gás natural  t	76	57	44
Resíduos sólidos  kg	295	255	261
<b>Emissões</b>			
CO <sub>2</sub>  t	897	683	522
N <sub>x</sub> O <sub>y</sub>  kg	1.796	1.368	1.042
SO <sub>2</sub>  kg	3.173	2.416	1.838

Observe que em quase todas as situações a maior redução de impactos, seja por consumo de recursos naturais ou por geração de contaminantes, acontece no caso da utilização dos transformadores de núcleo amorfo. Levantamentos similares aos da anterior tabela foram usados para definir os possíveis impactos ambientais causados pelos transformadores em consideração, para um ciclo de vida de 30 anos. Para isto foram calculados os equivalentes de impacto ambiental em termos de índices usados para quantificar os impactos ambientais.<sup>(21,22)</sup> Os resultados são mostrados na seguinte tabela:

**Tabela 3.** Índices de impacto ambiental para o ciclo de vida dos transformadores<sup>(22)</sup>

Parâmetro	Unidade	Transformador AA'	Transformador CC'	Transformador NA
Potencial de acidificação	kg SO <sub>2</sub> -eq	4.616	3.517	2.677
Potencial de eutroficação	kg fosfato-eq	336	256	195
Potencial de efeito estufa	t CO <sub>2</sub> -eq	947	722	551
Potencial de redução da camada de ozônio	kg R11 -eq	0,27	0,20	0,15
Criação de oxigênio fotoquímico	kg etano -eq	353	270	207

## 6.2 Outras Aplicações Ambientais

Existem várias outras aplicações com conotação de caráter ambiental. Vários estudos mostram as possibilidades de utilização de pós e particulados de material

amorfo para o jateamento de superfícies metálicas.<sup>(23)</sup> Observa-se que pela sua dureza e estrutura lamelar estes particulados possuem um poder abrasivo muitas vezes ainda maior do que as areias e pós de escórias metalúrgicas que são usados para esta finalidade. Por outro lado, areias e pós de sílica que são correntemente usados para este fim oferecem um constante perigo para a saúde dos trabalhadores; a doença ambiental chamada silicose. O problema aparece em virtude de que as partículas cristalinas das areias e da sílica absorvem a umidade do pulmão e se aderem aos tecidos superficiais deste, bloqueando sua função.

As partículas amorfas, a semelhança do vidro, não absorvem a umidade e não são aderentes aos tecidos orgânicos. Propõe-se, então, o uso de pós amorfos residuais para uso como material de jateamento, principalmente por sua baixa periculosidade e elevada dureza. O uso de pós de materiais amorfos para jateamento, além de evitar a silicose poderá também contribuir para uma menor degradação dos córregos de areia do planeta.

Outro aspecto que envolve também a redução de impactos ambientais e que é amplamente relevante, propõe o reaproveitamento de resíduos sólidos de fornos metalúrgicos, por exemplo o forno elétrico, como matéria-prima para a fabricação de materiais base que podem ser logo usados para a fabricação de ligas amorfas<sup>(24)</sup>. Isto contribuiria para reduções substanciais dos impactos decorrentes da geração desses resíduos visto que a sua produção, principalmente no campo siderúrgico envolve quantidades anuais significativas.

## **7 COMENTÁRIOS FINAIS**

Do ponto de vista ambiental os materiais amorfos são ecologicamente sustentáveis por várias razões:

Em primeiro lugar deve-se observar que pela sua baixíssima reatividade química com agentes do meio ambiente, deve-se esperar, no futuro níveis totalmente desprezíveis de produtos de reação que poderiam contaminar os ecossistemas. Com os conhecimentos atuais, é possível prever que as possibilidades de impacto ambiental serão mínimas senão inexistentes.

Foi mostrado, por outro lado, que os benefícios ambientais decorrentes do uso de equipamentos de distribuição de energia elétrica construídos com núcleos de ligas amorfas, são consideráveis. A emissão de gases de efeito estufa, tais como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc. e gases que provocam a chuva ácida (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) é reduzida consideravelmente com a conseqüente contribuição para amenizar o aquecimento do planeta.

Ligas amorfas podem ser fabricadas usando como matéria-prima resíduos siderúrgicos tais como os pós e poeiras de fornos elétricos contribuindo para o gerenciamento ambiental destes materiais.

Pós amorfos podem ser usados para jateamento proporcionando segurança industrial para os trabalhadores e evitando a degradação dos recursos naturais na forma de córregos de areia.

Quando usados na forma de gel e espumas metálicos evita-se o uso de materiais tóxicos como Al iônico que são contaminantes do meio ambiente.

Considerados todos estes aspectos, pode-se entender por que as tecnologias de fabricação de materiais amorfos estão dando passos gigantes para a implantação dos seus produtos e processos.

## REFERÊNCIAS

- 1 WIKIPEDIA, Amorphous metal, [http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous\\_metal](http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous_metal)
- 2 -----, Amorphous metals; <http://libraryoflibrary.com/EncpdMetal.html>
- 4 3. -----, Amorphous Metals – History & Properties, disponível em: <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Amorphous+alloy>
- 5 -----, Vitreloy, Liquid Metal Technologies Inc., disponível em : <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Vitreloy>
- 6 FARMER J.C., HASLAM J.J., DAY S.D., Corrosion resistance of Iron-based amorphous metals in various environments - pdf; <http://ecsmeet3.peerx-press.org/>
- 7 NASA, Amorphous alloy surpasses steel and titanium, <http://www.luyenkim.net/home9/index>
- 8 ELSUKOV E.P., BARINOV V.A. Magnetic Properties of Fe-Si Amorphous Alloys, J. Phys.: Condens. Matter 4 (1992) 7597-7606. Printed in the UK
- 9 NASA; Microgravity Materials Science – Research announcement-HEDS-02, December 4, 1996
- 10 OGAWA Y., MASAMU N., HASEGAWA R., Magnetic Properties of a new High-permeability Oriented Silicon Steel; IEEE Transactions on Magnetics, Vol Mag-13, N° 5, 09/77
- 11 BROTHERS A.H., DUNAND D.C., Amorphous metal foams.pdf; Scripta Materiala 54, 513 – 520, 2006, disponível em: <http://arc.nucapt.northwestern.edu/refbase/files/Brothers-2006.pdf>
- 12 PADDOCK D., A Guide to Applications of Amorphous Metals; disponível em: <http://archive.chipcenter.com/circuitcellar>
- 13 FARMER J.C., HASLAM J.J., DAY S.D., YANG N.D., Corrosion characterization of Iron-based high-performance amorphous metal thermal spray coatings-pdf; <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/862390-wrf2io/>
- 14 HASHIMOTO K., Process for making corrosion-resistant amorphous-metal coatings from gas-atomized amorphous metal powders ; disponível em: <http://www.freepatentsonline.com/20070107809.html>
- 15 WU X. & HONG Y., Fe-based thick amorphous-alloy coating by laser cladding, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, PR China, 2001, disponível em <http://www.sciencedirect.com/science>
- 16 -----, Patentes em US para a fabricação de tiras, lâminas, núcleos, etc. de ligas ou materiais amorfos, disponível em:
- 17 <http://www.freepatentsonline.com/CCL-29-609-p2.html>
- 18 HITACHI METALS, Metglas Core for Transformer Applications, [www.hitachimetals.com](http://www.hitachimetals.com)
- 19 HITACHI METALS-Environmental Report 2005; <http://www.hitachi-metals.co.jp/e/corp/pdf/cp0707en.pdf>
- 20 LEONARDO ENERGY-The Global Community; <http://www.leonardo-energy.org/drupal/>
- 21 BELMANS.R., The Potential for Global Energy Savings from High Efficiency Distribution Transformers – 2005; European Copper Institute, [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org) / [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org)
- 22 SEEDT – Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers; <http://www.leonardo-energy.org/drupal/files/2006/SEEDT.pdf>
- 23 ENVIRONMENTAL INDEXES, disponível em: <http://www.leonardo-energy.org/drupal/node/1008>
- 24 De KEULENAER H., Eco sheet 2006- 1.6 MVA industrial transformer designs with increasing efficiency, disponível em: [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org)
- 25 ANDELA C., Amorphous Glass – abrasion powder, disponível em: <http://www.americanrecycler.com/0405glass.shtml>
- 26 CHEN H. & POLK D.E., Amorphous metal alloy and method of producing same. US Patent, disponível em: <http://www.patentstorm.us/patents/5547487-description.html>