

Estudo das propriedades de secagem de cerâmica vermelha: Uma revisão **(Study of drying properties about heavy clay ceramics: A review)**

A. Zaccaron^{1*}; M. Dal Bó², M. Peterson¹, V.S. Nandi¹, O.R.K. Montedo¹, E. Angioletto¹,
A.M. Bernadin¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - PPGCEM
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC
Av Universitária 1105, Criciúma, SC, 88806-000, Brasil

²Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC – Campus Criciúma
Rod. SC-443 845 - Vila Rica, Criciúma, SC, 88813-600, Brasil

*alexandrezaccaron@hotmail.com

Resumo

A fabricação de materiais cerâmicos a base de argila está unida a elevados percentuais de umidade durante o processo de conformação. Posterior a isso, no tratamento térmico, há a necessidade de remoção quase que completa dessa umidade antes da queima, tal ação denomina-se como secagem. Sabe-se que a retirada da umidade da peça é uma etapa bastante delicada na fabricação de cerâmica vermelha, sendo responsável por perdas processuais bastante expressivas caso não realizada de forma adequada. Devido a esse fator, se faz de grande importância a necessidade do conhecimento das principais propriedades envolvidas no processo de secagem, desde a interação da matéria-prima com água até os fenômenos responsáveis pela remoção dessa água do corpo cerâmico.

Palavras chave: Argila, secagem, cerâmica vermelha.

Abstract

The manufacture of clay-based ceramic materials is linked to high percentages of moisture during the forming process. Subsequently to this, in the heat treatment, there is a need for almost complete removal of this moisture before burning, such action is called drying. It is known that the removal of moisture from the part is a very delicate stage in the manufacture of red ceramics, being responsible for the significant production losses, if not performed properly. Due to this factor, it is of great importance the knowledge of the main properties involved in the drying process, from the interaction of the raw material with the water to the phenomena responsible for the removal of this water from the ceramic body.

Keywords: Clay, drying, heavy clay ceramic.

INTRODUÇÃO

Por muitos milhares de anos, a argila tem sido amplamente utilizada como parte integrante de materiais e produtos de construção. Exemplos dos principais produtos de argila estrutural são tijolos, blocos e telhas. Piso e azulejos são exemplos de produtos não estruturais feitos de argila. Edifícios feitos de materiais argilosos remontam aos primeiros períodos de desenvolvimento civilizado [1,2].

O uso de produtos à base de argila com durabilidade, resistência, isolamento acústico e resistência ao fogo significa que ainda existe uma demanda considerável em uma variedade de setores, muito embora há a disponibilidade de materiais alternativos modernos, como concreto, fibra de vidro / resinas compostas, aço e plásticos [3].

Acredita-se que os tijolos de barro cozidos ao sol tenham sido usados pela primeira vez por volta de 8000 a.C. enquanto tijolos de barro cozido usavam cerca de 4500 a.C. [4–6]. Na Europa, os romanos introduziram tijolos à base de argila durante os séculos IX e X e milhares de igrejas e catedrais foram construídas em alvenaria durante a Idade Média [4]. Os edifícios de arranha-céus mais antigos do mundo estão localizados na cidade de Shibam, no Iêmen, nos quais foram construídos com blocos de argila [7,8].

Em 2013, a produção anual de tijolos foi de cerca de 1391 bilhões de unidades em todo o mundo [5]. Espera-se que este número aumente com o rápido desenvolvimento da indústria da construção a nível global, juntamente com um aumento esperado da população mundial [9,10].

A conformação de peças a partir de argila, para cerâmica estrutural, como telhas, blocos e tijolos, é comumente reconhecida pelos altos teores de umidade envolvidos [11,12]. Em contrapartida, a necessidade desses elevados gradientes de umidades, refletem posteriormente durante o processo de eliminação desses [13]. A evolução no processo fabril também está associada a mecanismos para remoção de umidade na produção de artefatos cerâmicos [14].

O processo térmico da fabricação de cerâmica vermelha se inicia pela secagem da peça. O termo “secagem” é utilizado para descrever o processo de remoção higroscópica de um sólido [15]. Muitas vezes, vem a ser uma das operações mais complexas do processo fabril, pois além da perda de umidade, na qual uma série de modificações, principalmente físicas, ocorrem no corpo cerâmico, também ocorrem alterações dimensionais expressivas no produto, mesmo antes da queima [16]. Devido à grande importância desse processo na fabricação de cerâmica, a secagem tem sido uma parte importante de pesquisas desde os anos 1980, concentrando estudos em dois pontos: “teoria de secagem” e “equipamentos de secagem” [17,18].

Do ponto de vista mecânico a secagem do material cerâmico consiste de dois processos distintos: difusão de água líquida em todo o corpo cerâmico e evaporação da superfície. A redução da umidade e a estabilidade do produto dependem da relação entre esses dois mecanismos. No que diz respeito ao primeiro passo de difusão, é necessário um gradiente de umidade dentro da própria peça: a magnitude do gradiente e a permeabilidade determinam a taxa de migração da água, enquanto a espessura (e, portanto, a distância que as moléculas devem percorrer para atingir a superfície) regula o fluxo (ou taxa de produção) de água. A etapa de evaporação é função da temperatura (a pressão de vapor da água), das condições termo higrométricas do ambiente e da maneira como o vapor é removido da superfície [19].

Portanto, como base no já explanado, a secagem é uma etapa importante do processo de produção e contribui significativamente para a qualidade do produto final [20], pois durante a secagem, ocorrem tensões internas devido aos gradientes de temperatura e umidade [21], e essas tensões podem produzir defeitos [22–25] ou a perda do produto [26,27]. Devido a este fato, os processos de secagem de materiais argilosos constituem um assunto de grande interesse na literatura [28–30].

Baseado nestas afirmações o presente trabalho tem como finalidade apresentar uma pesquisa aprofundada referente ao tema térmico de secagem. Objetivando entender melhor este comportamento que há anos está sendo estudado e aprofundado por diversos autores de todo o mundo.

REVISÃO DE PESQUISA

Argila

A argila é a mais antiga matéria-prima usada pelo homem, sendo definida como uma terra que forma uma massa pegajosa quando misturada à água. Uma vez molhada essa massa é prontamente moldável, após seca, torna-se dura e quebradiça, retendo sua forma. Além disso, se aquecida, torna-se ainda mais resistente e insuscetível à ação da água. Tal material se presta claramente à confecção de artigos de todas as formas [31].

As argilas são os principais componentes da fração mineral dos solos. São adsorventes naturais eficazes devido aos seus pequenos tamanhos de partícula, estruturas lamelares (ao contrário das partículas de areia e de silte) e superfícies carregadas negativamente, o que as torna bons adsorventes de cátions com grandes áreas de superfície reativa para troca de íons ou

atração eletrostática. Estes fatores permitem que tenham interação com a água e que sejam facilmente moldadas [32,33].

As argilas servem como insumo em uma série de atividades econômicas, porém, é na indústria que a utilização do material argiloso se destaca, entrando em todas as classificações industriais, desde a extrativista, de transformação, que dará insumos para a construção civil e até mesmo serve como matéria-prima para processamento químico. A riqueza mineral aliada a uma grande disponibilidade natural e outras propriedades importantes torna a argila uma matéria-prima de amplas possibilidades de utilização industrial principalmente para fabricação de peças cerâmicas [34–36].

As cerâmicas são definidas como compostos sólidos que são formados pela aplicação de calor e, por vezes, calor e pressão. Compreendem pelo menos dois elementos, desde que um deles seja um sólido elementar metálico ou não metálico. Os outros elementos podem ser um metal ou outro sólido elementar não metálico [37].

Os grupos cerâmicos podem ser classificados com base no emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, textura da massa padrão, além de outras características cerâmicas ou técnico-econômicas [38].

Quanto às aplicações, têm-se as cerâmicas tradicionais, que são bastante comuns na fabricação de insumos para alvenaria, revestimento e de louças sanitárias. As aplicações de cerâmicas avançadas incluem isolamento térmico, refratariedade, materiais ferroelétricos, materiais semicondutores, isoladores em aplicações eletrônicas, dielétricos de micro-ondas, magnéticos e supercondutores, catálise, propriedades anticorrosão, etc. [37].

Para a utilização das argilas em processos industriais é importante e indispensável uma identificação completa do tipo de argila e de suas propriedades, para estabelecer quais as formulações e condições de processamento são mais adequadas para se obter produtos com as propriedades finais desejadas. As propriedades do produto final estão estreitamente relacionadas às características iniciais das matérias-primas, como textura, características química, composição mineralógica, plasticidade, dentre outras [35,39,40].

A produção de cerâmica vermelha depende muito das características de suas matérias-primas, por isso a extrema importância de realizações dos ensaios experimentais. É sabido que as argilas são compostas de material argiloso e material não-plástico. Esses materiais não-plásticos, representados essencialmente por areias, micas, óxido de ferro e outros, atuam como agentes não-plásticos nas composições, visto que reduzem a plasticidade quando misturados com os materiais argilosos. As argilas plásticas apresentam textura muito fina, isto é, tamanhos abaixo de 2 μm , e como consequência, o processo de composição contendo excessivamente este

tipo de argila torna-se complicado. Para facilitar o processo de fabricação, são introduzidas outras argilas (denominadas arenosas), que apresentam um maior teor de impurezas misturadas aos argilominerais, reduzindo a plasticidade da massa. Nesse caso, há necessidade de se fazer uma mistura entre argilas, juntamente com os materiais não-plásticos, a fim de se obter uma distribuição de tamanho de partículas adequada ao processamento e às características de qualidade do produto desejado [41].

A distribuição de tamanho de partículas é a classificação das partículas de um material sólido por seus determinados tamanhos. Como influencia muitas propriedades dos argilominerais, a sua medida é muito importante para a caracterização de qualquer produto cerâmico [42].

Quase todos os artigos científicos sobre fabricação de alvenaria estrutural mostram a composição química da argila sendo bastante semelhante entre si. Isso pode ser explicado porque a maioria das matérias-primas para fabricação de tijolos possui argilas com composição semelhante. Portanto, essas argilas apresentam os mesmos componentes principais: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO) [43].

Sabe-se que a sílica (SiO_2) forma o esqueleto de corpos cerâmicos enquanto a alumina (Al_2O_3) permite melhorar a sua resistência mecânica por sua transformação em mulita durante o processo de sinterização [44].

A cor de queima avermelhada dos produtos de cerâmica tradicional deve-se ao alto conteúdo de óxido de ferro (Fe_2O_3) total que se apresenta geralmente superior a 4 % [45,46]. A importância do óxido cálcio (CaO) está relacionada com a sua capacidade de reduzir a temperatura de sinterização ou aumentar a resistência mecânica na fabricação dos tijolos, contribuindo para minimizar, de forma indireta, os efeitos da expansão por umidade [47].

Folhelhos, argilitos, siltitos, ritmitos e outras rochas de natureza pelítica são materiais argilosos tradicionais, plásticos ou arenosos, ou materiais rochosos de interesse cerâmico, extraídos das bacias sedimentares, denominados genericamente de “taguás”. Essas rochas contêm, predominantemente, argilominerais do grupo da illita, sendo um mineral rico em óxido de potássio (K_2O), que confere baixo ponto de sinterização, característica marcante dessas rochas, que para aplicação no processo cerâmico necessitam de beneficiamento [48].

Interação água + argila

Como observado anteriormente, a argila é um material composto por argilominerais e sedimentos, que com a adição de uma determinada quantidade de umidade lhe confere a

possibilidade de moldagem [49]. A água encontrada nos corpos cerâmicos crus recém submetidos à extrusão pode ser ligada às partículas minerais de maneiras diferentes, com uma energia de ligação diferente e, conseqüentemente, diferentes graus de dificuldade para ser removida dos corpos cerâmicos [50]. A água pode estar unida às partículas minerais de diversas maneiras, cada uma das quais contém uma distinta energia de união e, por conseqüência, distintos graus de dificuldade para ser eliminada [51].

As formas de ligação da umidade com o material são classificadas como: química, físico-química e físico-mecânica. A umidade ligada quimicamente é a que se une com maior solidez ao material em determinadas proporções (estequiométricas) e só pode ser eliminada aquecendo o material até altas temperaturas ou com resultado de uma reação química. Esta umidade não pode ser eliminada do material por secagem. Durante a secagem se elimina somente a umidade ligada com o material em forma físico-química e mecânica [50,52]. Pode-se considerar que a água bruta do corpo cerâmico se encontra nas seguintes formas possíveis:

Água intersticial

A água que se encontra entre partículas minerais nos capilares e que pode se mover livremente entre eles é a água de conformação. Esta água pode ocupar um espaço importante entre as partículas do corpo argiloso e sua eliminação pode gerar uma perda de volume significativo [50,53].

A água de conformação pode ser dividida em dois tipos: o primeiro é denominado de água intersticial. O segundo é denominado de água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. Já a água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação. É este último tipo de água que é responsável pela retração das peças [54,55].

Água higroscópica

É a água que se encontra ligada às partículas minerais por forças elétricas, próprias do dipolo da água, assim como das cargas naturais dos cristais que formam as argilas [50,56].

Devido sua grande área de superfície, os argilominerais são altamente reativos, carregados de cargas iônicas, onde a base para a sua capacidade de troca iônica com a água faz com que as partículas de argila expandam. As várias camadas de partículas de argila têm uma

deficiência de cargas iônicas intercalares. A capacidade de troca iônica das argilas é a propriedade pela qual os minerais de argila atraem íons disponíveis em seu entorno e os retêm em um estado de troca. Estes íons podem ser trocados com outros cátions e ânions durante o tratamento de íons numa solução aquosa. Estas relações de troca de íons em geral não afetam a estrutura do mineral de argila [57,58].

Água cristalográfica

É a água que se encontra ligada quimicamente aos cristais dos minerais de argila, formando o corpo. A quantidade de água cristalográfica contida no corpo de argila depende da natureza química e mineralógica das matérias-primas. Esta água é removida durante a primeira fase de queima e os efeitos produzidos pela eliminação devem ser considerados em certas argilas [50].

Plasticidade

A plasticidade é a propriedade mais importante das dispersões de minerais argilosos que determinam o caráter de participação desses sistemas em muitos processos naturais e tecnológicos, sendo uma propriedade característica das argilas, bem como, a propriedade ou capacidade da argila em seu estado dúctil totalmente plástico de se deformar e mudar de forma e reter a forma permanentemente sem fratura, enquanto a trabalhabilidade pode ser considerada como a facilidade ou dificuldade com que o material é trabalhado ou deformado [59,60].

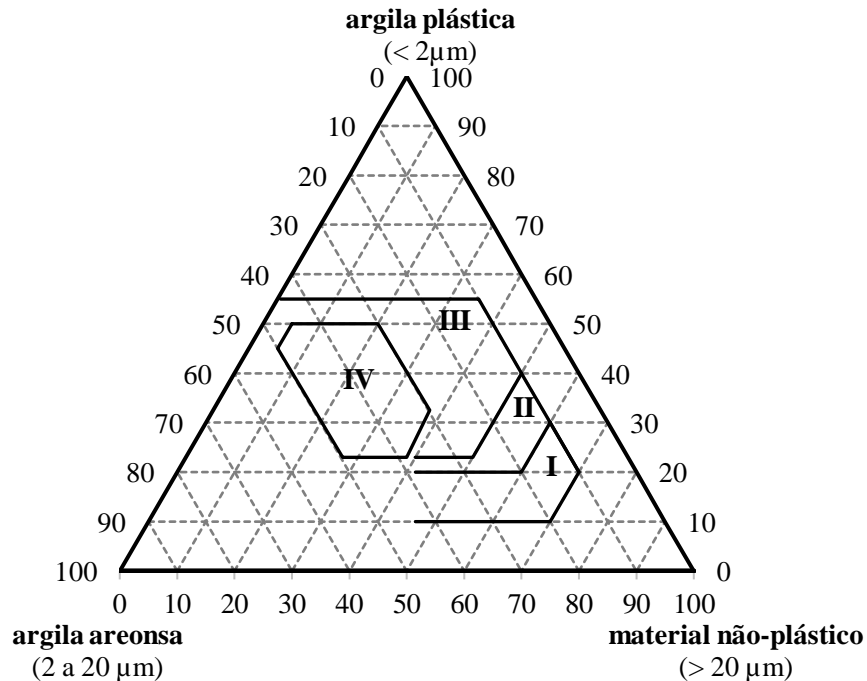
A plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e da ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares. Pode-se admitir que a plasticidade se desenvolva quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais, com uma película de “água rígida” (não-líquida, mas com um pouco de água “líquida”), isto é, não orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada [34].

A plasticidade pode ser avaliada com base no tamanho médio de grãos ($< 2 \mu\text{m}$ e $> 20 \mu\text{m}$) por meio de um diagrama proposto por *Winkler* [61], cuja projeção auxilia no tipo de material cerâmico que a matéria-prima está apta a ser desenvolvida [62].

O diagrama de *Winkler* (Figura 1) se constitui em uma importante ferramenta para processamento de cerâmica vermelha, pois, de acordo com a textura das argilas, pode-se prever sua recomendação para fabricação de determinados tipos de produtos ou a necessidade

de mistura com outras matérias-primas [63]. As partículas de argila são menores que $2\ \mu\text{m}$, o que as fazem ter uma área superficial específica muito grande, dando-lhes uma enorme capacidade de adsorver água e outras substâncias. Essa grande superfície adsorviva faz com que as partículas de argila formem uma massa coesa quando seca, o que possibilita moldá-la quando úmida [32].

Figura 1 - Diagrama de tamanhos de partículas de *Winkler* (I) tijolos comuns, (II) tijolos perfurados verticalmente, (III) telhas e tijolos de alvenaria, e (IV) produtos ocós) [64].



Argilas de granulometria muito fina apresentam boa plasticidade, portanto precisam de uma considerável quantidade de água para desenvolver completamente essa plasticidade. Possuem alta resistência mecânica a seco e pós-queima, em razão do seu alto grau de compactação, e devido a isso, os canais internos existentes entre partículas são reduzidos, dificultando a eliminação de água durante o processo de secagem. A adição de argilas arenosas, reduz a interação com água da massa, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas, tanto no sentido horizontal, como no vertical. Esses pontos de descontinuidade produzem poros, que permitem a passagem da água do interior até a superfície da peça. Portanto, a utilização de materiais não-plásticos para fabricação de cerâmica vermelha auxilia na redução do grau de compactação da massa, ocorrendo a diminuição da plasticidade, reduzindo as contrações sofridas pela massa, tanto no processo de secagem quanto de queima [41].

Existem diversos métodos de medição e caracterização da plasticidade de uma massa argilosa, embora a sua determinação experimental dependa, em alguns casos, da maior ou menor habilidade do operador, sendo a comparação de resultados entre os diferentes ensaios problemática. Entre eles destacam-se, o índice de plasticidade de *Atterberg*, o índice de plasticidade de *Pfefferkorn*, as curvas tensão/deformação [65] e o índice de plasticidade pelo método de indentação [66].

Atterberg [67] definiu o Limite Líquido (LL) e Limite Plástico (PL) como sendo os dois mais importantes limites de consistência de solo. O Limite Líquido (LL) marca a fronteira entre os estados líquido e plástico e o Limite Plástico (PL) entre os estados plástico e semi-sólido. O Limite de Líquido (LL) é obtido de acordo com vários padrões através do método de Casagrande [68–70] ou do teste de penetração [71]. Para obtenção do Limite Plástico (PL), usa-se o "thread rolling test", que vem a ser o método mais popular e padronizado para sua determinação [68,72,73]. Com base nos limites obtidos, encontra-se o Índice de Plasticidade (IP), no qual é usado para classificar o solo de acordo com o Gráfico de Plasticidade mostrado na American Society for Testing and Materials [74], baseado na pesquisa de Casagrande [75,76]. A equação A apresenta como obter o Índice de Plasticidade (IP) conforme a literatura [77]:

$$IP = LL - LP \text{ (A)}$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade

LL= Limite Líquido

LP= Limite Plástico

Com base nos valores de Limites Líquidos, pode-se dividir as argilas em argilas de baixa plasticidade (LL <50) e alta plasticidade (LL > 50) [49]. No entanto as argilas são classificadas com base no Índice de Plasticidade (IP) listados na tabela I.

Tabela I – Classificação das argilas conforme Índice de Plasticidade (IP) [78].

IP	Classificação
0	Não plástico
1-5	Pouco plástico
5-10	Baixa plasticidade
10-20	Média plasticidade
20-40	Alta plasticidade
>40	Muito plástico

O método de deformação plástica por *Pfefferkorn* segundo descrito pela literatura [79], é definido como a porcentagem de água na qual a amostra do ensaio experimenta uma retração de 33 % em relação à sua altura inicial, que neste caso é de 40 mm. Portanto, o índice de plasticidade de *Pfefferkorn* é o valor percentual de umidade da amostra quando a altura final for igual a 12 mm [79,80], de acordo com a equação B, conforme exposto na literatura [11].

$$\varepsilon(\%) = \frac{h_o - h_f}{h_o} \times 100 \quad (\text{B})$$

Onde:

$\varepsilon(\%)$ = Deformação plástica

h_o = Altura inicial

h_f = Altura final

Curva de Bigot

Em 1921, Bigot ampliou seus estudos sobre massas argilosas, relacionando a quantidade de água perdida com a diminuição do volume (contração) [81]. Estabeleceu-se que a perda de massa (em pesagens sucessivas) é diretamente proporcional à contração (medida da maior dimensão). As modificações verificadas na massa argilosa, durante a secagem, são tais que o ciclo completo de secagem é diferenciado em três fases [82]:

1ª fase: diminuição do volume proporcional à água eliminada;

2ª fase: formação de vazios (poros) enquanto que a massa continua a contrair-se ligeiramente;

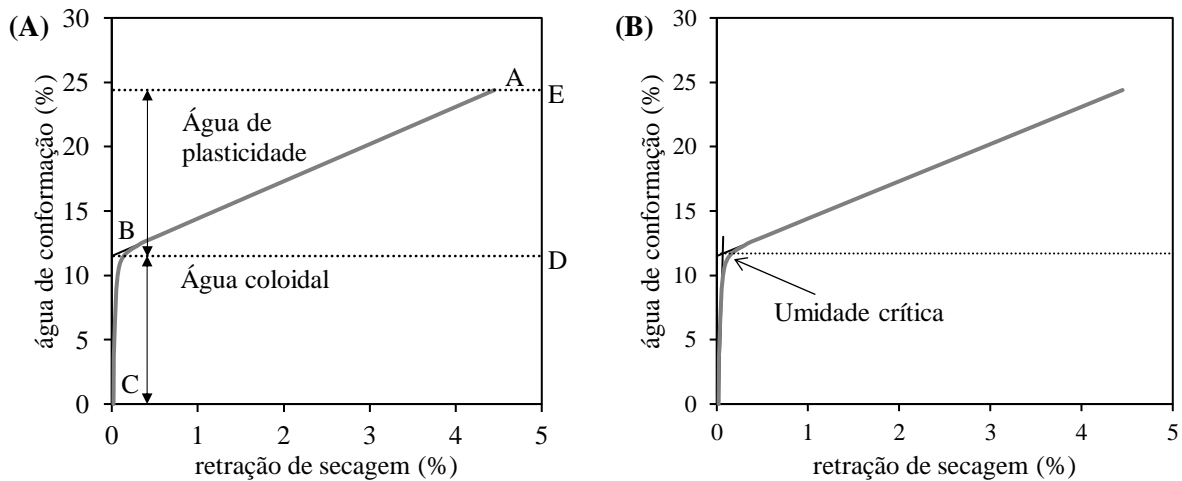
3ª fase: término da diminuição de volume, e os poros manifestados são proporcionais a água eliminada.

A variação das dimensões do corpo cerâmico de acordo com o teor médio de água, aplicada no gráfico é chamada curva de Bigot. Estas curvas expressaram a relação entre a evaporação (perda de massa) e o encolhimento, sendo o encolhimento devido à evaporação da umidade [83].

Na Figura 2.A, ponto (A) representa, na ordenada (ponto E), a quantidade de água de umidade que as peças apresentam no início da etapa de secagem. Na abscissa, pode-se obter a retração total de secagem que irá ocorrer. A linha (A-B) representa a primeira fase de secagem com eliminação de água de plasticidade, localizada entre as partículas. Esta é a fase mais problemática na etapa de secagem já que a eliminação de água entre partículas é acompanhada de retração. Conforme já mencionado anteriormente, com a retração de secagem aumenta-se o risco de aparecimento de defeitos. A linha (B-C) representa a segunda fase de secagem

caracterizada pela eliminação de água intersticial. Teoricamente, o ponto (B) deveria situar-se no eixo da abscissa, indicando ausência de retração de secagem quando se iniciar a eliminação de água intersticial. Entretanto, na prática, nem todas as partículas entram em contato ao mesmo tempo, já que a superfície seca com mais rapidez que o interior da peça. Com isso, parte da água evaporada ainda se origina da interposição entre partículas. Por outro lado, à medida que evapora esta água de plasticidade a água intersticial proveniente dos capilares e que não produzem retração, vai tornando-se predominante. O ponto (D) separa os dois tipos de água de umidade. A água de plasticidade corresponde ao valor (D-E), enquanto que a água intersticial é representada pelo segmento (D-C) [89,90].

Figura 2 – (A) Variação da retração de secagem em função da água de conformação (Curva de *Bigot*) [55,84–86]; (B) Umidade crítica na Curva de *Bigot* [87,88].



A curva de *Bigot* aponta dados importantes das argilas. Um deles se encontra ao fim da água de plasticidade, em consequência, final da retração de secagem, onde denomina o “ponto crítico” [46,91]. Conhecendo o “ponto crítico” da argila, sabe-se o momento exato em que se extingue a probabilidade de chances de se obter trincas de secagem, uma vez que os problemas oriundos desse processo encontram-se durante a perda de umidade, e principalmente, contração [87]. Com base nisso, há como descobrir um coeficiente de sensibilidade de secagem, k , definido conforme a equação C [88,92,93]:

$$k = \frac{M - M_{cr}}{M_{cr}} \quad (C)$$

Onde:

k = Coeficiente de sensibilidade de secagem

M = Umidade de moldagem da massa cerâmica

M_{cr} = Umidade crítica

A umidade crítica vem a ser o teor de umidade em que termina a retração linear de secagem, é geralmente determinada como o ponto de intersecção de duas linhas traçadas pela inspeção de dados experimentais representados em uma curva de *Bigot* (Figura 2.B). O coeficiente de sensibilidade à secagem permite classificar as massas cerâmicas de plástico como ligeiramente ($k < 1,2$), moderadamente ($k = 1,2$ a $1,8$) e altamente sensível à secagem ($k > 1,8$). Uma alta sensibilidade de secagem indica que altas tensões podem surgir no corpo cerâmico, particularmente quando rapidamente ou não secam uniformemente, resultando no aparecimento de defeitos [92].

No entanto, a falta de um critério objetivo para traçar essas linhas retas implica escolhas subjetivas e, conseqüentemente, uma certa ambigüidade na determinação da umidade crítica. Porém, há estudos que fornecem expressões matemáticas capaz de descrever a curva de secagem completa próxima à umidade crítica, além de modelagem matemática da curva de secagem, que também fornece um critério objetivo para a determinação da umidade crítica, ou seja, o ponto de intersecção de duas linhas retas derivadas da função logística generalizada de melhor ajuste [87].

Mecanismo e cinética de secagem

Existem na indústria, em geral, vários métodos de secagem baseados em princípios muito diferentes. Assim, um produto pode ser seco por um ou mais dos seguintes métodos: Absorção, adsorção, filtração, centrifugação, evaporação, vaporização, condensação e liofilização. Na indústria cerâmica, o método que é usado quase que exclusivamente é o da evaporação [94].

A perda de água é dividida em duas fases, onde durante a primeira fase de secagem, o ar arrasta as moléculas de água livres localizadas na superfície da peça. Essa transferência dá origem a um movimento ascendente ou fluxo de água livre para a superfície para preencher o espaço vazio deixado pelas moléculas de água que passaram para a atmosfera [50]. A primeira umidade que a argila perde é a última adicionada, isto é, a água livre que ocupa os capilares, como mostrado nas Figuras 3 e 4.

Conforme o estudo de Estrada & Espinosa de los Monteiros [94], o delicado problema da secagem na cerâmica é amplamente resolvido quando a taxa de evaporação não excede a velocidade de difusão da água do interior para a superfície da massa, e assim a água pode difundir e evaporar a uma taxa que não danifica o material que está secando. A água irá passar pelas lacunas deixadas pelas partículas laminares, isto é, nos canais capilares formados por elas, com uma velocidade de difusão que depende de alguns fatores.

- da temperatura da peça,
- da natureza mineralógica do material,
- da magnitude e forma das partículas e, portanto, dos capilares,
- da porcentagem de água na massa,
- da dinâmica e importância da contração da massa,
- da relação entre a tensão de vapor do líquido na peça e a pressão de vapor do ar, isto é, do seu estado higrométrico e da sua umidade relativa.

Figura 3 - Representação esquemática dos dois tipos de água a serem removidos durante a secagem: (a) Água livre ou intersticial e (b) Água fixada por forças eletrostáticas à superfície das partículas de argila [50].

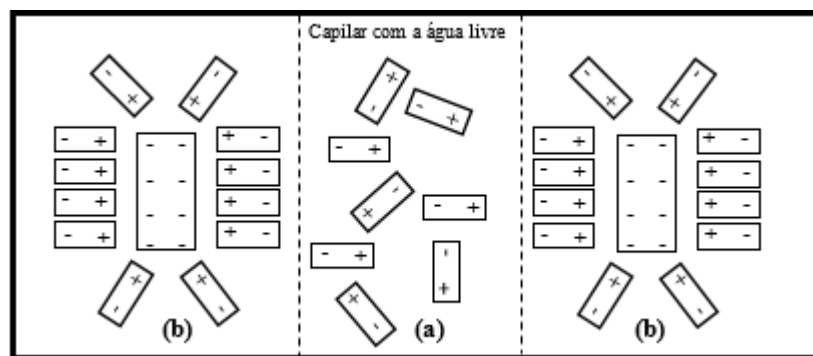
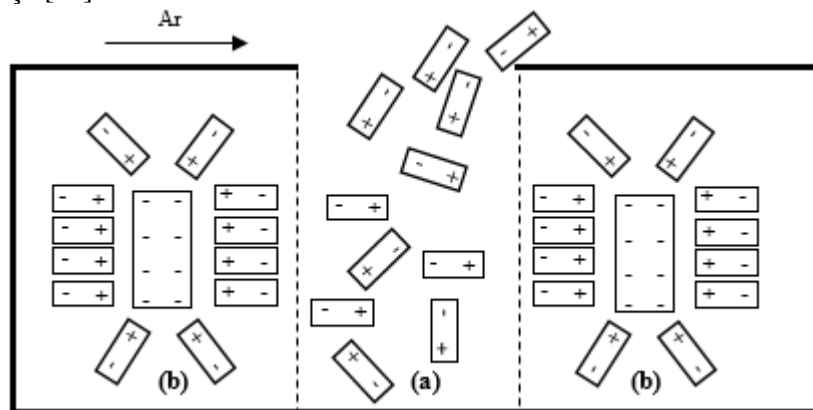
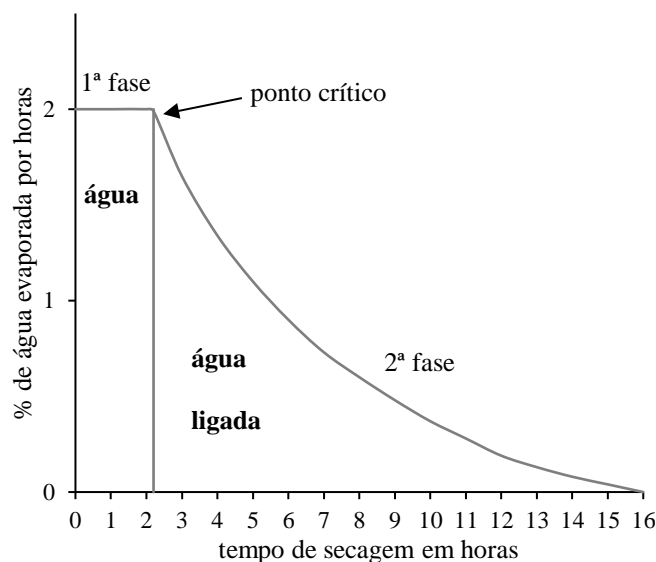


Figura 4 - Representação esquemática da forma como a água livre ou intersticial é eliminada pelo ar que circula na peça [50].



A quantidade de água evaporada por unidade de tempo é constante nesta primeira fase e pode ser vista na Figura 5. O desempenho da evaporação permanecerá constante, desde que a água flua para a superfície com a mesma velocidade com que ela evapora, o que só acontecerá enquanto houver água livre dentro dos capilares. A taxa de evaporação da água na superfície da argila é muito menor do que na superfície livre da água, pois existe uma atração entre partículas de água e argila que reduzem significativamente a taxa de evaporação [50].

Figura 5 - Variação do desempenho de secagem em função do tempo [50].



Portanto, Alvarez [50] explica que no momento em que a água livre (intersticial) é eliminada, considera-se que a contração da peça terminou (nesse ponto, ou antes) e esse ponto é chamado de "ponto crítico", na umidade residual da argila. A partir deste ponto, o desempenho de secagem diminui (a quantidade de água evaporada por unidade de tempo) e a segunda fase de secagem inicia, sendo diferente da etapa anterior.

Ainda conforme o autor, a partir do ponto crítico, a água para de fluir para a superfície (porque não há água livre na peça). Começa a evaporação da água ligada por forças eletrostáticas à superfície das partículas de argila, sendo a evaporação muito mais difícil quanto mais próximas as moléculas de água estão em relação à superfície do cristal de argila. À medida que a secagem progride, o desempenho diminui cada vez mais rapidamente.

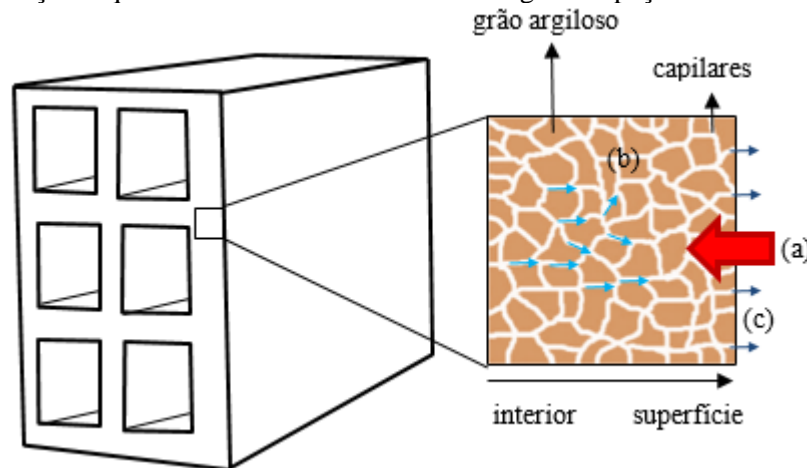
Durante esta segunda fase de secagem, a água não evapora na superfície da peça, mas dentro dos capilares, no mesmo ponto em que está ligada à partícula de argila. Portanto, o arraste e deposição de sais solúveis que geram eflorescência de dentro da peça para a superfície não ocorre nesta fase e sim na primeira, em que a água circula em estado líquido dentro dos capilares e que transportam os sais solúveis para a superfície da peça. Com relação à solubilidade dos sais, o autor [50] coloca que a solubilidade geralmente aumenta com a temperatura, sendo aconselhável manter a temperatura do secador mais baixa durante a primeira fase de secagem, para minimizar a quantidade de sais dissolvidos na água, e que seriam depositados na superfície da peça. Em secadores rápidos onde a secagem começa imediatamente, a peça é introduzida no secador com ar quente, sendo muito mais difícil evitar a eflorescência por efeito dos sais solúveis.

De acordo com Brosnan e Robinson [95], alguns problemas podem aparecer na peça cerâmica devido a vários fatores, podendo ser rachaduras devidas à gradiente de retração, não homogeneidade na estrutura, umidade não-uniforme e gradiente de espessura. Os mais comuns são os problemas relacionados à retração superficial, sem a retirada da maior parte da umidade do interior da peça.

A secagem é um processo que envolve fenômenos de transferência de calor e massa entre o corpo e o ar de secagem. Portanto, avaliando a Figura 6 (que ilustra como ocorre a dispersão da umidade na peça cerâmica), tem-se a transferência de calor (a), que atua sobre as moléculas de água do interior da peça, e que por meio de difusão (b) migram para a superfície da peça, evaporando (c).

Como já explanado anteriormente, a velocidade da difusão deve ser similar à de evaporação, para que não ocorram problemas na secagem. Se houver uma evaporação mais acelerada que a difusão, a superfície tende a retrair, e ter uma acomodação das partículas, obstruindo os canais de difusão, impossibilitando que a água interna chegue à superfície e evapore. Esse bloqueio dos capilares, força a água contra a parede superficial, abrindo as trincas de secagem.

Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de secagem da peça cerâmica.

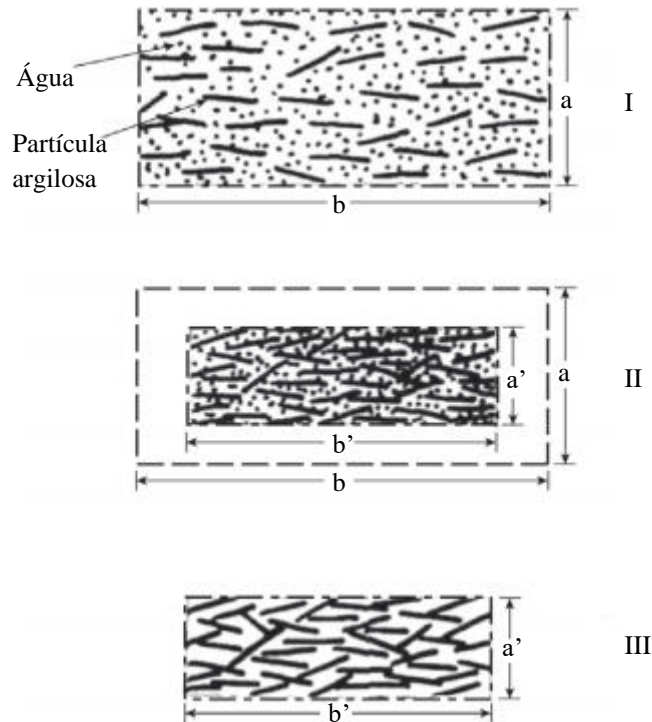


Retração de secagem

Além do transporte de calor e massa, pode-se citar outro fenômeno que ocorre durante o processo de secagem, trata-se da variação da dimensão do sólido [96]. É imprescindível que os produtos cerâmicos atendam as normas técnicas, incluindo o controle dimensional. Deste modo, essa variação ocasionada pela secagem deve ser bem avaliada, para que não ocorram problemas com os produtos acabados.

A Figura 7 descreve esquematicamente a evolução da eliminação de água de conformação e retração de secagem de uma massa cerâmica plástica.

Figura 7 - Representação esquemática da secagem do sistema argila+água [86,89].



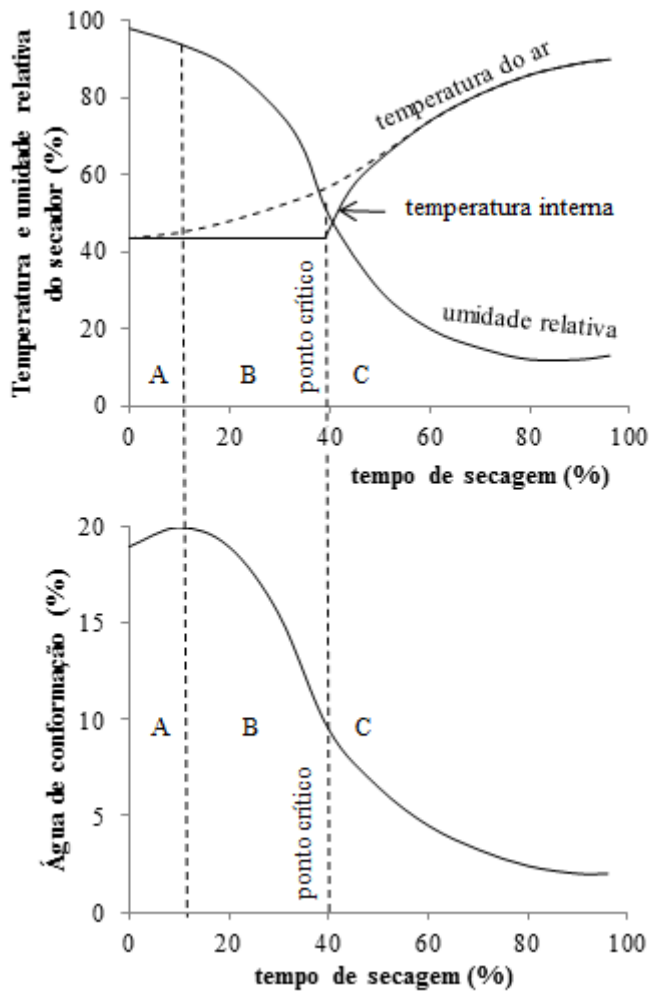
- I. está representado o sistema argila + água no início da etapa de secagem.
- II. após certo período de tempo, já não há mais a água de plasticidade que separa as partículas. Por outro lado, ainda há água nos capilares, denominada de água intersticial. Observa-se também que houve retração em relação ao estágio inicial.
- III. toda a água intersticial foi eliminada e a peça não apresenta retração em relação ao estágio II.

Ciclo de secagem

Segundo Alvarez [50], o ciclo de secagem é dividido em três zonas, conforme observa-se na Figura 8, onde a primeira trata-se do aquecimento da peça (A), seguida da eliminação da água crítica (fim da retração) (B) e eliminação da água de porosidade (C).

Num primeiro momento faz-se o aquecimento da peça, e para que não inicie o processo de evaporação, é necessário que se trabalhe com um ambiente saturado (umidade interna do secador entre 80 e 100 %).

Figura 8 - Demonstração do ciclo de secagem [50].



A secagem inicia na segunda zona (B), e é nela que os riscos de trinca são reais, uma vez que há retração da peça, dando origem a tensões e quebra no material seco. Para evitar a possibilidade de perdas, é necessário alcançar grande uniformidade de secagem, através de uma boa recirculação de ar através da peça.

Na transição entre as zonas B e C ocorre o momento em que a peça atinge o ponto crítico, muito próximo do final da contração. A partir desse momento, o principal agente de secagem torna-se a temperatura, deixando de ser a velocidade do ar, uma vez que o fator determinante da secagem passa a ser a separação das moléculas de água ligadas por ligações elétricas fortes às partículas de argila, e essa separação é basicamente obtida por temperatura.

A duração desse último estágio depende apenas do tempo necessário para que a umidade da peça esteja entre 2 e 3 %, que são os valores máximos permitidos para que a peça entre na queima. Em resumo, tem-se que o tempo de secagem para uma mesma argila é diretamente proporcional:

- I. À espessura da peça, desde o início do processo até a eliminação da água livre (ponto crítico), zona B;
- II. À espessura do produto elevada a uma potência próxima a 2, durante a eliminação de água de porosidade, zona C;
- III. Inversamente proporcional à diferença de temperatura entre peça e o ar durante o período de eliminação de água livre e uma grande parte do período correspondente à perda de água de porosidade.

CONCLUSÕES

A conformação de cerâmica vermelha, necessita de altos gradientes de umidade, para que possam ser facilmente moldados, através do processo de extrusão, e após esta etapa e antes do processo de sinterização, o excesso de água no produto é removido. Sem um estágio de secagem, o calor que emana do processo de sinterização irá transformar a água em vapor dentro do corpo cerâmico, o que danificará gravemente o produto. Assim, a maior parte da água encontrada na peça deve ser removida por meio de um processo de secagem que deve ser realizado antes da queima.

Portanto, a secagem é um passo essencial no processamento de cerâmicas vermelhas, e é nesta fase da produção de cerâmica, podem surgir defeitos de secagem que só se tornarão aparentes após a queima, com consequentes perdas econômicas, por isso a necessidade de um controle, com intuito de minimizar a possibilidade de perdas.

Por natureza, as argilas com auto teor de plasticidade, tentem a necessitar na adição de maiores percentuais de umidade para que atinjam o índice ideal de trabalhabilidade, isso, se torna um epínício para a secagem, uma vez que se precisará de maior energia (gerando custos) para a remoção da água, e ainda, aumentará a probabilidade dos riscos de perdas de processo.

A utilização de materiais não argilosos na composição da massa, tentem a auxiliar o processo de secagem, minimizando o percentual de retração e ajudando no escoamento da água através da difusão.

O ambiente de secagem do material cerâmico, também deve ser observado, pois a velocidade do escoamento da umidade deve ser controlada - cada tipo de argila possui um comportamento diferente - e assim, se extingue a possibilidade de perdas obtidas pelo processo de secagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pela possibilidade de realizar a pesquisa e o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J.E. Gillott, *Elev. Natl. Conf. Clays Clay Miner.* (1963) 296–298.
- [2] M.S. El-mahllawy, A.M. Kandeel, *HBRC J.* 10 (2014) 82–91.
doi:10.1016/j.hbrcj.2013.08.009.
- [3] G.M. Reevers, I. Sims, J.C. Cripps, *Clay Materials Used in Construction*, 21st ed., Engineering Geology Special Publication, London, UK, 2006.
- [4] A.S. Smith, P. Bingel, A. Bown, *Sustainability of masonry in construction*, Second Edition, Elsevier Ltd., 2016.
- [5] L. Zhang, *Pr Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 643–655.
- [6] A. Ukwatta, A. Mohajerani, S. Setunge, *N. Constr. Build. Mater.* 91 (2015) 86–93.
- [7] J.E. Aubert, A. Fabbri, J.C. Morel, P. Maillard, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 366–369.
- [8] A. Abdulhussein, M. Sadique, P. Kot, W. Atherton, *Constr. Build. Mater.* 210 (2019) 172–187.
- [9] M. Dondi, M. Raimondo, C. Zanelli, *Appl. Clay Sci.* 96 (2014) 91–109.
- [10] A. Jency, 2015 UK Greenhouse Gas Emissions, Final Figures - Statistical release: National Statistics, Department of Energy & Climate Change, London, UK, 2017.
- [11] A. Zaccaron, S.L. Galatto, V. de S. Nandi, P. Fernandes, *Cerâmica Ind.* 19 (2014) 33–39.
- [12] V.S. Nandi, A. Zaccaron, P. Fernandes, J.P. Dagostin, A.M. Bernadin, *Cerâmica Ind.* 19 (2014) 29–32.
- [13] A. Zaccaron, G.A. Benedet, F. Rosso, V. de S. Nandi, P. Fernandes, A.M. Bernardin, R. Piccoli, in: 7º FIRS, 2016.
- [14] S. Andreani, J.L.G. del Castillo, A. Jyoti, N. King, M. Bechthold, *Gerontechnology.* 11 (2012).
- [15] A. Yataganbaba, I. Kurtbaş, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59 (2016) 206–224.
- [16] H.A. Oliveira, D.C. Silva, R.M.P.B. Oliveira, C.P. Santos, E. de Jesus, Z.S. Macedo, *Appl. Clay Sci.* 161 (2018) 211–214.

- [17] A.S. Mujumdar, Principles, classification, and selection of dryers., in: Arun S. Mujumdar (Ed.) (Ed.), *Handb. Ind. Dry.*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2006: p. 32.
- [18] R. Toei, *Dry. Technol.* 14 (1996) 1–7.
- [19] A.F. Gualtieri, A. Ricchi, M.L. Gualtieri, S. Maretti, M. Tamburini, *J. Therm. Anal. Calorim.* 123 (2016) 153–167.
- [20] W.P. Silva, L.D. da Silva, V.S. de O. Farias, C.M.D.P. da S. e Silva, *Ceram. Int.* 39 (2013) 4017–4030.
- [21] W.P. da Silva, V.S. de O. Farias, G. de A. Neves, A.G.B. de Lima, *Heat Mass Transf.* 48 (2012) 809–821.
- [22] Z.X. Gong, A.S. Mujumdar, Y. Itaya, S. Mori, M. Hasatani, *Dry. Technol.* 16 (1998) 1119–1659.
- [23] G. Musielak, *Dry. Technol.* 19 (2001) 1645–1659.
- [24] G. Musielak, D. Mierzwa, Permanent strains in clay-like material during drying, *Dry. Technol.* 27 (2009) 894–902.
- [25] Y. Itaya, S. Uchiyama, S. Hatano, S. Mori, *Dry. Technol.* 23 (2005) 1243–1255.
- [26] R. Maciulaitis, J. Malaiškiene, A. Kicait, *J. Civ. Eng. Manag.* 14 (2008) 263–268.
- [27] R. Maciulaitis, J. Malaiškiene, *J. Civ. Eng. Manag.* 15 (2009) 197–204.
- [28] S. OUMMADI, B. Nait-Ali, A. Alzina, J.-L. Victor, Y. Launay, M. Mirdrikvand, W. Dreher, K. Rezwan, D.S. Smith, *J. Eur. Ceram. Soc.* 39 (2019) 3164–3172.
- [29] E. Barreira, V.P. Freitas, J.M.P.Q. Delgado, in: 5º Encontro Sobre Patol. e Reabil. Edifícios - PATORREB. (2015) 165–170.
- [30] H.B. de Azevedo, W.O. Santos, I.F. de Lima, V.S. de O. Farias, C.M.R. Franco, P.I. de O. Rocha, *Educ. Ciência e Saúde.* 5 (2018).
- [31] W.E. Worrall, *Clays and ceramic raw material*, Applied Science Publishers LTD., London, UK, 1975.
- [32] N.C. Brady, R.R. Wei, *Elements of the nature and properties of soils*, 3rd ed., Pearson Education Inc., Prentice Hall, 2010.
- [33] W.T. Tsai, C.W. Lai, K.J. Hsien, *J. Colloid Interface Sci.* 263 (2003) 29–34.
- [34] P. de S. Santos, *Ciências e tecnologia de argilas.*, 2ª ed., Edgard Blücher Ltda, 1989.
- [35] D.M. Morais, R.M. Sposto, *Cerâmica Ind.* 11 (2006) 35–38.
- [36] H.G. Riella, *Cerâmica - dos Minerais à Porcelana*, 1ª Ed., Editora Tecart, São Paulo, SP, 2010.
- [37] M.W. Barsoum, *Fundamentals of Ceramics*, Ed. Taylor & Francis Group LLC, New

- York, NY, USA, 2003.
- [38] J.F.M. Motta, A. Zanardo, M.C. Junior, *Cerâmica Ind.* 6 (2001) 28–39.
- [39] R.S. Macedo, R.R. Menezes, G.A. Neves, H.C. Ferreira, *Cerâmica.* 54 (2008) 411–417.
- [40] R.P.S. Dutra, M.L. Varela, R.M. Nascimento, U.U. Gomes, C.A. Paskocimas, P.T. de Melo, *Cerâmica Ind.* 11 (2006) 42–46.
- [41] S. Pracidelli, F.G. Melchiades, *Cerâmica Ind.* 2 (1997) 31–35.
- [42] J.R. Crozetta, V.S. Nandi, F. Rosso, A. Zaccaron, D.F. Niero, *Cerâmica Ind.* 21 (2016) 21–29.
- [43] P. Muñoz V., M.P. Morales O., V. Letelier G., M.A. Mendivil G., *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 241–252. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024.
- [44] Y. Taha, M. Benzaazoua, R. Hakkou, M. Mansori, *J. Clean. Prod.* 135 (2016) 847–858.
- [45] C.M.F. Vieira, R.M. Pinheiro, *Cerâmica.* 57 (2011) 319–323.
- [46] E. Facincani, *Tecnologia ceramica – I laterizi*, 2ª edizion, Gruppo Editoriale Faenza Editrice, Faenza, Italia, 1992.
- [47] J.C.S. Oliveira, B.B. Lira, Y.P. Yadava, C.M.M. e Silva, T.W.G. Santos, *Cerâmica Ind.* 16 (2011) 34–38.
- [48] M.C. Junior, L.C. Tanno, A. Sintoni, J.F.M. Motta, J.M. Coelho, *Cerâmica Ind.* 17 (2012) 36–42.
- [49] J.P. Malizia, A. Shakoore, *Eng. Geol.* 244 (2018) 125–131.
- [50] F. Blanco Álvarez, *Cerámicas: Secado*, Oviedo, España, 2013.
- [51] X. Zhou, D. Liu, H. Bu, L. Deng, H. Liu, P. Yuan, *Solid Earth Sci.* 3 (2018) 16–29.
- [52] Q. Bui, J. Morel, S. Hans, P. Walker, *Constr. Build. Mater.* 54 (2014) 163–169.
- [53] L.F.T. Queiroz, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, *Cerâmica.* 56 (2010) 279–284.
- [54] C.M.F. Vieira, E.T.A. de Souza, S.N. Monteiro, *Cerâmica.* 50 (2004) 254–260.
- [55] V. Beltrán, E. Ferrando, J. García, E. Sánchez, *Tile Brick Int.* 11 (1995) 169–176.
- [56] C.T. Johnston, *Infrared Studies of Clay Mineral-Water Interactions*, 1st ed., Elsevier Ltd., 2017.
- [57] C.F. Gomes, *Argilas: O que são e para que servem*, 1988.
- [58] E. Eslinger, Properties, in: D. Pevear (Ed.), *Clay Miner. Pet. Geol. Eng. (Short Course Notes Ser. No. 22)*, Sepm Society for Sedimentary Geology, 1988: p. 412.
- [59] G.E. Barnes, *Appl. Clay Sci.* 153 (2018) 107–112.
- [60] A. Kasprzhitskii, G. Lazorenko, V. Yavna, P. Daniel, *J. Mol. Struct.* 1109 (2016) 97–105.
- [61] H.G.F. Winkler, *Berichte Deutsche Keramics Gesellschaft.* 31 (1954) 337–343.

- [62] M. Milošević, M. Logar, *Clay Miner.* 52 (2017) 329–340.
- [63] C.M.F. Vieira, S.N. Monteiro, J. Duailibi Fh, *Cerâmica Ind.* 10 (2005) 23–26.
- [64] S. Boussen, D. Sghaier, F. Chaabani, B. Jamoussi, A. Bennour, *Appl. Clay Sci.* 123 (2016) 210–221.
- [65] M.J. Ribeiro, A.A.L. Ferreira, J.A. Labrincha, *Cerâmica Ind.* 8 (2003) 37–42.
- [66] C. de O. Modesto, A.M. Bernardin, *Appl. Clay Sci.* 40 (2008) 15–19.
- [67] A. Atterberg, *Int. Mitteilungen Für Bodenkd.* 1 (1911) 10–43.
- [68] ASTM, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, in: ASTM D 4318, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [69] AENOR, *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*, in: UNE 103-103-94, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 1994: p. 9.
- [70] ABNT, *Solo - Determinação do limite de liquidez*, in: NBR 6459, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984: p. 6.
- [71] BSI, *Soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification Tests*, in: BS 1377-2, British Standard, London, UK, 1990: p. 66.
- [72] AENOR, *Determinación del límite plástico de un suelo*, in: UNE 103-104-93, 1993.
- [73] ABNT, *Solo - Determinação do limite de plasticidade*, in: NBR 7180, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984: p. 3.
- [74] ASTM, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, in: ASTM D2487-11, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [75] A. Casagrande, *Public Roads.* 13 (1932) 121–146.
- [76] A. Casagrande, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 113 (1948) 901–991.
- [77] J.M. Moreno-maroto, J. Alonso-azcárate, *J. Vis. Exp.* 112 (2016) 1–13.
- [78] D.M. Burmister, *Proc. Highw. Res. Board.* (1949) 402–433.
- [79] J.L. Amoros, E. Javier, S. Vilches, F. Javier, G. Ten, M.M. Fuster, V.S. Solana, *Manual para el Control de la Calidad de las Materias Primas Arcillosas, 2ª*, Instituto de Tecnología Cerámica: Asociación de Investigación de las Industria Cerámicas, Castellón, 1998.
- [80] I. Toretti, E.B. Nunes, A. Benincá, K.Z. Rezin, M. Cargnin, in: *1º Simpósio Integr. Científica e Tecnológica Do Sul Catarinense – SICT-Sul.* 3 (2012) 226–233.
- [81] A. Bigot, *Comptes Des Séances L'Académie Des Sci.* 172 (1921) 755–788.
- [82] A.A. de Oliveira, *Tecnologia em Cerâmica*, Editora Lara, Criciúma, SC, 2011.

- [83] K. Atcholi, E. Padayodi, J. Vantomme, K. Kadja, D. Perreux, *Int. J. Simul. Multidiscip. Des. Optim.* 2 (2008) 91–97.
- [84] L. Alviset, *Bull. Du Groupe Français Des Argiles.* 23 (1971) 19–37.
- [85] S. Oller, *Cerâmica.* 27 (1981) 319–329.
- [86] M.F. Abajo, *Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos*, Beralmar SA, Terrassa, España, 2000.
- [87] C. Cavion, J. Tonet, L.S. Miola, C.A. Perottoni, J.E. Zorzi, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 16 (2019) 400–403.
- [88] A. Atanasov, *J. Univ. Chem. Technol. Metall.* 40 (2005) 311–314.
- [89] C.M.F. Vieira, H.S. Feitosa, S.N. Monteiro, *Cerâmica Ind.* 8 (2003) 42–46.
- [90] M.O.E. Schwartz, J.A.T. Rios, B.B. Lira, F. Hipólito, *Cerâmica Ind.* 10 (2005) 28–30.
- [91] E. Mancuhan, S. Özen, P. Sayan, S.T. Sargut, *Dry. Technol.* 34 (2016) 1535–1545.
- [92] P. Aungatichart, S. Wada, *Appl. Clay Sci.* 43 (2009) 182–185.
- [93] H. Salmang, *Ceramics: Physical and Chemical Fundamentals*, translated, Butterworths, Washington, DC, 1961.
- [94] D.A. Estrada, J.E.D.L. Monteiro, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 21 (1982) 327–337.
- [95] D.A. Brosnan, G.C. Robinson, *Introduction to drying of ceramics*, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, USA, 2003.
- [96] G.S. Almeida, *Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais*, Universidade Federal de Campina Grande, 2009.