

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DURANTE A SECAGEM DE
CONCRETOS REFRAATÓRIOS VIA A UTILIZAÇÃO DE
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

ANDRÉ ALVES DE MORAES GOBBATO FILHO

SÃO CARLOS -SP
2025

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DURANTE A SECAGEM DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS VIA A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Victor Carlos Pandolfelli

São Carlos-SP
2025



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Andre Alves de Moraes Gobbato Filho

RA: 769648

TÍTULO: Otimização energética durante a secagem de concretos refratários via a utilização de simulações numéricas

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli

CO-ORIENTADOR(A): Me. Túlio Múmic Cunha


DATA/HORÁRIO: 11/02/2025, 11h

BANCA – NOTAS:


	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli	9,0	8,5
Eng. Fernanda Crivelari Figueiredo	9,0	8,5
Média	9,0	8,5

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli

Documento assinado digitalmente
 **VICTOR CARLOS PANDOLFELLI**
Data: 11/02/2025 12:04:48-0300
Verifique em <https://validar.lfi.gov.br>

Eng. Fernanda Crivelari Figueiredo

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA CRIVELARI FIGUEIREDO**
Data: 11/02/2025 13:47:35-0300
Verifique em <https://validar.lfi.gov.br>

AGRADECIMENTO

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram, se esforçaram em me proporcionar todas as oportunidades e deram o melhor exemplo possível dentro de casa que disciplina e dedicação ao conhecimento podem transformar a vida. Dedico também aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado independentemente da situação, fazendo parte de toda a minha trajetória. Aos meus amigos do time UFSCar Fire, por toda experiência, risadas e vitórias colecionadas nas competições universitárias, representando a universidade com muito êxito e alcançando resultados que no início nem nós acreditávamos que eram possíveis. Agradeço aos professores do DEMa e demais departamentos, por compartilharem os conhecimentos e experiências para minha formação. A toda a equipe do GEMM que me recebeu bem no laboratório, em especial ao Túlio, pela supervisão e orientação nas pesquisas. Por fim, agradeço em especial meu professor orientador, Victor Carlos Pandolfelli, pelo apoio durante vários semestres de orientação em pesquisas científicas e estágio e pelos conhecimentos passados ao longo de todo esse período.

RESUMO

Durante a secagem de cerâmicas refratárias monolíticas, se faz necessário um controle do aquecimento e um entendimento mais profundo sobre os fenômenos envolvidos, visto que se não efetuado adequadamente pode resultar em trincas e fraturas no material. Neste trabalho, utilizando simulações por elementos finitos, foram analisados os processos de secagem dessa camada de trabalho variando a proporção das espessuras das camadas permanente e isolante, a fim de se determinar os impactos destas no processo de secagem. A partir desses cenários, foram simuladas camadas com espessuras não usuais na indústria com a finalidade de se entender melhor as tendências ao se aumentar ou diminuir as espessuras de isolante com relação a camada permanente. Isto posto, observou-se que o aumento da camada isolante acelera a secagem, atingindo menores valores de pressão máxima e conseqüentemente, uma razão de resistência menor. Vale ressaltar também que com essa maior espessura de isolante a perda térmica é menor e conseqüentemente o gasto energético.

Palavras-chave: Refratários. Simulação. Otimização.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

ENERGY OPTIMIZATION DURING THE DRYING OF REFRACTORY CONCRETES USING NUMERICAL SIMULATIONS

During the drying of monolithic refractory ceramics, it is necessary to control the heating and gain a deeper understanding of the phenomena involved, since if this is not done properly it can result in cracks and fractures in the material. In this work, using finite element simulations, the drying processes of this working layer were analyzed by varying the proportion of the thicknesses of the permanent and insulating layers, in order to determine their impact on the drying process. Based on these scenarios, layers with unusual thicknesses in the industry were simulated in order to better understand the trends when increasing or decreasing the thickness of the insulator in relation to the permanent layer. It was observed that increasing the insulating layer speeds up drying, achieving lower maximum pressure values and consequently a lower resistance ratio. It is also worth noting that with this greater thickness of insulation the heat loss is lower and consequently the energy expenditure.

Keywords: Refractories. Simulation. Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquemática da composição de um material refratário	6
Figura 2 - Estágios iniciais da secagem de concretos na presença de uma película de água.	16
Figura 3 - Avaliação do comportamento de secagem por meio de (a) análise termogravimétrica, (b) perfil de temperatura interna na superfície ou no centro da amostra e (c) aumento exponencial da pressão de vapor (P_v) com a temperatura, de acordo com a equação de Antoine	17
Figura 4 - Efeito da pressurização de vapor e suas correlações com a resistência mecânica de concretos	19
Figura 5 - Pressão em diferentes profundidades (50, 100 e 150 mm) versus tempo para concretos com níveis de permeabilidade mais baixo e mais alto	20
Figura 6 - Configuração típica do revestimento de painéis de aço, com camadas e zonas distintas destacadas, sendo cada uma dessas seções especificamente definida para atender a critérios específicos	22
Figura 7 - Gráfico de Pressão Máxima <i>versus</i> o tempo de simulação sem patamar	28
Figura 8 - Gráfico da Razão de Resistência máxima do material versus o tempo de simulação sem patamar	28
Figura 9 - Gráfico de Razão de Resistência máxima do material com patamar de 7 horas	29
Figura 10 - Gráfico de secagem de água livre (curva com decaimento mais rápido) e da água quimicamente ligada (curva com decaimento mais lento) versus o tempo de simulação com patamar de 7 horas	30
Figura 11 - Gráfico de evolução da razão de resistência ao longo do concreto de trabalho e do tempo de secagem	31
Figura 12 - Gráfico da curva de temperatura na face fria dos três cenários e a curva de aquecimento versus o tempo de simulação	33
Figura 13 - Gráfico de gasto de energia em MWh ao longo do tempo de aquecimento para os três cenários versus o tempo de simulação	33
Figura 14 - Gráfico de correlações entre temperatura da face fria e energia gasta para	

os três cenários	34
Figura 15 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário I	35
Figura 16 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário II	35
Figura 17 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário III	35
Figura A1 - Gráfico de pressão máxima versus o tempo de simulação variando o valor do coeficiente de permeabilidade (B_w)	45
Figura A2 - Valores de pressão máxima variando o valor do coeficiente de permeabilidade (B_w)	46
Figura A3 - Distância na face quente e respectivos valores máximos de pressão de acordo com a variação do valor do coeficiente de permeabilidade (B_w)	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do concreto 5CAC	22
Tabela 2 - Propriedades das camadas II e III	22

LISTA DE SIGLAS

CAC – Cimento de aluminato de cálcio

LCC – Low cement castable

ULCC – Ultra-low cement castable

LD – Linz-Donawitz

CP – Cimento Portland

Q.L. – Químicamente ligada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 CERÂMICAS REFRAATÁRIAS	3
2.2 MONOLÍTICOS	3
2.3 ALUMINA	8
2.3.1 - Alumina Tabular.....	9
2.3.2 - Alumina Calcinada	9
2.3.3 - Alumina Reativa.....	10
2.4 CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO	10
2.5 SECAGEM	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 MATERIAIS E PROPRIEDADES.....	23
3.2 MODELOS NUMÉRICOS	24
3.3 SETUP DE SIMULAÇÃO.....	26
3.4 CÁLCULO DO CONSUMO ENERGÉTICO	26
4 RESULTADOS	27
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS	40
APÊNDICE - Estudo Do Coeficiente De Troca Mássica Superficial (Bw)	43

1 INTRODUÇÃO

Materiais refratários são cerâmicas amplamente utilizadas como revestimento de equipamentos no processo de produção de materiais como aço, vidros, cimento, entre outros. Elas são utilizadas devido às elevadas resistências à altas temperaturas e à corrosão nesses ambientes extremos, tornando-os possíveis. O mundo que é conhecido atualmente só se tornou possível devido aos refratários. Os refratários podem ser separados em duas grandes classes, os conformados e os monolíticos. Os monolíticos são aqueles que adquirem o formato apenas no momento da aplicação, ao contrário dos conformados que são produzidos em uma geometria específica. Por serem aplicados com água na etapa de instalação do revestimento, é necessário que ocorra uma etapa de secagem controlada antes da operação de produção a qual a cerâmica foi instalada voltar ao normal. Durante essa etapa de secagem de cerâmicas refratárias monolíticas, se faz necessário um controle do aquecimento e um entendimento mais profundo sobre os fenômenos envolvidos, visto que se não efetuado adequadamente, pode resultar em trincas e fraturas no material. Neste trabalho, utilizando simulações por elementos finitos, foram analisados os processos de secagem da camada de trabalho com espessura constante, variando a proporção das espessuras das camadas permanente e isolante, a fim de determinar os impactos destas camadas no processo de secagem, levando em consideração a resistência mecânica do concreto durante esse período de aquecimento para que ele resista às pressões internas de vapor. A partir desses cenários, foram simuladas camadas com espessuras não usuais na indústria com a finalidade de se entender melhor as tendências ao aumentar ou diminuir as espessuras de isolante com relação a camada permanente. Isto posto, observou-se que o aumento da camada isolante acelera a secagem, atingindo menores valores de pressão máxima e conseqüentemente, uma razão de resistência menor. Vale ressaltar também que quanto maior espessura de isolante, menor a perda térmica e conseqüentemente o gasto energético é reduzido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CERÂMICAS REFRAATÁRIAS

Cerâmicas refratárias, por definição, são materiais que devem ser resistentes ao calor enquanto expostos a diferentes graus de tensão, sendo estes mecânica, térmica, corrosão, entre outras solicitações. São importantes em diversos setores da indústria atuando principalmente como isolantes, viabilizando a produção de diferentes materiais, em especial na indústria vidreira e metalúrgica. A indústria de refratários movimentou, no ano de 2023, um total de US\$ 27,91 bilhões, sendo o principal consumidor a indústria siderúrgica. (REFRACTORIES WORLDFORUM, 2023).

Usualmente, as cerâmicas refratárias são separadas em duas classes, sendo estas, as conformadas e as monolíticas. A primeira classe, as conformadas, possuem geometria definida em sua produção, enquanto as monolíticas adquirem a geometria diretamente na sua instalação. Dentre as vantagens de se utilizar concretos ao invés de tijolos, incluem, uma menor quantidade de juntas, uma instalação mais rápida e maior facilidade para revestimento de geometrias complexas. Entretanto, outras complicações surgem após a escolha de utilizar monolíticos nos revestimentos. (SCHACHT, 2004)

2.2 MONOLÍTICOS

Os concretos refratários, que estão dentro da classe dos monolíticos, são classificados de acordo com seu teor de cal em: convencionais, com baixo teor de cimento, com baixíssimo teor de cimento e sem cimento. Eles também podem ser classificados pelo método de instalação, como refratários de vibração de fundição e refratários de fluxo automático. A produção de concretos refratários contém CACs (cimento de aluminato de cálcio) variando sua pureza de baixa, intermediária ou alta pureza. Eles são classificados de acordo com sua quantidade na formulação, em grandes quantidades, pequenas quantidades ou sem a adição de cimento. Dentre os concretos com pequena adição, estão os LCCs e ULCCs (low cement castable e ultra-low cement castable), que ambos contêm abaixo de 8% em massa de cimento na formulação. Junto ao cimento, são adicionados uma variedade de calcário orgânico e inorgânico, juntamente com pequenas quantidades de sílica e aditivos, como defloculantes, retardadores de pega e aditivos. Para a produção de refratários

monolíticos, o pó cerâmico é misturado com um líquido, geralmente água, e despejado em seu local da aplicação final. (LEE et al, 2001)

A primeira menção de concretos refratários com baixa adição de cimento ocorreu em 1969, na obtenção de uma patente francesa da Prost e Pauillac. Essa redução do teor de cimento sem qualquer piora nas propriedades mecânicas foi obtida através da adição de 2,5 a 4% de minerais de argila fina e 0,01 a 0,30% de defloculantes. A finalidade dessa formulação era reduzir a quantidade de cimento para que a ligação hidráulica pudesse ser totalmente utilizada. Apesar de sua menor porosidade e melhor resistência à corrosão, em comparação com os concretos convencionais, a primeira geração de LCCs era muito sensível ao aquecimento rápido, principalmente porque a água quimicamente ligada era liberada em uma faixa de temperatura muito mais estreita, e essa rápida liberação de água causava fragmentação explosiva. (KRONERT et al, 1984)

As principais vantagens dessa classe de concreto são suas excelentes propriedades físicas, como alta densidade, baixa porosidade, alta resistência a frio e a quente e alta resistência à abrasão e à corrosão. (CLAVAUD et al, 1983) A maioria possui uma porosidade aberta não superior a 16% após a queima. Os concretos de baixo cimento geralmente têm uma distribuição de tamanho de poro muito mais fina do que os concretos convencionais de alto cimento, o que contribuindo para um maior empacotamento, e, portanto, aumentando a resistência à corrosão devido ao fato da escória ter uma menor capacidade de penetração no mesmo. (ONO et al, 1997)

A resistência a frio desses concretos com baixo cimento aumenta de forma constante com a temperatura e geralmente é maior do que a de um concreto convencional de composição semelhante em todas as temperaturas após a desidratação. (CLAVAUD et al, 1983) Eles normalmente possuem módulo de ruptura mais alto e valores de fluência mais baixos em comparação aos concretos de alto cimento. Todas essas propriedades proporcionam uma vantagem no desempenho em comparação aos concretos convencionais com alto teor de cimento na formulação. Entretanto, a menor quantidade de cimento implica em uma maior sensibilidade aos parâmetros de instalação e às variações na adição de água, como temperatura ambiente e temperatura do ar.

A próxima etapa após a instalação no local desejado é a de secagem desse concreto, consistindo-se na eliminação dessa água excedente. (LUZ et al, 2015) A secagem e o aquecimento de LCCs e ULCCs costumam ser difíceis, principalmente

em instalações espessas, devido à baixa permeabilidade ao gás causada pela baixa porosidade desses materiais. A espessura do monolítico presente na camada de trabalho varia entre 10 cm e 30 cm, e quanto mais espessa é essa camada, mais cuidadoso deve ser o padrão de aquecimento e mais complexa é a retirada desses vapores gerados dentro do concreto. (CUNHA et al, 2023)

Os principais problemas são a ocorrência de rachaduras e o risco de fragmentação explosiva, decorrente de um acúmulo de pressão interna de vapor dentro da estrutura excedendo a resistência do material. (NARUSE et al, 1984) Devido à presença dos agentes hidráulicos na mistura, é necessária a adição de um programa de aquecimento controlado para garantir que todo o vapor gerado, oriundo de duas fontes diferentes de pressão de vapor (água livre e água quimicamente ligada), seja expelido da cerâmica sem que haja um acúmulo de pressão na porosidade que possa ocasionar fratura, gerando problemas para o processo produtivo de uma indústria. Este fenômeno de acúmulo de pressão não é restrito somente para cerâmicas refratárias, sendo sua primeira descrição oriunda do setor da engenharia civil, a partir de estudos sobre acidentes de incêndio em construções. (JANSSON, 2013)

A pressão interna de vapor depende muito da temperatura de cura e das propriedades do material, como resistência e permeabilidade. O equilíbrio entre a pressão de vapor e a resistência, sem dúvida, determina se ocorrerá ou não uma explosão durante a etapa de secagem. A indústria geralmente aplica patamares de temperatura com temperaturas específicas para garantir uma maior segurança no aquecimento desse refratário. (LUZ et al, 2015)

Na família dos materiais refratários, os refratários monolíticos compreendem um grande grupo de materiais, e que evoluíram e cresceram significativamente nas últimas décadas. Os concretos refratários são combinações de agregados, componentes de matriz, agentes de ligação e aditivos. Os agregados são partículas grosseiras da ordem de milímetros e constituem cerca de 60 a 80% de toda a formulação. Eles são extremamente importantes, pois compõem o “esqueleto” do concreto e, quando quimicamente adequados, atuam como mecanismo de aumento da resistência ao choque térmico e de corrosão (LEE et al., 2001).

Os agregados, que representam a maior parte da formulação, possuem tamanho de grão que podem variar de 20 mm a 300 mm (50 Mesh) e são

dimensionados e proporcionados para obter o empacotamento e a distribuição de tamanho de partícula desejados. Há uma grande variedade de agregados refratários disponíveis, e os concretos podem ser formulados com base em somente um ou em uma combinação de agregados para obter a química, a mineralogia e as propriedades físicas desejadas (SAKO et al, 2014).

A matriz é o conjunto das partículas finas, geralmente menores que 100 μm , que são adicionadas com a finalidade de preencher os espaços vazios deixados pelos agregados, aumentando assim a densidade de empacotamento do material (OLIVEIRA et al., 2000). Na matriz podem ocorrer reações entre seus componentes para formação in-situ de fases de interesse em altas temperaturas, como é o caso do espinélio, da mulita e dos aluminatos de cálcio (TOUZO et al., 2005). Os ligantes são matérias-primas utilizadas para conferir resistência mecânica inicial da composição refratária. A esquematização da composição do material refratário entre agregado, matriz e ligante pode ser observada na Figura 1.

Por fim, os aditivos empregados em composições refratárias possuem as mais diversas funções. Em concretos, geralmente adiciona-se aditivos químicos, tais como os agentes de dispersão das partículas finas, a fim de se otimizar o empacotamento de partículas e reduzir o consumo de água (HOMMER et al., 2005). Há também aditivos comerciais utilizados para interferir no processo de cura, atuando tanto como retardantes quanto como aceleradores de pega (CURRELL et al., 1987).

Os agregados e os aditivos usados em uma formulação de concretos refratários são dimensionados e proporcionados para atingir o empacotamento e a distribuição de tamanho de partícula desejados. O empacotamento e o dimensionamento dos componentes do concreto refratário afetarão a reologia da mistura do concreto durante a instalação e a densidade e a resistência finais do concreto colocado em serviço.

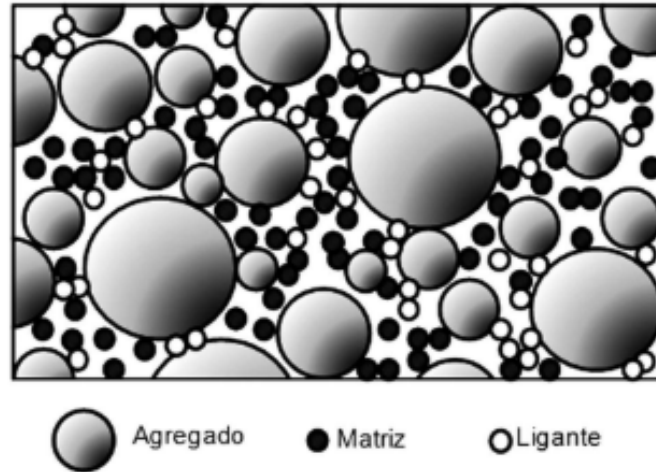


Figura 1: Esquemática da composição de um material refratário (SAKO et al, 2014).

Neste contexto, destacam-se as indústrias siderúrgicas, petroquímica, de cimento, de vidros e de não-ferrosos. Durante a aplicação, os refratários devem apresentar as seguintes funções: manter e armazenar o calor; resistir a solicitações mecânicas, térmicas e químicas; suportar cargas sólidas e/ou líquidas, estáticas ou dinâmicas (ESCHNER et al., 2004). A indústria de refratários tem se desenvolvido tecnologicamente principalmente em resposta aos avanços das indústrias de produtos primários, sendo a siderurgia a principal consumidora, utilizando mais de 70% da produção mundial de refratários (LEWIS, 1991). Neste setor, a utilização de refratários está presente em todos os equipamentos do processo, a começar pelos fornos de coqueria, passando pelo alto forno, carro torpedo, conversor LD, fornos elétricos, painéis de refino secundário, até o estágio final de lingotamento.

No ponto de instalação, o concreto é misturado com um líquido (normalmente água) e vibrado, derramado, bombeado ou disparado pneumáticamente no local desejado para formar uma estrutura refratária rígida. É comum a todos os concretos o uso de agregados refratários e componentes de matriz que podem permitir que o refratário seja usado em temperaturas de serviço de até 1850°C (SCHACHT, 2004). Como os concretos refratários são um grupo muito grande e diversificado de materiais, eles podem ser tipificados ou classificados de várias maneiras ou por uma combinação de características. A principal divisão dos concretos é baseada na química. Essa divisão separa os concretos refratários baseados em agregados de alumina e alumino-silicato dos concretos baseados em óxidos refratários básicos, como magnesita e dolomita. Essa divisão é fundamental, pois diferentes sistemas de

ligação são utilizados em cada categoria. Além disso, o escopo de aplicação dos produtos fundíveis básicos é mais limitado do que o dos fundíveis à base de alumina e alumino-silicato (SCHACHT, 2004).

A maioria dos produtos básicos fundidos é usada em áreas onde existem condições básicas de escória, como em vários recipientes de processamento de aço, cobre e chumbo. Nos concretos refratários isolantes e de peso médio, os agregados leves são usados no lugar de agregados mais densos ou são misturados com agregados densos para obter a densidade e as propriedades desejadas. Nos últimos 20 anos, foram desenvolvidos monolíticos especializados usando ligantes não cimentícios, como alumina hidratável, argila, sílica e géis de alumina, entre outros. Os sistemas fundíveis básicos dependem de ligações químicas ou orgânicas, sendo as mais comuns os silicatos alcalinos, os fosfatos de sódio, ácidos minerais ou orgânicos e resinas. Para completar a formulação do concreto refratário, vários tipos de aditivos ou aditivos podem ser usados para modificar as características reológicas do concreto, controlar o comportamento de endurecimento (retardando ou acelerando), reduzir a água de moldagem, estabilizar/controlar o pH da pasta de cimento ou estabilizar o comportamento de armazenamento. Em muitos casos, vários aditivos são usados em uma única formulação. Os aditivos são usados em quantidades muito pequenas, normalmente 0,2%, e podem mudar de função ao variar a quantidade usada. O uso e o controle adequados das combinações de aditivo/mistura são um aspecto essencial do projeto avançado de mistura fundível (SCHACHT, 2004).

2.3 ALUMINA

As aluminas são materiais versáteis amplamente utilizados em indústrias como refratários, abrasivos e cerâmicas técnicas. Suas propriedades, como resistência ao desgaste, estabilidade térmica e elevada dureza, tornam-nas indispensáveis em aplicações que exigem alta performance. A produção de aluminas é derivada principalmente do processo Bayer, resultando em materiais com alta pureza e diferentes características conforme o processamento e uso final (MACZURA et al., 2000; CARBONE, 1990).

Existem três tipos principais de aluminas industriais: tabular, calcinada e reativa. Cada tipo apresenta propriedades específicas e aplicações distintas, desde o

uso em refratários de alta temperatura até cerâmicas avançadas e catalisadores (GITZEN, 1970; WEFERS & BELL, 1972).

2.3.1 - Alumina Tabular

A alumina tabular é amplamente reconhecida como um material de alta densidade e resistência, destacado por seu desempenho excepcional em aplicações refratárias e cerâmicas. Sua produção ocorre por meio da sinterização de alumina calcinada em temperaturas que variam entre 1600 °C e 1850 °C. Esse processo resulta na formação de grandes cristais de coríndon, com porosidade predominantemente fechada, o que confere ao material propriedades únicas em termos de estabilidade estrutural e desempenho térmico (MACZURA, 1990).

As propriedades da alumina tabular incluem alta refratariedade, baixa retração térmica, excelente resistência ao choque térmico e notáveis propriedades mecânicas. Sua estrutura cristalina é composta por cristais grandes e poros esféricos fechados, o que a torna ideal para aplicações que exigem elevada estabilidade em condições de altas temperaturas e rigorosos ambientes industriais (MACZURA & GETTY, 1971; MISRA, 1986). Devido às suas características, a alumina tabular é amplamente utilizada como base para refratários de alta performance, atendendo às demandas de indústrias como siderurgia, petroquímica e cerâmica. Entre as principais aplicações destacam-se ladrilhos refratários e concretos monolíticos, que são amplamente utilizados para revestimentos de fornos e equipamentos de alta temperatura. Além disso, a alumina tabular é empregada em filtros metálicos fundidos e camas de suporte inertes, essenciais para sistemas de troca térmica e catalisadores industriais (MACZURA, 1990).

2.3.2 - Alumina Calcinada

A alumina calcinada é derivada do processo Bayer e caracteriza-se por sua elevada pureza e estabilidade térmica. Ela é amplamente utilizada em abrasivos, cerâmicas e como precursor para outros materiais, como a alumina tabular (CARBONE, 1990; GITZEN, 1970). A produção de alumina calcinada envolve a decomposição térmica da gibsitá, que resulta em uma mistura de fases transitórias, como γ e δ -alumina, e α -alumina estável. Esse processo permite ajustar propriedades como área superficial e granulometria, adequando o material a diferentes aplicações

(WEFERS & BELL, 1972; MISRA, 1986). A alumina calcinada é essencial na fabricação de materiais refratários devido à sua elevada resistência a altas temperaturas, estabilidade química e baixa reatividade com outros materiais. Ela pode também ser utilizada em outras aplicações, como por exemplo em materiais abrasivos em ferramentas de polimento e corte, e em isoladores elétricos e componentes estruturais de cerâmicas técnicas (MACZURA et al., 2000).

2.3.3 - Alumina Reativa

A alumina reativa é um tipo especializado de alumina, produzido por moagem intensiva até que as partículas atinjam tamanhos abaixo de 1 μm . Sua principal característica é a capacidade de densificação a temperaturas relativamente baixas, o que a torna ideal para cerâmicas avançadas e refratários de alta densidade (MACZURA et al., 2000).

A alumina reativa apresenta alta pureza, baixa porosidade e elevada capacidade de sinterização. Essas características são obtidas pela combinação de tamanhos de partículas reduzidos e excelente dispersibilidade, que permitem alta densificação em temperaturas mais baixas (CARBONE, 1990; GITZEN, 1970).

2.4 CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO

O cimento de aluminato de cálcio é reconhecido por suas propriedades de rápido desenvolvimento de resistência, alta resistência térmica e tolerância a condições quimicamente agressivas. Essas características tornam o CAC indispensável em aplicações de alto desempenho, como refratários, tubulações de esgoto, pisos industriais e reparos rápidos. Apesar de sua versatilidade, o CAC é cerca de quatro vezes mais caro que o cimento Portland (CP), devido à escala limitada de produção e às matérias-primas específicas necessárias, restringindo seu uso a aplicações de alto valor agregado. Embora possuir uso em menor volume comparado ao CP, o CAC é preferido em situações em que suas propriedades únicas superam os desafios de custo e complexidade de produção. (SCRIVENER et al., 2001; IDEKER, 2008; ROBSON, 1962).

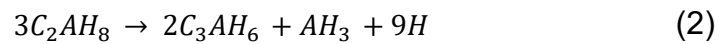
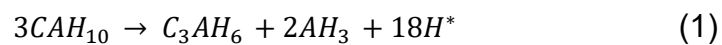
O CAC é composto principalmente por fases reativas, como o aluminato monocálcico (CA) e o hepta-aluminato de dodecacálcio (C_{12}A_7). Essas fases

desempenham um papel crucial na hidratação inicial, proporcionando o rápido ganho de resistência característico do CAC. Durante o processo de hidratação, o CA reage com a água para formar produtos hidratados metaestáveis como o CAH_{10} (hidrato de aluminato de cálcio decahidratado) e o C_2AH_8 (hidrato de aluminato de cálcio octahidratado), que possuem baixa densidade e ocupam um grande volume, preenchendo poros e contribuindo para a rápida resistência inicial. Entretanto, sob condições de temperatura superior a $30^{\circ}C$ e alta umidade, essas fases metaestáveis tendem a se converter em formas termodinamicamente mais estáveis, como o C_3AH_6 (hidrato de aluminato de cálcio hexahidratado) e a AH_3 (hidrato de alumina amorfo). Essa reação é acompanhada por uma redução de densidade dos produtos hidratados, resultando em liberação de água e, conseqüentemente, no aumento da porosidade do material. Como conseqüência, podem ocorrer perdas de resistência mecânica e formação de microfissuras, principalmente em ambientes onde as condições de temperatura e umidade não são devidamente controladas. Esses fatores tornam essencial o controle do histórico térmico e da relação água/cimento durante a cura do CAC, especialmente em aplicações estruturais ou de longa duração. (TAYLOR, 1997; DING et al, 1995)

Os refratários moldáveis são os maiores consumidores de CAC, utilizando teores variados de cimento para atender a diferentes necessidades. Moldáveis convencionais contêm entre 15% e 30% de CAC, enquanto moldáveis de baixo teor de cimento LCC e ULCC reduzem esse teor para 5% a 8% e 1% a 3%, respectivamente. Essa redução melhora a resistência térmica e diminui a vulnerabilidade a choques térmicos, essenciais para fornos industriais e sistemas de contenção de calor (FRYDA & SCRIVENER, 2007; ADAMS & IDEKER, 2017).

O CAC ao ser submetido à elevadas temperaturas forma hexaluminato de cálcio, o CA_6 ($CaO \cdot 6Al_2O_3$), que atua como um excelente mecanismo de tenacificação e apresenta caráter expansivo, contribuindo positivamente para a variação dimensional do concreto. Portanto, além de contribuir indiretamente para a infiltração de escória em caso de expansão não controlada, a presença de CaO no refratário também é uma variável significativa nas interações químicas entre o concreto e as escórias de panela de aço (SAKO et al, 2014).

Sua utilização ocorre principalmente em aplicações industriais devido às suas propriedades de rápido desenvolvimento de resistência, alta resistência térmica e resistência a condições químicas agressivas. As principais aplicações do CAC são em refratários, tubulações, vertedouros de barragens e reparos estruturais, incluindo revestimentos de esgoto e reparos emergenciais em rodovias e pistas de aeroportos. A alta resistência inicial do cimento CAC é atribuída à formação de hidratos hexagonais (CAH_{10} e C_2AH_8) como os produtos de hidratação dominantes. Como o CAH_{10} e o C_2AH_8 são metaestáveis, eles convertem-se nos mais estáveis C_3AH_6 e AH_3 , de acordo com as equações 1 e 2. (TAYLOR, 1997)



O CAC possui resultados positivos para a durabilidade e estabilidade das misturas em climas quentes, tornando-o essencial em aplicações que demandam alta performance e rápidas intervenções, destacando-se por sua versatilidade e eficiência em cenários exigentes. (HOUGHTON & SCRIVENER, 1994; THOMAS et al., 2011).

A produção do CAC envolve matérias-primas ricas em alumina, como bauxita, e calcário de alta pureza, calcinados a temperaturas entre, aproximadamente, 1300 e 1400 °C em fornos rotativos. O CAC de alta pureza requer controle rigoroso das fases minerais, resultando em um produto com baixo teor de CaO livre e alta reatividade hidráulica (BAUER & KIEHL, 1980; FRYDA et al., 2001).

Desde a década de 1980, o desenvolvimento de moldáveis refratários com baixo teor de cimento e autoadensáveis revolucionou o uso do CAC, eliminando a necessidade de vibração mecânica durante a aplicação e aumentando a eficiência no processo de instalação. A substituição parcial do cimento por sílica ativa e alumina reativa resultou em moldáveis com maior resistência a altas temperaturas e desempenho mecânico superior (BIZZOZERO & SCRIVENER, 2014; FRYDA et al., 2016).

O CAC é essencial para aplicações industriais que demandam alta resistência térmica, estabilidade química e durabilidade mecânica. Apesar dos desafios associados ao custo e às reações de conversão, o avanço tecnológico contínuo

fortalece sua posição como material estratégico em setores de alta performance, como refratários e construção especializada. A evolução de suas aplicações, alinhada à pesquisa de novos aditivos e técnicas de processamento, assegura seu papel como componente indispensável na engenharia moderna (SCRIVENER & CAPMAS, 1998; DUNSTER et al., 1997)

2.5 SECAGEM

Um dos maiores desafios relacionados aos concretos refratários é a complexidade da etapa de secagem. Devido aos avanços no projeto de distribuição de tamanho de partícula e redução da permeabilidade do sistema, a complexidade dessa etapa só aumenta. Além disso, há uma demanda crescente por tempos mais curtos de manutenção dos equipamentos, pressionando uma etapa de secagem mais curta. (LEE et al, 2001)

Na década de 1960, os concretos convencionais à base de alumina tabular e CAC de alta pureza eram os refratários normalmente aplicados. Como eles continham cimento em quantidades tão altas, chegando a 30% em peso e não apresentavam o melhor projeto de distribuição de tamanho de partículas, nem continha dispersantes eficientes, a água necessária para a colocação adequada era muito alta (cerca de 20-25% em peso), resultando em estruturas porosas e permeáveis. Desta forma, a saída de água era tão rápida devido à alta porosidade que o aglutinante hidráulico não estava totalmente hidratado. Como consequência, a resistência mecânica verde era menor e a probabilidade de rachaduras maior. Portanto, após o primeiro aquecimento, defeitos estruturais foram comumente identificados na estrutura do revestimento. (LEE et al, 2001)

Posteriormente, por volta dos anos 1970 a 1980, foi observada uma redução notável no teor de CAC, o que levou ao chamado revestimento baixo (LCC) e ultrabaixo cimento (ULCC). Nesses produtos, o aglutinante foi parcialmente substituído por grãos mais finos e dispersantes aprimorados também foram incorporados às composições. Como resultado, esses materiais exigiram uma quantidade menor de água para a moldagem adequada e sua microestrutura final apresentou porosidade geral reduzida. O desenvolvimento de estruturas mais densas e menos permeáveis é essencial para suportar o ambiente severo das unidades

industriais de alta temperatura. Portanto, a busca por refratários avançados destacou um dos maiores desafios para aplicações monolíticas, pois os cronogramas de secagem usados anteriormente para produtos convencionais se tornaram subitamente inviáveis devido à fragmentação explosiva recorrente e aos danos mecânicos observados durante a desidratação. (LEE et al, 2001; INNOCENTINI et al, 2004)

A associação dessa microestrutura não permeável e de um procedimento de aquecimento não apropriado geralmente acelera a taxa de geração de vapor (levando à pressurização), principalmente em grandes peças fundidas. Além disso, ao alterar as condições hidrotérmicas, fases não esperadas de cimento hidratado cimento não esperadas são obtidas, provavelmente diminuindo a permeabilidade do sistema. Entre todas as etapas de processamento do concreto (mistura, colocação, cura e secagem), a secagem é geralmente a mais longa. Como é um processo que demanda tempo, esse tempo impacta não apenas os custos relacionados ao consumo de energia, mas também sobre a produção (perda de renda). (AUVRAY et al, 2013)

Além disso, qualquer dano mecânico causado durante a secagem (podendo até gerar explosão) implicaria em uma vida útil mais curta do revestimento e gastos extras com manutenção e material, resultando em perdas contínuas e significativas. (KEEY, 1978)

O cronograma de aquecimento de uma de aquecimento de uma panela de aço compreende quase metade do tempo total de parada do equipamento, reforçando a necessidade de reduzir o período de secagem. Além disso, uma preocupação prática relacionada ao aquecimento do primeiro fundido é garantir que a programação recomendada (geralmente fornecida pelo fornecedor do refratário) será de fato seguido no procedimento operacional. (NAKAMURA et al, 2004)

O fenômeno de secagem é compreendido pela retirada de água impulsionado por gradientes de pressão, concentração e/ou temperatura. Envolve a transferência de calor (por condução, convecção ou radiação) quanto o movimento de massa (por difusão ou capilaridade). (HALL, 1979)

Depois que o concreto é misturado com água, durante a aplicação e a etapa de cura, uma fina camada de líquido recobre a superfície e se deposita na estrutura

do material, conforme demonstrado na Figura 2 (a). No início do processo de secagem, a água é retirada da região logo abaixo da superfície, sem qualquer alteração na pressão, pois a temperatura geralmente é constante. A etapa de vaporização é lenta e depende das condições ambientais de temperatura e umidade. Quando essa película externa é removida, são geradas interfaces entre o sólido e a atmosfera e, para manter a coesão do líquido, são formados meniscos entre as partículas, devido à tensão superficial da água. Sob essa condição, fortes forças capilares puxam a água da região interna do material para a superfície. Esse é um processo contínuo, desde que o equilíbrio entre a água arrastada de áreas mais profundas e sua liberação para a atmosfera seja constante (Figura 2 (b)). A taxa de secagem durante esse período é estável e, por isso, é chamada de período de taxa constante. Como a secagem do concreto é geralmente conduzida sob aquecimento contínuo, quando a temperatura se aproxima de 100°C, a pressão de vapor aumenta fortemente, tornando a taxa de desidratação da superfície maior do que a velocidade de migração da água das regiões internas do material, resultando em uma descontinuidade entre as camadas mais profundas e úmidas da estrutura e a superfície seca, conforme demonstrado pela Figura 2 (c). Após esse momento, a água não é mais retirada como líquido, mas sim por meio da difusão de vapor pelos caminhos permeáveis do concreto. Em função disso, a taxa de secagem é reduzida, levando ao chamado período de queda da taxa, podendo durante esta etapa, não haver taxa de aquecimento, gerando um platô na curva de aquecimento do concreto. Durante a vaporização, a temperatura e a taxa de aquecimento são menores do que na superfície de secagem, devido à maior capacidade da água de absorver calor em comparação com meios sólidos. Esse aspecto é muito relevante no final do estágio de secagem, pois há menos H₂O presente entre as partículas sólidas e, portanto, uma quantidade maior de calor pode ser absorvida pela estrutura (Figura 2 (d)). (SALOMÃO et al, 2008)

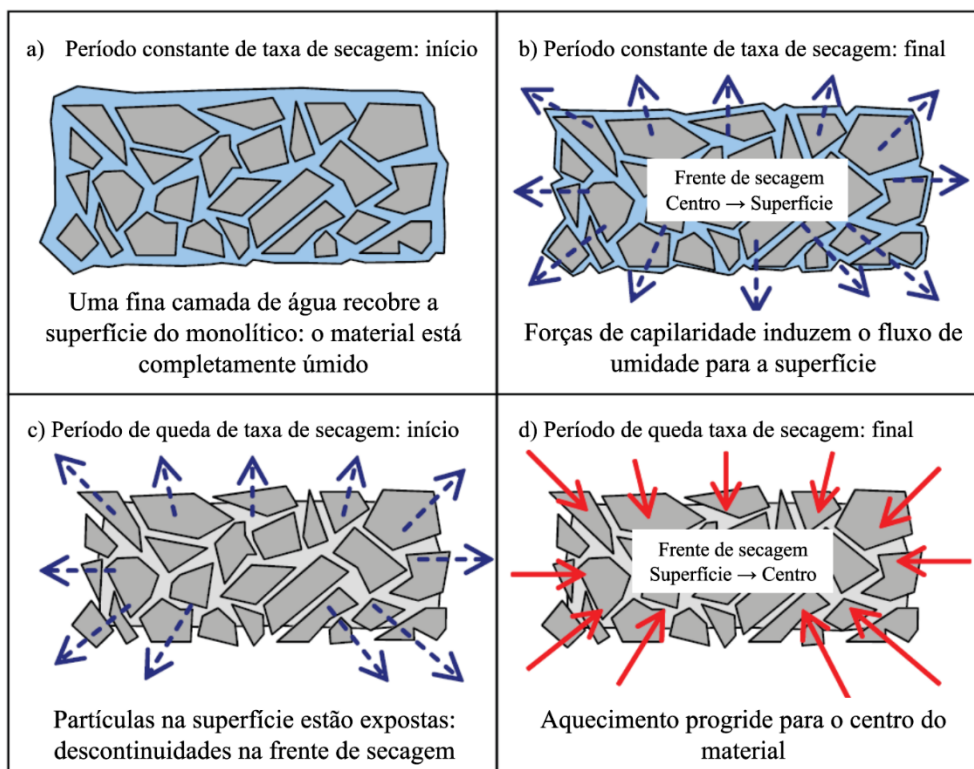


Figura 2: Estágios iniciais da secagem de concretos na presença de uma película de água. Adaptado de (SALOMÃO et al, 2008).

Considerando a localização da frente de secagem, não há água livre em direção à face quente, indicando que o processo completamente finalizado nessa área. Como o calor é então transferido por condução para as regiões mais profundas, a água começa a ferver (ou evaporar) antes da frente de secagem. Enquanto o vapor formado que se difunde para o lado do aquecimento é retirado do sistema, a outra parte que se desloca para o lado frio se condensa, devido à frio se condensa, devido à temperatura mais baixa nessa área, aumentando a probabilidade de transferência de calor por condução térmica para essa área de temperatura relativamente baixa. À medida que esse processo avança, a frente de secagem é deslocada para a região mais profunda do material, até o ponto em que o H₂O é totalmente liberado da estrutura. (MAEDA & IIDA, 2008)

Como os concretos são geralmente unidos com aglutinantes hidráulicos, o processo de secagem envolve três estágios que ocorrem em diferentes temperaturas: (1) evaporação (25-100 °C), (2) ebulição (100-300 °C) e (3) decomposição de hidratos (acima de 250-300 °C), conforme ilustrado na Figura 3. A quantidade relativa de água livre, que é expelida durante a evaporação ou ebulição, e de água quimicamente

ligada (Q.L.), oriunda dos hidratos de CAC, por exemplo, depende da quantidade total de líquido adicionado para mistura e do teor de ligante hidráulico. (INNOCENTINI et al, 2003)

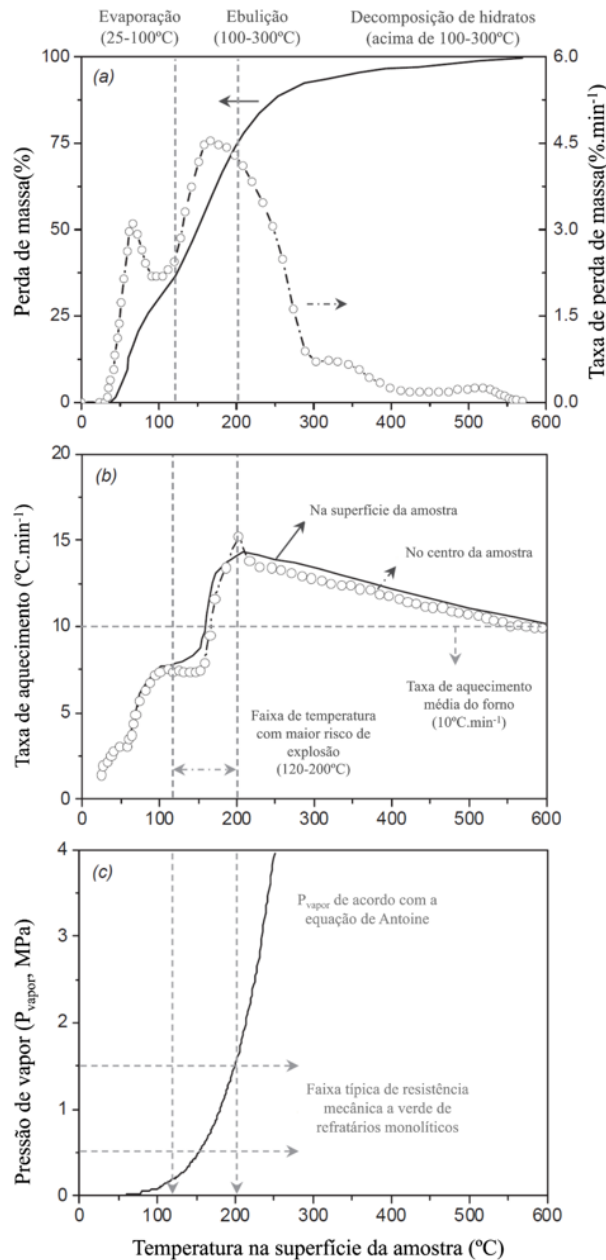


Figura 3: Avaliação do comportamento de secagem por meio de (a) análise termogravimétrica, (b) perfil de temperatura interna na superfície ou no centro da amostra e (c) aumento exponencial da pressão de vapor (P_v) com a temperatura, de acordo com a equação de Antoine.

Quando a temperatura da amostra atinge 100°C, a ebulição começa (Figura 3 (a)) e leva a uma taxa de perda de massa maior do que a observada durante a evaporação, pois é então governada pela pressão do vapor de água em vez dos

aspectos ambientais (temperatura e umidade, como visto anteriormente para a evaporação). Essa é a etapa de desidratação mais crítica e onde provavelmente ocorre a fragmentação. Como o vapor é formado rapidamente e geralmente está localizado a uma certa profundidade da superfície (gerando aglomerados de vapor pressurizado), não é fácil obter um equilíbrio adequado e preciso entre a quantidade de gás gerada dentro do corpo e sua retirada na superfície (que depende da taxa de aquecimento, da permeabilidade da taxa de aquecimento, da permeabilidade e da espessura do concreto). (ODA et al, 1989)

A pressão de vapor de água (P_v) apresenta uma relação exponencial com a temperatura e é descrita, para um sistema aquoso fechado de líquido/vapor, pela equação de Antoine (Equação 3): onde, P_v é dada em Pascal, T é a temperatura (em K) e A , B , C são constantes empíricas adimensionais (para água, $A = 23,22$; $B = 3841,22$; $C = - 45,00$). Essa equação é válida na faixa de 0 a 374 °C, na qual existe equilíbrio líquido-vapor. (REID et al, 1989)

$$P_v = \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right) \quad (3)$$

A Figura 3(b) indica a taxa de aquecimento medida na superfície e no centro da amostra comparada com a média do dispositivo (linha tracejada a 10 °C/min). Durante a evaporação e a maior parte do estágio de ebulição (até aproximadamente 160 °C), a temperatura e sua taxa na superfície de secagem e na região central do material são mais baixas do que os estabelecidos para a câmara de aquecimento. (ODA et al, 1989)

No início da etapa de ebulição (100-150°C), o aumento de temperatura na superfície é mais rápido do que o observado na parte interna da parte interna do corpo do concreto, pois a quantidade de água entre as partículas sólidas é maior nas áreas mais profundas. Isso ocorre porque a vaporização de água é uma transformação de primeira ordem com alto calor latente, indicando que é necessária mais energia para aquecer a água do que os componentes sólidos do concreto. Isto é, a eficiência de aquecimento do meio sólido é menor devido à maior capacidade calorífica da água. Logo, a secagem é fortemente afetada pelo gradiente de temperatura do refratário,

pois esse aspecto leva a um notável comportamento não isotérmico, causando uma variação da pressão de vapor ao longo da espessura do material. (MIZOBE et al, 2008)

A Figura 3 (c) mostra a evolução da P_v em função da temperatura (Equação 4) e a faixa típica de resistência mecânica verde do monolítico (considerando os resultados de resistência à tração). Dependendo da taxa de aquecimento aplicada, a velocidade de formação de vapor, a resistência mecânica do material e sua capacidade de liberar água por caminhos permeáveis, o estágio de ebulição geralmente pode terminar em temperaturas que variam de 250 a 300°C sem fragmentação, conforme Figura 4 (a). (ODA et al, 1989)

A ebulição na faixa de 160°C é perigosa para a maioria dos concretos verdes e a pressão imposta resulta em tensão de tração triaxial. Desta forma, a condição necessária para a ruptura do concreto pode ser facilmente atingida, levando à fragmentação, conforme ilustrado na Figura 4 (b). Como a vaporização da água é um processo endotérmico, observa-se um aumento repentino na temperatura, em torno de 200°C. (INNOCENTINI et al, 2003)

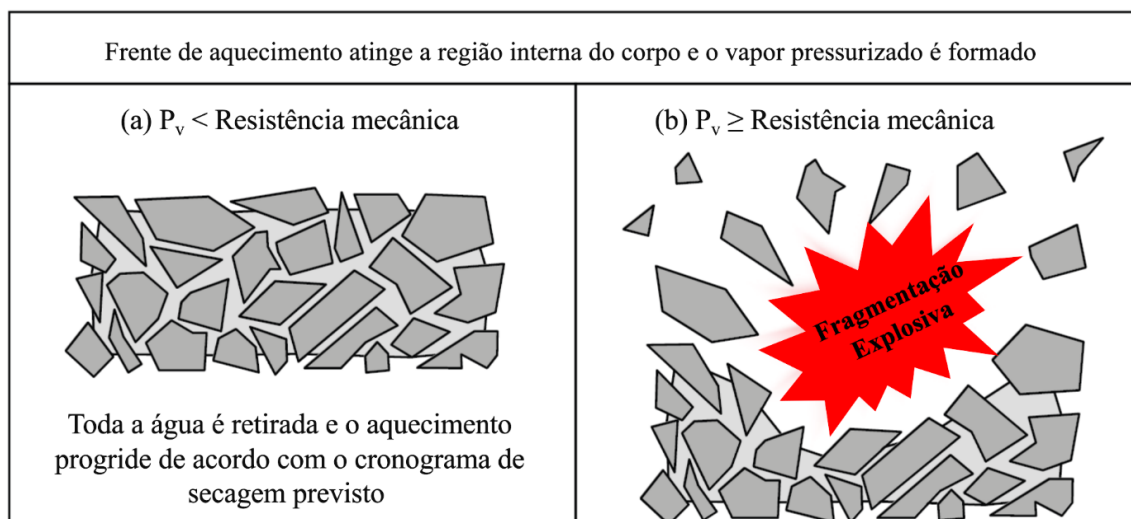


Figura 4: Efeito da pressurização de vapor e suas correlações com a resistência mecânica de concretos. Adaptado de (SALOMÃO et al, 2008).

Os níveis de P_v podem ser notavelmente diferentes de acordo com a permeabilidade das amostras e a capacidade da estrutura das amostras para liberar a água livre. A Figura 5 mostra as pressões em diferentes profundidades de amostra, indicando valores mais altos de pressão para a composição que apresenta menor

permeabilidade (Figura 5(a)), em comparação com a composição que possui maior permeabilidade (Figura 5(b)). Por conseguinte, a presença de caminhos permeáveis na microestrutura do material é um aspecto fundamental para a secagem rápida e segura, pois a resistência mecânica do concreto pode não ser suficiente para suportar um estresse termomecânico mais abrupto. (MIZOBE et al, 2008)

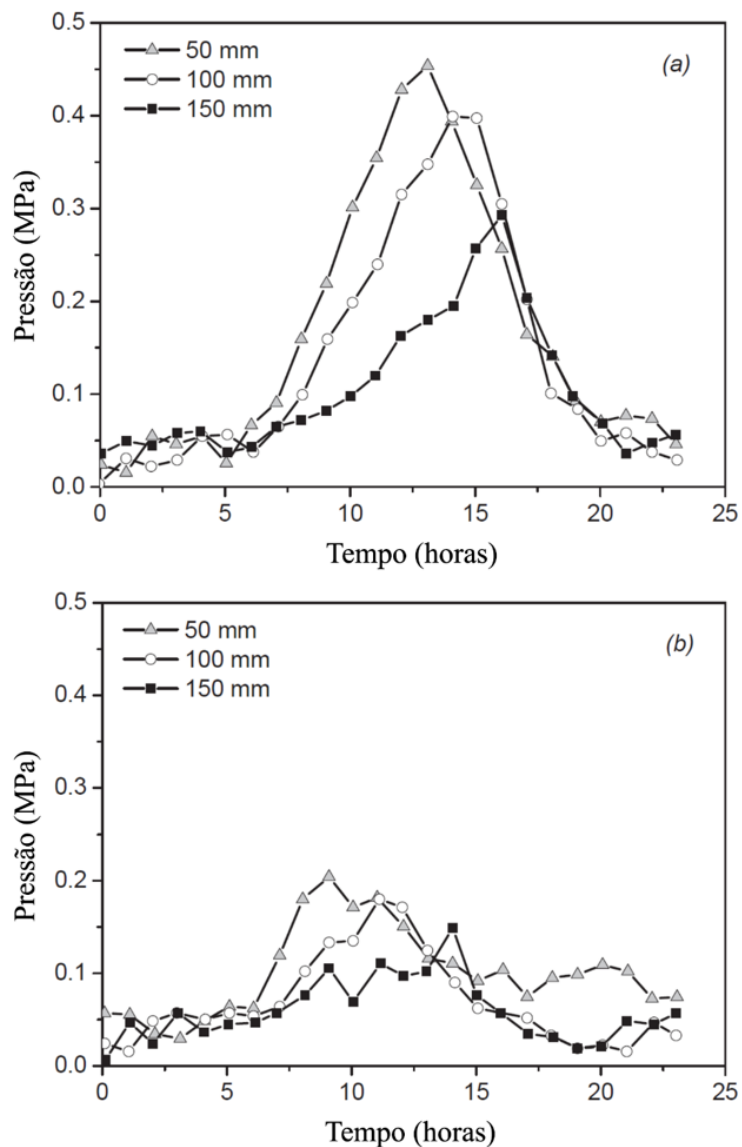


Figura 5: Pressão em diferentes profundidades (50, 100 e 150 mm) versus tempo para concretos com níveis de permeabilidade mais baixo (a) e mais alto (b). Adaptado de (MIZOBE et al, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram realizadas simulações de um concreto de alta alumina ligado utilizando 5% em formulação de cimento de aluminato de cálcio (denominado aqui como 5CAC, Tabela 1), previamente avaliado por CUNHA. A composição foi projetada de acordo com o modelo de empacotamento de Andreasen, considerando um coeficiente de distribuição $q = 0,21$. Para a condutividade térmica, os valores foram medidos na faixa de 35 °C e 800 °C usando amostras pré-queimadas (5h) para temperaturas acima de 200 °C e, em seguida, foram interpolados por meio de uma função quadrática. A constante de permeabilidade em um fluxo linear k_1 pode ser calculada de acordo com a correlação de Forchheimer, Equação 4, em que P_i e P_e são as pressões de entrada e saída do fluido (Pa), L é o comprimento da amostra (m), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), ρ a densidade do fluido (Kg m^{-3}), v_s é a velocidade de saída do fluido (m s^{-1}) e k_2 é a constante de permeabilidade não-Darciana, que não foi levada em consideração neste estudo para obter um valor de permeabilidade com base no perfil do fluxo de ar.

$$\frac{P_i^2 - P_e^2}{2P_e L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (4)$$

Para comparar diretamente a pressão de vapor gerada e a resistência do refratário, foi introduzido um parâmetro de razão de resistência (ξ), que é definida pela razão entre a pressão máxima de vapor obtida durante a simulação e a resistência à tração triaxial do material. A razão de resistência (ξ) é definida pela Equação 5, onde $P_{vm\acute{a}x}$ (MPa) é a maior pressão de vapor e σ_{tri} a resistência a tração triaxial (MPa).

$$\xi = \frac{P_{vm\acute{a}x}}{\sigma_{tri}} \quad (5)$$

Para otimizar o processo de secagem de concretos refratários, este estudo utilizou simulações numéricas para avaliar e aprimorar o consumo energético. A metodologia envolveu três etapas principais. Primeiramente, foi realizada uma análise preliminar do processo de secagem através de uma revisão bibliográfica para compreender os parâmetros críticos e identificar as variáveis influentes, como a temperatura da curva de aquecimento, a umidade e a composição do material. Em

seguida, um modelo numérico detalhado foi utilizado via software de simulação FEniCs, que consiste na resolução de equações diferenciais parciais pelo método de elementos finitos, com base nas propriedades térmicas e físicas dos concretos refratários. As simulações foram configuradas para replicar condições operacionais reais e foram realizadas simulações em 3 cenários de isolamentos diferentes sob duas condições de secagem, uma sem patamar de temperatura e outra após a adição de um patamar sob uma temperatura específica, para observar o impacto dessas variáveis sobre a razão de resistência local do concreto e os impactos energéticos. Por fim, os resultados das simulações foram analisados para identificar padrões e otimizar os parâmetros de processo, com o objetivo de reduzir o consumo energético e melhorar a eficiência da secagem.

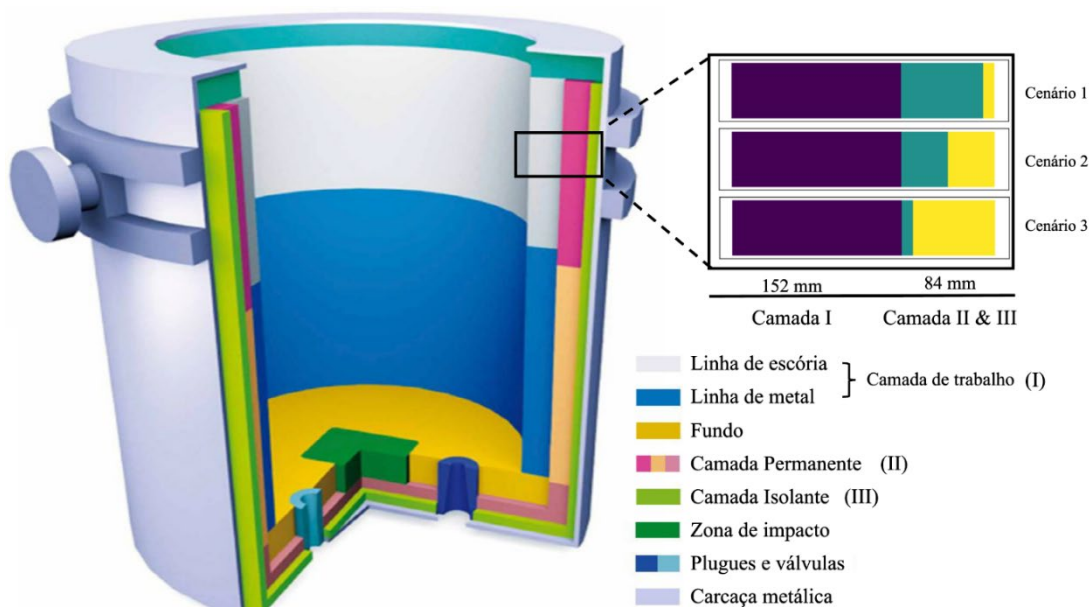


Figura 6: Configuração típica do revestimento de painéis de aço, com camadas e zonas distintas destacadas, sendo cada uma dessas seções especificamente definida para atender a critérios específicos. Geometria avaliada para cada um dos casos simulados, adaptado de (SANTOS et al, 2018)

Na Figura 6 é possível observar uma configuração típica do revestimento de painéis de aço, e o recorte da região específica que foi utilizada para realizar as simulações, com as configurações de espessura utilizadas em cada cenário de simulação com as espessuras indicadas. Na sessão da imagem que representa os cenários simulados, a espessura de cor roxa indica a camada de trabalho, enquanto a cor verde a camada permanente e a cor amarela indica a camada isolante.

3.1 MATERIAIS E PROPRIEDADES

O material utilizado na camada de trabalho é um monolítico 5CAC, isto é, com adição de 5% em massa de Cimento de Aluminato de Cálcio, com composição presente na Tabela 1. As camadas posteriores (permanente, isolante e metálica) são compostas de alta alumina, alumina isolante e aço carbono respectivamente. As propriedades dos materiais podem ser encontradas na Tabela 2.

Tabela 1 - Composição do concreto 5CAC, adaptado de (CUNHA et al, 2022)

Matéria-prima	Fração de massa (%)	Fornecedor
Alumina Tabular (< 5mm)	74	T-60, Almatis, Alemanha
Alumina Calcinada	11	CL370, Almatis, Alemanha
Alumina Reativa	10	CT3000SG, Almatis, Alemanha
CAC	5	Secar 71, Imerys Aluminates, França
Dispersante	0.2	Castament FS60, BASF, Alemanha
Água destilada	4,5	-

Tabela 2 – Propriedades das camadas II e III, adaptado de (SANTOS et al, 2018).

Material	Propriedade	Temperatura [°C]	Valor
Camada II - Tijolo de alta alumina (98,7% Al ₂ O ₃)	ρ [Kg m ⁻³]	-	2660
	k [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	400	2.60
		800	2.10
		1200	2.00
		200	890
	Cp[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]	700	1060
		1200	1144
Camada III - Fibra isolante de alumina (80,0% Al ₂ O ₃)	ρ [Kg m ⁻³]	-	510
	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	250	0.15
		800	0.25
		1350	0.34
	Cp[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]	-	-

3.2 MODELOS NUMÉRICOS

As equações numéricas de balanço de massa e de balanço de energia são demonstradas nas equações 6 e 7, respectivamente.

$$\frac{dw}{dt} = \nabla \left(\frac{a}{g} \nabla P_v \right) + \left(\frac{dw_d}{dt} \right) \quad (6)$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = C_a \frac{dw_d}{dt} - C_w \frac{a}{g} (\nabla P_v \nabla T) + \nabla (k \nabla T) \quad (7)$$

A Equação 6, descreve a variação da água livre e adsorvida com o tempo pela somatória do fluxo de Darcy e da variação da água quimicamente ligada com o tempo. A Equação 7 a variação da energia térmica dentro do corpo cerâmico é representada pela somatória entre a energia usada para a liberação da água adsorvida com o fluxo de Fourier, subtraídos pelo fluxo térmico por convecção.

As condições de contorno selecionadas são expressas pela Equação 8, que descreve a abordagem de Dirichlet, em que a temperatura para a face aquecida do corpo é imposta e T_{HUC} é a curva de aquecimento de entrada do usuário final. As equações 9 e 10 são condições de Robin que representam, respectivamente, o fluxo térmico e o fluxo de massa nos limites, por meio de termos convectivos e radiativos, e um gradiente de pressão de vapor entre a superfície P_v e o ambiente P_{ven} . \vec{n} é o vetor normal unitário, B_t é o parâmetro de troca de calor da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε a emissividade da superfície e B_w o parâmetro de troca de massa da superfície. Na interface entre a camada III com o ar, considerou-se o coeficiente de troca mássica superficial (B_w) como $1e-10$. O estudo presente no apêndice dessa tese demonstra o levantamento realizado sobre as variações de pressão máxima no aquecimento utilizando coeficientes com valores diferentes.

$$T_\Gamma = T_{HUC}(t) \quad (8)$$

$$\vec{n} \cdot q = B_t(T)(T_{en} - T) - \sigma \varepsilon (T_{en}^4 - T^4) \quad (9)$$

$$\vec{n} \cdot J = B_w(P_v - P_{ven}) \quad (10)$$

Com relação às condições de contorno, a curva de aquecimento foi aplicada na face quente da camada I, enquanto o calor foi dissipado após a camada III,

considerando condições de contorno semelhantes àsquelas de quando se tem uma carcaça metálica presente.

Os modelos numéricos utilizados para a simulação têm como base as equações utilizadas por CUNHA et al, 2023. Foram retiradas como base as equações para razão de resistência, as equações de balanço de massa e balanço de energia. As simulações foram realizadas por meio do FEniCs, uma ferramenta *open-source* de elementos finitos para resolução do sistema de equações diferenciais. A geometria de interesse é o revestimento de uma panela de aço, conforme demonstrado na Figura 6.

O revestimento possui quatro camadas, sendo elas: (I) de trabalho, (II) permanente, (III) isolante e (IV) metálica. A camada I teve seu tamanho fixo de 152 mm. A somatória das espessuras das camadas II e III somam sempre 84 mm, totalizando 236 mm ao se somarem as três camadas. As dimensões consideradas da panela siderúrgica foram altura de 5,34 m, com raios: externo de 1,75m e interno de 1,514m. Foram simulados três cenários diferentes com base nas razões entre camada II e camada III, sendo estes:

Cenário 1:

Camada II: 74 mm | Camada III: 10 mm

Cenário 2:

Camada II: 42 mm | Camada III: 42 mm

Cenário 3:

Camada II: 10 mm | Camada III: 74 mm

É de conhecimento do autor que algumas das espessuras podem ser irrealistas, entretanto o objetivo do estudo é avaliar os impactos resultantes da utilização de proporções diferentes de isolantes com relação ao revestimento permanente. Também foi levado em consideração uma representação dos efeitos dinâmicos da desidratação durante o aquecimento.

3.3 SETUP DE SIMULAÇÃO

Fixo

Temperatura inicial: 25 °C

Temperatura final: 825 °C

Taxa de aquecimento: 100 °C/h

Adicionado posteriormente

Tempo de patamar: 7 h

Temperatura de patamar: 180 °C

A curva de aquecimento foi construída de forma a começar na temperatura ambiente de 25 °C e aumentar linearmente, de acordo com a taxa de aquecimento escolhida, até a temperatura final desejada. Nas primeiras simulações, o aquecimento foi constante partindo de 25 °C até 825 °C com taxa de aquecimento de 100 °C/h. Nas demais simulações, houve a adição de patamar na temperatura de 180 °C, isto é, a temperatura crescia linearmente de 25 °C até 180 °C, depois se mantinha constante por 7 horas, e depois retomava o aquecimento sob a mesma taxa. Adotou-se o patamar de temperatura a 180 °C, por ser uma temperatura que permite a secagem da água adsorvida sem que ocorra secagem simultânea de água Q.L.

Ao se iniciar as simulações, a temperatura e a pressão parcial de vapor de água para cada elemento foram definidas como 25 °C e 2850 Pa, respectivamente. O conteúdo inicial de água livre adsorvida estava em equilíbrio com esses dois valores para toda a camada I.

3.4 CÁLCULO DO CONSUMO ENERGÉTICO

Para o cálculo do dimensionamento de energia, utilizou-se a abordagem na qual requer menos operações numéricas para o cálculo no FEniCs, visto que não há diferença significativa entre as abordagens. Para o cálculo, primeiramente integrou-se os fluxos térmicos das diferentes componentes das equações diferenciais constitutivas do problema na geometria e, por fim, integrou-se este valor no tempo para se obter o valor de energia (CUNHA et al, 2023).

4 RESULTADOS

Na primeira simulação, com taxa de aquecimento de 100 °C/h, sem patamar, com temperatura inicial de 25°C e temperatura final de 825 °C, os valores de pressão e de razão de resistência superaram os valores considerados toleráveis para o concreto conforme demonstrado nas figuras 7 e 8.

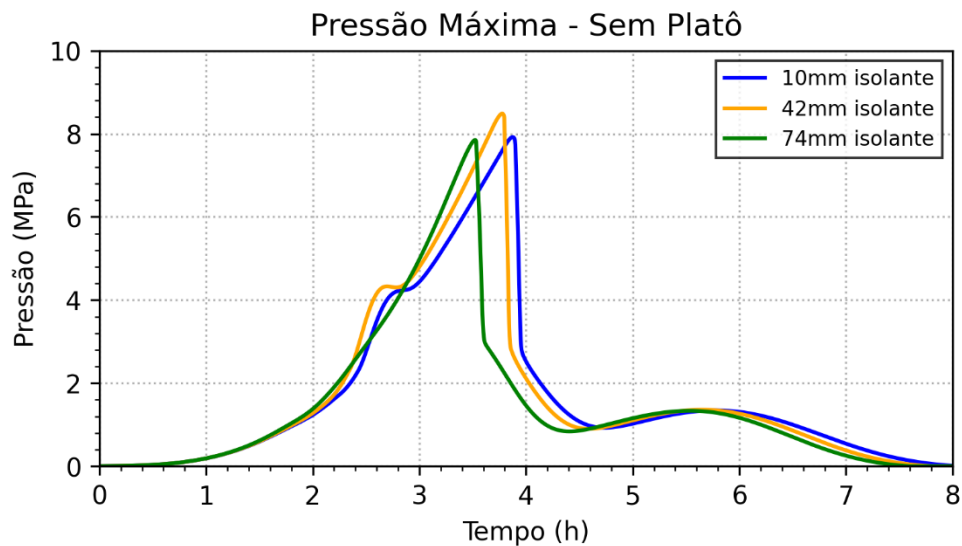


Figura 7 - Gráfico de Pressão Máxima versus o tempo de simulação sem patamar

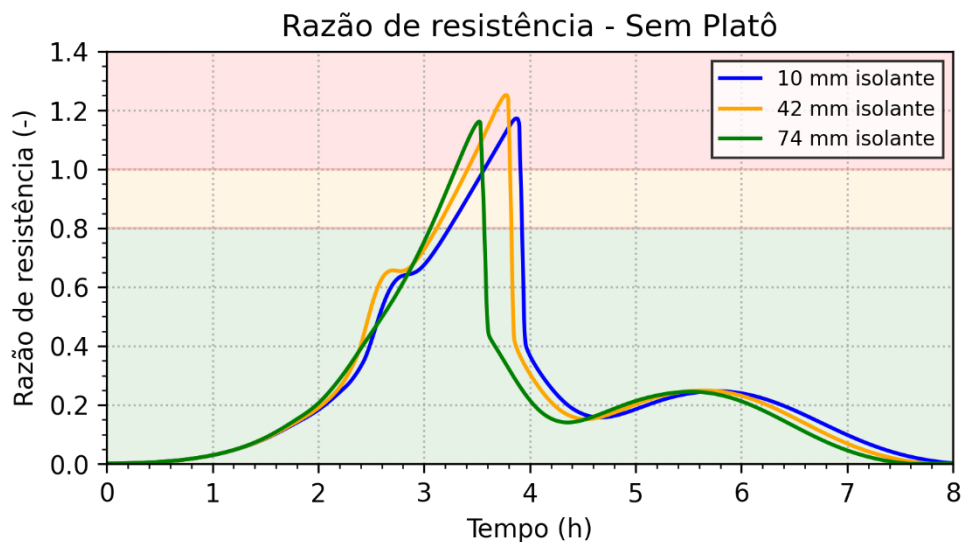


Figura 8 - Gráfico da Razão de Resistência máxima do material versus o tempo de simulação sem patamar. A região verde é considerada uma região de segurança do material, que indica que o material está sendo solicitado abaixo de 80% do seu limite máximo de resistência. A região laranja indica uma zona fora do fator de segurança, que está acima dos 80% e vai até o limite de resistência do material. Enquanto a zona vermelha, nesse caso, indica fratura por fragmentação explosiva.

Na Figura 7, pode-se observar que os valores para os 3 cenários ultrapassaram o valor de 6 MPa de pressão máxima, considerada como limite aceitável para esse padrão de materiais utilizado. Logo, para uma curva de aquecimento sem a utilização de patamar, ocorreria fratura para os três cenários, conforme demonstrado pela Figura 8, com todas as curvas ultrapassando o valor de 1,0 para o cálculo de razão de resistência. Conforme demonstrado pela Equação 5, os valores de razão de resistência são representados em função da pressão máxima do material, portanto, serão considerados e demonstrados apenas os gráficos e valores de razão de resistência para os cenários simulados.

Isto posto, para que não houvesse fratura explosiva durante o aquecimento, foi necessária a implementação de um patamar de temperatura, determinado à 180°C. Foram realizadas simulações aplicando patamar à essa temperatura de 180°C escolheu-se para a continuação do estudo o menor tempo de patamar ao qual nenhum dos 3 cenários simulados ultrapassassem a margem de segurança de razão de resistência de 0,8. Portanto, o tempo de patamar escolhido foi de 7 horas, resultando no gráfico de razão de resistência demonstrado na Figura 9.

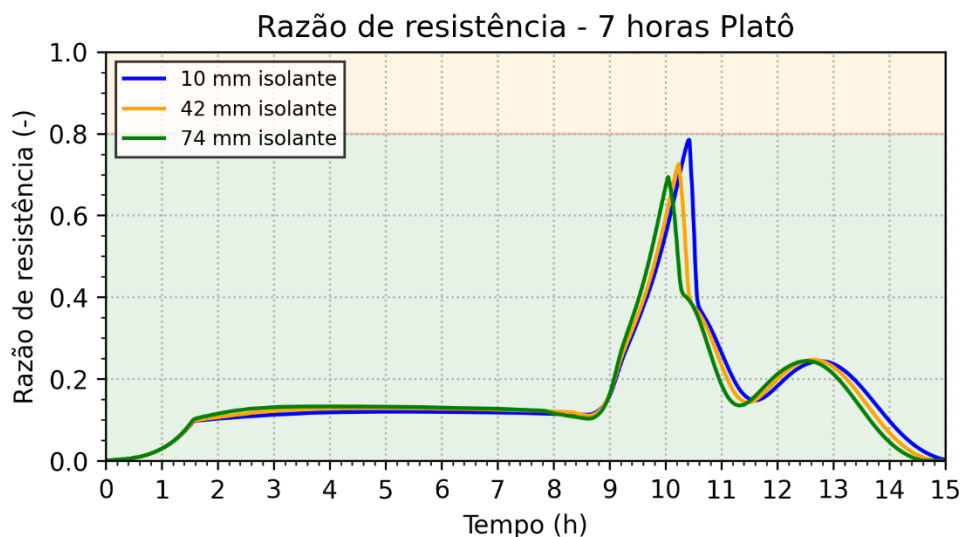


Figura 9 - Gráfico de Razão de Resistência máxima do material com patamar de 7 horas. A região verde é considerada uma região de segurança do material, que indica que o material está sendo solicitado abaixo de 80% do seu limite máximo de resistência. A região laranja indica uma zona fora do fator de segurança, que está acima dos 80% e vai até o limite de resistência do material.

Nesse cenário, com o patamar de 7 horas, já é possível analisar uma clara evolução de resistência conforme menor a espessura da camada III. O cenário 1, em

que há somente 10 mm de isolante e com uma curva de tonalidade mais escura possui o maior valor, enquanto conforme vai se aumentando a espessura do isolante, reduz-se o valor de razão de resistência, sendo o cenário 3, com 74 mm de isolante e curva de tonalidade intermediária, o cenário com o menor valor de razão de resistência da comparação.

Para esse padrão de aquecimento com taxa de aquecimento de 100 °C/h e patamar de 7 horas sob temperatura de 180 °C, o perfil de secagem do concreto é descrito de acordo com a Figura 10.

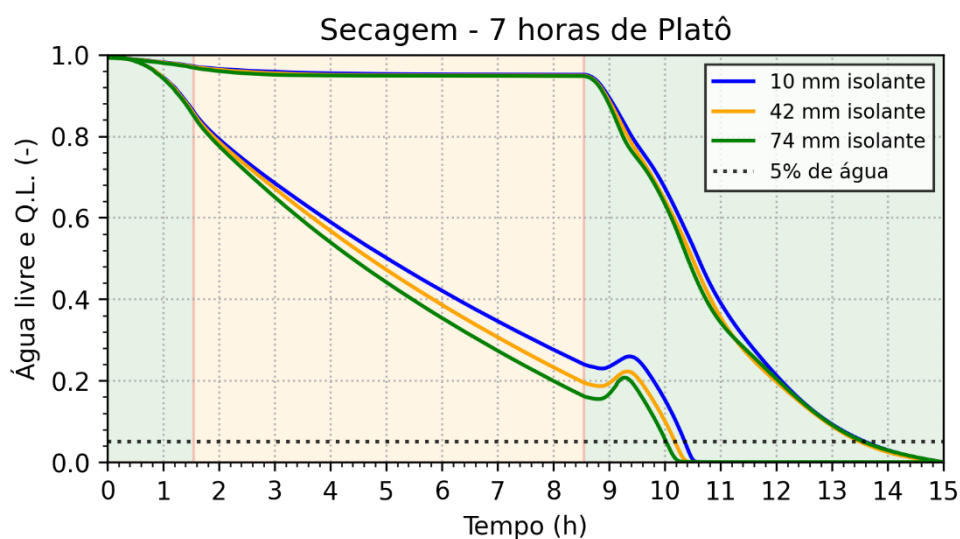


Figura 10 - Gráfico de secagem de água livre (curva com decaimento mais rápido) e da água quimicamente ligada (curva com decaimento mais lento) versus o tempo de simulação com patamar de 7 horas. A região com fundo de coloração verde representa o tempo em que há aquecimento, enquanto o intervalo com tonalidade alaranjada indica o tempo de patamar. A linha horizontal pontilhada representa 5% de água, que é uma medida que considera praticamente seca o concreto.

Na Figura 10, que representa a secagem do concreto, é interessante que não haja uma somatória significativa e simultânea das duas secagens ao ponto que essa liberação de água de ambas as fontes no material em uma quantidade em que ele não resista. Logo, quanto mais rápido a secagem da água livre durante a etapa de patamar, mais facilitada será a secagem da água quimicamente ligada após o reaquecimento, e conseqüentemente, implicando em um menor valor de pressão máxima e de razão de resistência do material. É notável esse padrão de separação das curvas de secagem da água livre e da água quimicamente ligada durante a etapa do patamar, resultando em uma razão de resistência menor, em comparação com a

Figura 7. Pode-se observar também, uma leve crescente na quantidade de água livre logo após o reaquecimento. Portanto, embora haja pouca diferença no padrão da curva de secagem da água quimicamente ligada dos três cenários, a maior velocidade de secagem da água livre do cenário 3, em comparação com os outros dois cenários, é responsável por diminuir seu valor máximo de razão de resistência, conforme demonstrado na Figura 9.

A próxima figura 11 representa a evolução, ao longo do tempo, da razão de resistência sob determinadas profundidades, dentro do refratário de trabalho, indicando a qual distância da face de aquecimento e em qual momento do tempo de secagem a razão de resistência é mais elevada.

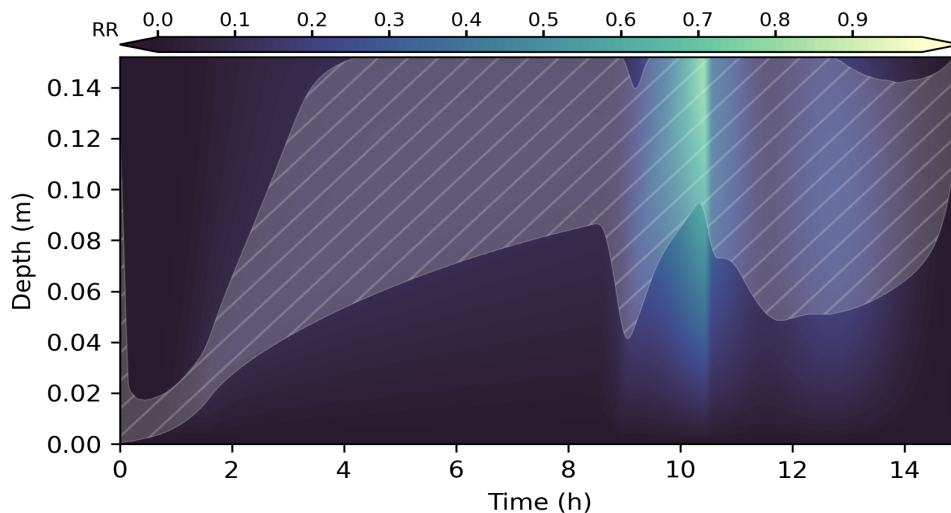


Figura 11 - Gráfico de evolução da razão de resistência ao longo do concreto de trabalho e do tempo de secagem. Região hachurada: indica para cada momento quais estão dentro do limite de 80% da razão de resistência máxima (Cenário 1).

Nessa figura acima, é possível analisar, ao longo de cada *timestep* (eixo x), a distância da face quente (eixo y), em metros, na qual ocorre a evolução de ponto de razão de resistência. a coloração de cada ponto indica qual o tempo de aquecimento que ocorreu essa evolução de acordo com a barra do mapa de cores situada acima das figuras, com tonalidade praticamente azul-escuro para as razões de resistência mais baixas e verde-água para os maiores valores de razão de resistência presentes nas simulações desses três cenários.

Como visto na Figura 9, quanto maior a espessura de isolante (cenário 3) menor a razão de resistência, portanto, escolheu-se demonstrar o gráfico correspondente ao cenário 1, visto que ele seria o cenário mais problemático com relação a um maior acúmulo de pressão de vapor no reaquecimento e conseqüentemente uma maior razão de resistência, como visto na Figura 9 e na Figura 10. O comportamento da evolução da razão de resistência é o mesmo para os três cenários. Como a região hachurada indica a região na qual, para cada timestep, a razão de resistência local está acima do valor de 80% do valor máximo da razão de resistência pontual, pode se notar que ao início da secagem, essa região está mais próxima à face de aquecimento, e logo durante a primeira curva de aquecimento, junto com o tempo de patamar, essa região já se desloca mais próxima à interface com a camada permanente. No reaquecimento, pode se notar um leve descolamento da região de máxima razão de resistência local da interface com a camada permanente oriunda do acúmulo de vapor de água em regiões um pouco mais interiores do concreto. Logo após esse reaquecimento, por volta da décima hora de secagem é possível notar os maiores valores de razão de resistência, conforme demonstrado pela Figura 9. Ou seja, justamente quando há a decomposição da água quimicamente ligada, isto é, por volta da temperatura de 325°C na face quente, conforme demonstrado na Figura 10, onde a água saída simultânea de ambas as fontes de água leva a elevadas pressões. Logo, o período mais crítico para a secagem do concreto é dentro de 2 horas após o reaquecimento e numa região próxima a 10 cm da face quente.

Passando para uma análise sobre a temperatura da face fria de acordo com os cenários de simulação, a Figura 12 representa essas diferentes temperaturas de acordo com as diferentes composições dos três cenários.

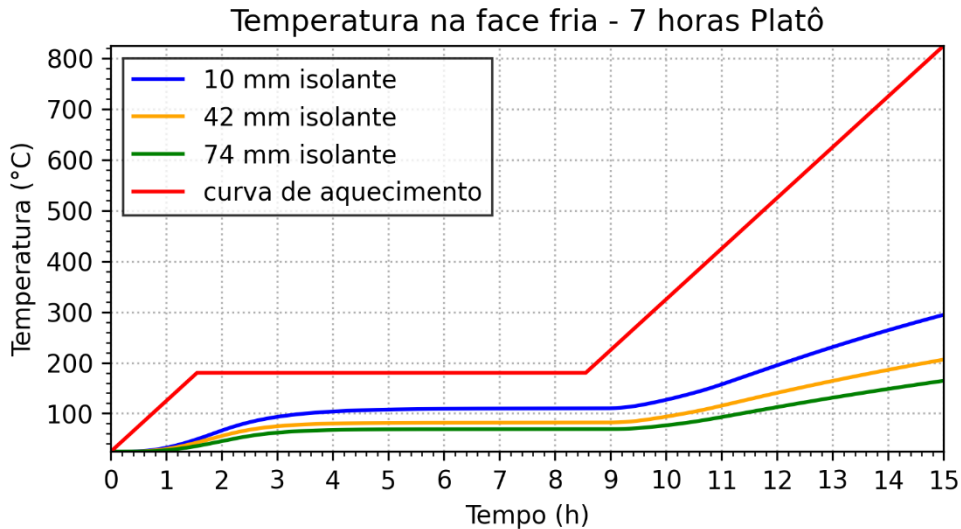


Figura 12 - Gráfico da curva de temperatura na face fria dos três cenários e a curva de aquecimento versus o tempo de simulação

Nessa figura, é possível analisar o decréscimo da temperatura na face fria conforme maior a proporção de isolante em relação à espessura de camada permanente. Ou seja, o cenário I, com 10 mm de camada isolante e curva de coloração azul, é o que representa maior temperatura na face fria, e o cenário III, com 74 mm de isolante e curva de coloração verde, o que representa menor temperatura na face fria, e conseqüentemente, menor perda térmica, resultando em uma maior economia de energia, conforme demonstrado na Figura 13.

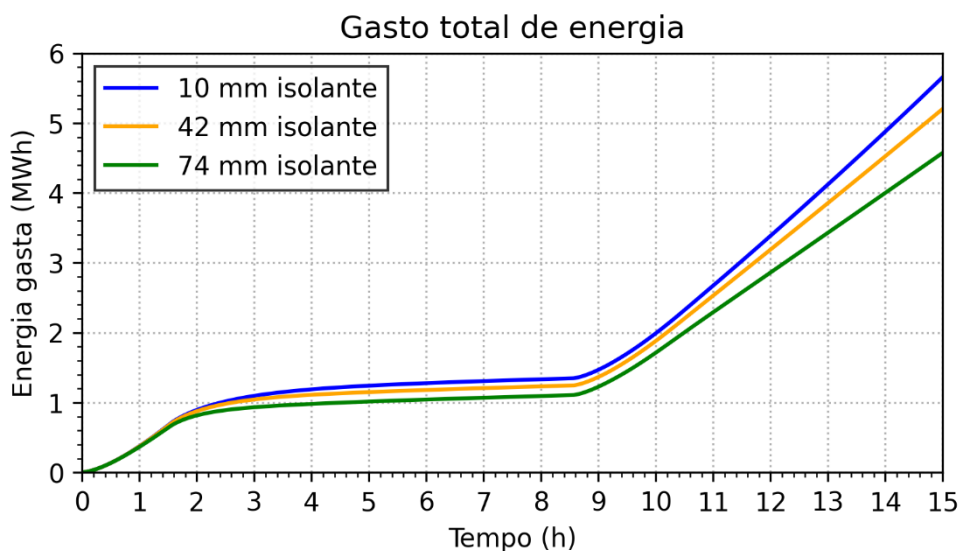


Figura 13 - Gráfico de gasto de energia em MWh ao longo do tempo de aquecimento para os três cenários versus o tempo de simulação

Nessa imagem, é demonstrado o gasto de energia em MWh ao longo do tempo de aquecimento para os três diferentes cenários. Conforme antecipado na Figura 12, quanto menor a perda térmica, maior a economia de energia e, portanto, menor a temperatura da face fria. Entretanto, essa economia de energia não é tão significativa conforme o decréscimo de temperatura. De acordo com a Figura 14, mesmo que a temperatura de face fria seja reduzida em 130 °C (redução de temperatura do cenário I para o cenário III) a economia de energia representa 19%.

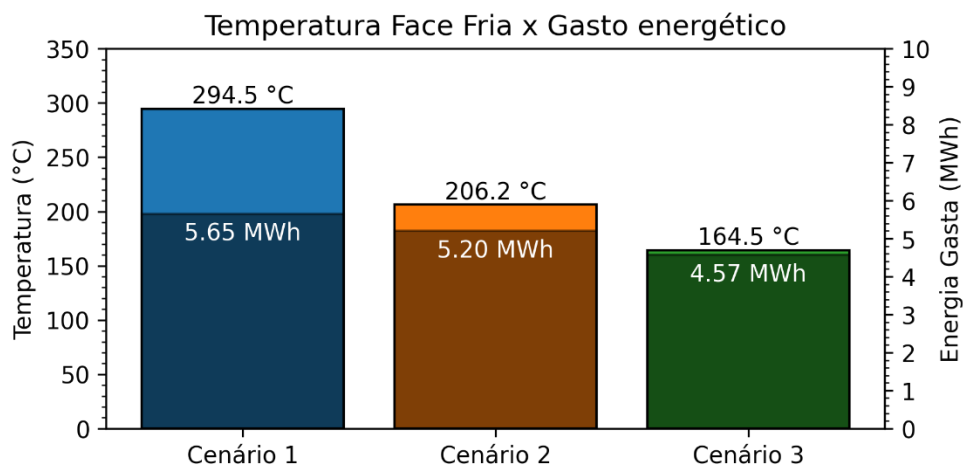


Figura 14 - Gráfico de correlações entre temperatura da face fria e energia gasta para os três cenários

Após analisar de uma forma mais geral os resultados de uma composição com uma camada permanente mais espessa em relação a espessura do isolante, uma composição com a mesma proporção entre isolante e camada permanente e por último uma composição com mais isolante em proporção com a camada permanente, as figuras 15, 16 e 17 são gráficos que resumem a secagem, temperatura de face fria e a razão de resistência para cada um dos três cenários.

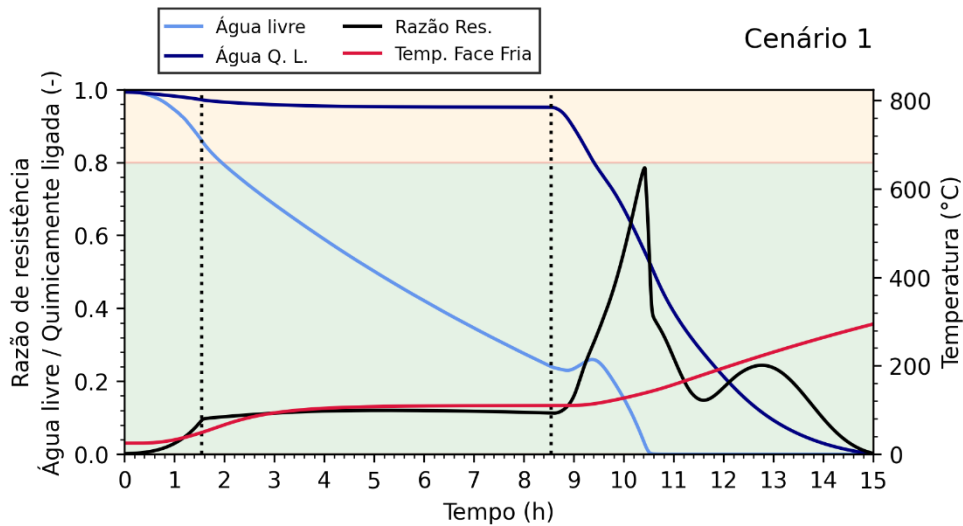


Figura 15 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário I. A região verde é considerada uma região de segurança do material, que indica que o material está sendo solicitado abaixo de 80% do seu limite máximo de resistência. A região laranja indica uma zona fora do fator de segurança, que está acima dos 80% e vai até o limite de resistência do material.

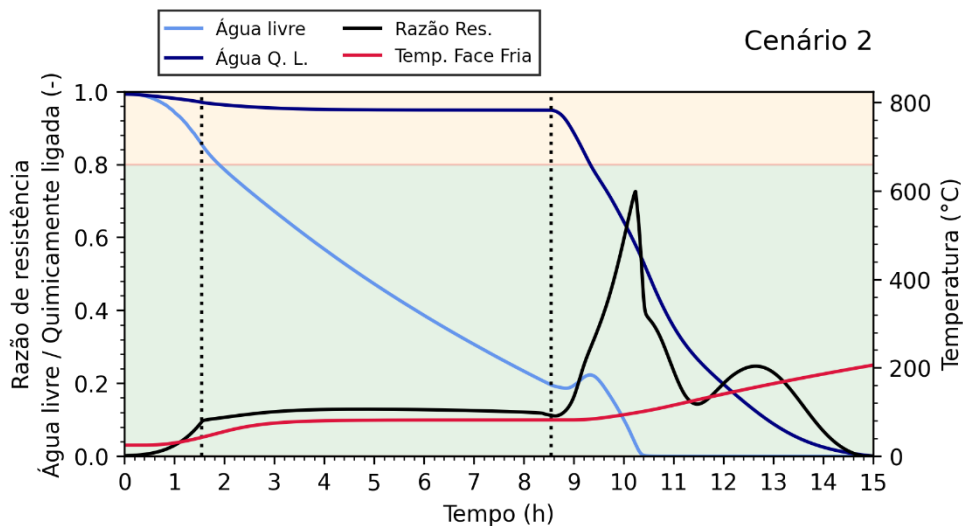


Figura 16 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário II. A região verde é considerada uma região de segurança do material, que indica que o material está sendo solicitado abaixo de 80% do seu limite máximo de resistência. A região laranja indica uma zona fora do fator de segurança, que está acima dos 80% e vai até o limite de resistência do material.

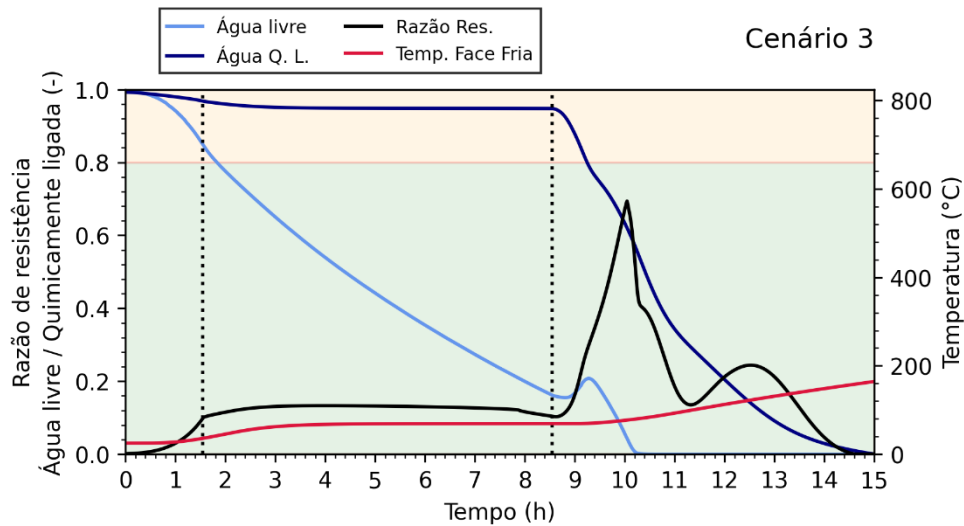


Figura 17 - Gráfico de secagem, temperatura da face fria e razão de resistência versus o tempo de simulação para o cenário III. A região verde é considerada uma região de segurança do material, que indica que o material está sendo solicitado abaixo de 80% do seu limite máximo de resistência. A região laranja indica uma zona fora do fator de segurança, que está acima dos 80% e vai até o limite de resistência do material.

Sendo as curvas azuis representando a secagem, com a coloração azul clara indicando a secagem da água livre e a de coloração azul escura representando a secagem da água quimicamente ligada. A curva de resistência é representada pela coloração preta, e essas 3 curvas são analisadas conforme o eixo y da esquerda. Já a curva vermelha indica a temperatura na face fria, e é analisada pelo eixo y da direita. As linhas verticais pontilhadas representam o início e término do patamar e o fundo de cor verde a região com razão de resistência menor que o fator de segurança, enquanto o fundo alaranjado indica valores superiores ao fato de segurança, porém menores que 1.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em síntese, os resultados obtidos mediante a análise dos três cenários distintos de isolamento térmico, submetidos a um processo de aquecimento com taxa constante de 100°C/h e um patamar de 180°C por 7 horas, destacam o cenário III como a opção mais vantajosa. Composta por 74 mm de isolante e 10 mm de camada permanente, essa configuração revelou-se superior ao proporcionar a menor temperatura na face fria, um menor consumo energético, uma velocidade de secagem da água livre mais rápida e uma razão de resistência reduzida em comparação com os demais cenários. Essa preferência pelo cenário III é justificada pela capacidade da espessura mais ampla do isolante em reter maior quantidade de temperatura na camada I. Essa elevação na temperatura do concreto de trabalho contribui para a eficácia do processo de secagem, diminuindo as pressões originadas tanto da água livre quanto da água quimicamente ligada, resultando, por conseguinte, em uma menor razão de resistência. Adicionalmente, a maior retenção de temperatura nas camadas subsequentes (II e III) contribui para uma redução adicional na temperatura da face fria quando comparada aos outros cenários. Em última análise, a redução das perdas térmicas nesse cenário não apenas implica em um menor consumo de energia, mas também promove uma maior eficiência na velocidade de secagem do material estudado. Esses achados reforçam a relevância da escolha adequada do isolamento térmico na otimização de processos de secagem em contextos similares.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a simulação de secagem de concretos monolíticos, demonstrou-se necessária a adição de um patamar para possibilitar a secagem de fontes diferentes de água do concreto, sendo essas, água livre e água quimicamente ligada, com a finalidade de gerar uma pressão interna menor no concreto para que não haja indícios de fratura no mesmo. Concluiu-se, portanto, que para esses cenários, de aquecimento constante à 100 °C/h, o patamar ideal foi de 7 horas a uma temperatura de 180 °C. A análise dos distintos cenários de isolamento térmico submetidos a um protocolo específico de secagem evidencia o cenário III, caracterizado por 74 mm de isolante e 10 mm de camada permanente, como a configuração mais eficiente do ponto de vista produtivo e econômico. Este cenário destaca-se por apresentar a menor temperatura na face fria, menor consumo energético, maior velocidade de secagem da água livre e menor razão de resistência em relação aos demais cenários. A preeminência do cenário III advém da capacidade de uma maior espessura do isolante em reter calor na camada de trabalho, favorecendo o processo de secagem do concreto ao acelerar a secagem da água livre na camada I e mitigando as pressões associadas à somatória das fontes de água durante a secagem, resultando em uma redução na razão de resistência. É possível concluir, que tais benefícios impactam na esfera industrial, acarretando uma diminuição nos custos operacionais relacionados à energia, na ordem de um quinto do valor total; uma aprimorada eficiência produtiva, destacando, assim, a relevância estratégica da seleção criteriosa de um isolamento térmico mais espesso em comparação à camada de trabalho em ambientes industriais, a fim de reter mais calor na panela durante a secagem e acelerar esse processo ocioso à produção de aço. De uma forma prática, é possível reduzir o tempo não-produtivo da panela de aço gastando menos energia durante a secagem e gerando menos solicitação mecânica na camada de trabalho. Por fim, é importante ressaltar que o intuito deste trabalho é avaliar e os impactos das camadas consequentes da camada de trabalho em uma panela siderúrgica e não propor uma solução tecnológica para instalação das camadas consequentes com as espessuras utilizadas nas simulações, uma vez que as espessuras utilizadas podem apresentar riscos de segurança.

REFERÊNCIAS

1. Refractories Global Market Report 2023, refractories WORLDFORUM – Manufacturing & Performance of High-Temperature Materials
2. Schacht, C., Refractories Handbook, oCLC: 910581448, CRC Press, Hoboken, 2004, ISBN 978-0-203-02632-8.
3. Lee, W.E., Vieira, W., Zhang, S., Ghanbari Ahari, K., Sarpoolaky, H., Parr, C., Castable refractory concretes. International Materials Reviews, 46(3), 145-167, 2001.
4. Kronert, W., Adv. Ceram., 13, 21-45, 1984.
5. Clavaud, B., Kiehl, J.P., Schmidt-Whitley, R.D., Proc. Int. Conf. on "Refractories", Tokyo, Japan, 1983, Technical Association of Refractories Japan, 589-606.
6. Ono, Y., Komatsu, H., Taikabutsu Overseas, 17(3), 45-49, 1997.
7. Luz, A.P., Braulio, M.A.L., Pandolfelli, V.C., Refractory Castable Engineering, Goller Verlag GmbH, Baden-Baden, 2015, ISBN 978-3-87264-004-8.
8. Cunha, T.M., Moreira, M.H., Santos, M.F., Angélico, R.A., Pandolfelli, V.C., A simple methodology based on numerical analysis for the drying curve design of a castable lined steel ladle. Open Ceramics, 13, 100330, 2023.
9. Cunha, T.M., Moreira, M.H., Santos, M.F., Luz, A.P., Pandolfelli, V.C., Drying behavior of steel-ladle lining refractory castables under continuous heating rate, Ceram. Int. 48 (1) (2022) 1142 –1151 T.
10. Naruse, Y., Fujimoto, S., Kiwaki, S., Mishima, M., Progress of additives in monolithic refractories, New Developments in Monolithic Refractories in Advances in Ceramics, 13, 245-256, 1984.
11. Jansson, R., Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies, Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2013.
12. Sako, E.Y., Pandolfelli, V.C., Artigo revisão - A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho, Cerâmica, 60, 127-143, 2014.
13. Oliveira, I.R., Studart, A.R., Pileggi, R.G., Pandolfelli, V.C., Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico, Fazendo Arte Editorial, São Paulo, Brasil, 2000, p. 119.
14. Touzo, B., Wohrmeyer, C., Parr, C., Microstructural changes in calcium

- aluminate cement bonded castable systems, Proc. Unified Int. Conf. Refractories, UNITECR'05, Orlando, EUA, 35-39, 2005.
15. Hommer, J., Wutz, K., Recent developments in deflocculants for castables, Proc. Unified Int. Conf. Refractories, UNITECR'05, Orlando, EUA, 186-190, 2005.
 16. Currell, B.R., Grzeskowlak, R., Midgley, H.G., Parsonage, J.R., The acceleration and retardation of set high alumina cement by additives, Cement Concrete Res., 7, 420-432, 1987.
 17. Eschner, A.R., Papp, G., Routschka, G., Refractory Engineering: materials – design – construction, 2nd Ed., Vulkan-Verlag GmbH, 2004.
 18. Lewis, G., Engineered Materials Handbook, v. 4, ASM Int., Metals Park, EUA, 1991, p. 895.
 19. MacZura, G., Aluminum Oxide (Alumina), Calcined, Tabular, and Aluminate Cements, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2000.
 20. Carbone, T.J., Production Processes, Properties, and Applications for Calcined in High-Purity Aluminas, Alumina Chemicals: Science and Technology Handbook, The American Ceramic Society, 1990.
 21. Gitzen, W.H., Alumina as a Ceramic Material, The American Ceramic Society, 1970.
 22. Wefers, K., Bell, G.M., Oxides and Hydroxides of Aluminum, Technical Paper No. 19, Aluminum Company of America, 1972.
 23. Misra, C., Industrial Alumina Chemicals, ACS Monograph Series No. 184, 1986.
 24. MacZura, G., Moody, K.J., Getty, R.J., Am. Ceram. Soc. Bull., 69(5), 844-846, 1990.
 25. Ideker, J.H., Early-age behavior of calcium aluminate cement systems, Doctoral thesis, University of Texas, Austin, 2008, p. 296.
 26. Taylor, H.F.W., Cement Chemistry, London, UK, Taylor and Thomas Telford Services, 1997, 459 pp.
 27. Ding, J., Fu, Y., Beaudoin, J.J., Strätlingite formation in high alumina cement–silica fume systems: the significance of sodium ions, Cem Concr Res, 25(6), 1311-1319, 1995.
 28. Mostafa, N.Y., Zaki, Z.I., Abd Elkader, O.H., Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature, Cement and

- Concrete Composites, 34, 1187-1193, 2012.
29. Majumdar, A.J., Singh, B., Cement compositions, European patent no. 0/312/323, 1989.
 30. Fryda, H.F., Saucier, F., Lamberet, S., Scrivener, K., Guinot, D., Durabilité des bétons d'aluminates de calcium, 2007.
 31. Adams, M.P., Ideker, J.H., Influence of aggregate type on conversion and strength in calcium aluminate cement concrete, *Cem Concr Res*, 100, 284-296, 2017.
 32. Houghton, S.J., Scrivener, K.L., A microstructural study of a 60-year-old calcium aluminate cement concrete, In: Proceedings of the third CANMET/ACI international conference on the durability of concrete, Nice, 1994, p. 133-146.
 33. Thomas, M.D.A., Hayman, S., Drimalas, T., Folliard, K.J., Deterioration of cement paste exposed to potassium acetate solution, In: International congress on chemistry of cement, Madrid, Spain, 2011, Paper 575.
 34. Bauer, J.M., Kiehl, J.P., *Proc. Brit. Ceram. Soc.*, 29(10), 191, 1980.
 35. Fryda, H., Scrivener, K., Chanvillard, G., Relevance of laboratory tests to field applications of calcium aluminate cement concretes, In: Mangabhai, R.J., Glasser, F.P., editors, Proceedings of the international conference on calcium aluminate cements (CAC), Edinburgh, Scotland, UK, IOM Communications Ltd, Heriot-Watt University, 2001, p. 215-247.
 36. Lee, W.E., Vieira, W., Zhang, S., Ghanbari Ahari, K., Sarpoolaky, H., Parr, C., Castable refractory concretes, *International Materials Reviews*, 46(3), 145-167, 2001.
 37. Innocentini, M.D.M., Cardoso, F.A., Paiva, A.E.M., Pandolfelli, V.C., Dewatering refractory castables, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 83(7), 9101-9108, 2004.
 38. Auvray, J.M., Zetterström, C., Wöhrmeyer, C., Fryda, H., Parr, C., Eychenne-Baron, C., Dry-out simulation of castables containing calcium aluminate cement under hydrothermal conditions, In: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR'13), Victoria, Canada, 150-155, 2013.
 39. Santos, M., Moreira, M., Campos, M., Pelissari, P.I., Angélico, R., Sako, E., Sinnema, S., Pandolfelli, V.C., Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses, *Ceram. Int.*, 44, doi:10.1016/j.ceramint.2018.04.092, 2018.

APÊNDICE - Estudo Do Coeficiente De Troca Mássica Superficial (B_w)

Conforme conhecimento do grupo em pesquisas anteriores, foi observado que o coeficiente de troca mássica superficial modifica os valores de pressão obtidos de forma não linear. A fim de se entender melhor as correlações entre pressão e esse coeficiente, foram realizadas diversas simulações, variando o valor desse coeficiente. Essas simulações foram realizadas utilizando as espessuras do cenário I com taxa de aquecimento constante de 100 °C/h, sem a utilização de patamar, com temperatura inicial de 25 °C e temperatura final de 825 °C. Encontrou-se que o valor de 1e-6 equivale à uma permeabilidade total. Portanto, iniciaram-se os valores a partir de 1e-6, sendo este o maior valor de todos, até o valor de 0, que equivale a uma permeabilidade nula, conforme demonstrado pela Figura A1.

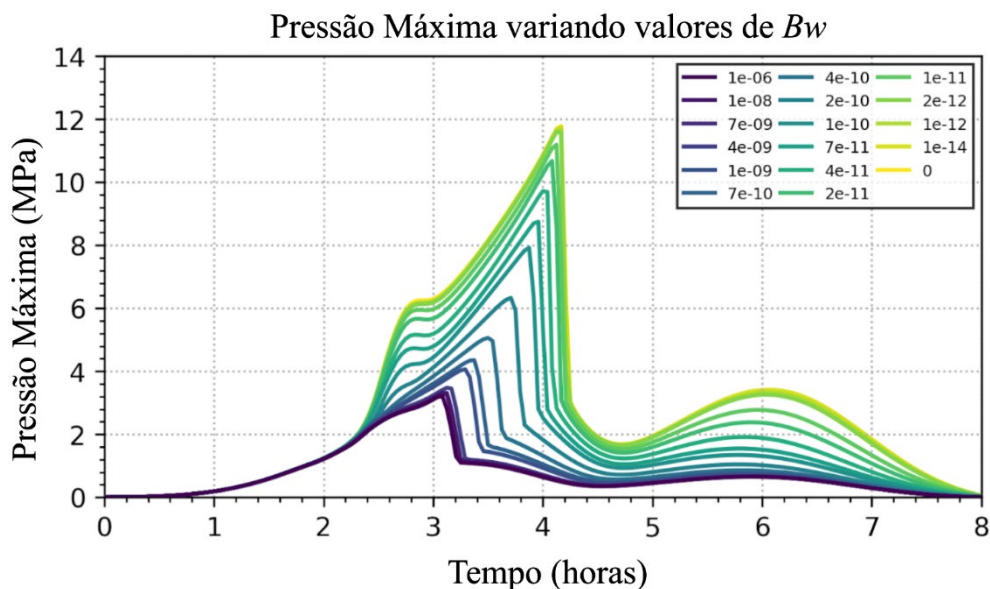


Figura A1: Gráfico de pressão máxima versus o tempo de simulação variando o valor do coeficiente de permeabilidade (B_w)

Neste gráfico, é possível ver o comportamento da curva de acordo com o coeficiente utilizado. As curvas com colorações mais escuras, são as que possuem os maiores valores de B_w , enquanto as curvas com cores mais claras são as que possuem menores valores. Posteriormente, foram retirados os pontos de pressão máxima de cada uma das curvas e foram correlacionadas de acordo com os valores do coeficiente B_w (Figura A2).

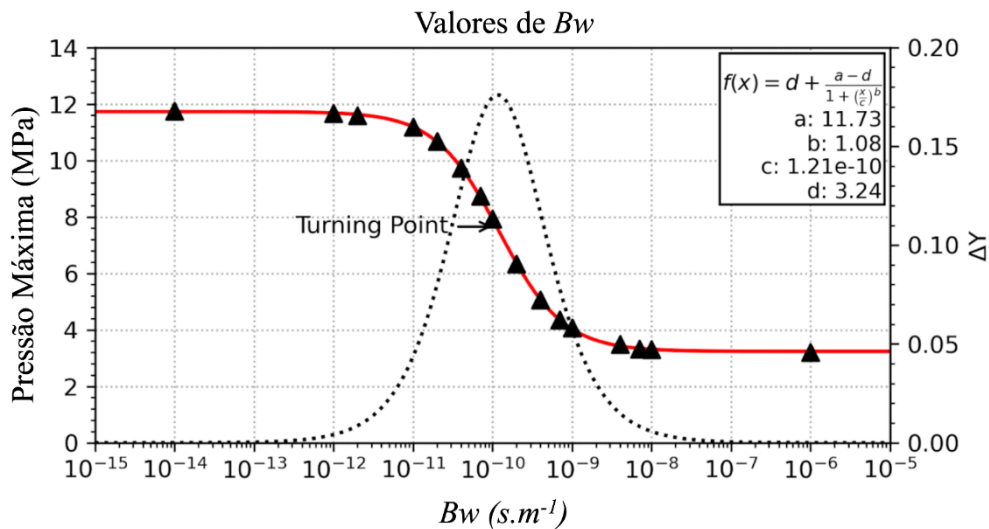


Figura A2: Valores de pressão máxima variando o valor do coeficiente de permeabilidade (Bw)

Nessa figura, foi plotado também um ajuste de curva com padrão sigmoideal de acordo com a função e os parâmetros descritos na legenda. Foi também plotado uma derivada deste ajuste de curva para se descobrir o ponto máximo de variação, o qual é o ponto de inflexão da curva, e, portanto, o ponto médio. A partir disto, foi adotado o valor de 1e-10 como coeficiente de permeabilidade para a realização das simulações.

Também foi avaliada qual a distância da face quente em que ocorria esse ponto de pressão máxima de acordo com o valor de Bw utilizado (Figura A3).

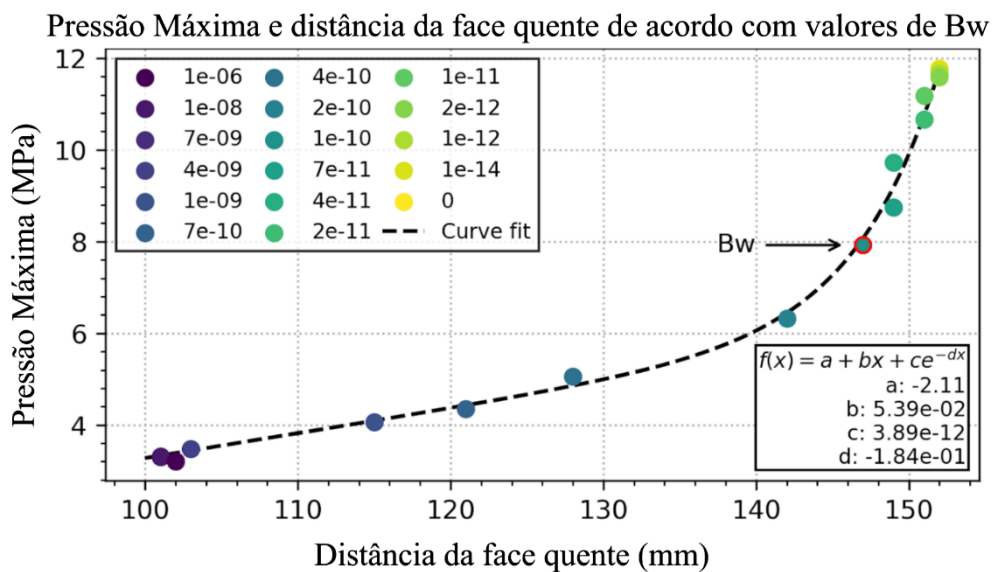


Figura A3: Distância na face quente e respectivos valores máximos de pressão de acordo com a variação do valor do coeficiente de permeabilidade (Bw)

Nesta figura acima, pode-se observar a qual distância da face de aquecimento em que ocorre o pico de pressão máxima de acordo com o coeficiente utilizado. Como as colorações seguem o mesmo padrão do gráfico A1, é possível afirmar que para as simulações realizadas com os maiores valores de B_w , o pico de pressão ocorre mais próximo a face de aquecimento e os valores de pressão são menores, por volta de 4 MPa, enquanto o para as simulações realizadas com maiores valores de B_w , o pico de pressão máxima é mais elevado, na ordem de 12 MPa, e ele ocorre mais próximo a interface da camada de trabalho com a camada permanente.

Com base nas figuras A2 e A3, pode-se analisar que: Os valores de pressão máxima possuem perfil sigmoidal com relação aos valores de B_w ; Conforme B_w vai diminuindo, a pressão vai aumentando de mesmo modo; Quanto mais difícil sair o vapor de água pela face fria, maior o percurso de refratário esse vapor terá que percorrer, portanto, aumentando a pressão acumulada no mesmo; Abaixo de $1e-14$, o valor de permeabilidade é equivalente a considerar impermeabilidade naquela face; Acima de $1e-6$, o valor de permeabilidade é semelhante à permeabilidade completa. Portanto, optou-se utilizar o valor de $1e-10$ para as simulações deste trabalho, visto que indica um valor intermediário, ou seja, há a possibilidade de saída de vapor pela face fria, porém existe uma resistência imposta pela presença da carcaça metálica.