

## Avaliação da deformação a quente em núcleos de areia para fundição utilizando escória de forno cubilô como aditivo

Evaluation of hot deformation in foundry core sand using cupola furnace slag as additive

Elder Gregol dos Santos<sup>1</sup> , Athos Henrique Plaine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciência Tecnológicas, Joinville, SC, Brasil.

e-mail: elder.gregol@gmail.com, athos.plaine@udesc.br

---

### RESUMO

Nesta pesquisa foi avaliado o efeito da adição de três tipos de escória de fornos cubilô na deformação a quente de núcleos de areia. Além da avaliação de distorção a quente, foram avaliadas propriedades como resistência a tração imediata e resistência a tração após 30 minutos. Comparativamente, avaliou-se para cada tipo de escória, misturas com a adição 8, 12, 20, 40 e 70% em peso de escória sobre uma areia de sílica da região sul do Brasil. Os resultados mostraram uma redução na resistência à tração imediata dos núcleos de areia, independente do tipo de escória utilizada. A adição de escória granulada de cubilô, devidamente processadas, reduziu a deformação máxima a quente dos núcleos de areia, observou-se também que deformação foi diferente para cada tipo de escória utilizada. De uma maneira geral, os melhores resultados de deformação máxima foram obtidos para as misturas com 70% de adição, seguidas das misturas com 40% de escória. A adição progressiva das escórias também reduz a taxa de deformação, sendo que as escórias verde e preta apresentaram redução de 58%. Os resultados obtidos no ensaio de distorção a quente mostraram um potencial de utilização da escória de cubilô para melhorar o desempenho dos núcleos de areia em relação a defeitos motivados pela expansão da areia de sílica.

**Palavras-chave:** Escória de cubilô; núcleo de areia; distorção à quente.

---

### ABSTRACT

In this research, the effect of adding three types of cupola furnace slag in sand was evaluated on the hot distortion test. In addition, properties like as immediate tensile strength and tensile strength after 30 minutes were evaluated. Comparatively, mixtures with the addition of 8, 12, 20, 40 and 70% by weight of slag on silica sand from southern Brazil were evaluated for each type of slag. The results showed a reduction in the immediate tensile strength of the sand cores, regardless of the type of slag used. The addition of granulated cupola slag, duly processed, reduced the maximum hot deformation of the sand cores. It was also observed that the deformation was different for each type of slag used. In general, the best maximum deformation results were obtained for mixtures with 70% addition, followed by mixtures with 40% slag. The progressive addition of slag also reduces the deformation rate, with the green and black slag showing a 58% reduction. The results obtained in the hot distortion test showed a potential use of cupola slag to improve the performance of sand cores in relation to defects caused by the expansion of silica sand.

**Keywords:** Cupola slag; core sand; hot distortion.

---

### 1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição de ferro é considerada por muitos especialistas ambientais como uma indústria de reciclagem, pois esta indústria recicla uma grande quantidade de sucata como matéria-prima (sucata de aço e ferro, sucata de cobre, etc.). Apesar desse benefício, a indústria de fundição também produz muitos resíduos, como areia, escória, poeira e refratários, sendo a areia o resíduo com maior volume de descarte [1]. A escória de

fundição, por sua vez, também apresenta alta participação nos resíduos gerados pela indústria de fundição, principalmente a escória do processo de fusão em forno cubilô. Um cubilô é um forno do tipo cuba, caracterizado construtivamente pelo seu tamanho (altura). Termicamente é um trocador de calor em contra-corrente. Durante a combustão, o ar entra pelas ventaneiras e queima o carvão coque em seu interior, liberando calor. A fusão em fornos cubilô gera 5 a 6% de escória por tonelada de metal fundido [2, 3]. Essa escória contém óxidos provenientes de: impurezas do material de carga, material refratário erodido do forno, da cinza de coque e das perdas na fusão do metal carregado. [2, 4]. Junto aos materiais carregados no forno é utilizado um fundente, um composto básico (como o calcário) que reage com cinzas de coque e outras impurezas para formar escória [2, 4]. O metal e a escória líquida gotejam através da cama de coque e se acumula no cadinho do forno, escoando por um orifício de ligação entre o interior do forno e o sifão. Como a densidade da escória é menor que a do ferro, ela pode ser facilmente separada do metal [5, 6].

Resultados favoráveis de experimentos e similaridade química de escória de alto forno e escória de cubilô iniciaram uma série de experimentos que tratam das possibilidades de utilização da escória de cubilô na produção de diferentes tipos de indústria, como, por exemplo na indústria rodoviária e de construção (material de construção de estradas, material de produção de cimento, etc.), agricultura (neutralização de solos ácidos no caso de escórias básicas) e métodos especiais de utilização, como material para produção de fibras de silicato. Outra possibilidade relatada foi o uso de escória de cubilô para a preparação de concretos escória-alcalinos, ou seja, concretos não cimentícios [2].

No processo de fundição, uma das alternativas para a utilização da escória de cubilô seria a adição nas misturas de areia utilizadas para produção de núcleos de areia. Atualmente, em algumas aplicações especiais, são adicionadas nas misturas das areias certos tipos de aditivos ou areias especiais, com o objetivo de melhorar as propriedades físicas e químicas dos núcleos de areia, contribuindo assim para redução de defeitos, principalmente veiaamentos e deformação. Dessa forma, a areia de sílica de alta pureza pode ser substituída total ou parcialmente por outros agregados, como areia de lago, zirconita, cromita, olivina, sílica fundida ou outros materiais sintéticos [7–10]. A expansão menor e mais uniforme desses materiais pode minimizar ou eliminar o veiaamento [11]. No entanto, esses materiais também são mais caros do que a areia de sílica e podem apresentar problemas específicos na moldagem ou na fabricação de machos [8, 10].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes tipos de escória de forno cubilô como aditivo para fabricação de núcleos de areia pelo processo cold-box fenólico-uretânico-amina, avaliando as alterações na resistência a tração e na distorção a quente para estas misturas de areia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química da escória de cubilô é diretamente dependente da composição dos materiais de entrada e da tecnologia de fusão do forno. A composição química influencia diretamente a viscosidade da escória e a taxa de cristalização durante o resfriamento, afetando a porosidade, a natureza e o tamanho dos cristais na escória solidificada.

Neste estudo, as escórias foram coletadas na forma granulada, obtidos pelo direcionamento direto da escória líquida do forno cubilô a um choque térmico em água corrente. A escória gerada neste processo é um material com granulometria heterogênea e incompatível com a granulometria da areia e demais aditivos utilizados para confecção dos núcleos de areia. Dessa forma foi necessário o processamento deste material, com o objetivo de ajustar a granulometria, ficando assim coerente com os valores desejados para ser utilizado como aditivo na areia.

A primeira etapa foi submeter as escórias à secagem em mufla por 48 horas em 120°C. Para ajuste de granulometria, o processo escolhido foi por amassamento, utilizando um misturador de mós verticais (Figura 1), com velocidade de rotação de 60 rpm, com a altura das mós reguladas para ficarem encostadas no fundo. A quantidade utilizada por batelada foi de 1,2 kg de escória, com tempo de processamento de 10 min.

Após o processo de esmagamento no misturador, verificou-se a presença tanto de partículas grosseiras, quanto de partículas muito finas. Um aumento do tempo de processamento no misturador poderia ter reduzido as partículas grosseiras, contudo a geração de finos se tornaria maior, sendo necessária a remoção para evitar quedas significativas na resistência dos núcleos de areia e assim, conseqüentemente menor rendimento do processo de ajuste da granulometria (maior perda de matéria-prima). Por este motivo, optou-se por um processo posterior de peneiramento de forma a reduzir a presença de partículas finas (< 0,075 mm) e das partículas grosseiras (> 1,7 mm).

A determinação da distribuição granulométrica, do tamanho médio de grão e do teor de finos, foi realizada conforme norma CEMP/ABIFA - 081 [12]. Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma amostra de aproximadamente 50 g, peneirada por 12 minutos em um jogo de peneiras montado em um sistema vibratório automático.



**Figura 1:** Misturador de mós verticais utilizado para ajustar a granulometria das escórias.

**Tabela 1:** Composição em óxidos das escórias utilizadas como aditivo.

ESCÓRIA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe METÁLICO
Cinza	12,9%	0,9%	6,4%	0,3%	27,6%	46,2%	0,18%
Verde	6,1%	1,8%	4,9%	1,6%	29,4%	51,0%	0,28%
Preta	7,7%	4,2%	3,3%	1,3%	31,5%	51,1%	0,40%

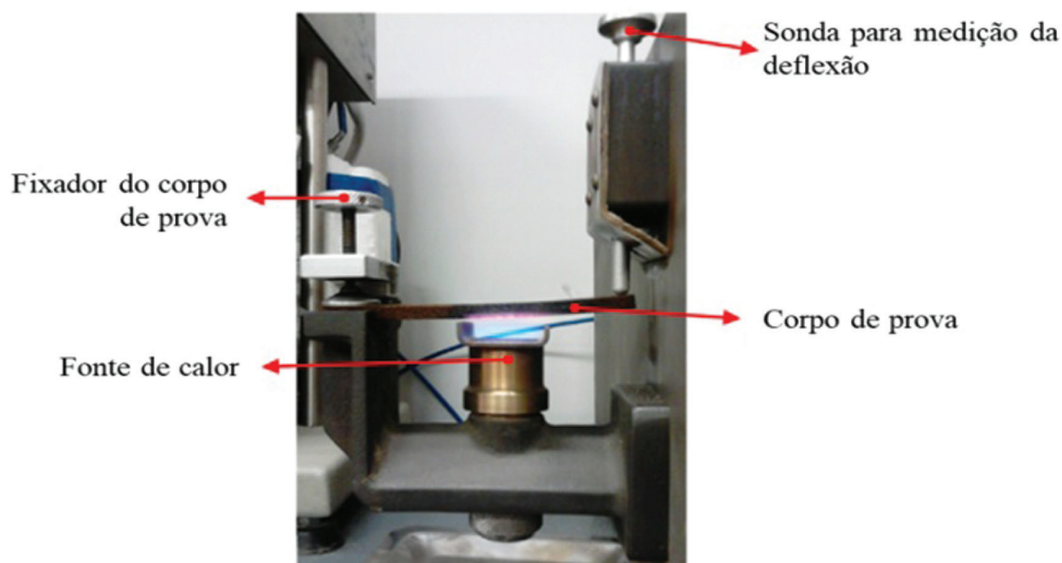
Devido ao elevado número de fatores envolvidos na formação das escórias de cubilô, é possível observar uma gama de tipos de escórias, cada uma com composição de óxidos particulares. Com intuito de verificar a influência destas diferenças no comportamento das misturas, optou-se por realizar um estudo comparativo entre três tipos de escórias, caracterizando-as previamente de acordo com sua coloração (cinza, verde e preta) e posteriormente, a composição da escória, em óxidos foi determinada com auxílio de um espectrômetro por fluorescência de raios-X, da marca Thermo Scientific, modelo Niton XL3T 980 e estão apresentados na Tabela 1.

A escória verde foi coletada em um cubilô de 20 ton/h, com relação coque/carga metálica de 11,8% em peso, sendo que o coque utilizado continha 9% de cinzas. A composição da carga metálica foi de 30% sucata de ferro fundido, 12% briquete de cavaco de ferro fundido e 58% de sucata de aço. A proporção de pedra calcária/coque utilizada foi de 45% em peso. A escória cinza, por sua vez, foi coletada em um cubilô de 24 ton/h, com relação coque/carga metálica de 9,2% em peso, com o coque contendo a mesma quantidade de cinzas do caso anterior. A composição da carga metálica foi de 35% de sucata de ferro fundido e 65% de sucata de aço. A proporção de pedra calcária/coque utilizada foi de 80% em peso. Já a escória preta foi coletada em um cubilô de 8 ton/h com relação coque/carga metálica de 17,5% em peso, sendo que o coque utilizado continha 11% de cinzas. A composição da carga metálica foi de 10% de sucata de ferro fundido, 40% de ferro gusa e 50% de sucata de aço. A proporção de pedra calcária/coque utilizada foi de 65% em peso.

Observa-se que os valores de CaO e SiO<sub>2</sub> são similares entre as escórias, entretanto os demais óxidos apresentam diferenças significativas. Para a escória cinza, verifica-se os maiores teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO, enquanto que os teores de FeO e MnO são os menores entre as escórias avaliadas. A escória de cor preta destaca-se pela maior presença de FeO, enquanto que a escória de cor verde possui valores intermediários na maioria dos óxidos, com exceção apenas do teor de MnO, mas ainda assim bem próximo do valor apresentado para a escória preta.

Com as escórias trituradas e peneiradas, foram realizadas misturas utilizando areia base de sílica (areia com módulo de finura 50/57), da região sul do estado de Santa Catarina - Brasil, adicionando 8, 12, 20, 40 e 70% sobre o peso de areia de cada tipo de escória e, posteriormente, realizados os ensaios descritos a seguir. Para cada sequência de ensaios, realizou-se respectivamente testes apenas com areia base a fim de comparar os efeitos da adição das escórias.

O valor de demanda de ácida, uma característica crítica para o processo de confecção por caixa fria, foi medido para a amostra de areia de sílica e para as amostras de escórias. Em geral, quanto maior valor de pH da areia, menor o tempo que a areia estará aproveitável, pois a resina começa a reagir antes do normal [13, 14].



**Figura 2:** Configuração típica do dispositivo para o ensaio de distorção a quente [18].

### 2.1. Ensaio de distorção a quente

O teste de distorção a quente é projetado para avaliar a expansão, suscetibilidade à formação de trincas, deformação e flexão de areias quimicamente ligadas a altas temperaturas. É usado para avaliação de rotina e controle de material na fabricação de moldes e machos, e para prever o comportamento provável de novos ligantes e misturas de areia, fornecendo um modelo para entender como os moldes ou núcleos quimicamente ligados reagirão quando submetidos ao metal fundido. O uso de curvas de distorção a quente permite que as fundições reduzam a variação do processo e melhorem a qualidade da fundição [15, 16].

A configuração experimental para o teste de distorção a quente é mostrada na Figura 2. Tal configuração se assemelha a um molde ou seção de núcleo que entra em contato com metal fundido [15]. Devido ao aquecimento unilateral, a diferença térmica é desenvolvida na amostra. A taxa de expansão térmica da areia é maior no lado aquecido do corpo de prova do que no lado oposto. Isso leva à deflexão para cima da amostra que é registrada como valor de deformação positivo e registrada como uma curva ao longo do tempo [17].

As curvas de distorção a quente foram geradas utilizando a técnica padronizada desenvolvida pela BCIRA (British Cast Iron Research Association) [16]. Para esta avaliação um núcleo de areia em forma de barra ( $115 \times 25 \times 6$  mm) é aquecido a  $890^{\circ}\text{C}$  e submetido a uma carga de 0,3 N em uma das extremidades da barra. A deformação da barra do núcleo foi medida durante o aquecimento por 60 segundos. Um total de seis amostras foram ensaiadas por condição, obtendo-se uma curva média com os valores de todos os ensaios.

### 2.2. Ensaio de resistência à tração

A resistência à tração dos núcleos de areia foi determinada em corpos de prova com 1,5% de resina fenólica uretânica (50/50% de cada parte), catalisada com amina terciária; cujas dimensões estão de acordo com a norma da COMISSÃO DE ESTUDOS DE MATÉRIAS PRIMAS (CEMP E-11)[19] (Figura 3). A resistência foi determinada em duas condições, resistência à tração imediata (RTI) e resistência a tração imediata em 30 minutos. No caso da RTI, a mistura de areia foi colocada no cabeçote da máquina de machos e na sequência realizada confecção do corpo de prova e, logo em seguida, realizado os ensaios de tração. Para o ensaio de 30 minutos, a mistura de areia aguardou 30 minutos no cabeçote de máquina antes de ser soprada para a confecção do corpo de prova, que foi ensaiado logo em seguida à sua confecção. Um total de quatro amostras foram ensaiadas por condição, obtendo-se o resultado médio e desvio padrão.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Aspecto granulométrico e resistência à tração

Na Figura 4 tem-se distribuição granulométrica de cada tipo de escória após o processamento e a granulometria da areia utilizada nas misturas. A distribuição granulométrica e o módulo de finura (Tabela 2) das escórias são semelhantes entre si, o que indica estabilidade no método de processamento utilizado. A distribuição das

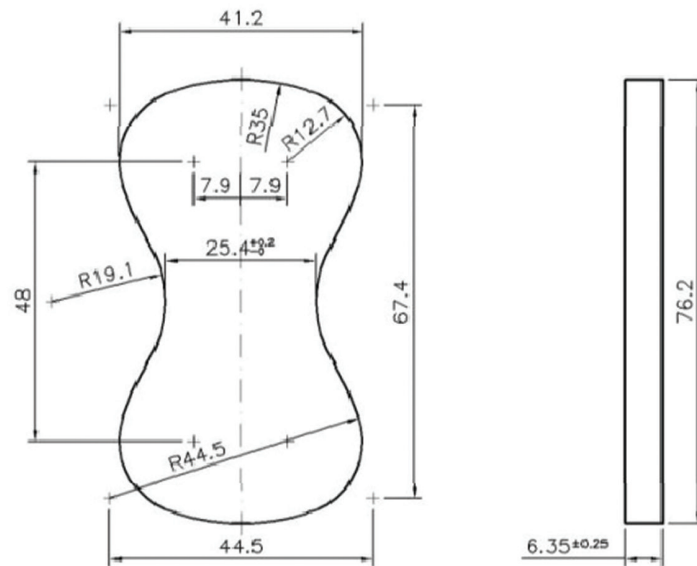


Figura 3: Dimensão (em mm) do corpo-de-prova para os ensaios de resistência [19].

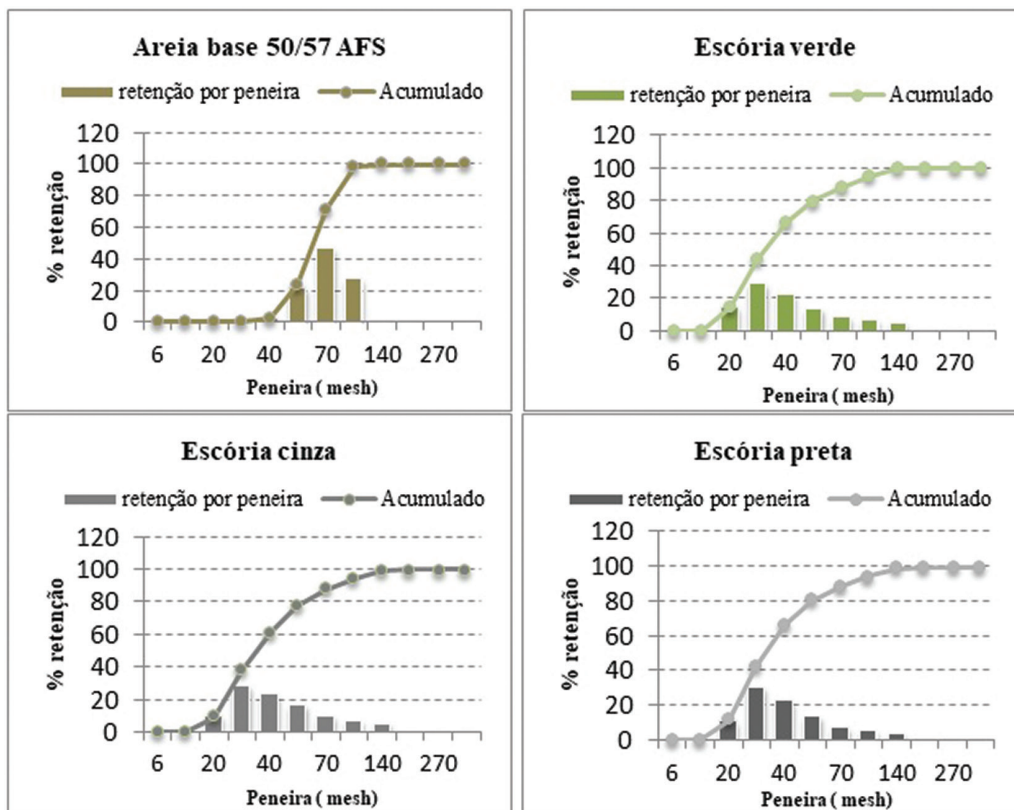


Figura 4: Distribuição granulométrica por peneira e acumulada para areia base e cada tipo de escória utilizada nas misturas.

peneiras indica uma maior dispersão de tamanho de grão das escórias quando comparado a areia de sílica. Enquanto que para a areia tem-se uma concentração em praticamente três peneiras (50, 70 e 100 mesh), para as escórias, a retenção foi em sete diferentes peneiras (20, 30, 40, 50, 70, 100 e 140 mesh).

Com relação aos valores de perda ao fogo, verifica-se que as escórias apresentaram resultados negativos, indicando um ganho de massa durante o ensaio, o qual deve estar associado à oxidação do ferro metálico presente nas escórias, oriundo do seu próprio processo de separação no forno cubilô e estão indicados nos resultados da Tabela 3.

**Tabela 2:** Características das escórias utilizadas como aditivo e da areia de sílica base.

CARACTERÍSTICA	AREIA BASE	ESCÓRIA CINZA	ESCÓRIA VERDE	ESCÓRIA PRETA
Módulo de Finura (AFS)	53,4	35,9	33,5	34,0
Finos (%)	0,08%	0,58%	0,30%	0,64%
Argila AFS (%)	0,06%	0,26%	0,18%	0,80%
Densidade bulk (g/cm <sup>3</sup> )	1,52	1,53	1,52	1,54
Permeabilidade (AFS)	130	220	208	256
Perda ao fogo (%)	0,10%	-0,01%	-0,28%	-0,04%
pH	7,04	8,16	6,93	7,78

**Tabela 3:** Influência de algumas propriedades nas regiões da curva do ensaio de distorção à quente [14].

REGIÃO 1 DEFLEXÃO SUPERIOR	REGIÃO 2 PLASTICIDADE	REGIÃO 3 TERMO ENDURECIMENTO	REGIÃO 4 - FRATURA
Distribuição da areia base	Tipo de resina	Velocidade de cura	Densidade do corpo de prova
Tipo e forma da areia base	Grau de cura	Grau de cura	Colapsibilidade
Expansão térmica da areia	Estabilidade dimensional	Tipo de resina	Teor de resina
Densidade do Copo de prova	Tendência à veiação ou a trinca à quente		Resistência a quente

O quadro da Figura 5 ilustra o formato dos grãos de escória após o processamento. Observa-se um formato de grão heterogêneo, mesclando formatos muito angulares e angulares, conforme critério proposto por BROWN [20]. Este tipo de superfície é resultado da fratura dos grãos de escória durante o processo de esmagamento no misturador. As “lascas” oriundas destes grãos geram partículas de diferentes tamanhos, que por sua vez, também geram outras partículas provenientes da sua fratura, e assim sucessivamente. Dessa forma, justifica-se a retenção de material em um número grande de peneiras no ensaio de granulometria. Este efeito também justifica a maior presença de finos e argila AFS (Tabela 2) nas escórias quando comparado a areia de sílica.

Os resultados de resistência a tração imediata (RTI) e resistência a tração imediata após 30 minutos estão plotados nos gráficos da Figura 6 e Figura 7. Para a escória verde, a mistura inicial, sem a adição do aditivo, a resistência inicial foi de 155 N/cm<sup>2</sup>, sendo progressiva até a adição de 12% do aditivo (88% de areia base), com valor de 164 N/cm<sup>2</sup>. Para as adições de 20%, 40% e 70%, os valores foram decrescente com 145, 129 e 124 N/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Para os resultados de tração após 30 minutos, a mesma tendência é observada.

Para a escória cinza, a mistura inicial, sem a adição do aditivo apresentou uma resistência de 165 N/cm<sup>2</sup>, o qual se manteve praticamente estável até o nível de adição de 40%, reduzindo para 152 N/cm<sup>2</sup> na mistura com 70% do aditivo. Assim como acontece para a escória verde, nota-se que a tendência de valores de resistência após 30 minutos com o aumento do aditivo é a mesma para a RTI.

A mistura inicial para a série de misturas com a escória preta, sem a adição do aditivo, apresentou um valor de 180 N/cm<sup>2</sup>. Com a adição crescente de escória preta, observa-se uma redução nos valores de RTI imediato, com valores de 176, 171, 166 e 162 N/cm<sup>2</sup> para as misturas com 8, 12, 20 e 40% de aditivo. O resultado de RTI com 70% de aditivo apresentou uma redução mais pronunciada, com valor de 125 N/cm<sup>2</sup>. Para a resistência a tração após 30 minutos, a valor reduziu de 185 N/cm<sup>2</sup> (100% areia de sílica) para 124 N/cm<sup>2</sup> (70% de escória preta).

Com base nestes resultados, observa-se um aumento nas resistências após 30 minutos quando comparadas a resistência a tração realizadas imediatamente após a confecção dos corpos de prova. Este fato está provavelmente associado ao aumento do tempo de cura da mistura e indica que a trabalhabilidade com misturas de areias produzidas utilizando escórias como aditivo não é afetada.

De uma maneira geral, a relação dos valores decrescentes de resistência com o aumento da quantidade de escória é justificado pelo formato dos grãos de escória, BROWN [20] e CAREY e SWARTZLANDER [21] explicam que areias/aditivos com grãos irregulares e de esfericidade mais baixa requerem adições de ligantes (resina) mais altas para obter as mesmas propriedades mecânicas que as areias com grãos arredondados, em média, 25% a mais de resina. Como nesta pesquisa optou-se por não alterar o % de ligante, a queda de resistência é explicado por este mecanismo. Embora os aditivos tenham alterado de maneira negativa a resistência à

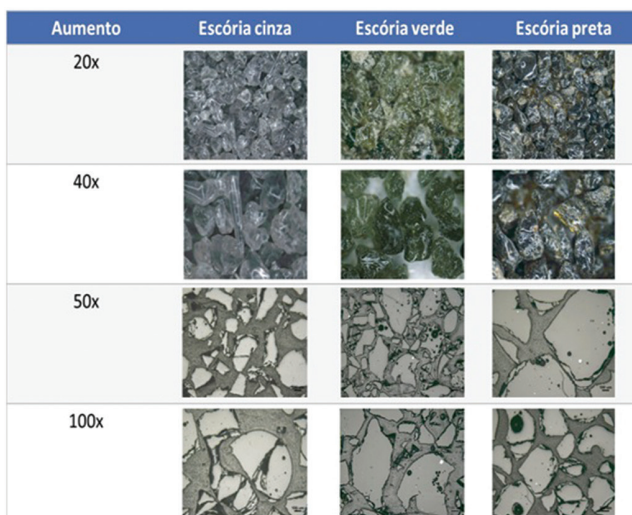


Figura 5: Aspecto granulométrico das escórias utilizadas nas misturas com areia base. Aumento 20 e 40× (estereoscópio) e 50 e 100× (microscópio ótico).

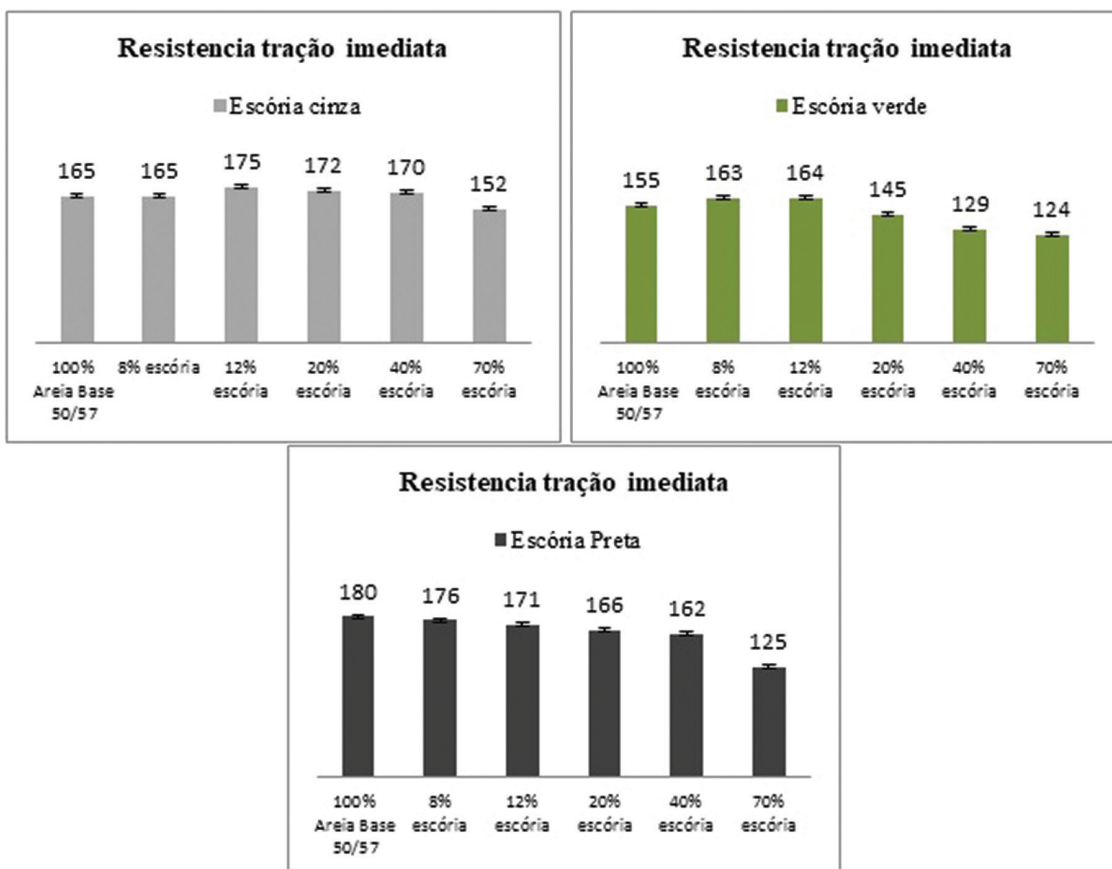


Figura 6: Resistência a tração imediata para cada tipo e quantidade de escória.

tração imediata, os valores observados ainda estão acima dos desejados para o processo cold-box de fabricação de núcleos de areia. PEIXOTO e GUESSER [22] citam que o valor mínimo de resistência seria de 80 N/cm<sup>2</sup>.

### 3.2. Distorção à quente

BUDAVÁRY e VARGA [17] apresentam uma curva de dados característica do ensaio de distorção à quente, conforme é mostrada na Figura 8, onde tipicamente pode ser dividida em quatro seções, dependendo do tempo de duração do ensaio.

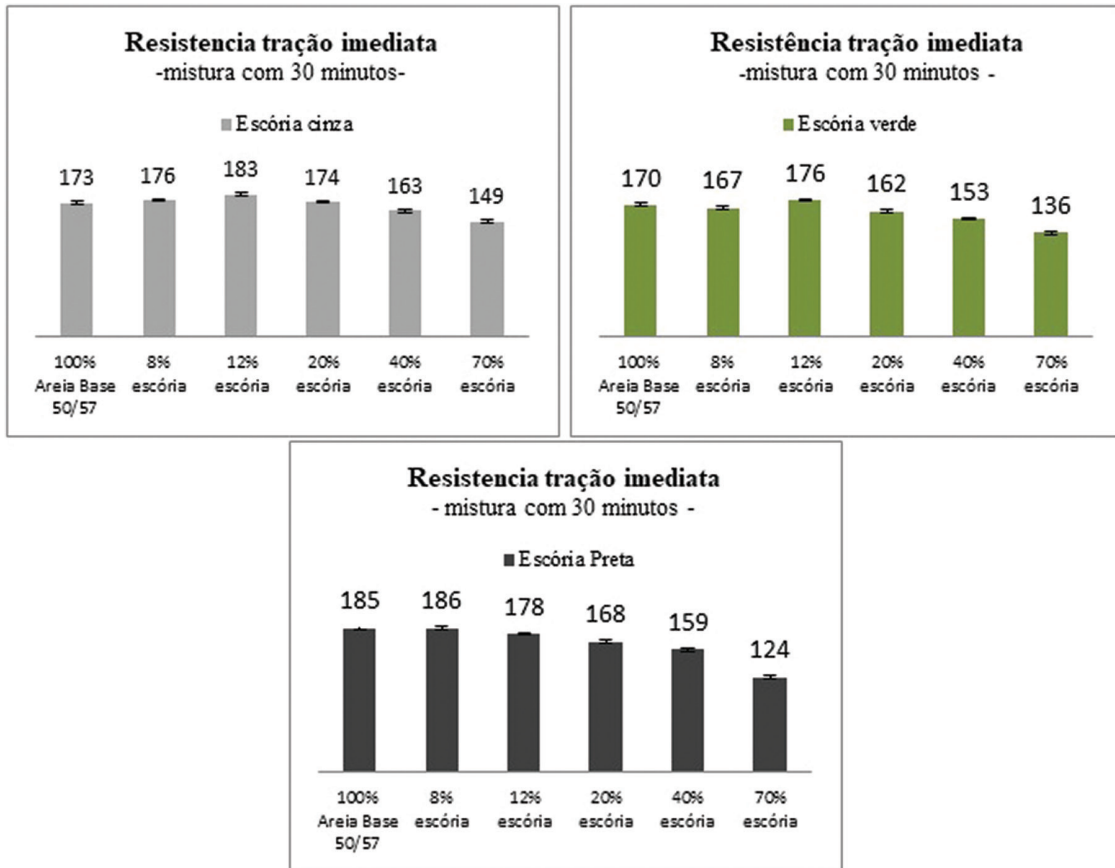


Figura 7: Resistência a imediata após 30 minutos de areia preparada para cada tipo e quantidade de escória.

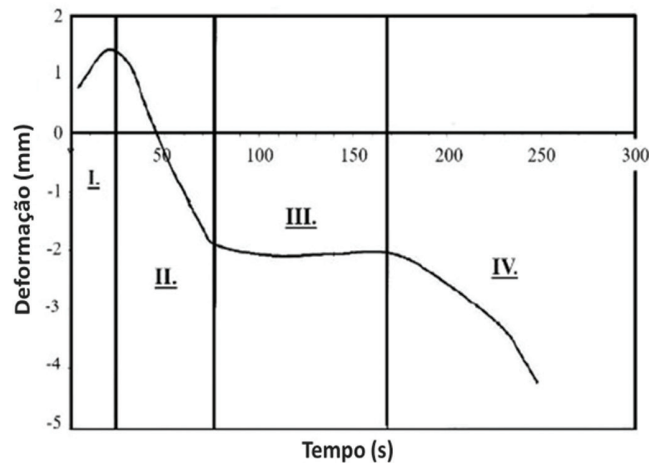
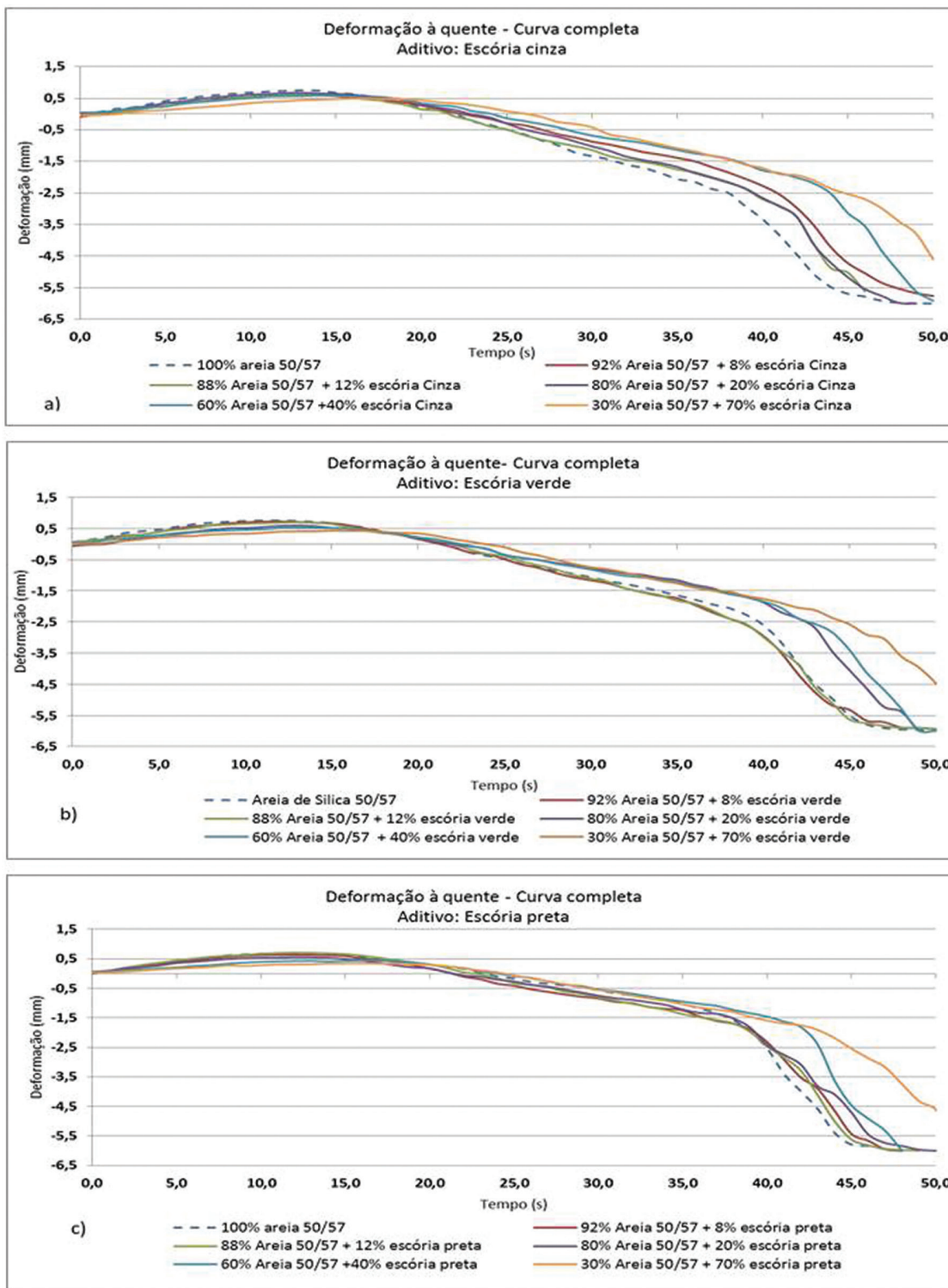


Figura 8: Curva típica do ensaio de distorção à quente [17].

A Tabela 3 relaciona as informações apresentadas por MCINTYRE e STROBL [14] onde que algumas das propriedades de núcleos e molde de areia que podem ser representadas por cada região da curva de ensaio de distorção a quente.

As curvas de deformação-tempo obtidas nos ensaios de distorção a quente estão plotadas na Figura 9. A Figura 10 apresenta, em detalhe, a região I da curva de deformação a quente (região de deflexão superior, correspondente ao início do ensaio até o ponto de deformação máxima). Observa-se diferença de comportamento em relação à mistura base (linha tracejada nos gráficos) com a adição das escórias. Nota-se que na região I da curva, há uma diferença nos valores máximos atingidos para a deformação, conforme detalhamento na Tabela 4. Para todos os ensaios com adição de escória, com exceção da mistura com 12% de escória preta, houve uma redução do valor de deformação máxima.





**Figura 9:** Gráfico com as curvas de deformação pelo tempo obtidos pelo ensaio de deformação à quente para as misturas com a) escória cinza, b) escória verde e c) escória preta.

Os melhores resultados de deformação máxima foram obtidos, independentemente do tipo de escória, para as misturas com 70% de adição, seguidas das misturas com 40% de escória, conforme dados do gráfico comparativo na Figura 11. Dos três tipos de escória avaliadas, a escória de coloração preta apresentou o menor valor de deformação em relação a mistura base, chegando em 49% de redução com 70% de adição. A escória verde também apresentou uma redução considerável, com 43%, com a adição de 70% na mistura. Em seguida,

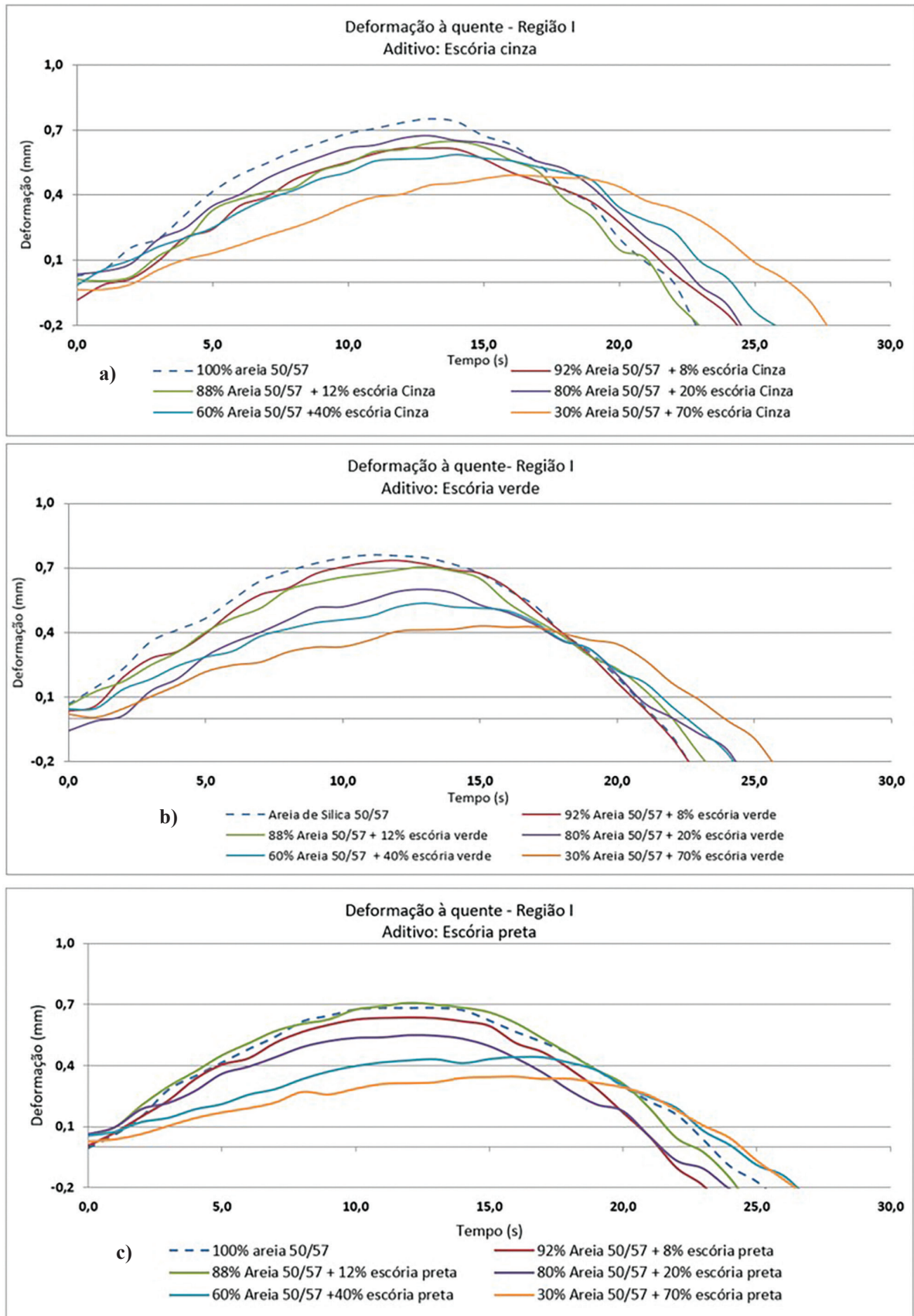


Figura 10: Detalhe da Região I (deflexão superior) da curva obtido no ensaio de distorção à quente para as misturas com a) escória cinza, b) escória verde e c) escória preta.

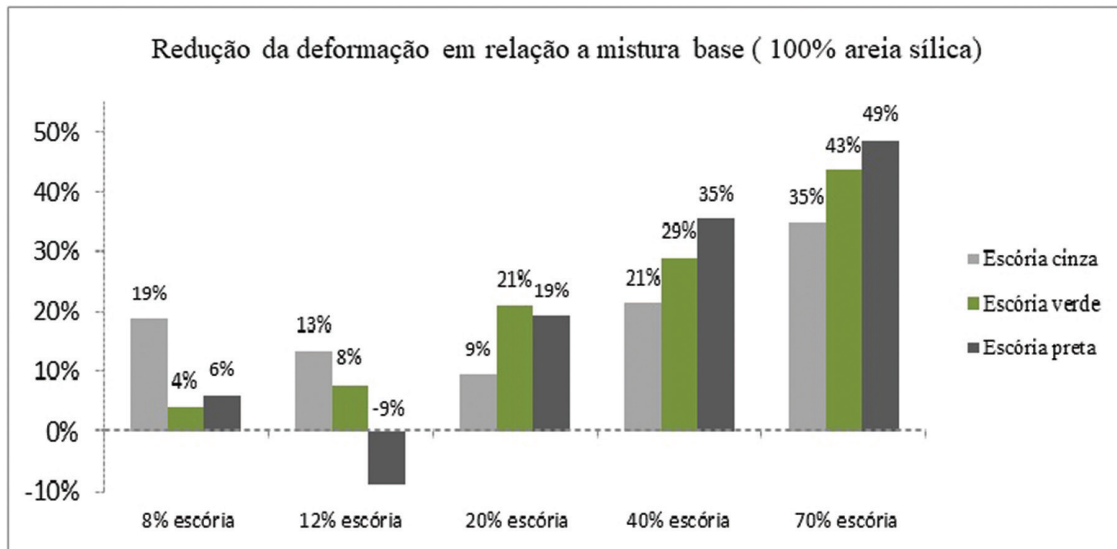


Figura 11: Gráfico comparativo da redução da deformação para cada quantidade e tipo de escória.

Tabela 4: Deformação máxima no ensaio de deformação a quente para cada tipo de escória e mistura.

DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)	AREIA DE SILICA 50/57	92% AREIA 50/57 + 8% ESCÓRIA	88% AREIA 50/57 + 12% ESCÓRIA	80% AREIA 50/57 + 20% ESCÓRIA	60% AREIA 50/57 + 40% ESCÓRIA	30% AREIA 50/57 + 70% ESCÓRIA
Escória cinza	0,75	0,61	0,65	0,68	0,59	0,49
Escória verde	0,76	0,73	0,70	0,60	0,54	0,43
Escória preta	0,68	0,64	0,74	0,55	0,44	0,35

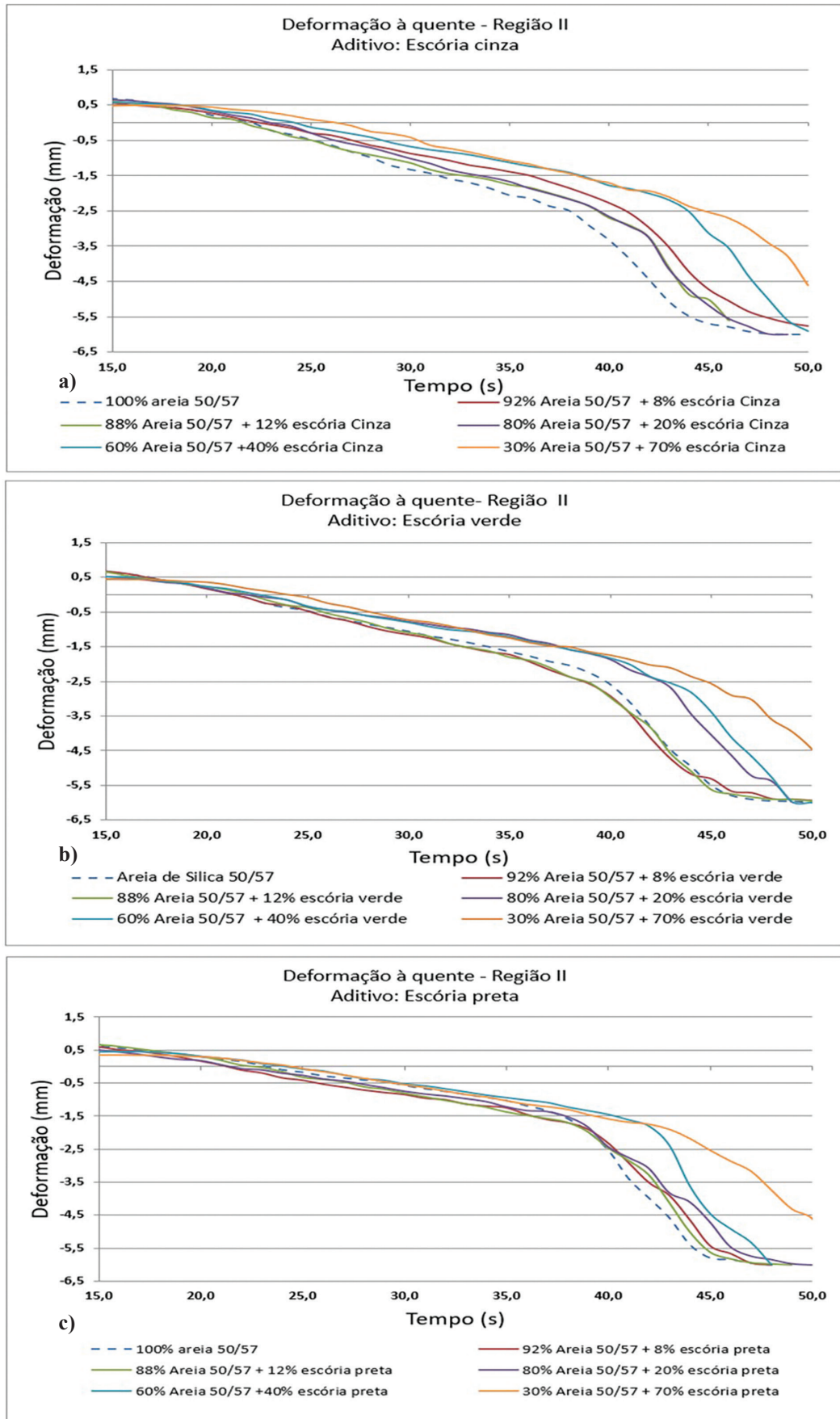
Tabela 5: Taxa de deformação a quente para cada tipo de escória e mistura.

TAXA DE DEFORMAÇÃO (mm/s)	AREIA DE SILICA 50/57	92% AREIA 50/57 + 8% ESCÓRIA	88% AREIA 50/57 + 12% ESCÓRIA	80% AREIA 50/57 + 20% ESCÓRIA	60% AREIA 50/57 + 40% ESCÓRIA	30% AREIA 50/57 + 70% ESCÓRIA
Escória cinza	0,058	0,051	0,046	0,052	0,042	0,031
Escória verde	0,069	0,061	0,054	0,046	0,041	0,029
Escória preta	0,053	0,053	0,059	0,046	0,027	0,022

está a escória de cor cinza com 35% de redução na deformação máxima, com 70% de adição, mesmo valor obtido pela escória de cor preta, mas com 40% na mistura.

Conforme citado por MCINTYRE e STROBL [14] os fatores que afetam o comportamento desta região são a expansão térmica da mistura e tipo e forma dos grãos de areia ou do aditivo. Conforme a adição das escórias é progressiva, seu efeito é mais pronunciado, já que temos diferenças significativas na forma e distribuição entre os grãos de escória e areia (conforme Figuras 5 e 6). Este comportamento indica que núcleos de areia produzidos com estes aditivos podem ter sua estabilidade térmica melhorada. Deformação excessiva de núcleos de areia e moldes durante o processo de fundição pode levar a imprecisões dimensionais, então deste ponto de vista, os valores de deformação mais elevados são desvantajosos [16].

Outra característica que pode ser retirada da região I da curva é a taxa de deformação, utilizando a relação deformação máxima/tempo. Os dados da Tabela 5 indicam que os ensaios com as misturas com 70% de escória apresentaram a menor taxa de expansão, com o menor valor para escória preta, 0,022 mm/s, seguido pela escória cinza (0,029 mm/s) e posteriormente a escória verde (0,031 mm/s). Entretanto, quando comparado à mistura base, proporcionalmente, a redução da escória preta e verde é a mesma (58%). A diminuição da taxa de deformação é um indicativo do efeito de amortecimento da expansão da sílica pela presença do aditivo (escórias), fazendo com que o núcleo de areia mantenha as suas dimensões iniciais preservadas por mais tempo logo após o contato com o metal líquido.



**Figura 12:** Detalhe da região II das curvas de deformação pelo tempo obtidos pelo ensaio de deformação à quente para as misturas com a) escória cinza, b) escória verde e c) escória preta.

Nos gráficos da Figura 12 observa-se em detalhe a região II da curva do ensaio de distorção quente. Nota-se um deslocamento para direita das curvas com o uso das escórias, indicando um aumento na termoplasticidade da mistura, conforme critérios citados por MCINTYRE e STROBL [14]. Com a termoplasticidade aumentada, o núcleo de areia é capaz de absorver a tensão acumulada devido a expansão da sílica, ocasionando assim um potencial em reduzir a tendência ao veamento e também melhorar estabilidade dimensional dos núcleos de areia.

Especificamente, para a série de misturas com escória cinza, o deslocamento nesta região é gradativo conforme o aumento do teor do aditivo. Para a escória verde, observa-se que nas misturas com 8 e 12% de escória, não há alteração em relação a mistura com 100% areia base, indicando que nestes teores não ocorre uma melhora da termoplasticidade da mistura. Os ensaios com 20 e 40% de escória apresentam o mesmo comportamento entre si na região II e a mistura com 70% apresenta o maior deslocamento para a direita. Nas amostras ensaiadas utilizando como aditivo a escória preta, nota-se alteração no comportamento das curvas nesta região apenas com adição de 40 e 70%. Misturas com escória preta até 20% mostraram não provocar alterações na termoplasticidade quando comparadas a linha base (mistura com 100% areia sílica).

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo foram avaliados diferentes tipos de escória de forno cubilô como aditivo para fabricação de núcleos de areia pelo processo cold-box fenólico-uretânico-amina, a partir das alterações na resistência a tração e na distorção a quente para estas misturas de areia. Com base nos resultados, pode-se concluir que a adição de escórias nas misturas, nas condições obtidas a partir do processamento da escória granulada bruta, reduz à resistência a tração imediata dos núcleos de areia, independente do tipo utilizado. Contudo, os valores ainda foram superiores ao mínimo desejado para confecção de núcleos de areia pelo processo cold-box. Ademais, foi possível verificar que a adição de escória granulada de cubilô, devidamente processada, impacta na deformação a quente dos núcleos de areia. Verificou-se ainda que a resposta da deformação foi diferente para cada tipo de escória utilizada, mas em todos os casos os melhores resultados de deformação máxima foram obtidos para as misturas com 70% de adição, seguidas das misturas com 40% de escória. A adição progressiva das escórias também reduz a taxa de deformação, sendo que as escórias verde e preta apresentaram redução em torno de 58%. Tais resultados mostram o potencial de utilização da escória granulada de cubilô para melhorar a performance dos núcleos de areia em relação a estabilidade dimensional e resistência a defeitos de fundição relacionados a expansão da areia de sílica.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SILVA, E.C., MASIERO, I., GUESSER, W., “Comparing sands from different reclamation processes for use in the core room of cylinder heads and cylinder blocks production” In: *Proceedings of the 2nd Carl Lopper – Cast Iron Symposium*, Bilbao, Espanha, Setembro 2019.
- [2] PRIBULOVÁ, A., FUTÁS, P., BARTOSAVÁ, M., *et al.*, “Utilization of slags from foundry process”, *Journal of Casting & Materials Engineering*, v. 1, n. 4, pp. 103–109, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2017.1.4.103>.
- [3] RAJU, K.V.S.B., PAI, G.M., MURTHY, N., “Geotechnical characterization of miscellaneous wastes”. In: *GEOtrendz: Proceedings of the Indian geotechnical conference*, Bombai, Mumbai, India, 16–18 Dec. 2010, pp. 53–56, 2010.
- [4] ENRIQUEZ, J.L., GARCIA, F., “Practica de fundicion: control del viento soplado em cubilote.”, *Revista Fundidores*, n. 22, pp. 33–38, 1993.
- [5] EDGE, H.A., “Melting, tapping and slagging”, In: Thomas, S.P (ed), *Cupola Handbook*, 6th ed, chapter 18, Illinois, EUA, American Foundry Society, pp. 181–185, 1999.
- [6] SOSA, I., TAMOYO, P., SAINZ-AJA, J.A., *et al.*, “Viability of cupola slag as an alternative eco-binder and filler in concrete and mortars”, *MDPI: Applied Science*, v. 11, n. 4, pp. 1957. Feb. 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/app11041957>.
- [7] SHOWMAN, R.E., HARMON, S.B., “Further evaluations of anti-veining sand additives,” In: *Proceedings of the AFS*, v. 120, pp. 205–212, Illinois, EUA, 2012.
- [8] STÖTZEL, R., KOCH, C., GHOTGE, V., *et al.* “New coatings and additives concepts as an entire approach for defect and residue free castings”, In: *Proceedings of the 72nd World Foundry Congress*, pp. 107–108, Nagoya, Japão, 2016.
- [9] BAKER, S.G., WERLING, J.M., “Expansion control method for sand cores”, In: *Proceedings of the AFS Transactions*, v. 111, pp. 2–7, Illinois, EUA, 2003.

- [10] SHOWMAN, R.E., CLIFFORD, S.L., HARMON, S.B., “Sand additives for molds/cores for metal casting”, United State Patent n. US 2012/0199309 A1. Depositante: ASK Chemicals L.P. Depósito: 04 fev.2011. Concessão: 09 agosto.2012.
- [11] BENO, J., POREBA, M., BAJER, T., “Application of non-silica sand for high quality castings”, *Archives of Metallurgy and Materials*, v. 66, pp. 25–35, 2021.
- [12] COMISSÃO DE ESTUDOS DE MATÉRIAS PRIMAS, “Materiais granulares usados em fundição – determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura”, *CEMP*, v. 81, pp. 1 - 5 Maio 2003.
- [13] WERLING, J., “Evaluation of sands for the coremaking process: a practical approach”, In: *Proceedings of the AFS Transactions*, v. 110, pp. 1–10, Illinois, EUA, 2002.
- [14] TILCH, W., MARTIN, M., “Properties and applications of alternative moulding sand of lightweight casting”, *Moulding Material*, n. 3, pp. 18–31, 2006.
- [15] MCINTYRE, S., STROBL, M.S., “Adapting hot distortion curves to process control”, *Foundry Management & Technology*, pp. 22–26, Mar. 1998.
- [16] BRITISH CAST IRON RESEARCH ASSOCIATION, “Hot distortion test for chemically bonded sands”, In: British Cast Iron Research Association. *BCIRA Broadsheet*, Birmingham, British Cast Iron Research Association, pp.176–178, n. 177, 1983.
- [17] BUDAVÁRY, I., VARGA, L., “The effect of coremaking parameters on the thermal distortion behaviour on resin-coated sand”, *Materials Science and Engineering*, v. 45, n. 1, pp. 37–49, 2020.
- [18] GYARMATI, G., BUDAVÁRI, I., FEGYVERNEKI, G., *et al.*, “The effect of sand quality on the bending strength and thermal distortion of chemically bonded sand cores”, *Heliyon*, v. 7, n. 7, pp. e07624, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07624>. PubMed PMID: 34355104.
- [19] COMISSÃO DE ESTUDOS DE MATÉRIAS PRIMAS, “Corpos de Prova- Formas e Tipos de Ensaios” *CEMP*, v. E-11, pp. 1–17, São Paulo. Nov. 2015.
- [20] BROWN, J.R. “Sand and green sand”, In: Brown, J.R (ed), *Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook*, 1st ed, chapter 12, Inglaterra, Ed. Butterworth-Heinemann, 2000, pp. 146–164.
- [21] CAREY, P., SWARTZLANDER, M., *Sand binder systems parte II – resin/sand interactions*, Independence, OH, Foundry Management & Technology, pp. 8–12, 1998.
- [22] PEIXOTO, F., GUESSER, W., “Reutilização de areia regenerada térmicamente”, In: *CONAF – ABIFA*, São Paulo, Brasil, 24–26 Setembro 2003.