

# OTIMIZAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO DE AREIA DE CURA A FRIO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO <sup>1</sup>

*Christian Egidio da Silva*<sup>2</sup>  
*Luiz Carlos Silidônio Júnior*<sup>3</sup>  
*Diego Luiz Oliveira*<sup>4</sup>  
*Amir Rivarolli Júnior*<sup>5</sup>

## **Resumo**

A reutilização ou reaproveitamento de areia é, sem dúvida, uma ótima opção para implementar a sustentabilidade. Proporciona economia de matéria-prima, reduz a necessidade de espaços destinados a resíduos industriais e proporciona uma diminuição dos custos de coleta e aterros sanitários. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de maximizar a reutilização de areia de cura a frio no processo de fundição e conhecer o real comportamento da areia reutilizada em termos de propriedades mecânicas e características visuais que possam fornecer informações importantes sobre o material, entendendo melhor algumas limitações técnicas. Evidenciou-se que uma alteração no percentual de resina é necessária para melhorar as propriedades mecânicas da areia de cura a frio quando são usadas até 50% de areia recuperada na mistura. Ao longo dos consecutivos ciclos de recuperação da areia de cura a frio percebe-se que a morfologia dos grãos modifica consideravelmente. Também foi possível evidenciar uma redução na rugosidade das peças fundidas à medida que foi incrementado o percentual de areia recuperada, o que sugere que a usinabilidade das peças melhora com o uso de areia reutilizada.

**Palavras-chave:** Areia; Reutilização; Fundição; Resíduos.

## **OPTIMIZATION OF COLD SET RECYCLING ON THE CASTING PROCESS**

### **Abstract**

Optimizing the cold set recycling is a great option to implement sustainability inside the casting industries. It allows a reduction of raw material consumption, optimizes the industrial wastes, decreases the wastes collect and material discharge costs. The present work was developed to optimize the cold set recycling and to understand the real behavior of recycled cold set in terms of mechanical properties and other visual characteristics in order to find out technical limitations or restrictions. It was noted that a change on resin percentage is necessary to improve the mechanical properties of cold set when it is used up to 50% of recycled cold set. Along the recycling cycles it was also noted that the grains morphology changed a lot. It was possible to see a reduction on roughness of pieces, what suggests that the machining can be improved with the use of recycled cold set.

**Key words:** Sand; Recycling; Casting; Wastes.

<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> *Doutorando, Engenheiro de Processos – Gerdau Pindamonhangaba / PPG-EAM ITA / FATEC Pindamonhangaba.*

<sup>3</sup> *Técnico de Produto – Gerdau Pindamonhangaba.*

<sup>4</sup> *Estagiário do Laboratório de Areias – Gerdau Pindamonhangaba / FATEC Pindamonhangaba.*

<sup>5</sup> *Engenheiro de Produto e Desenvolvimento – Gerdau Pindamonhangaba.*

## 1 INTRODUÇÃO

A atual produção de resíduos urbanos e industriais é tal que constitui para a sociedade moderna um grande problema, não apenas de ordem sanitária e ambiental, mas também de caráter social e econômico.

Em função dos problemas ambientais associados à geração de resíduos esta questão tomou tal relevância que para muitas empresas passou a ser tratada como estratégia empresarial. Empresas têm mudado sua filosofia de satisfação das necessidades do consumidor, objetivando uma melhor qualidade de vida para a sociedade através da busca por soluções aos problemas ambientais, seja através do uso adequado dos recursos naturais ou através da redução do impacto de suas atividades no meio ambiente. Independente do rumo escolhido para sanar deficiências ou problemas ambientais estas empresas têm procurado alcançar o desenvolvimento sustentável e ao mesmo tempo têm focado o aumento da lucratividade de seus negócios.

Atualmente, o Brasil conta com uma indústria de fundição vasta e diversificada, o que invariavelmente acaba gerando grandes quantidades de resíduos industriais. Por tratar-se de uma fundição, estamos falando de resíduos de areia. Dentro de um sistema de gestão ambiental, torna-se necessário minimizar a geração de tais resíduos. No entanto, devido à necessidade básica de se confeccionar moldes de areia para a fundição, tenta-se maximizar sua reutilização.

A reutilização ou reaproveitamento surge como recurso potencial para implementar a sustentabilidade. De acordo com Okida<sup>(1)</sup> e Armange *et al.*,<sup>(2)</sup> a reutilização proporciona economia de matéria-prima, uma vez que seu processamento geralmente exige menos insumos quando comparados ao processamento para obtenção de materiais originais. Adicionalmente, reduz a necessidade de espaços destinados a resíduos industriais, proporciona uma diminuição dos custos de coleta e com aterros sanitários e conscientiza os empregados. Proporciona-se a redução de impactos ambientais, sanitários e sociais com isso.

## 2 AREIA DE FUNDIÇÃO

As características dos grãos de areia têm grande influência no acabamento e na qualidade final das peças fundidas, uma vez que a areia representa a maior parte do material empregado na confecção dos moldes. Para um desempenho satisfatório, a areia de fundição deve apresentar uma estabilidade dimensional e térmica a elevadas temperaturas, possuir tamanho e formato de partículas adequadas, ser quimicamente inerte a metais fundidos, não ser facilmente molhada, não conter elementos voláteis que produzam gás no aquecimento, ser disponível em grandes quantidades e preços razoáveis. É comum adicionar-se à areia pequenas quantidades de ligantes, como as resinas sintéticas.

Depois de solidificado e devidamente resfriado, procede-se com a desmoldagem. Esta operação nada mais é do que a retirada da peça de dentro do molde. Neste instante são gerados resíduos de areia contendo residuais de ligantes e aglomerantes, inclusive com resíduos de metal (respingos).

Considerando a necessidade de maximizar a reutilização de areia de cura a frio no processo de fundição, minimizando com isso a geração de excedentes de areia de fundição, desenvolve-se o presente trabalho no intuito de conhecer exatamente o comportamento da areia de cura a frio reutilizada, elaborada sob diversos traços

“areia virgem/areia reutilizada”, em termos de propriedades mecânicas e outras características de qualidade que possam fornecer informações importantes acerca do comportamento daquela determinada proporção.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados como matéria-prima a areia de sílica (40/50 AFS *quartzosa* comercial) para moldação com cura a frio (designada como “virgem” no presente estudo), areia reutilizada do próprio processo de fundição com cura a frio (designada como “recuperada” ou “reutilizada” no presente trabalho), resina furânica com teor máximo de nitrogênio de 4% e catalisador PTS (para-tolueno sulfônico).

A caracterização consistiu em duas partes: (a) caracterização laboratorial a partir de traços preparados especificamente para esta finalidade e (b) ensaio tecnológico, no qual foram fundidas sucessivas peças (cunhas) em moldes empregando-se areia “recuperada”.

#### 3.1 Caracterização Laboratorial

##### 3.1.1 Preparação da areia para caracterização

A preparação da areia foi realizada considerando-se o documento CEMP-182<sup>(3)</sup> como referência. Conforme descrito por Silva *et al.*,<sup>(4)</sup> foram utilizados os traços “areia virgem/areia reutilizada” da Tabela 1 sem alteração do percentual de resina e catalisador na mistura para a confecção dos corpos-de-prova.

Tabela 1. Traços utilizados para a preparação dos corpos-de-prova e caracterização mecânica.

Tipo de areia	Proporção de mistura (traço)										
	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	-
Virgem	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	-
Reutilizada	-	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

##### 3.1.2 Ensaio de granulometria

Foram realizadas análises granulométricas para as areias “virgem” e “reutilizada” utilizando-se para tal o documento de referência CEMP-081,<sup>(5)</sup> conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(4)</sup>

##### 3.1.3 Resistência à compressão e à tração

A resistência à compressão foi avaliada após 24 h da elaboração do respectivo traço. Para a preparação dos corpos-de-prova e realização do ensaio de compressão foi utilizado o documento CEMP-060<sup>(6)</sup> como referência, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(4)</sup>

A resistência à tração foi avaliada para diferentes períodos de espera após a elaboração do respectivo traço: 4h, 5h e 24h. Para a preparação dos corpos-de-prova e realização do ensaio de tração foi utilizado o documento de recomendação CEMP-162,<sup>(7)</sup> conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(4)</sup>

##### 3.1.4 Caracterização morfológica

Empregou-se um microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens para análise morfológica dos grãos de areia “virgem” e “recuperada” no intuito de compreender eventuais diferenças dos resultados obtidos nos ensaios de tração e compressão, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(4)</sup>

## 3.2 Ensaio tecnológico

### 3.2.1 Fundição

O presente teste consistiu na realização de fundições consecutivas de pequenas peças (cunhas) em moldes confeccionados por areia recuperada da fundição anterior, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(8)</sup> Seqüência adotada:

- (i) Areia quartzosa comercial 100% “virgem” foi utilizada para a preparação de areia de cura a frio, empregando-se para tal um traço “areia/resina/catalisador” típico do processo (1,2% a 1,3% de resina). Este foi o material de partida.
- (ii) Moldam-se peças (cunhas) com dimensões padronizadas utilizando-se a areia de cura a frio recém preparada.
- (iii) Efetua-se o vazamento de um metal líquido a  $1.400^{\circ}\pm 50^{\circ}\text{C}$ .
- (iv) Após resfriamento até a temperatura ambiente retira-se a cunha do molde de areia, separando-a para posterior análise de rugosidade.
- (v) Quebram-se os torrões de areia do item “iv” em um moinho de rodas.
- (vi) Utilizando-se de uma peneira #6 (3,35mm) segregam-se os torrões de areia que não foram moídos por estarem sinterizados ou por conterem partículas metálicas. Exceto para estes torrões, todo o restante da areia é separado para preparação de um novo traço.
- (vii) Coleta-se uma amostra desta areia, em quantidade suficiente para confeccionar corpos-de-prova de tração e compressão e para análise granulométrica e morfológica. Com isso finaliza-se o “1º ciclo de fundição”.
- (viii) Utilizando-se da areia moída no item “vi” inicia-se novamente o processo de confecção dos moldes. Uma nova moldação (item “ii”) é realizada, e consecutivamente as demais etapas (de “ii” a “viii”) são realizadas sucessivamente até completar 6 (seis) ciclos de fundição completos. O 6º ciclo de fundição compreenderá o 5º ciclo de “reutilização de areia”.

A partir da segunda moldação (inclusive) não foi adicionada qualquer nova quantidade de areia “virgem”, sendo utilizados apenas os resíduos de areia da fundição anterior, devidamente limpos, sendo descartados os pedaços sinterizados. As proporções de resina sobre a areia e de catalisador sobre a resina foram mantidas constantes para todos os ciclos de fundição utilizados no ensaio tecnológico.

### 3.2.2 Ensaio de granulometria

Foram realizadas análises granulométricas para as areias moídas obtidas após cada ciclo de fundição utilizando-se para tal o documento de referência CEMP-081,<sup>(5)</sup> conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(8)</sup>

### 3.2.3 Resistência à compressão e tração

A resistência à compressão e tração foi avaliada após 24h da elaboração da mistura de cada um dos ciclos, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(8)</sup> Para a preparação dos corpos-de-prova e realização do ensaio de compressão foi utilizado o documento CEMP-060<sup>(6)</sup> como referência e para a preparação dos corpos-de-prova e realização do ensaio de tração foi utilizado o documento de recomendação CEMP-162.<sup>(7)</sup>

### 3.2.4 Caracterização morfológica e microestrutural

Empregou-se um microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens e um estereomicroscópio para análise das superfícies dos corpos-de-prova de tração e

avaliação do tamanho médio dos grãos da areia “recuperada” após os consecutivos ciclos de fundição das peças e moagem dos torrões de areia dos moldes, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(8)</sup>

### 3.2.5 Rugosidade

Foram realizadas varreduras de rugosidade na superfície das peças fundidas após os ciclos de reutilização da areia, conforme descrito por Silva *et al.*<sup>(8)</sup>

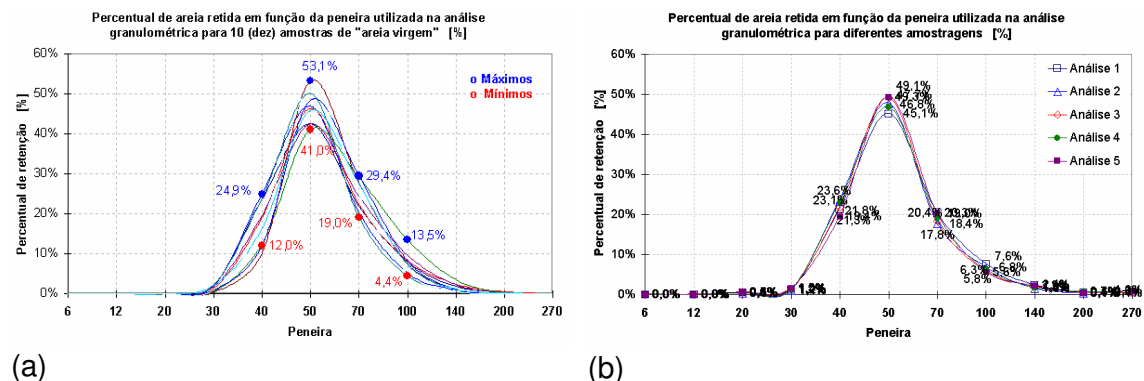
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização Laboratorial

#### 4.1.1 Ensaio de granulometria das areias virgem e recuperada

A distribuição granulométrica da areia no estado “apenas recuperado” para os lotes preparados em dias diferentes apresentou dispersão de resultados consideravelmente inferior àquela observada para lotes de areia “virgem” analisados no mesmo período, conforme Figura 1. Observou-se uma amplitude máxima de 5% para a areia “apenas recuperada” e de 13% para a areia “virgem”.<sup>(4,9)</sup>

Os autores<sup>(4,9)</sup> evidenciaram que o teor de finos para as amostras de areia nos estados “apenas recuperado” e “virgem” não apresentou diferença significativa entre si, estando sempre abaixo de 1,5%, que é o teor máximo tolerável para que não exista prejuízo de propriedades mecânicas para o molde de areia de acordo com Rúbio *et al.*<sup>(10)</sup> Um teor de finos elevado favorece a redução da permeabilidade do molde, dificultando a saída de gases, e conseqüentemente pode levar à ocorrência de defeitos de fundição, como porosidade.



**Figura 1.** Percentual de retenção de areia para: (a) Lotes diferentes de areia “virgem” recebidos no período de teste; (b) Diferentes amostras de areia “recuperada” coletadas no processo após sua moagem e limpeza em dias consecutivos.

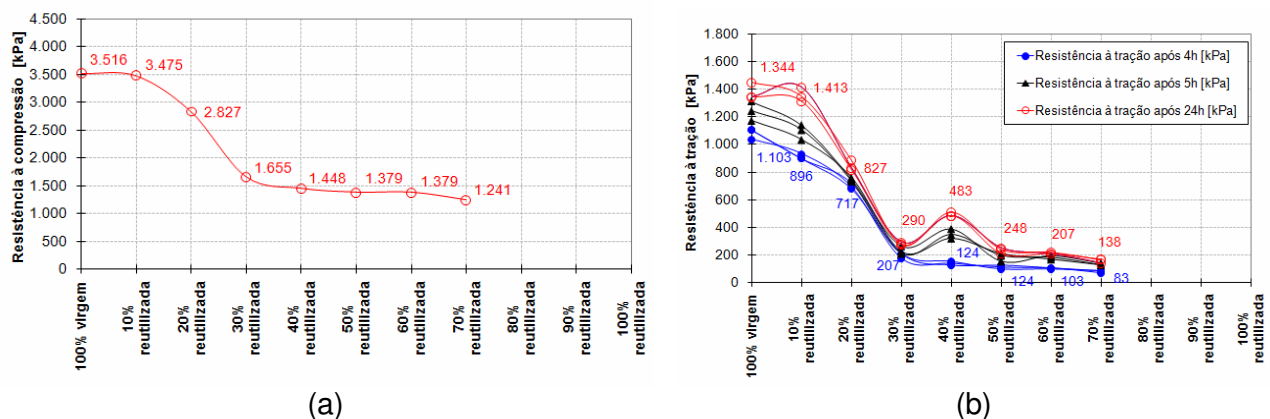
Adicionalmente, quanto maior for o teor de finos, maior será a área superficial dos grãos de areia, e conseqüentemente, maior deverá ser o consumo do ligante (resina) para que as propriedades mecânicas sejam mantidas. Portanto, deve-se objetivar a menor quantidade possível de finos para que não se tenha variação de propriedades mecânicas nem consumo excessivo da resina, o que encareceria a elaboração da areia e, sobretudo contribuiria para uma maior geração de gases devido à existência de uma quantidade maior de resina na mistura. Tendo em vista que objetiva-se uma maximização na recuperação de areia, o aumento do teor de finos será inevitável, logo, tornar-se-á necessário um incremento do consumo de resina.

Embora a existência de alto teor de finos não seja adequada para características como permeabilidade e expansão ao choque térmico, a presença de uma pequena quantidade é indispensável para que se consiga um acabamento superficial adequado. Ou seja, deve existir um equilíbrio entre as características granulométricas.

Silva *et al.*<sup>(4,9)</sup> observaram que a concentração (ou coeficiente de distribuição) das distintas amostras de areia “recuperada” utilizadas no estudo apresentou valores relativamente próximos entre si (entre 86,8% e 89,3%), ao passo que os lotes de areia “virgem” analisados apresentaram dispersão ligeiramente superior (entre 86,3% e 95,8%), porém dentro do considerado aceitável. Quando se tem uma areia “recuperada” com concentração relativamente próxima à de uma areia “virgem” não se deve esperar uma diferença significativa de expansão devido a um choque térmico provocado pelo contato com o metal líquido. Quanto menor a diferença entre as concentrações de areia “virgem” e “recuperada”, melhor, visto que não existirá gradiente de deformação, minimizando problemas de trinca no molde no instante seguinte ao vazamento (fundição).

#### 4.1.2 Resistência à compressão e tração para diversas misturas de areia “virgem”/“recuperada”

Estudos preliminares dos autores,<sup>(4)</sup> nos quais foram simuladas diferentes proporções de areia “virgem”/“recuperada” para ser avaliada a influência do percentual de areia recuperada na resistência mecânica, mantendo-se constante o percentual de resina e catalisador adicionados, evidenciaram que existe uma queda abrupta de resistência quando são utilizados 30% de areia recuperada ou mais, tanto em “tração” quanto “compressão”, conforme Figura 2. Resultados de resistência mecânica baixos preocupam, uma vez que se um molde não consegue suportar o peso da coluna de metal (pressão metalostática) ou se não suporta o efeito dos ciclos de expansão e contração proporcionados pela troca térmica com o metal, existe um grande risco do mesmo vir a trincar e o metal fica, portanto, susceptível a um vazamento. Para 80% até 100% de areia reutilizada, os corpos-de-prova se romperam no instante em que estavam sendo posicionados na máquina.



**Figura 2.** Resultados de resistência mecânica em função do traço utilizado: (a) Compressão após 24h de confecção do corpo-de-prova; (b) Tração após diferentes tempos de confecção do corpo-de-prova.

Adicionalmente, pode-se visualizar na Figura 2(b) que à medida que aumenta o tempo entre a preparação do corpo-de-prova e o ensaio propriamente dito (24h em relação à 4h), os valores de resistência à tração também aumentam. Esse comportamento também já poderia ser esperado, uma vez que com um tempo maior, a cura também é favorecida. Do ponto de vista prático, os resultados indicam que não se deve utilizar um molde que tenha sido confeccionado antes de concluídas 24 h, contadas a partir do horário em que foi efetuada a moldação. Isto sugere que quanto mais tempo decorrer entre a preparação do molde e a fundição propriamente dita, mais seguro será o processo.

Dando continuidade aos testes de resistência mecânica, Silva *et al.*<sup>(9)</sup> simularam novamente os diferentes traços de areia “virgem”/“recuperada”, conforme Tabela 1, porém desta vez alterando-se o percentual de resina na mistura. Em função dos resultados obtidos anteriormente, conforme Figura 2(b), adotou-se 24h como tempo de cura de referência, ou seja, intervalo entre a elaboração da mistura (para confecção dos corpos-de-prova) e o teste propriamente dito.

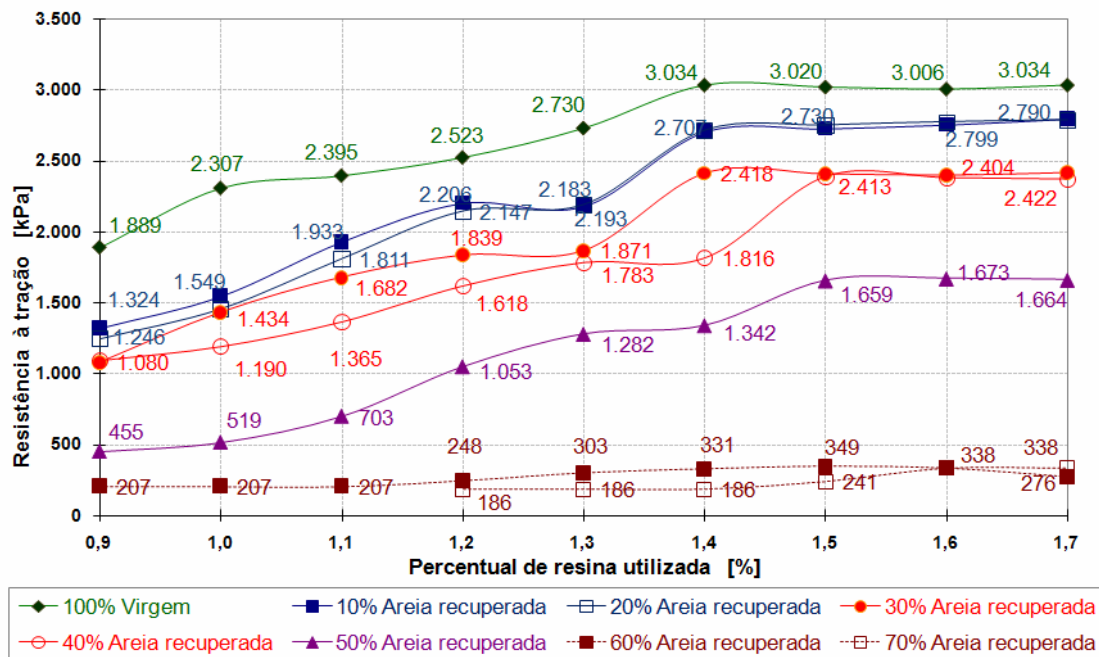


Figura 3. Resultados do ensaio de resistência à tração após 24h de cura em função do traço e do percentual de resina utilizado.

Analisando-se a Figura 3, percebe-se que para um determinado percentual de resina a resistência à tração diminui com o aumento do percentual de areia recuperada utilizado. Este comportamento é válido para toda a faixa de adição de resina adotada no presente estudo, ou seja, de 0,9% a 1,7% de resina.

Outro comportamento que pode ser observado na Figura 3 é o aumento da resistência à tração com o aumento do percentual de resina. Observa-se a formação de patamares onde a resistência à tração passa a não apresentar mais alteração a partir de certo percentual de adição de resina, o que evidencia que existe de fato um percentual de saturação da resina, a partir do qual nenhuma alteração de resistência mecânica é observada. Pode-se notar que a partir de 1,5% de resina a resistência à tração não sofreu alteração. Portanto, parece não ser viável incrementar mais ainda o percentual de resina visto que não traz benefícios adicionais em termos de resistência mecânica. É importante salientar que quantidades elevadas de resina,



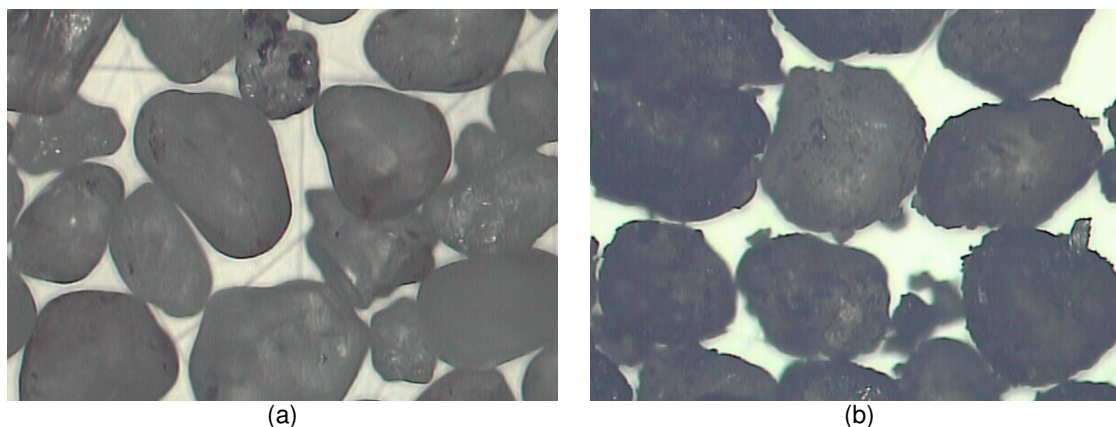
principalmente quando este limite de saturação é extrapolado, podem favorecer a geração de gases, o que sabidamente pode conduzir à formação de defeitos de fundição como “porosidades” nas peças.

Os resultados de tração para traços preparados utilizando-se 60% e 70% de areia recuperada apresentaram-se insatisfatórios, mesmo após incremento do percentual de resina, conforme Figura 3. Para traços preparados com maior quantidade de areia recuperada (80% e 90%) a areia não curou, mesmo aguardando-se um intervalo de 24h, que foi definido como tempo ideal para a cura. Devido a isso, não foi possível realizar testes de tração para estes traços. Do ponto de vista prático, tempos muito superiores às 24h não são desejáveis visto que podem comprometer o processo produtivo. É desejável a obtenção do menor tempo de cura possível, desde que a resistência mecânica apresente-se em níveis satisfatórios e seguros para evitarem-se trincas nos moldes durante a fundição.

Vale lembrar que todos estes testes foram realizados mantendo-se o percentual de catalisador adicionado à resina. Seu incremento provavelmente irá favorecer a aceleração do processo de cura, o que poderá proporcionar alguma melhora nos resultados de resistência mecânica ou mesmo redução do tempo de cura.

#### 4.1.3 Caracterização morfológica

Em trabalhos anteriores, Silva *et al.*<sup>(4,9)</sup> evidenciaram que existe uma diferença significativa entre a morfologia dos grãos da areia “virgem” e da areia “recuperada”, conforme Figura 4.



**Figura 4.** Grãos de areia “Virgem” (a) e “Recuperada” (b). Aumento: 50X.

Os grãos de areia “virgem” são muito mais uniformes e com menos relevos (saliências) do que os grãos de areia recuperada. As saliências observadas na areia “recuperada” possivelmente devem-se a dois fatores: (i) desgaste causado pelo atrito entre as partículas durante operação de quebra dos torrões para reutilização da areia; (ii) acúmulo de resíduos de resina e particulados finos da própria areia (função do aumento gradativo do teor de finos à medida que aumenta-se a quantidade de reutilização de areia “recuperada”).

Através da morfologia irregular dos grãos de areia “recuperada” pode-se supor que existe uma área superficial relativamente maior para esta areia em relação à areia “virgem”. Esta característica sugere que existe uma tendência natural de consumir-se mais resina para situações em que são empregadas areias reutilizadas. Ou seja, para atingir-se um mesmo nível de resistência, à medida que é aumentada a proporção de areia reutilizada na mistura, parece ser necessário incrementar a



quantidade de resina, de forma que se consiga “molhar” e “envolver” adequadamente os grãos da areia “recuperada”. Avaliando-se os resultados obtidos nos ensaios mecânicos (Figura 3), comprova-se a hipótese de que realmente é necessário aumentar o percentual de resina na mistura quando se aumenta a quantidade de areia “recuperada” utilizada, para que sejam obtidos níveis satisfatórios de resistência mecânica.

## 4.2 Resultados do Ensaio Tecnológico

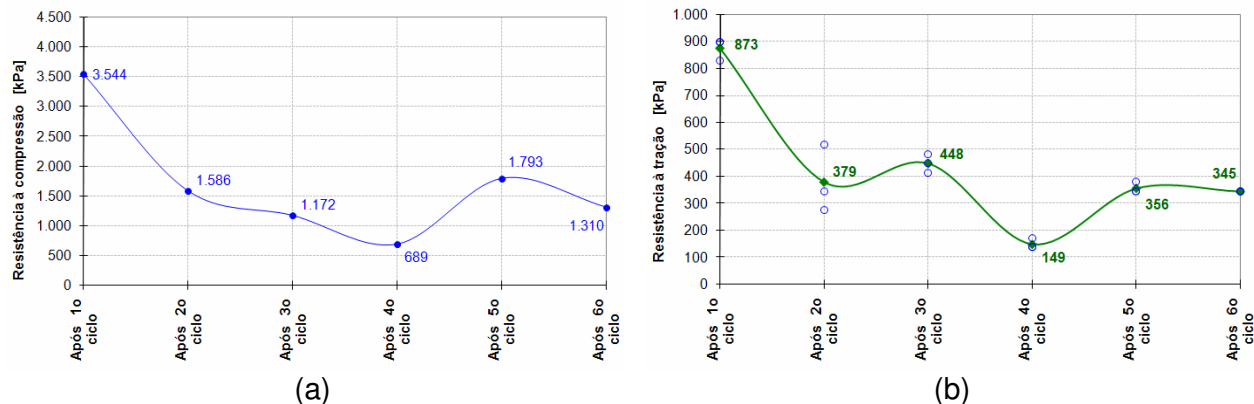
### 4.2.1 Ensaio de granulometria

Conforme descrito por Silva *et al.*,<sup>(8)</sup> o aumento do percentual de areia retida nas peneiras #30 (0,60mm) e #40 (0,42mm), quando são comparados o 7º e 1º ciclos de fundição, sugere que deve estar ocorrendo alguma aglomeração dos grãos mais finos ao longo do processo de reutilização devido à existência de quantidade cada vez maior de residual do ligante (resina), o que faz com que as pequenas partículas fiquem aderidas umas às outras, formando “cachos” ou “pequenos aglomerados”.

Analisando as peneiras #50 (0,30mm), #70 (0,21mm) e #100 (0,15mm), percebe-se uma sistemática redução do percentual de areia retido após o 7º ciclo de fundição, em relação ao 1º ciclo, o que reforça a hipótese de existência de um fracionamento dos grãos de areia seguido de uma aglomeração dos mesmos, justificando o aumento do percentual retido observado para as peneiras #30 (0,60mm) e #40 (0,42mm).

### 4.2.2 Resistência à compressão e tração

Conforme Figura 5, percebe-se que, os resultados de resistência à compressão e tração caem pela metade a partir do 2º ciclo de fundição, mantendo-se próximos para os demais ciclos de fundição, conforme descrito por Silva *et al.*,<sup>(8)</sup> exceto para os resultados obtidos após o 4º ciclo, que são os únicos que apresentam discrepância dos demais, sugerindo ter existido algum outro parâmetro de interferência durante a elaboração dos corpos-de-prova especificamente para este ciclo.



**Figura 5** Resultados do ensaio de resistência mecânica em função do ciclo de fundição: (a) Compressão após 24h de confecção do corpo-de-prova; (b) Tração após 24h de confecção do corpo-de-prova.

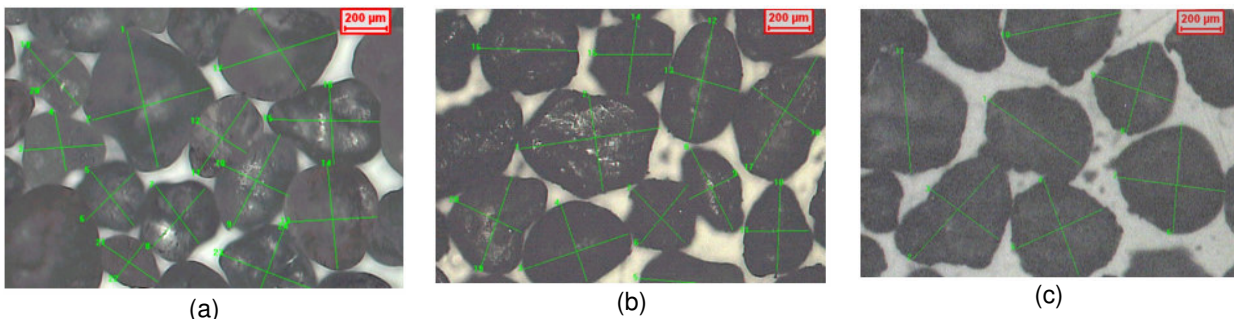
Uma solução para incrementar a resistência mecânica a partir do 2º ciclo seria o aumento do percentual de resina adicionado sobre a areia, como descrito por

Silva *et al.*,<sup>(9)</sup> que não foi avaliado neste teste. No entanto, deve-se ter cautela visto que a resistência mecânica passa a não apresentar mais alteração a partir de certo percentual de adição de resina (determinado experimentalmente como sendo 1,5%). Além disso, grande quantidade de resina implica, inevitavelmente, na geração de uma maior quantidade de gases, o que pode ocasionar alguns defeitos de fundição, como porosidade em peças.

#### 4.2.3 Caracterização morfológica

Conforme relatado por Silva *et al.*,<sup>(8)</sup> percebe-se uma considerável mudança na geometria dos grãos ao longo dos consecutivos ciclos de fundição, passando de “predominantemente arredondada” após o 1º ciclo de fundição para morfologia “irregular e bastante erodida (desgastada)” após o 6º ciclo de fundição. Observa-se, também, a aglomeração de particulados nas superfícies dos grãos de areia após o 6º ciclo de fundição.

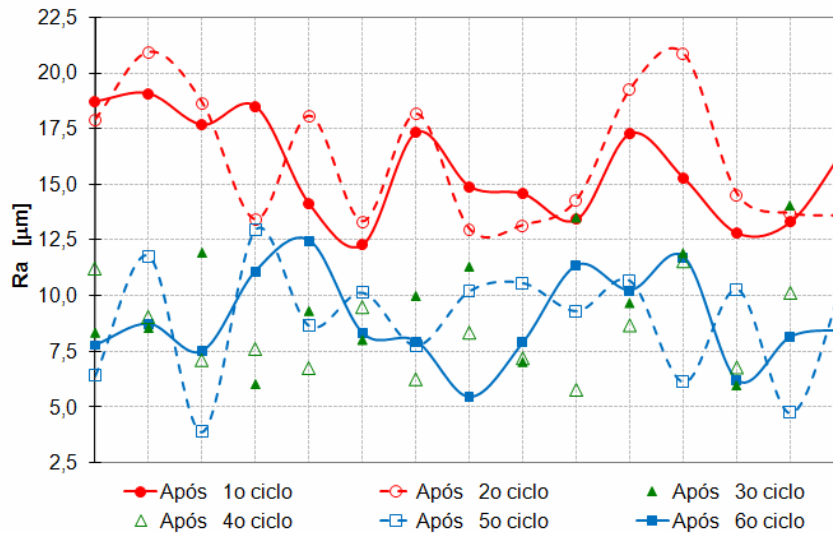
Na Figura 6 podem ser visualizadas fotos dos grãos de areia virgem e após o 3º e 6º ciclos de fundição, revelando a evolução da alteração morfológica dos grãos após os consecutivos ciclos de fundição. Apesar da alteração morfológica evidente, não se observou variação significativa do tamanho médio dos grãos de areia ao longo dos consecutivos ciclos de fundição, medição esta feita utilizando-se do recurso do microscópio ótico acoplado ao analisador de imagens.



**Figura 6.** Grãos de areia: (a) Virgem, antes do 1º ciclo de fundição; (b) Após o 3º ciclo de fundição; (c) Após o 6º ciclo de fundição.

#### 4.2.4 Rugosidade

Na Figura 7 encontram-se os resultados de varredura da rugosidade ( $R_a$ ) das faces das cunhas fundidas. Conforme relatado por Silva *et al.*,<sup>(8)</sup> as rugosidades observadas para o 1º (média  $15,7\mu\text{m}$ ) e 2º (média  $16,2\mu\text{m}$ ) ciclos apresentaram-se consideravelmente superiores àquelas observadas para os demais ciclos ( $9,6\mu\text{m}$  para 3º ciclo;  $8,2\mu\text{m}$  para 4º ciclo;  $9,0\mu\text{m}$  para 5º ciclo e  $8,9\mu\text{m}$  para 6º ciclo).



**Figura 7.** Rugosidade (Ra) da superfície das peças (cunhas) fundidas em função do ciclo de fundição.

Analisando apenas o aspecto superficial, para aplicações em que a qualidade superficial da peça fundida é um aspecto importante, os resultados obtidos sugerem que o uso de areia reutilizada não trará conseqüências negativas para a peça, conseguindo-se um acabamento melhor com o uso de areia reutilizada. Estes resultados sugerem, também, que problemas de sinterização em peças que foram fundidas utilizando-se moldes confeccionados com areia de cura a frio sejam minimizados à medida que se aumenta a quantidade de areia reutilizada. A usinabilidade da superfície das peças também deve melhorar com o aumento do uso de areia reutilizada, uma vez que a menor rugosidade deve minimizar problemas de quebras de insertos de usinagem.

## 5 CONCLUSÃO

Existe uma gradativa e sistemática aglomeração das partículas mais finas à medida que a areia de cura a frio é reutilizada.

Observa-se uma mudança significativa no aspecto superficial/morfológico dos grãos com o aumento da reutilização da areia da areia de cura a frio, o que sustenta a hipótese de que sempre existe um “residual” de ligante (resina) entre os ciclos de reutilização consecutivos, promovendo a aglomeração de partículas diminutas à superfície dos grãos maiores.

A resistência mecânica reduz consideravelmente com o aumento da reutilização da areia de cura a frio no processo. Torna-se necessário um incremento na sua resistência para que seja possível usar areia de cura a frio reutilizada sem prejuízos para a resistência do molde, possivelmente através do aumento do percentual de resina sobre a areia ou adição de areia virgem a cada ciclo de recuperação total.

Através do aumento do percentual de resina, conseguiu-se melhorar a utilização de areia recuperada, atingindo-se resultados satisfatórios de resistência mecânica para traços elaborados com até 50% de areia recuperada (contra 30% obtidos anteriormente para situações nas quais “não” foi alterado o percentual de resina típico).

Ficou evidente a existência de uma tolerância para a adição de resina (máximo de 1,5%), a partir da qual os resultados de resistência mecânica não sofrem quaisquer alterações.

A rugosidade das peças fundidas diminui consideravelmente com o aumento da quantidade de areia reutilizada, obtendo-se um acabamento melhor com um maior uso de areia reutilizada. Em função disso, também é esperada uma melhora na usinabilidade. Percebe-se, ainda, que as ocorrências de sinterização de areia à superfície da peça diminuiram razoavelmente com o aumento da reutilização de areia de cura a frio.

## REFERÊNCIAS

- 1 OKIDA, J. R. *Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, PR. Dezembro, 2006.
- 2 ARMANGE, L.C.; NEPPEL, L.F.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N.H.A. Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa. *Revista Matéria*, v.10, n.1, p.51-62, 2005.
- 3 ABIFA. Comissão de Estudos de Matérias-primas. *CEMP-182*. Preparação da mistura padrão utilizando batedeira planetária para o ensaio de resina cura a frio para a fundição. São Paulo, 2003.
- 4 SILVA, C.E.; RIVAROLI JÚNIOR, A.; SILIDÔNIO JÚNIOR, L.C.; PEREIRA, C.L.L. Reutilização de areia de cura a frio no processo de fundição como alternativa para a redução de resíduos – resultados preliminares. In: 63º Congresso Anual da ABM, Santos, 2008. SP: ABM, 2008. p.3152-3164.
- 5 ABIFA. Comissão de Estudos de Matérias-primas. *CEMP-081* Materiais granulares usados em fundição – Determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura. São Paulo, 2003.
- 6 ABIFA. Comissão de Estudos de Matérias-primas. *CEMP-060* Bentonita para fundição – Determinação da resistência à compressão à verde da mistura padrão. São Paulo, 2003.
- 7 ABIFA. Comissão de Estudos de Matérias-primas. *CEMP-162* Resina cura a frio para fundição – Determinação da resistência à tração da mistura padrão. São Paulo, 2003.
- 8 SILVA, C.E.; SILIDÔNIO JÚNIOR, L.C.; OLIVEIRA, D.L.; RIVAROLI JÚNIOR, A. Influência do número de ciclos de reutilização da areia de cura a frio nas propriedades mecânicas e características superficiais dos moldes empregados na fundição. In: 18º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, 2008. PE: CBECiMat, 2008. p.2159-2170.
- 9 SILVA, C.E.; OLIVEIRA, D.L.; SILIDÔNIO JÚNIOR, L.C.; RIVAROLI JÚNIOR; A. Influência da quantidade de areia de cura a frio reutilizada e do percentual de resina nas propriedades mecânicas de moldes empregados na fundição. In: 18º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, 2008. PE: CBECiMat, 2008. p.2147-2158.
- 10 RUBIO, J.C.C.; PANZERA, T.H.; NOGUEIRA, W.A. Qualidade superficial de peças de alumínio fundidas em molde de areia. *Revista Matéria*, v.11, n.2, p.125-137, 2006.