



**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCEAS DE REVESTIMENTO APÓS A AÇÃO DO CHOQUE TÉRMICO**

**CONTRIBUTION TO THE STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT MORTAR RENDERINGS AFTER THERMAL SHOCK EFFECT**

Juan F. Temoche Esquivel<sup>1</sup>, Mércia M. Semensato Bottura de Barros<sup>2</sup>

**RESUMO**

O trabalho objetivou analisar o efeito de sucessivos choques térmicos causados por variação da temperatura ambiental em revestimentos de argamassas. Pela inexistência de modelos numéricos para avaliar o efeito do choque térmico em materiais compósitos cimentícios multicamadas, optou-se pela simulação experimental, moldando corpos de prova de revestimento de argamassa aplicado sobre base de concreto. As variáveis analisadas foram dois valores diferentes de módulo de elasticidade e a exposição ou não ao choque térmico. A partir de prismas extraídos dos corpos de prova (painéis de revestimento de argamassa) verificou-se uma diminuição dos valores de resistência à tração na flexão após o choque térmico, mais evidente para as argamassas de maior módulo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tensões térmicas. Choque térmico. Revestimentos de argamassa. Módulo de elasticidade. Resistência à tração na flexão.

**ABSTRACT**

*The objective of this work was to analyze the effect of successive thermal shocks (caused by environmental change of temperature) on mortar renderings. Due to the inexistence of numerical models to study environmental thermal shock effects on multilayers cement mortar renderings, the option of this work was experimental simulation. Some specimens of cement mortar renderings were produced and they were bonded on concrete bases. Variables analyzed were two values of Elasticity modulus as well as the exposition or not to thermal shock. Tensile strength in flexion tests were done in prisms extracted from the specimens (mortar rendering panels) and the results showed a decrease of the values of tensile strength after thermal shock cycles, more evident for mortars with higher modulus*

**KEYWORDS:** Thermal stresses. Thermal shock. Cement mortar renderings. Modulus of elasticity. Tensile strength in flexion.

<sup>1</sup> Professor doutor no Curso de Engenharia Civil na Universidade UNIVERITAS/UNG

<sup>2</sup> Professora doutora no Curso de Engenharia Civil na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP



## 1. INTRODUÇÃO

Um dos agentes de degradação mecânica dos revestimentos aderidos de base cimentícia, reconhecido amplamente na literatura, é a temperatura, sobretudo porque sua variação provoca tensões no revestimento, e dentre elas as mais críticas são as de tração para os materiais de base cimentícia. No nível microscópico as tensões surgem devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica da pasta e dos agregados. No nível macroscópico as tensões derivam da variação de temperatura interna do revestimento e da restrição à sua livre movimentação, determinada pela sua aderência à base. Essas tensões são denominadas tensões térmicas.

Uma das situações críticas ocorre quando o revestimento inicialmente em equilíbrio térmico sofre uma rápida diminuição de temperatura na sua superfície enquanto que no seu interior e na interface com a base a temperatura permanece próxima da temperatura inicial de equilíbrio. Nessa circunstância ocorre o que se denomina choque térmico (Kingery, 1955) gerando-se tensões de tração principalmente na superfície. Se essas tensões superarem a resistência à tração do material ocorrerá a fratura do mesmo.

Em países de clima tropical como Brasil onde as variações de temperatura podem ocorrer rapidamente o fenômeno descrito ocorre com relativa frequência, não havendo ainda trabalhos focados no efeito desse fenômeno no comportamento mecânico dos revestimentos externos.

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de algumas propriedades das argamassas no comportamento mecânico do revestimento, quando submetido a choque térmico.

Utilizando os modelos teóricos para avaliação do choque térmico, foram determinadas as propriedades das argamassas com maior influência no comportamento mecânico dos revestimentos submetidos a choque térmico e, posteriormente, foi desenvolvido um programa experimental em que se simulou o choque térmico em revestimentos de argamassas para finalmente analisar os resultados de ambas as avaliações.

## 2. CHOQUE TÉRMICO

É definido como um fenômeno produzido por uma variação de temperatura rápida e transiente em um sólido cujo resultado é um estado de tensões térmicas (Kingery, 1955; Manson, 1966).

Para melhor analisar o fenômeno é necessário definir

algumas de suas características como: velocidade com que ocorre a variação de temperatura (minutos, frações de segundos); o meio em que ocorre (líquido ou gasoso); a faixa de variação de temperatura (poucos ou centenas de °C); o tipo de variação (aumento também denominado “upshock” ou diminuição também denominada “downshock”); direção do fluxo de calor (da superfície do sólido para seu centro ou no sentido contrário) ou formas de transferência de calor atuantes.

Na ciência dos materiais, por exemplo, esse fenômeno refere-se principalmente a materiais frágeis em cenários em que ocorre uma rápida e severa (centenas de °C), diminuição da temperatura do ambiente em que encontra-se o sólido (Jin et al., 1995; Lu; Fleck, 1998). O choque é produzido uma vez que o gradiente gerado entre a superfície do sólido submetido à rápida diminuição de temperatura, e o miolo do sólido ainda na temperatura inicial provoca tensões de tração no corpo do sólido.

Para os materiais e componentes de construção são também diversas as situações em que a rápida diminuição de temperatura pode ocorrer, seja pela exposição ao meio ambiente (ciclos de gelo e degelo, períodos de aquecimento solar seguidos de rápidos períodos de chuva), ou pelas diversas condições de uso (fornos industriais, saunas, etc.) ou, inclusive, em casos de incêndios. Nos cenários em que o choque térmico é produzido pela exposição dos materiais o componentes ao meio ambiente, os valores de rápida queda de temperatura geralmente não ultrapassam os 50°C (Goldberg, 1998).

### 2.1 Choque térmico em revestimentos de argamassa

Nas condições de exposição dos revestimentos externos ao meio ambiente vários autores como Goldberg (1998); AQC (1995); ASTM (2002); CSTC (1980) coincidem em denominar como choque térmico o fenômeno produzido quando a diminuição da temperatura superficial na face externa do revestimento é rápida, como por exemplo, quando se tem o início de uma chuva intensa precedida por um período de forte insolação.

Nesse cenário, a variação de temperatura será mais crítica quanto maiores forem a temperatura na superfície exposta e a taxa de variação dessa temperatura. Os valores mais altos de temperatura superficial na face exposta dos revestimentos de fachada, relatados na literatura (Bansal, Garg, Kothari, 1992), são atingidos geralmente nos períodos diurnos em que a principal



fonte de calor é a radiação solar. Porém, essa energia é atenuada pela influência de vários fatores até atingir um determinado ponto na superfície terrestre, dentre eles: a latitude, a estação do ano, a hora do dia, as condições do céu e, as condições atmosféricas.

Além disso, as características da superfície receptora da radiação - ângulo de inclinação, rugosidade superficial, cor, orientação - também têm influência nos valores de temperatura superficial atingidos.

Quanto à taxa de diminuição da temperatura do ambiente, ela pode levar alguns minutos pois o processo (não instantâneo) começa com a chegada de uma frente fria acompanhada de precipitação pluviométrica.

Na superfície externa do revestimento inicialmente em equilíbrio térmico com suas camadas a diminuição da temperatura começa, a rigor, no momento em que a nebulosidade que antecede a um período de precipitação cobre o céu, impedindo a passagem da radiação solar, e devido também às perdas de calor por convecção devido ao aumento da velocidade do vento no início da precipitação. Quando, na sequência (após alguns minutos), a superfície do revestimento recebe o impacto do fluido que está com uma temperatura menor, estimada em valores próximos aos 20°C, e as trocas de calor são aceleradas na presença da água que satura a superfície do revestimento. O gradiente gerado através do corpo do revestimento dependerá da temperatura máxima que foi atingida na sua interface com a base.

A busca de um modelo que permita avaliar o comportamento dos revestimentos (sistema multicamadas) diante deste cenário remete aos modelos básicos de avaliação do efeito do choque térmico em sólidos que podem ser teóricos ou fundamentados em experimentos, os quais são discutidos na sequência.

## 2.2 Modelos teóricos de avaliação do efeito do choque térmico

Para explicar a falha por choque térmico em materiais frágeis existem duas teorias: a primeira e mais difundida está relacionada à ocorrência da fratura, quando a resistência mecânica do material é superada, e a segunda refere-se à propagação das fissuras que é promovida pela energia elástica armazenada no momento da fratura (Hasselman, 1969; Biswas, 1973; Kingery, 1960).

A primeira abordagem (ocorrência de fratura) é baseada em modelos da termo-elasticidade, pelos quais qualquer problema de fratura de origem térmica pode

ser entendido a partir de três elementos básicos: distribuição de temperatura; tensões resultantes e resistência do material (Hasselman, 1969; Baroody; Simons; Duckworth, 1955).

A segunda abordagem - propagação das fissuras - não considera a questão do início do processo de fratura, mas aborda a extensão da propagação das fissuras e a resultante mudança no comportamento físico do material (Hasselman, 1969). Esta abordagem foca o estudo das propriedades do material que afetam a propagação das fissuras.

Quando existem defeitos no material, sejam eles microfissuras ou poros, o transiente térmico originado pelo choque térmico provoca tensões não-lineares, concentradas nas extremidades desses defeitos (Coble; Kingery, 1955). Nessas situações, a exposição contínua a choques térmicos pode desencadear a propagação progressiva ou generalizada de defeitos, provocando uma degradação da resistência mecânica do material e, finalmente, o seu colapso (Jin et al., 1995; Hasselman, 1969; Nied, 1987; Lu; Fleck, 1998).

Dentro da primeira abordagem, pode-se identificar as propriedades do material que tem maior influência no efeito do choque térmico a partir do modelo simplificado mais difundido para estabelecer a resistência ao choque térmico de um material, o qual analisa um sólido prismático de material contínuo, homogêneo e isotrópico, considerando um sistema bidimensional e, como cenário crítico, a total restrição à deformação do prisma em um dois eixos devido à variação de temperatura.

O modelo apresentado na Equação (1) introduz parâmetro de resistência ao choque térmico denominado de  $R$  que estabelece o valor mínimo de diferença de temperatura necessário para gerar uma tensão térmica de intensidade suficiente para superar a resistência à tração do material e propagar uma fissura através do mesmo.

$$\Delta T_c = R = \frac{\sigma_T(1-\nu)}{\psi \cdot E \cdot \alpha} \quad (1)$$

Onde:

$R$  = resistência ao choque térmico

$\Delta T_c$  = variação de temperatura crítica

$\sigma_T$  = resistência à tração do material avaliado

$\nu$  = coeficiente de Poisson

$\Psi$  = Parâmetro de atenuação da tensão térmica

$E$  = módulo de elasticidade do material

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica



Observa-se que tanto o módulo de elasticidade ( $E$ ) como o coeficiente de dilatação térmica limitam a máxima variação de temperatura que promove o choque térmico uma vez que aumentam o nível de tensões.

O parâmetro de atenuação térmica ( $\Psi^{-1}$ ) foi proposto por Manson (Manson, 1966) em função das condições térmicas dependentes do tempo. Esse fator (Equação (2)) é calculado a partir do coeficiente de transferência de calor não-dimensional ( $\beta$ ), denominado número de Biot.

$$\Psi^{-1} = 1,5 + \frac{3,2}{\beta} - 0,5 \exp\left[-\frac{6}{\beta}\right] \quad (2)$$

Onde:

$\Psi$  = Parâmetro de atenuação da tensão térmica

$\beta$  = Número de Biot que é adimensional e proporcional a uma medida da queda de temperatura no sólido em relação à diferença de temperaturas entre a superfície do sólido e o fluido definido pelo quociente  $hL/k$  sendo  $h$  o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $L$  a espessura característica do material analisado, na direção de maior troca de calor e  $k$  o coeficiente de condutividade térmica do material.

Apesar da existência de modelos teóricos para avaliação do choque térmico, eles são limitados a geometrias prismáticas considerando o sólido de maneira isolada e com condições de contorno simplificadas, além da suposição de que as propriedades mecânicas e higro-térmicas se mantêm constantes durante a ocorrência do evento térmico, o que realmente não ocorre. Portanto, geralmente, a avaliação teórica é complementada por uma avaliação experimental.

### 2.3 Modelos experimentais de avaliação do efeito do choque térmico

A avaliação experimental é realizada empregando-se ensaios em que corpos de prova do material a ser testado são submetidos a choques térmicos em que o valor da variação de temperatura é alterado até que o material atinja sua tensão de ruptura, sendo determinado assim o parâmetro  $R$  que representa sua resistência ao choque térmico.

Nesses ensaios os sólidos são totalmente expostos a uma elevação da temperatura uniforme até atingir o equilíbrio térmico e posteriormente é promovido um rápido resfriamento, geralmente com água. E, após um

número determinado de ciclos de exposição (elevação e queda rápida da temperatura) são avaliadas as alterações em propriedades como massa, resistência mecânica, permeabilidade ou módulo elástico.

Para o caso em que a exposição ao choque térmico é unicamente por uma das faces do material o componente, representando em muitos casos as condições reais de uso dos materiais aplicados, surgiu, segundo indicam Kingery (1955) e Buessem (1955), o método de ensaio prescrito pela ASTM C-38 (ASTM, 1949) para avaliação de tijolos refratários, atualmente fora de vigência. Nesse método simulava-se um painel produzido com tijolos refratários e era mantido aquecido por uma das suas faces a uma temperatura determinada e em seguida resfriado rapidamente com ar e água.

Utilizando um princípio semelhante ao da ASTM, diversos organismos normativos recomendam métodos de ensaio para avaliar o efeito do choque térmico em materiais e componentes construtivos. Entretanto os parâmetros utilizados para realização do ensaio variam, por exemplo, em função das características climáticas locais, como pode ser visto na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros dos métodos de ensaio propostos por diferentes autores e normas técnicas

Norma / Método	Equipamento	Temperatura Mín. (° C)	Temperatura Máx. (° C)	Nº de ciclos	Tempo do ciclo
EN 1367-5 (2002)	Molhagem e secagem				
EN 13687-2 (2002)	C/ aparelho durante 5 h 45' e simulação de chuva 15'min.	21± 2	60±10	Definido na EN 1504-2	6 horas
CSTC (1980)	Aparelho	15 - 20	80	>10	1 h. 10'
UEATC (1999)	Aparelho	23± 2	70	140	6 horas
Roman et al. (2000)	Câmara climática	18	68	120	3 horas
IPT (1998)	Painel radiante e simulação de chuva	20	80	10	4 horas

No Brasil, os primeiros registros da utilização de ensaios de simulação de choque térmico em componentes do edifício foram introduzidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas na década de 80. No entanto, a com-



pleta descrição do método somente foi publicada em 1998 (IPT, 1998), e mais recentemente, é recomendado pela norma de desempenho de edifícios residenciais de até 5 pavimentos (ABNT, 2013). Nesse método, é simulado o aquecimento por radiação (com lâmpadas incandescentes) sobre um corpo de prova na forma de painel de 1,20m x 2,00 m até atingir uma temperatura superficial de 80°C, controlada com termopares. O painel deve ser mantido com essa temperatura durante uma hora, promovendo-se, em seguida, o resfriamento via jato de água (simulação da chuva) até atingir uma temperatura superficial de 20°C. Usualmente realizam-se 10 ciclos de ensaio, durante os quais verifica-se o surgimento de fissuras no revestimento.

Quando simulados revestimentos verticais, o parâmetro utilizado para avaliar o efeito do choque térmico têm sido a resistência de aderência à tração normal residual no revestimento.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação experimental do efeito do choque térmico em revestimentos de argamassa foram produzidos corpos de prova de revestimento de argamassa submetendo uma parte deles ao ensaio choque térmico definindo os parâmetros a serem utilizados no ensaio. Posteriormente foram extraídos prismas dos revestimentos submetidos ao choque térmico e aqueles de referência para avaliar suas propriedades mecânicas.

#### 3.1 Materiais

Diante das diversas possibilidades de produção da argamassa e objetivando diminuir as variáveis fora de controle, foi decidido manter constante o tipo de argamassa, optando pela sua dosagem em laboratório com um único tipo de aglomerante e agregado, bem como um único teor de água. Assim, para se obter o segundo tipo de argamassa, com características distintas, foi utilizado um aditivo incorporador de ar na dosagem.

Desta forma, foram utilizadas duas argamassas para revestimento. A primeira dosada na proporção 1:4, em volume de materiais secos sem aditivo incorporador de ar (Argamassa S/AIA) e a segunda com adição de incorporador de ar (Argamassa C/AIA). O teor de aglomerante e do agregado (em massa) e o teor de água (16% da massa dos materiais secos) foram mantidos constantes.

A proporção 1:4 em volume, apesar de não ser comum para revestimento externo, permitiu potencializar

o efeito do módulo de elasticidade na ocorrência das tensões térmicas; e a adição de incorporador de ar na segunda argamassa permitiu diminuir a sua densidade e, por consequência, a condutividade térmica do revestimento, devido à baixa condutividade térmica do ar (0,025 W/m °K) e também seu módulo de elasticidade, permitindo valores desta propriedade mais próximos aos valores das argamassas freqüentemente utilizadas em revestimento externo. A Tabela 2 mostra a proporção em massa seca dos materiais utilizados na produção da argamassa para revestimento:

Tabela 2: Proporção dos materiais utilizados para produção do revestimento

Materiais	Massa dos materiais secos por batelada (20 litros de argamassa) em Kg	Traço em massa
Cimento Portland CP II F	5,177	1
areia quartzosa de leito de rio	29,818	5,759
aditivo incorporador de ar a base de laurilsulfato de sódio (0,00125% da massa de materiais secos)	0,437 g	
água	5,599	1,08

Os revestimentos de argamassa foram produzidos sobre uma base rígida de concreto (0,30m x 0,40m x 0,10m) com características superficiais de um substrato padrão de acordo com a ABNT – NBR 14082.

A produção do revestimento foi realizada por mistura mecânica em argamassadeira de eixo horizontal e sua aplicação com projeção mecânica com ar comprimido, com uma pressão constante de 90 psi, conforme mostrado na Figura 1 e Figura 2:



Figura 1:  
Mistura da argamassa



Figura 2:  
Projeção da argamassa sobre a base o substrato

Após moldagem os revestimentos foram mantidos durante 28 dias a cura em câmara úmida.

### 3.2 Métodos de ensaio

#### 3.2.1 Ensaios realizados nas argamassas

Os materiais constituintes da argamassa foram caracterizados no estado anidro, fresco e no estado endurecido. A Tabela 3 apresenta o resumo dos ensaios utilizados para caracterização das argamassas.

Tabela 3: Ensaios de caracterização dos materiais utilizados e do revestimento

Material	Ensaio	Nº de repetições	Referência normativa
Estado anidro			
Cimento	Massa específica	3	NBR NM 23/01
Areia	Massa unitária	3	ABNT, NBR 7251 (1982)
	Massa específica	3	
Estado fresco			
Argamassa	Densidade de massa	3	ABNT, NBR 13278 (2005)
	Teor de ar incorporado	3	ABNT, NBR 13277 (2005)
Estado endurecido			
Revestimento	Resistência à tração na flexão	6	ABNT, NBR 13279 (2005)
	Módulo de elasticidade - Método do ultrassom	6	BS 1881 (BSI, 1990)
	Densidade de massa aparente no estado endurecido	3	ABNT, NBR 13280 (2005)
	Coefficiente de dilatação térmica	3	ASTM 531 (2000)
	Choque térmico	30	

#### 3.2.1 Ensaios de choque térmico

Para definição dos parâmetros de choque térmico foram analisadas as características dos métodos apresentados na Tabela 1 e revisados os trabalhos nacionais (Geyer, 1994; Siqueira; Cincotto; John, 1995; Candia, 2001; Miranda; Selmo, 2003). Os parâmetros definidos para o ensaio são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Parâmetros definidos para os ensaios de choque térmico

Parâmetro de ensaio	Valores definidos no ensaio	Referência
Temperatura superficial máxima	70°C	(UEATC, 1999)
Temperatura superficial mínima	23°C (ambiente)	(UEATC, 1999)
Tempo de aquecimento	3 h	(Roman et al., 2000)
Permanência na temperatura máxima	1,5 h	
Tempo de resfriamento	1 h	(Roman et al., 2000)
Forma de aquecimento	Painel com 96 lâmpadas incandescentes (150 W)	
Forma de resfriamento	Jato de água na superfície do revestimento	(Roman et al., 2000)
Número de ciclos	30	(EN 13687-2, 2002)
Duração do ciclo	4 h	(Roman et al., 2000)
Controle de temperatura	Controlador automático	
Registro de temperaturas	Termopares tipo "t"	

Para o cenário considerado neste trabalho adotou-se a temperatura superficial máxima de 70°C gerada pelo aquecimento com lâmpadas incandescentes conforme mostrado na Figura 3 e para o resfriamento foi montada uma estrutura com aspersores de água para molhar uniformemente a superfície do revestimento (Figura 4). O controle da temperatura superficial no revestimento foi feito com termopares colados na superfície do revestimento.



Figura 3: Painel para aquecimento dos corpos de prova em funcionamento



Figura 4: Estrutura para resfriamento dos corpos de prova

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.2 Caracterização dos materiais

#### 4.2.1 Estado anidro

De acordo com o objetivo do trabalho o tipo de aglomerante e de agregado foram mantidos constantes. Os resultados das propriedades avaliadas para o cimento utilizado (CPII F) e para a areia de cava são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Caracterização dos materiais constituintes da argamassa

Material	Massa unitária NBR 7251 (ABNT, 1982) (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Real – Pícnometria de Gás Hélio (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento CPII F	1,26	3,00
Areia seca	1,51	2,633

#### 4.2.2 Estado fresco

São apresentados na Tabela 6 os resultados da caracterização das argamassas no estado fresco.

Tabela 6: Caracterização da argamassa em estado fresco.

Propriedade	Método de ensaio	Tipo de argamassa	
		1:4 sem AIA	1:4 com AIA
Densidade no estado fresco	NBR13278 (ABNT, 2005)	1,99	1,65
Teor de ar incorporado (%)	NBR13278 (ABNT, 2005)	5,20	21,74

Observa-se na Tabela 6 que o valor de incorporação de ar obtido após a inclusão do aditivo mostrou-se coerente com o objetivo de obter uma argamassa de menor rigidez.

#### 4.2.2 Estado endurecido

Após a realização dos ensaios de choque térmico, dos corpos de prova do revestimento foram extraídos prismas do revestimento com dimensões de 30mm (espessura) x 40mm x 160 mm, como mostrado na Figura 5a, para avaliar a variação das propriedades como densidade aparente, módulo de elasticidade e resistências mecânicas (Figura 5b) dessas argamassas em relação às propriedades obtidas em prismas obtidos de corpos de prova de revestimento não submetidos ao choque térmico.



Figura 5: a) Corte do revestimento para extração de prismas para ensaios mecânicos e b) ensaio de tração na flexão em prisma extraído do revestimento.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as propriedades mecânicas avaliada nos prismas extraídos do revestimento para as duas situações: sem choque térmico e com choque térmico.

Tabela 7: Ensaios mecânicos nos prismas extraídos dos revestimentos sem choque térmico.

Material		Módulo - E (MPa) BS 1881-209 (BSI, 1990)	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração na flexão (MPa) NBR13279 (ABNT, 2005)
Sem choque térmico	Prisma extraído de rev. S/ AIA	19532	1,941	3,83
	Prisma extraído de rev. C/ AIA	18605	1,822	4,73
Com choque térmico	Prisma extraído de rev. S/ AIA	18327	1,943	3,68
	Prisma extraído de rev. C/ AIA	15246	1,774	3,35

Observa-se em geral uma diminuição dos valores de módulo de elasticidade e de resistência à tração na flexão para os prismas de revestimento submetidos ao choque térmico. No caso da densidade aparente endurecida observa-se que a diferença inicial no estado fresco, praticamente desaparece. A diminuição dessa diferença pode estar relacionada com o processo de aplicação da argamassa (projeção).

### 4.3 Variação das propriedades mecânicas dos revestimentos em função do choque térmico

A Figura 6 mostra a variação produzida no módulo de elasticidade de prismas de revestimento extraídos tanto dos corpos de prova de referência como os que foram submetidos ao choque térmico



V.2, N.1, 2018

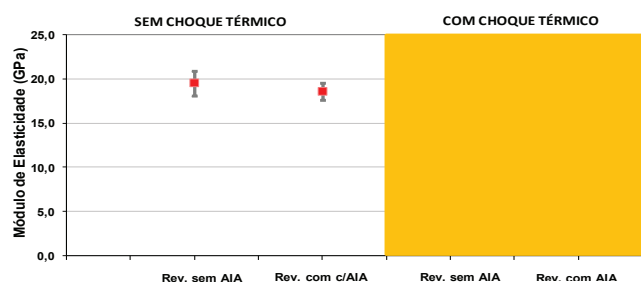
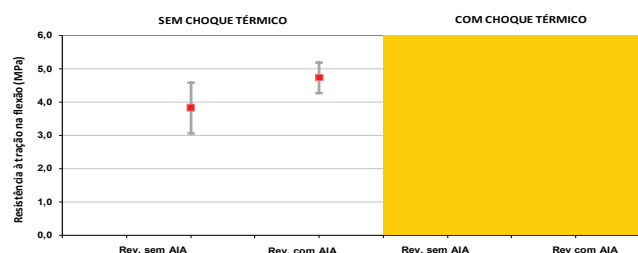


Figura 6: Variação do módulo de elasticidade dos prismas de revestimento extraídos dos corpos de prova ensaiados

Observa-se na Figura 6 que ocorre uma diminuição dos valores de módulo de elasticidade devido aos ciclos de choque térmico mais evidente para os revestimentos com AIA que atinge uma diminuição máxima de 18%, enquanto que para os prismas de revestimento mais rígidos (S/AIA), a redução do módulo é de 6%. Pode-se observar também que a diferença dentre os módulos de elasticidade dos revestimentos sem choque térmico (4,7%) aumenta para 16,7% após os ciclos de choque térmico.

A Figura 7 apresenta a variação produzida após o choque térmico na resistência à tração na flexão dos prismas de revestimento extraídos dos corpos de prova.

Figura 7: Variação da resistência à tração na flexão dos prismas de revestimento extraídos dos corpos de prova devido ao choque térmico.



A semelhança do efeito produzido pelo choque térmico no módulo de elasticidade dos prismas de revestimento observa-se na Figura 7 uma diminuição dos valores de resistência à tração na flexão após o choque térmico muito mais evidente (29%) nos prismas de revestimento com adição de incorporado de ar (AIA) enquanto que nos prismas de revestimento sem AIA não há praticamente diferença (3%). O maior decréscimo na resistência a tração ocorre nos prismas dos revestimentos de menor rigidez (C/AIA)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os modelos teóricos a propriedade que tem maior influência no desenvolvimento de tensões por choque térmico é o módulo de elasticidade ( $E$ ). Segundo esses modelos a resistência à fratura por choque térmico ( $R$ ) depende de altos valores de resistência mecânica e baixos valores de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica.

Entretanto pela avaliação experimental, para o caso de revestimentos observou-se que menores valores de módulo de elasticidade podem promover maior deterioração no revestimento do que revestimentos mais rígidos.

Assim é possível que nos revestimentos mais densos os ciclos térmicos tenham promovido uma cura térmica acelerada gerando uma maior quantidade de hidratos do que os revestimentos com maior teor de ar incorporado.





## 6. REFERÊNCIAS

AGENCE QUALITÉ CONSTRUCTION - AQC. **L'é-tanchéité des façades 1**: exigences et moyens. Paris: EG, 1995. 72 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C38 – 49**: standard method for basic procedure in panel spalling test for refractory brick. West Conshohocken, ASTM, 1949.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D1079-02**: standard terminology relating to roofing, waterproofing, and bituminous materials. ASTM, USA, 2002.

ANDERSSON, T.; ROWCLIFFE, D. J. Indentation thermal shock test for ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, n. 6, p. 1509-1514, (1996).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR15575-4**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - desempenho - Parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013. 51 p.

ABNT - **NBR14082**: argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: execução do substrato-padrão e aplicação de argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ABNT - **NBR13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

ABNT - **NBR13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

BANSAL, N. K.; GARG, S., KOTHARI, S. Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings. **Building and Environment**, v. 27, 1, p. 31-37, 1992.

BAROODY, E. M.; SIMONS, E. M.; DUCKWORTH W. H. Effect of shape on thermal fracture. **Journal of the American Ceramic Society**. Easton, v. 38 N. 1 (1955) 38-43.

BISWAS, D.R. Thermal shock resistance in glass-nickel composites. **Fracture Mechanics of ceramics**. v. 6: Measurements, transformations, and high-temperature fracture. Bradt, 1973.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881-209**: testing concrete. Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity. London, 1990. 8 p.

BUESSEM, W. R. Thermal shock testing. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 38, n. 1, p.15-17, (1955).

CANDIA, M. C. **Avaliação da durabilidade de revestimentos externos com argamassa**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001. 198 p. (Relatório FAPESP proc 1999/02081-9 Pós-Doutorado).

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC). **Guide des performances du bâtiment**. Façades 2. Bruxelles, 1980.

COBLE, R. L.; KINGERY, W. D. Effect of porosity on thermal stress fracture. **Journal of the American Ceramic Society**. Easton, v. 38, n. 1, p. 33-37, 1955.

CRESCENCIO, R.; BARROS, M. A influência do choque térmico na resistência à tração do revestimento decorativo monocamada. In: Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas, 5, São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 631-642.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1367-5**: Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Determination of resistance to thermal shock. 2002. 8 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 13687-2**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of thermal compatibility - Part 2: Thunder-shower cycling (thermal shock). 2002. 12 p.

GEYER, R. M. T. **Influência do choque térmico na aderência de azulejos ao substrato**. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994. 104 p.

GOLDBERG, R. P. **Revestimientos exteriores con adherencia directa de azulejos cerámicos, piedra y ladrillos caravista**. Manual de diseño técnico. Bethany, CT 1998. Laticrete International.

HASSELMANN, D. P. H. Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 52, n. 11, p. 600-604, (1969).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Crêterios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social**. São Paulo: IPT, 1998.

JIN, ZHI-HE; MAI, YIU-WING. Effects of damage on thermal shock strength behavior of ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 78, n. 7, p.1873-1881, (1995).



V.2, N.1, 2018

KINGERY, W. D. Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 38, n. 1, p. 3-15, 1955.

KINGERY, W.D. **Introduction to ceramics**. New York: J. Wiley & Sons, 1960. 781 p.

LU, T. J.; FLECK, N. A. The thermal shock resistance of solids. **Acta Materialia**, v. 46, n. 13, p. 4755-4768, 1998.

MANSON, S. S. **Thermal Stress and low-cycle fatigue**. New York: McGraw-Hill, 1966. 404 p.

MIRANDA, L.; SELMO, S. Efeito de choques térmicos na fissuração de revestimentos de argamassa com RCD. In: Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas, 5, São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 583-594.

NIED, H. F. Thermal shock in an edge-cracked plate subjected to uniform surface heating. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 26, n. 2, p. 239-246, 1987.

ROMAN, L.; SAGAVE, A.; ROMAN, H.; ALARCON O. Análise da resistência de aderência em sistemas de revestimento cerâmico submetidos a ciclos higrótérmicos. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 8, 2000. Salvador: ANTAC, 2000, v. 2, p. 862-868

SIQUEIRA, N., M.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V.M. Influência da fração carbonática da cal hidratada no desempenho de rebocos. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 1993, São Paulo. v. 1, p. 241-260.

UEATC (UNION EUROPEENNE POUR L'AGREMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION). **Guide technique UEAtc pour l'agrément des systèmes d'isolation extérieure des façades avec enduits minéraux**. Avril, 1999. UEAtc.