

Brasil x Espanha: Consumo de Energia Térmica e Emissões de CO₂ Envolvidos na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos

E. Monfort^a, A. Mezquita^a, E. Vaquer^a, H. J. Alves^b,

F. G. Melchíades^b, A. O. Boschi^{b*}

^a*Instituto de Tecnología Cerámica – ITC, Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas – AICE, Universitat Jaume I, Castellón, España*

^b*Laboratório de Revestimentos Cerâmicos – LaRC, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil*

**e-mail: daob@power.ufscar.br*

Resumo: A demanda de energia térmica da indústria de revestimentos cerâmicos é bastante elevada, sendo atendida quase por completo pela combustão do gás natural. Os gastos com geração de energia térmica representam uma grande parte do custo de produção de revestimentos cerâmicos, e as emissões de CO₂ resultantes desta atividade industrial são muito expressivas. Neste sentido, o aumento da eficiência térmica nos processos produtivos conhecidos atualmente deve ser buscado constantemente com o objetivo de reduzir o custo de fabricação e as emissões de CO₂. Para isso, é necessário dispor de uma base de dados de consumos energéticos e emissões de CO₂, a fim de conhecer a situação atual do setor e as possibilidades de aumentar a eficiência energética do processo. Dessa forma, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de levantar dados baseados em medições diretas em equipamentos industriais consumidores de gás natural, no Brasil e na Espanha, utilizando a mesma metodologia. Foram visitadas 65 empresas e analisados 130 equipamentos, sendo possível estabelecer comparações entre o consumo de diversas tipologias de produtos, etapas do processo produtivo, distintas rotas de processamento, equipamentos com características construtivas diferenciadas, dentre outros. As informações obtidas constituem um inédito banco de dados que representa a real situação dos setores de revestimentos cerâmicos do Brasil e da Espanha, com respeito ao consumo energético e às emissões de CO₂.

Palavras-chave: *energia térmica, gás natural, emissões de CO₂.*

1. Introdução

A produção mundial de revestimentos cerâmicos praticamente dobrou nos últimos dez anos, e países como Espanha e Brasil se destacam por contribuírem para este crescimento, atuando principalmente no desenvolvimento de produtos diferenciados e no aprimoramento dos processos produtivos. Na última década a Espanha e o Brasil estiveram sempre entre os quatro principais países produtores de revestimentos cerâmicos. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial e também apresenta o segundo maior mercado consumidor do produto no mundo. Já a Espanha ocupa a terceira posição no *ranking* de maiores exportadores mundiais e se destaca por produzir produtos de alto valor agregado.

Como consequência da expansão do setor a demanda de combustíveis para a geração de energia térmica, utilizada em várias etapas do processo produtivo (secagem, atomização e queima), aumentou significativamente, sendo um indicador direto do avanço da produção. O combustível mais utilizado pelas indústrias de revestimentos cerâmicos para geração de energia térmica é o gás natural, que consiste num combustível fóssil cuja combustão resulta principalmente na emissão de dióxido de carbono (CO₂). Por sua vez, o CO₂ é um dos gases de efeito estufa responsável pelas mudanças climáticas e pelo aquecimento global do planeta. As emissões de CO₂ na fabricação de revestimentos cerâmicos podem ser divididas em dois grupos: 1) Emissões de combustão: emissões produzidas durante a reação exotérmica de combustão entre o combustível e o comburente; 2) Emissões de processo: emissões causadas devido à decomposição dos carbonatos presentes nas matérias-primas, durante

a etapa de queima, e à decomposição da matéria orgânica presente nas peças, tanto no suporte como nas aplicações serigráficas.

Sabe-se que os gastos com energia térmica correspondem a uma das maiores parcelas do custo de produção dos revestimentos cerâmicos, e que as emissões de CO₂ resultantes desta atividade industrial são expressivas^{1,2}. Entretanto, existem poucos dados disponíveis sobre o consumo térmico envolvido na fabricação de revestimentos cerâmicos levando-se em conta as particularidades do processamento do material cerâmico, diversidade de equipamentos, condições de operação e características das matérias-primas, que servem como base para estimar com maior precisão as emissões de CO₂. O conhecimento por parte das indústrias sobre o consumo térmico envolvido na produção de revestimentos cerâmicos é essencial, pois permite que medidas corretivas relacionadas às condições de operação dos equipamentos possam ser tomadas quando necessárias, desperdícios sejam evitados e decisões sobre a aquisição de equipamentos sejam tomadas assertivamente, visando o uso mais eficiente da energia, a redução de custos e maior controle sobre as emissões de CO₂.

As emissões de gases de efeito estufa são objeto de estudo e controle em nível internacional. Na Espanha, a legislação vigente se baseia nas diretrizes européias sobre o sistema de comércio de emissões, e menos de 20% das empresas do setor de revestimentos cerâmicos superam o limite estabelecido, sendo, portanto, afetadas pelo sistema. No Brasil, não existe ainda uma legislação parecida com a européia, na qual as indústrias do setor de revestimentos cerâmicos poderiam se enquadrar³.

Neste artigo são apresentados os resultados de um trabalho sistemático realizado no Brasil e na Espanha, envolvendo o consumo de gás natural de fornos, secadores e atomizadores, de indústrias de revestimentos cerâmicos. Os dados obtidos foram tratados e organizados de acordo com a tipologia de produto produzida, características dos equipamentos, etapas dos processos produtivos e tecnologias de fabricação. Os resultados apresentados constituem um banco de dados inédito sobre o consumo térmico e as emissões de CO₂ inerentes ao processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, revelando as particularidades encontradas em cada país⁴.

A seguir são encontradas informações específicas sobre o perfil dos setores de revestimentos cerâmicos espanhol e brasileiro, e ainda, as principais características dos produtos fabricados.

O setor espanhol de revestimentos cerâmicos, desde o ano 2000 até 2008, produziu uma média anual de 600 milhões de m². A partir de 2008, a situação da crise financeira internacional propiciou um declínio da produção, alcançando um valor mínimo no ano de 2009. A Figura 1 mostra a evolução da produção nacional de revestimentos cerâmicos na Espanha desde o ano 2000 até 2010⁵.

Os dados correspondentes ao setor espanhol mostrados neste artigo correspondem ao ano de 2008. Em 2008, o setor espanhol de fabricação de revestimentos cerâmicos estava constituído por mais de 215 empresas, das quais 13 eram produtoras de pó atomizado. No processo produtivo se utiliza majoritariamente a preparação de matérias-primas por via úmida, a conformação das peças é realizada por prensagem, e a queima do suporte e do esmalte é efetuada de maneira conjunta, por monoqueima.

A localização das empresas está situada principalmente na Comunidade Valenciana, onde estão localizadas 87% do total, com uma cota de produção sobre o total nacional de aproximadamente 95%. Na Comunidade Valenciana, o maior número de empresas está instalado na província de Castellón.

No ano 2008, o setor espanhol de revestimentos cerâmicos produziu 495 milhões de m², pelo valor de cerca de 3.700 milhões de euros. Aproximadamente 58% da produção são destinadas à exportação para 180 países.

Os produtos fabricados principalmente pelo setor cerâmico espanhol de revestimentos compreendem: azulejos, que são revestimentos que apresentam uma elevada absorção de água, utilizados para revestimentos de paredes; grês esmaltado, que possui uma absorção de água menor do que o azulejo, adequado como piso em ambientes interiores e exteriores; e porcelanato, produto com uma absorção de água muito baixa, que pode ser utilizado tanto como piso como em fachadas, interiores ou exteriores, sendo fabricado nas formas polidas e sem polir, esmaltada e sem esmaltar.

Tanto os azulejos como os pisos esmaltados podem ser obtidos a partir de argilas de cor de queima vermelha ou branca. No ano

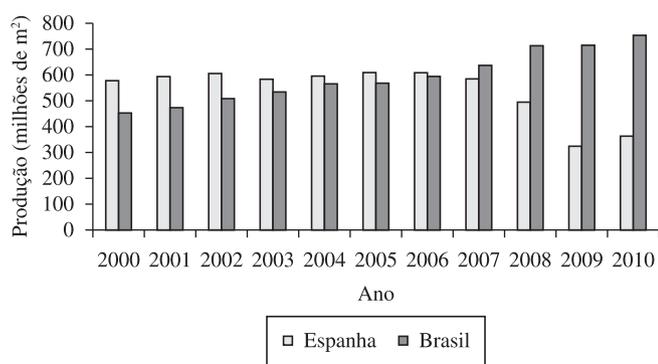


Figura 1. Evolução da produção de revestimentos cerâmicos na Espanha e no Brasil na última década.

de 2008, se estima que a produção nacional compôs-se da seguinte forma: 41% de azulejos, 35% de pisos, e quase 20% de porcelanato.

As emissões totais de dióxido de carbono originadas no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos atingiram, em 2008, 2,889 milhões de toneladas de CO₂, das quais 0,277 provém da decomposição dos carbonatos presentes nas formulações de azulejos e de grês, e os restantes 2,612, são emitidos pela combustão do gás natural, principal combustível utilizado na Espanha na fabricação de revestimentos cerâmicos.

Atualmente, a legislação espanhola que regula as emissões de gases de efeito estufa, está baseada na legislação europeia, em vigor desde 2003. Esta legislação afeta atualmente menos de 20% das empresas, mas a partir de 2013 a normativa irá mudar, e passarão a ser afetadas pelo regime europeu do comércio de emissões quase 60% das instalações⁶.

Diante desta situação, é necessário dispor de uma base de dados de consumos energéticos e emissões de CO₂, para conhecer a situação atual do setor e as possibilidades de aumentar a eficiência energética do processo.

Uma característica peculiar do setor de revestimentos cerâmicos brasileiro, é que as indústrias utilizam duas rotas de processamento distintas para a fabricação de seus produtos: “via úmida” e “via seca”, sendo 69% dos produtos fabricados por via seca e 31% por via úmida⁷.

A evolução da produção de revestimentos cerâmicos no Brasil pode ser observada na Figura 1. Neste caso, foram utilizados os dados disponíveis do ano de 2009 para realizar o estudo, por se tratar de um ano suficientemente representativo da situação habitual de funcionamento da indústria brasileira de revestimentos cerâmicos⁵.

No ano de 2009 o Brasil produziu 495.400.000 de m² por via seca (100% monoqueima vermelha) e 219.500.000 de m² por via úmida (5,5% grês vermelho, 22% azulejo branco, 22% porcelanato e 50,5% monoqueima branca), totalizando uma produção anual de 714.900.000 de m². Os pólos cerâmicos do Brasil concentram-se em duas regiões: Criciúma (Santa Catarina) e Santa Gertrudes (São Paulo), sendo que a grande maioria das indústrias de via seca está localizada na região de Santa Gertrudes. Os produtos obtidos por via seca, em geral, são placas cerâmicas esmaltadas que apresentam absorção de água entre 6 e 10% e suportes de cor de queima vermelha. O processamento do material por via seca é caracterizado pela preparação da massa por moagem a seco (~5% de umidade – o que dispensa o atomizador), prensagem (~9% de umidade) e monoqueima rápida (20-30 minutos).

A massa de via seca se destaca tanto por apresentar composição típica, quanto pela forma como é moída. A massa é formada, em geral, por apenas uma matéria-prima constituída naturalmente pelas proporções necessárias dos minerais que permitem a fabricação dos produtos desejados. Trata-se de uma massa formada somente por uma única argila, ou às vezes, pela mistura de várias argilas. A argila bruta extraída de jazidas (em blocos) é carregada por caminhões e transportada para secagem natural em pátios, onde ocorre a redução da umidade (valores próximos a 5%), homogeneização e destorroamento (britagem). Após o trabalho de pátio, o material segue para a moagem. Na moagem a seco a matéria-prima passa inicialmente pelo moinho primário (moinho de martelos), e em seguida, a fração mais dura que não conseguiu ser moída pelo mesmo é transportada para o moinho secundário (moinho pendular). O pó resultante é umidificado (~9%) e granulado. As etapas seguintes do processo são praticamente idênticas à via úmida.

Devido às exigências da agenda ambiental que o Brasil tem que cumprir, é extremamente importante conhecer o perfil de emissão de CO₂ de cada segmento industrial para traçar metas para o futuro. Estima-se que o país apresente um crescimento de 4 a 7% de seu produto interno bruto (PIB) até 2020. Entretanto, a meta para a redução das emissões de CO₂ é de 39% em âmbito nacional, considerando os patamares de emissão do ano de 2005. No estado

de São Paulo (estado cuja produção de revestimentos cerâmicos é superior a 70% da produção nacional) almejam-se reduções da ordem de 20% das emissões de CO₂ até o ano de 2020.

Conforme os dados disponíveis, o setor de revestimentos cerâmicos apresentou nos últimos dez anos um crescimento expressivo (incremento de cerca de 70% da produção nacional na última década) e as perspectivas para os próximos anos são ainda mais positivas. Sendo assim, o crescimento da produção de revestimentos cerâmicos no Brasil deverá potencializar a demanda de gás natural nos próximos anos, e conseqüentemente, aumentar as emissões de CO₂ decorrentes da utilização deste combustível. Tendo em vista as possibilidades e a necessidade de aumento da eficiência no uso do gás natural pelas indústrias, o desenvolvimento do setor deve ocorrer aliado às menores emissões de CO₂ possíveis.

Apesar da urgência deste tema, até o presente momento não existem dados disponíveis a respeito das emissões de CO₂ associadas ao setor de revestimentos cerâmicos no Brasil, tornando necessária a realização de um levantamento com dados qualitativos e quantitativos.

2. Objetivos e Alcance do Estudo

O levantamento das informações necessárias para a realização do trabalho na Espanha e no Brasil foi realizado utilizando a mesma metodologia (previamente definida), aplicada em número representativo de empresas de revestimentos cerâmicos em cada país entre os anos de 2008 e 2009. A seleção das empresas nas quais o trabalho seria realizado foi feita de modo que permitisse analisar o setor de revestimentos cerâmicos de cada país considerando suas principais características, bem como, levando em conta a capacidade de produção em m²/mês, tecnologia de produção (via seca ou via úmida), tipologia de produtos, características dos equipamentos consumidores, dentre outros. Na Tabela 1 são apresentados alguns dados sobre a amostra de empresas estudadas em cada país. Foram visitadas 65 empresas no total, sendo analisados 130 equipamentos. Os percentuais de produção alcançados são considerados adequados para a obtenção de dados representativos da situação dos setores cerâmicos do Brasil e da Espanha, com respeito ao consumo energético e às emissões de CO₂.

3. Metodologia

Inicialmente, todas as fábricas foram visitadas com os seguintes objetivos: conhecer as instalações; verificar as condições de operação dos equipamentos consumidores; verificar o local de instalação na tubulação e o funcionamento dos indicadores de consumo (manômetros e medidores de vazão do gás natural); indicar ações corretivas para garantir a precisão nas medidas, caso necessárias; estabelecer os pontos onde as medições deveriam ser realizadas e a frequência das mesmas; e levantar dados gerais sobre os equipamentos e os produtos produzidos.

As medidas experimentais nas instalações industriais foram realizadas em regime de funcionamento estacionário, sendo que durante as medidas não se produziram modificações das variáveis de funcionamento ao longo do tempo.

Sucessivas medidas de pressão, vazão e temperatura foram realizadas num determinado intervalo de tempo, em pontos pré-estabelecidos das tubulações localizados em regiões que antecediam a entrada do gás natural nos equipamentos consumidores. Os dados gerados foram tratados e corrigidos (normalizados com base nas CNTP e equação dos gases ideais), proporcionando conhecer o consumo térmico de cada equipamento avaliado e torná-los comparativos. De acordo com as informações sobre o produto, o volume de produção e as condições de operação dos equipamentos foi criado um banco de dados sobre o consumo térmico envolvido na fabricação de revestimentos cerâmicos, sendo possível estabelecer

comparações entre o consumo de diversas tipologias de produtos, etapas do processo produtivo, distintas rotas de processamento, equipamentos com características construtivas diferenciadas, etc. A unidade utilizada para expressar o consumo térmico específico nas situações abordadas foi o kWh.t⁻¹ de produto queimado, pois possibilita determinar a quantidade de energia envolvida no processamento de certa quantidade de massa de material produzido. Dessa forma, foi possível comparar o consumo térmico de várias tipologias de produtos obtidos por rotas distintas, como é o caso dos produtos de via seca e via úmida, e também com espessuras variadas, uma vez que a base de cálculo é a massa queimada (em toneladas) e não o metro quadrado. As emissões de CO₂ provenientes da combustão do gás natural foram calculadas de acordo com o volume total de gás natural consumido pelos setores, poder calorífico e fator de emissão do combustível. As emissões por decomposição dos minerais carbonatados durante a queima foram calculadas de acordo com o conteúdo de carbonatos presentes nas diversas tipologias de produtos e seus respectivos volumes de produção. As emissões produzidas pela decomposição da matéria orgânica não foram consideradas neste trabalho.

4. Resultados e Discussão

4.1. Consumo térmico

De acordo com um levantamento prévio realizado na Espanha e no Brasil, nos anos de 2008 e 2009, respectivamente, em ambos os países 92% da demanda de energia final necessária para a fabricação de revestimentos cerâmicos correspondem à energia térmica, conforme ilustra a Figura 2^{4,8}. Como o custo da energia térmica é um

Tabela 1. Amostra de empresas estudadas.

	Espanha	Brasil	
Ano	2008	2009	
Número de empresas participantes	55	10*	
Número de plantas produtivas participantes	65	14	
Cota de produção	Pó atomizado	48%	35%
	Revestimentos	34%	20%

*Cinco das dez empresas brasileiras produzem revestimentos por via seca.

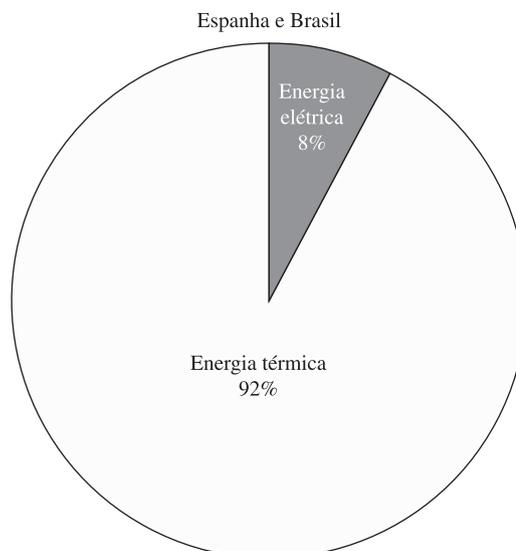


Figura 2. Distribuição de consumos energéticos no setor de fabricação de revestimentos cerâmicos e pó atomizado, durante o ano de 2008 (Espanha) e 2009 (Brasil).

dos principais insumos que atuam sobre o custo total de produção dos revestimentos cerâmicos, o conhecimento mais aprofundado sobre o consumo térmico envolvido nas etapas de produção torna-se uma importante ferramenta para as empresas.

Nas Tabelas 2, 4 e 6 são encontrados os valores de consumo térmico dos atomizadores, secadores e fornos avaliados, respectivamente. Em relação aos atomizadores, nota-se que os equipamentos do Brasil e da Espanha, em geral, possuem consumo térmico parecido (Tabela 2). Porém, no Brasil foram observadas maiores discrepâncias entre os consumos dos equipamentos, sendo que alguns atomizadores apresentaram consumo cerca de 40% maior do que os mais econômicos avaliados.

Na Espanha, é comum que os atomizadores utilizem como gases de secagem os gases de escape de turbinas a gás. As turbinas a gás são sistemas de cogeração que, a partir da combustão do gás natural, geram energia elétrica e energia térmica. A energia elétrica é consumida na própria planta produtiva, e se há excedentes, é vendida à companhia elétrica que está obrigada pela lei a adquiri-la. A energia térmica contida nos gases de escape é utilizada nos atomizadores, que contam também com um queimador de pós-combustão para terminar de cobrir as necessidades térmicas do secador, quando nos gases da turbina não há suficiente calor disponível para o processo de secagem.

Tabela 2. Consumo de energia térmica na etapa de atomização (referente ao PCS), em estado estacionário.

	Espanha	Brasil
Número de atomizadores	12	11
Consumo específico* kWh.t ⁻¹ sólido seco	476 ± 19	502 ± 87
kWh.t ⁻¹ queimado	510 ± 23	540 ± 100

*O Poder Calorífico Superior (PCS) do gás natural comercializado na Espanha e no Brasil são 39,83 MJ/Nm³ e 39,65 MJ/Nm³, respectivamente.

Tabela 3. Condições médias de operação na etapa de atomização.

Parâmetro	Espanha	Brasil
Produção de grânulo atomizado (t ss/h)	23 ± 4	21 ± 3
Conteúdo em sólidos da barbotina (%)	65,0 ± 0,7	63,0 ± 1,0
Umidade do grânulo atomizado (%)	6,2 ± 0,3	6,0 ± 0,5

Tabela 4. Consumo de energia térmica na etapa de secagem (referente ao PCS), em estado estacionário.

Tipo de secador	Espanha		Brasil			
	Via úmida		Via úmida		Via seca	
	Verticais	Horizontais	Verticais	Horizontais	Verticais	Horizontais
Número de equipamentos estudados	3	3	4	8	-	9
Consumo específico kWh.t ⁻¹ queimado	130 ± 19	139 ± 25	153 ± 18	164 ± 35	-	232 ± 90

Tabela 5. Condições médias de operação na etapa de secagem (referente ao PCS), em estado estacionário.

Parâmetro	Espanha		Brasil			
	Via úmida		Via úmida		Via seca	
	Verticais	Horizontais	Verticais	Horizontais	Verticais	Horizontais
Produção (kg queim/s)	2,2 ± 0,3	2,0 ± 0,6	2,4 ± 0,3	2,6 ± 0,2	-	3,0 ± 0,2
Umidade de entrada (%)	6,0 ± 0,3	6,0 ± 0,1	5,8 ± 0,2	5,8 ± 0,2	-	9,0 ± 0,5
Umidade de saída (%)	0,13 ± 0,09	0,5 ± 0,3	0,6 ± 0,2	0,7 ± 0,3	-	0,9 ± 0,4
Duração do ciclo de secagem (minuto)	77,9 ± 22,4	24,6 ± 2,8	80 ± 8	15 ± 2	-	10 ± 1
Temperatura máxima de secagem	172 ± 19	241 ± 40	160 ± 15	185 ± 20	-	270 ± 40

O consumo energético dos atomizadores na Espanha, mostrado na Tabela 2, corresponde à soma da energia fornecida pelos gases procedentes da turbina de cogeração e a energia proporcionada pelo queimador de pós-combustão.

Na Tabela 3 são encontradas as condições médias de operação dos atomizadores analisados na Espanha e no Brasil. A diferença mais significativa é observada no conteúdo em sólidos da barbotina, pois no Brasil as suspensões possuem valores, em média, 2% inferiores aos observados na Espanha. Esta poderia ser a causa do menor consumo energético dos atomizadores do setor espanhol, com relação aos brasileiros.

Na Tabela 4 são encontrados os consumos dos secadores de acordo com suas características construtivas (verticais ou horizontais) e tecnologia de fabricação dos revestimentos cerâmicos (via seca e via úmida). Também, na Tabela 5 são reveladas as condições médias de trabalho dos secadores estudados na Espanha e no Brasil.

Os secadores utilizados nas fábricas espanholas (via úmida) são mais econômicos que os avaliados no Brasil. Na Espanha os secadores verticais e horizontais monitorados possuem consumo térmico parecidos. O maior consumo dos secadores da via seca pode estar associado à maior umidade utilizada para a prensagem desta tipologia de produtos no Brasil (~9%) e à manutenção de elevadas temperaturas (200-320 °C) que são utilizadas para a retirada rápida de água em ciclos curtos (10 minutos - secadores horizontais), garantindo uma elevada produtividade. No Brasil as condições de secagem por via úmida são mais amenas do que as encontradas na via seca: umidade para prensagem entre 5 e 6,5%, temperatura de secagem entre 150 e 200 °C e ciclos de 15 minutos (secadores horizontais). As maiores discrepâncias foram observadas entre os consumos específicos dos secadores da via seca, sendo possível encontrar equipamentos que consumiam duas vezes mais do que os mais econômicos avaliados.

Nos secadores verticais do processo via úmida, não são observadas diferenças significativas entre os parâmetros de secagem analisados em ambos os países. Contudo, o consumo energético na Espanha é menor que no Brasil. Em relação aos secadores horizontais, na Espanha, apesar de ter maior duração e temperatura máxima no ciclo de secagem, o consumo energético também é menor que no Brasil. Isto se deve possivelmente por uma diferente regulação nas instalações, o que interfere sobre a eficiência do processo de secagem, resultando nas diferenças de consumo observadas⁹.

Na Tabela 6 foram organizados os valores de consumo térmico na etapa de queima, das tipologias de revestimentos cerâmicos mais

importantes para os setores brasileiro e espanhol. São encontradas na Tabela 7 as características de cada tipologia de produto avaliado neste trabalho e os parâmetros de queima utilizados.

No Brasil, pode-se notar que a queima de produtos de via úmida consome maior energia térmica, do que os produtos de via seca (Tabela 6). Isso pode ser explicado pelo fato de que os fornos avaliados na via úmida são de uma geração mais antiga do que os encontrados na via seca, o que pode justificar o maior consumo. Além disso, os produtos produzidos por via úmida possuem ciclos térmicos mais longos do que os de via seca e temperaturas máximas superiores, uma vez que as matérias-primas utilizadas são mais refratárias (Tabela 7). Em geral, as massas de via seca brasileiras são constituídas exclusivamente por argilas vermelhas de caráter altamente fundente, que permitem a utilização de baixas temperaturas de queima e ciclos muito rápidos (Tabela 7). Entretanto, quando se compara o grês vermelho e a monoqueima vermelha, ambos fabricados utilizando argilas com propriedades parecidas, o maior consumo térmico do grês vermelho pode ser atribuído ao ciclo térmico mais longo e às maiores temperaturas de queima, tendo em vista que uma menor porosidade deve ser alcançada.

Na Espanha, os resultados obtidos mostram que, em geral, o consumo específico médio da queima por unidade de massa dos produtos porosos é maior que o obtido em produtos gresificados. Isto se deve ao fato de que ocorre a reação de decomposição dos carbonatos presentes na composição, que é endotérmica (ou seja, envolve absorção de energia), e isso exige que os ciclos térmicos

empregados para a queima de produtos porosos devam ter uma etapa de pré-aquecimento com elevada demanda energética. Os azulejos são os produtos formulados com argilas de coloração branca que apresentam o maior consumo, devido aos maiores tempos de queima que requeridos por estes produtos.

Dentre os produtos gresificados, o porcelanato é o que apresenta maior consumo, por causa da maior temperatura de queima e da duração do ciclo térmico. Se estes mesmos valores de consumo específico forem expressos por metro quadrado, o porcelanato torna-se o produto que apresenta o maior consumo, devido ao seu maior peso específico médio.

De acordo com a Tabela 8 o consumo térmico médio da via seca é dividido em 71% na etapa de queima e 29% na etapa de secagem, o que revela que o consumo dos fornos é aproximadamente 2,5 vezes maior do que o consumo dos secadores. Já na via úmida a etapa de atomização é responsável por 39% do consumo térmico total e os fornos possuem um consumo 4,3 vezes maior do que os secadores. O consumo médio total da via úmida brasileira é inferior ao apresentado pela via úmida espanhola (1383 e 1428 kWh.t⁻¹, respectivamente), o que se justifica pelo menor consumo específico dos fornos avaliados no Brasil, que por sua vez está relacionado aos ciclos térmicos mais curtos, devido à obtenção de produtos com espessuras menores (Tabela 7) e matérias-primas mais fundentes.

Na Tabela 8 encontra-se o resumo dos resultados obtidos no estudo de consumo de energia térmica por etapas, para revestimentos prensados fabricados por monoqueima. Aparece indicado tanto o

Tabela 6. Consumo de energia térmica na etapa de queima (referente ao PCS), em estado estacionário.

Produto		Azulejo vermelho	Azulejo branco	Grês vermelho	Porcelanato	Monoqueima branca	Monoqueima vermelha	Total valor médio	
Consumo específico (kWh.t ⁻¹ queimado)	Espanha	816 ± 27	885 ± 51	724 ± 18	802 ± 20	-	-	793 ± 14	
	Brasil	Via úmida	-	688 ± 99	635 ± 5	705 ± 45	724 ± 70	-	683 ± 73
		Via seca	-	-	-	-	-	575 ± 49	575 ± 49
Consumo específico (kWh.m ⁻² queimado)	Espanha	13,4 ± 0,5	16,0 ± 1,4	14,3 ± 0,4	17,4 ± 0,6	-	-	15,5 ± 0,4	
	Brasil	Via úmida	-	10,7 ± 2,1	9,5 ± 0,3	13,7 ± 1,3	10,9 ± 1,8	-	12,1 ± 0,7
		Via seca	-	-	-	-	-	8,3 ± 1,2	8,3 ± 1,2

Tabela 7. Parâmetros de funcionamento médios da etapa de queima em fornos a rolo em estado estacionário - revestimentos cerâmicos prensados.

	Material	Funcionamento		Produto final				
		Conteúdo de carbonatos (%)	Perdas por calcinação (%)	Duração do ciclo (minuto)	Temperatura máxima (°C)	Porosidade expressa como absorção de água (**) (%)	Espessura média (mm)	Peso médio específico (kg.m ⁻²)
Espanha	Azulejo vermelho	13,1 ± 0,2	9,9 ± 0,1	47 ± 2	1126 ± 6	>10	9,4 ± 0,3	16,4 ± 0,5
	Azulejo branco	12,5 ± 0,6	10,1 ± 0,3	59 ± 5	1144 ± 6	>10	10,5 ± 0,6	18,0 ± 0,5
	Grês vermelho	3,3 ± 0,1	5,5 ± 0,1	46 ± 1	1147 ± 2	0,5-6,0	9,3 ± 0,2	19,7 ± 0,5
	Porcelanato	<0,5	4,0 ± 0,1	57 ± 2	1192 ± 2	<0,5	9,7 ± 0,3	21,7 ± 0,6
Brasil	Azulejo branco	14,0 ± 1,0	12,0 ± 0,6	36 ± 2	1152 ± 7	>10,0	8,5 ± 0,2	15,5 ± 0,5
	Grês vermelho	1,8 ± 0,8	4,6 ± 0,2	33 ± 3	1170 ± 10	0,5-6,0	9,0 ± 0,3	17,5 ± 0,6
	Porcelanato	1,0 ± 0,7	4,0 ± 0,4	45 ± 7	1205 ± 15	≤0,5 (*)	9,5 ± 0,4	19,5 ± 0,7
	Monoqueima Branca	1,5 ± 0,5	4,4 ± 0,4	30 ± 2	1175 ± 12	6,0-10,0	8,0 ± 0,2	15,0 ± 0,5
	Monoqueima Vermelha	1,0 ± 0,5	4,0 ± 0,5	23 ± 3	1140 ± 10	6,0-10,0	7,0 ± 0,5	14,0 ± 0,6

*No Brasil, de acordo com a normativa NBR 15463/2007, o porcelanato técnico (polido) deve apresentar absorção de água ≤ 0,1. **Intervalos de absorção de água para classificar os produtos segundo a norma ISO 13006.

intervalo de variação quanto o valor médio de consumo em cada uma das etapas estudadas. Todos os valores estão expressos em toneladas de produto queimado, de forma que é possível realizar a adição direta dos consumos nas distintas etapas para calcular o consumo total. Também, na mesma tabela são indicados os intervalos de consumo de energia térmica apresentados no BREF (documento de referência sobre as melhores técnicas disponíveis na indústria cerâmica, segundo normativa europeia) para cada uma das etapas do processo de fabricação de produtos cerâmicos e o ponto central do referido intervalo¹⁰.

Na etapa de atomização, os intervalos de variação dos consumos obtidos nos estudos realizados na Espanha e no Brasil são menores que o indicado pelo BREF, sendo que o consumo médio na Espanha é similar ao ponto central indicado pelo BREF e no Brasil é superior.

Nas etapas de secagem e queima a amplitude dos intervalos de consumos obtidos nos estudos experimentais é menor que o intervalo indicado no BREF, e o valor médio do consumo em ambas as etapas nos dois países estudados é inferior ao valor do ponto central calculado a partir do intervalo indicado no BREF.

O consumo global de energia nos processos via úmida analisados na Espanha e no Brasil é similar; no entanto, o consumo global do processo via seca desenvolvido no Brasil é muito inferior (cerca de 42%) ao consumo médio dos processos via úmida. Entretanto, os valores devem ser interpretados com prudência, já que o processo de

via seca desenvolvido no Brasil apresenta algumas particularidades, uma vez que se produz uma única tipologia de produto (monoqueima vermelha) com formatos inferiores a 55 × 55 cm², resultando em produtos queimados com elevada porosidade (absorção de água compreendida entre 6,0 e 10,0%).

Estes dados indicam que os setores espanhol e brasileiro de fabricação de revestimentos cerâmicos, utilizam as Melhores Tecnologias Disponíveis, e que realizam uma gestão eficaz destas tecnologias¹¹, o que indica que a capacidade de redução do consumo e das emissões por unidade de produto em curto prazo está limitada, sendo necessário aplicar medidas de otimização de processo e de economia energética^{12,13}.

4.2. Emissões de CO₂

Na Tabela 9 são apresentadas as emissões médias de CO₂ provenientes da fabricação de revestimentos cerâmicos na Espanha e no Brasil. Os dados apresentados correspondem às emissões resultantes da combustão de gás natural em cada etapa do processo, em estado estacionário. As emissões geradas na etapa de queima (emissões de combustão e de processo) estão organizadas por tipologia de produto, como pode ser observado na Figura 3.

Em geral, as emissões específicas de CO₂ que provém da obtenção de produtos por via úmida no Brasil e na Espanha são semelhantes. Por sua vez, as emissões resultantes da produção de revestimentos

Tabela 8. Consumos de energia térmica obtidos e comparados com o BREF (todos os valores estão expressos em kWh.t⁻¹ queimado, com base no PCS).

	Estudo do setor espanhol		Estudo do setor brasileiro				BREF	
	Intervalo	Valor médio	Via úmida		Via seca		Intervalo	Ponto central ^(*)
			Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio		
Atomização	387-621	510 ± 23	375-637	540 ± 100	-	-	339-679	509
Secagem	97-160	125 ± 20	126-236	160 ± 30	135-444	232 ± 90	92-247	170
Queima	578-1182	793 ± 14	605-892	683 ± 73	522-647	575 ± 49	586-1480	1033
Total	1062-1963	1428 ± 57	1106-1765	1383 ± 203	657-1091	807 ± 139	1017-2406	1712

*O ponto central foi calculado como a média aritmética dos extremos do intervalo.

Tabela 9. Emissões específicas de CO₂ no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos (kg CO₂.t⁻¹ queimado), em estado estacionário.

Etapa do processo	Emissões de combustão			Emissões de processo			Total			
	Espanha*	Brasil**		Espanha*	Brasil**		Espanha*	Brasil**		
		Via úmida	Via seca		Via úmida	Via seca		Via úmida	Via seca	
Atomização	93 ± 4	99 ± 5	-	-	-	-	93 ± 4	99 ± 5	-	
Secagem	23 ± 2	29 ± 2	42 ± 4	-	-	-	23 ± 2	29 ± 2	42 ± 4	
Queima	Azulejo vermelho	149 ± 5	-	64 ± 1	-	-	213 ± 5	-	-	
	Azulejo claro	161 ± 9	126 ± 11	-	61 ± 3	70 ± 3	222 ± 10	196 ± 12	-	
	Grês vermelho	132 ± 3	116 ± 2	-	15 ± 1	8 ± 2	147 ± 3	124 ± 2	-	
	Porcelanato	147 ± 4	129 ± 5	-	<1	5 ± 1	147 ± 4	134 ± 5	-	
	Monoqueima vermelha (esmaltada)	-	-	105 ± 6	-	-	5 ± 1	-	-	110 ± 6
	Monoqueima clara (esmaltada)	-	132 ± 8	-	-	7 ± 1	-	139 ± 8	-	
Total	Azulejo vermelho	265 ± 11	-	64 ± 1	-	-	329 ± 11	-	-	
	Azulejo claro	277 ± 15	254 ± 18	-	61 ± 3	70 ± 3	338 ± 18	324 ± 20	-	
	Grês vermelho	248 ± 9	244 ± 9	-	15 ± 1	8 ± 2	263 ± 9	252 ± 9	-	
	Porcelanato	263 ± 10	257 ± 12	-	<1	5 ± 1	263 ± 10	262 ± 12	-	
	Monoqueima vermelha (esmaltada)	-	-	147 ± 10	-	-	5 ± 1	-	-	152 ± 10
	Monoqueima clara (esmaltada)	-	260 ± 15	-	-	7 ± 1	-	-	267 ± 15	-

*Na Espanha, o fator de emissão do gás natural é de 202 g CO₂.kWh⁻¹.

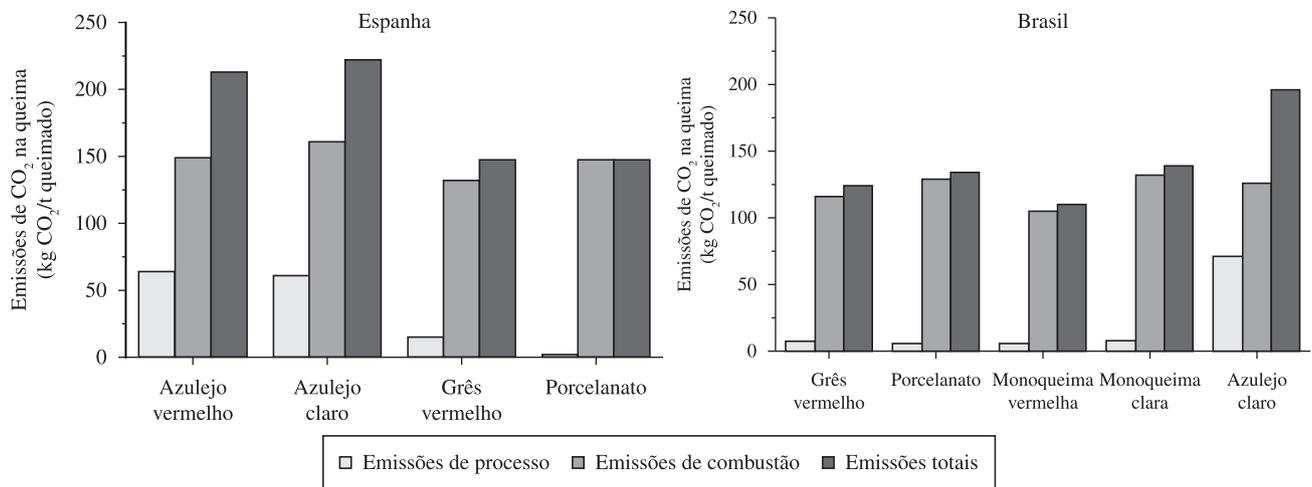


Figura 3. Emissões de CO₂ na etapa de queima (estado estacionário).

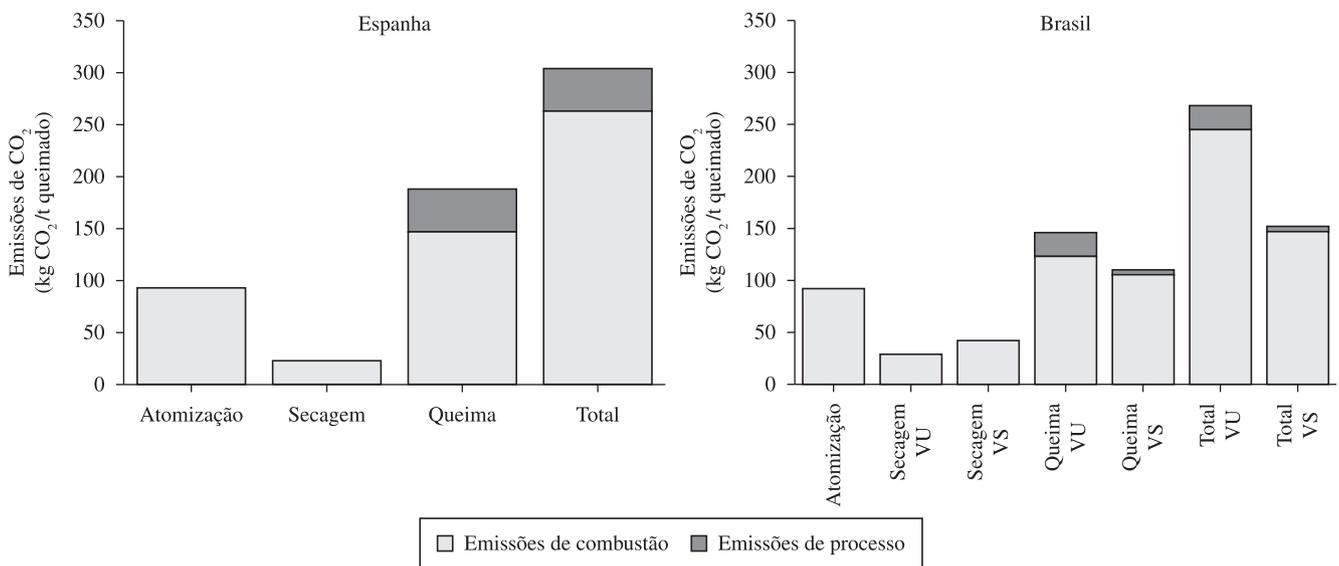


Figura 4. Emissões médias de CO₂ (estado estacionário).

Tabela 10. Emissões específicas de CO₂ no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos.

	Emissões de CO ₂ (%)			Emissões específicas (kg CO ₂ .t ⁻¹ queimado)	Emissões específicas (kg CO ₂ .m ⁻² queimado)	
	Emissões de combustão	Emissões do processo	Total			
Espanha	91	9	100	304	5,76	
Brasil	Via úmida	90	10	100	285	4,81
	Via seca	97	3	100	152	2,13

cerâmicos por via seca são muito menores que por via úmida, pois na via seca os ciclos térmicos utilizados na queima dos produtos são mais curtos e as matérias-primas possuem baixos teores de carbonatos, o que implica em menores níveis de emissões de combustão e de processo, respectivamente (Tabela 9 e Figura 4).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 10, as emissões específicas envolvidas na produção de revestimentos cerâmicos por via úmida na Espanha e no Brasil são parecidas. Já o processo de via seca, por dispensar a etapa de atomização, utilizar ciclos de queima curtos e matérias-primas com baixos teores de carbonatos, emite à atmosfera quase 50% a menos de CO₂ por tonelada de produto quando comparado à via úmida.

A evolução das emissões totais na última década nos setores espanhol e brasileiro é apresentada na Figura 5. Nota-se como, na

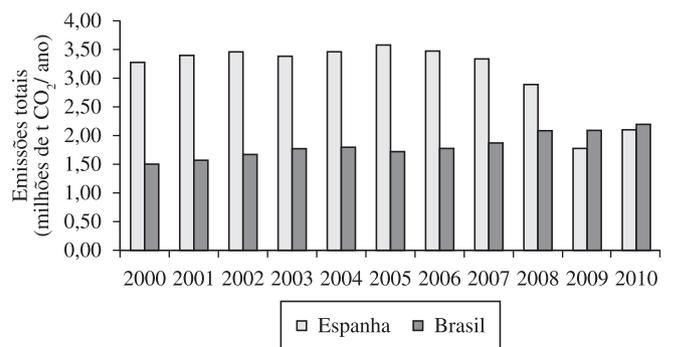


Figura 5. Evolução das emissões setoriais de CO₂ na Espanha e no Brasil.

Espanha, dado que não houve nenhuma mudança tecnológica de relevância no processo produtivo no período de tempo considerado, a evolução das emissões é paralela à da produção nacional. No Brasil, o aumento progressivo da produção na última década foi o principal fator responsável pelo aumento das emissões. Nota-se que apesar da produção nacional aumentar de mais de 65% nos últimos 10 anos (Figura 2), como os produtos de via seca impulsionaram este crescimento, o incremento das emissões totais foi inferior a 46% no mesmo período (Figura 5), uma vez que os produtos de via seca possuem menor emissão específica.

5. Conclusões

As principais conclusões do trabalho realizado são as seguintes:

- Nos dois países analisados, Espanha e Brasil, 92% da demanda final de energia do setor de fabricação de revestimentos cerâmicos e grânulos atomizados, correspondem ao consumo de energia térmica, enquanto que o consumo de energia elétrica representa 8% do consumo total de energia;
- O consumo energético dos atomizadores no Brasil é superior ao dos atomizadores na Espanha. A diferença observada possivelmente se deve ao maior conteúdo em sólidos das suspensões na Espanha;
- A fabricação de grânulos atomizados na Espanha é realizada geralmente com a entrada de calor proveniente de sistemas de cogeração. A energia restante necessária para o processo de secagem, quando necessária, é fornecida por queimadores de pós-combustão;
- Os secadores verticais e horizontais empregados no processo por via úmida do Brasil, mostram um maior consumo energético que os da Espanha, apesar dos parâmetros de trabalho serem similares. As diferenças encontradas podem ser explicadas pelas diferentes formas de regular os secadores que incidem de maneira distinta sobre a eficiência do processo;
- Na indústria brasileira, os secadores horizontais utilizados no processamento via seca têm um maior consumo que os utilizados no processo via úmida, devido à maior umidade de entrada dos suportes a secar;
- O consumo da etapa de queima no processo com moagem via úmida, é menor no Brasil, provavelmente devido à maior fundência das matérias-primas empregadas, que possibilitam o uso de ciclos de queima mais curtos;
- No Brasil, as matérias-primas utilizadas no processo via seca são muito fundentes, o que permite o emprego de ciclos de queima muito curtos, e por isso o consumo energético dos fornos que fabricam o produto (monoqueima vermelha) é inferior ao dos fornos que processam outros produtos obtidos por via úmida;

Os valores de consumos energéticos médios por etapas obtidos nos estudos realizados se situam no intervalo indicado no documento BREF da Comissão Europeia. Pode-se concluir que as indústrias cerâmicas espanhola e brasileira estão utilizando de modo geral as Melhores Técnicas Disponíveis. Na situação atual, é possível realizar uma redução de consumos significativa em nível individual aplicando medidas de otimização de processo e de economia energética, apesar de que as margens de redução em nível setorial são relativamente estreitas em ambos os países. Uma redução significativa das emissões setoriais somente parece possível com mudanças tecnológicas importantes nos equipamentos consumidores de energia térmica e/ou com a substituição das atuais fontes de energia;

- Em geral, as emissões específicas no processamento de revestimentos cerâmicos por via úmida na Espanha e no Brasil são similares. Já o processo por via seca utilizado no Brasil apresenta menores emissões devido à eliminação da etapa de secagem por atomização e ao menor conteúdo de carbonatos das matérias-primas utilizadas. Porém, o produto obtido por este processo pode possuir limitações quanto ao seu uso em determinadas aplicações;
- A evolução das emissões totais de CO₂ na Espanha na última década foi paralela à da produção, uma vez que não foram produzidas mudanças significativas no processo produtivo. Entretanto, no Brasil o crescimento progressivo das emissões foi inferior ao da produção, pois grande parte do incremento da produção nacional deve-se à fabricação de produtos de via seca, que por sua vez possuem menor emissão específica.

Referências

1. CRASTA, G. P. Costi e ricavi dell'industria ceramica italiana. **Ceramic world review**, v. 65, n. 16, p. 46-50, 2006.
2. ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Consumo de gás natural na indústria de revestimentos cerâmicos brasileira. **Cerâmica**, v. 54, p. 326-331, 2008.
3. UNIÓN EUROPEA. Parlamento Europeo y del Consejo. Directiva nº 2009/29/CE, de 23 de Abril de 2009. Modifica la Directiva 2003/87/CE, para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. **Diario Oficial de la Unión Europea**, 5 jun. 2009.
4. MONFORT, E. et al. Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 49, n. 4, p. 303-310, 2010.
5. GIACOMINI, P. World production and consumption of ceramic tiles. **Ceramic world review**, v. 88, p. 52-68, 2010.
6. MEZQUITA, A.; MONFORT, E.; ZAERA, V. Sector azulejero y comercio de emisiones: reducción de emisiones de CO₂, benchmarking europeo. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 48, n. 4, p. 211-222, 2009.
7. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO - ANFACER. Disponível em: <www.anfacer.org.br>. Acesso em: 15 abr. 2011.
8. ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Levantamento inicial do consumo de energias térmica e elétrica na indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 1-2, p. 17-21, 2007.
9. MALLOL, G. et al. Estudio de la operación de secado de los soportes de las baldosas cerámicas en secaderos verticales. **Cerámica Información**, n. 287, p. 81-93, 2002.
10. EUROPEAN COMMISSION. **Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry**. Sevilla: European commission, European IPPC Bureau, 2007. Disponível em: <http://ftp.jrc.es/eippcb/doc/cer_bref_0807.pdf>. Acesso em: 2009 jun. 25.
11. ESCARDINO, A. *El esfuerzo en innovación de la industria cerámica de la Comunidad Valenciana para reducir las emisiones de dióxido de carbono*. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, DESDE LA CIENCIA A LA SOCIEDAD, 2005, Valencia. **Anais...** Valencia: Generalitat Valenciana, 2005. p. 121-133.
12. MONFORT, E. et al. Estudio de la combustión en hornos industriales de fabricación de baldosas cerámicas. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 11., 2010, Castellon. **Anais...** Instituto de Tecnología Cerámica - AICE ITC, 2010.
13. ENRIQUE, J. E. et al. Improving energy efficiency in single-deck kilns by optimization of the process variables. **Ceramic forum international**, v. 72, n. 5, p. 255-260, 1995.