

# The influence of low temperature on the evolution of concrete strength

## *A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto*



V. CECCONELLO <sup>a</sup>  
vcecconello@gmail.com

B. TUTIKIAN <sup>b</sup>  
bftutikian@unisinis.br

### Abstract

The mechanical strength of concrete can be affected by many conditions, among them the proportion of the mixture and the influence of external agents, such as external temperatures. Thus, the objective of the paper is to analyze the influence of low temperature on the evolution of concrete strength, from the molding of tests specimens cured at various temperatures. The specimens were submitted in the first 7 days, as curing temperatures ranging from 0°C to 25°C, simulating the lowest possible value for the start of the cement hydrations reactions to the considered ideal for development resistances. The results of the experimental program demonstrated at lower cure temperatures the strength of the mixture develops more slowly, as might be expected, but also found after 14 days, the strength of the mixtures was reversed, i.e., concretes cured at higher temperatures lower values. Thus, it was concluded the concrete in cold weather can be beneficial to its mechanical performance to over time, at the expense constructive steps in normal temperature.

**Keywords:** external agents, low temperatures cure, evolution of resistance, hydration heat of Portland cement paste.

### Resumo

As resistências mecânicas do concreto podem ser afetadas por inúmeros condicionantes, como a proporção entre os seus constituintes e a influência de agentes externos, como a temperatura ambiente. Com isso, o objetivo deste artigo é analisar a influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto a base de cimento Portland, a partir da moldagem de corpos-de-prova curados em temperaturas variadas. Os corpos-de-prova foram submetidos, nos primeiros 7 dias, a temperaturas de cura que variaram de 0°C até 25°C, simulando as temperaturas mais baixas possíveis para o início das reações de hidratação do cimento até os valores considerados ideais para o desenvolvimento das resistências. Os resultados do programa experimental demonstraram que em temperaturas de cura inferiores a resistência à compressão da mistura se desenvolve mais lentamente, como era de se esperar, porém também verificou-se que a partir dos 14 dias, as resistências das misturas se inverteram, ou seja, os concretos curados a temperaturas superiores apresentaram valores menores. Com isso, concluiu-se que a concretagem em dias frios pode ser vantajosa para o seu desempenho mecânico ao longo do tempo, apesar de prejudicar etapas construtivas em situações normais de temperatura.

**Palavras-chave:** agentes externos, curas a baixas temperaturas, evolução de resistência, calor de hidratação da pasta de cimento Portland.

<sup>a</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, Unisinis, vcecconello@gmail.com – Av. Unisinis, 950, centro 6 – Exatas, São Leopoldo / RS, Brasil;

<sup>b</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, Unisinis, bftutikian@unisinis.br – Av. Unisinis, 950, centro 6 – Exatas, São Leopoldo / RS, Brasil.

## 1. Introdução

O concreto armado tem se consagrado no decorrer dos anos como um dos sistemas construtivos mais utilizados. Segundo Helene e Levy (2003) [1], o concreto terá um futuro cada vez mais promissor nas próximas décadas, uma vez que sua versatilidade arquitetônica, aliada à durabilidade crescente, possibilitará a realização e o desenvolvimento de qualquer projeto.

Para o concreto atingir resistências previstas para o bom funcionamento, é necessário que reações de hidratação se consumam entre o cimento e a água. Desta forma a temperatura externa comporta-se como catalisador destas reações, quando mais quente estiver, mais rapidamente estas reações ocorrerão.

Segundo Shoukry et al. (2010) [2], a temperatura, conjuntamente com a umidade relativa do ar, desempenha um grande papel nas reações de hidratação da pasta de cimento, afetando as propriedades do concreto no estado fresco e no endurecido.

No entanto, o Brasil é formado por um território extenso, englobando vários tipos de condições climáticas, inclusive locais com baixas temperaturas em determinados períodos do ano. Na região sul, por exemplo, o clima pode ser comparado como o de outros países da América Latina e do mundo, onde a incidência de baixas temperaturas em longos períodos do ano é caracterizada pelo clima temperado. Ainda assim, a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, a ABNT NBR 6118:2007 [3] não diferencia as regiões do país ou temperaturas externas. Os projetos estruturais e, conseqüentemente, a execução vêm sendo realizados sem cuidado no que diz respeito ao controle da temperatura de cura nos primeiros dias, podendo surgir problemas irreversíveis nessas estruturas.

Conforme Mehta e Monteiro (2008) [4]:

“Nesse aspecto, o concreto equipara-se a uma criança: para se tornar um adulto saudável, o recém nascido precisa de atenção especial durante os primeiros períodos de crescimento. No entanto, em ambos os casos, não há definição clara de quanto tempo dura esse período de primeiras idades.”

O cimento Portland, ao reagir com a água, forma uma pasta com mais ou menos fluidez, dependendo do percentual de água adicionada. Com o passar do tempo, essa mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-la um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição (Isaia, 2005 [5]).

Conforme Anka et al. (2009) [6], todo o processo de hidratação do cimento no concreto é muito complexo, podendo ser influenciado por inúmeros fatores. Entre as propriedades que mais afetam o processo de hidratação está a temperatura inicial do concreto e também a temperatura do ar.

O aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), componente do cimento, se hidrata em uma velocidade muito mais rápida do que os silicatos. Neville (1997) [7] cita que as reações do  $C_3A$  puro com água ocorrem de uma maneira violenta e resulta em um enrijecimento imediato da pasta de cimento, conhecido também como pega instantânea. Com o intuito de evitar que isso aconteça, adiciona-se gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ao clínquer no processo de fabricação do cimento Portland. Segundo Kirchheim et al. (2010) [8], um exemplo da ação do  $C_3A$  pode ser visualizado na execução do museu Iberê

Camargo em Porto Alegre, onde foi utilizado cimento Portland branco com teores de  $C_3A$  acima de 9%.

Os silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $\beta C_2S$ ), são responsáveis por cerca de 75% da constituição do cimento Portland comum, têm um papel dominante na determinação das características de endurecimento, também conhecida como a taxa de desenvolvimento da resistência. A hidratação do  $C_3S$  e  $\beta C_2S$  no cimento Portland produz uma família dos silicatos de cálcio hidratados que tem suas estruturas semelhantes, que variam amplamente na relação entre cálcio e sílica, além do teor de água quimicamente combinada (Mehta e Monteiro, 2008) [4].

Já o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) resulta em produtos de hidratação semelhantes estruturalmente aos produtos do  $C_3A$ , apesar de que a reatividade do  $C_4AF$  é mais lenta (Neville, 1997) [7]. Em paralelo às reações é gerado o calor de hidratação do cimento Portland, que pode ser observado como uma energia térmica resultante do contato com a água. Essa evolução de calor se dá de maneira rápida a partir da mistura do clínquer de cimento Portland moído com água. A hidratação do cimento é caracterizada como uma reação exotérmica, ou seja, reação que gera calor, com isso o processo de hidratação está diretamente relacionado à quantidade de calor gerada.

Portanto, o que se espera do cimento Portland é uma boa correlação entre a velocidade de hidratação do cimento e o calor de hidratação. Cimentos com alto calor de hidratação se hidratam com maior rapidez em comparação aos cimentos que geram menor calor de hidratação (Taylor, 1967) [9]. Kirchheim et al. (2010) [8] complementam que em determinadas obras que utilizam grandes quantidades de concreto, a sua condutividade térmica pode ser baixa e com a elevada liberação de calor devido à reação de hidratação, podendo gerar fissuras por retração térmica.

Conforme Mehta e Monteiro (2008) [4], o calor de hidratação pode, às vezes, ser desfavorável como, por exemplo, em estruturas de concreto-massa. E outras vezes ser favorável como, por exemplo, em concretagem no inverno ou em regiões de temperaturas baixas quando a temperatura do ambiente pode estar muito baixa para fornecer energia necessária para a ativação das reações iniciais de hidratação. Segundo Zhang et al. (2008) [10], não existe um valor único de energia de ativação para todos os concretos e suas diferentes formulações.

De acordo com Pinto Barbosa et al. (2006) [11], todo o processo de hidratação do cimento pode ser comparado a partir de uma taxa de evolução que depende da concentração e da temperatura de todos os reagentes da solução. A hidratação é acelerada em temperaturas altas e reduzida em temperaturas mais baixas. Kim et al. (2002) [12] ressaltam que concretos submetidos a altas temperaturas em idades iniciais alcançam mais cedo altas resistências, porém diminuem a taxa de crescimentos de resistência ao longo do tempo. Husem e Gozutok (2004) [13] complementam que curas em altas temperaturas diminuem a resistência do concreto, sendo inclusive aplicadas a peças moldadas em concretos convencionais e de alto desempenho, o que pode acarretar problemas no futuro.

Quando o concreto está em período de pega ou em princípio de endurecimento, e sofre a interferência das baixas temperaturas, essas ações apresentam a tendência de serem desaceleradas ou, até mesmo, anuladas, devido à redução na velocidade de hidratação dos compostos ativos do cimento (Cánovas, 1988) [14]. Já em

**Tabela 1 - Composição química do cimento**

Propriedades Mecânicas	Ensaio do cimento	Limite de norma
Finura #200 (75mm)	2,49	12
Finura #325 (45mm)	10,81	-
Finura Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	3472	2600
Início de tempo de pega (min)	190	60
Fim de tempo de pega (min)	310	600
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	26,1	10
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	31,3	20
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	40,4	32
Propriedades Químicas	Ensaio do cimento	Limite de norma
Resíduo insolúvel (%)	1,24	2,5
Perda ao fogo (%)	4,10	6,5
MgO (%)	1,81	6,5
So <sub>3</sub> (%)	2,00	4,0
Na <sub>2</sub> O (%)	0,11	-
K <sub>2</sub> O (%)	0,71	-

casos de aquecimento as propriedades mecânicas do concreto diminuem notavelmente, resultando em uma diminuição na qualidade da estrutura de concreto (Demirel e Kelestemur, 2010) [15].

Conforme Shoukry et al. (2010) [2], deve-se considerar em projetos estruturais a variabilidade da evolução das propriedades do concreto devido à temperatura, uma vez que isto pode afetar o

**Tabela 2 - Análise granulométrica do agregado miúdo e graúdo**

Abertura das peneiras (mm)	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada
# 19	0	0	0	0
# 12,5	0	0	31,6	31,6
# 9,5	0	0	45,2	76,8
# 6,3	0	0	22,6	99,4
# 4,8	0	0	0,6	100
# 2,4	0,3	0,3	0	100
# 1,2	1,1	1,4	0	100
# 0,6	10,4	11,8	0	100
# 0,3	45,5	57,3	0	100
# 0,15	33,2	90,5	0	100
Fundo (< 0,075)	9,5	100	0	100
Módulo de finura	1,61		6,77	
Dimensão máxima	1,2 mm		19 mm	
Massa específica	2618 kg/m <sup>3</sup>		2590 kg/m <sup>3</sup>	
Massa unitária no estado solto	1419 kg/m <sup>3</sup>		1197 kg/m <sup>3</sup>	

seu comportamento estrutural. Os autores demonstraram que para uma variação térmica de 80° C (-25 a 55° C), aos 28 dias de cura, há uma redução de 38% e 26% da resistência à compressão e à tração, respectivamente. Porém, o trabalho foi realizado com condições climáticas em extremos de temperatura de cura, condição raramente observada. Não há um consenso sobre o comportamento do concreto em situações de baixa temperatura, porém positivas, até por falta de resultados com estas características. Nesta pesquisa, em meio a isso, pretende-se analisar a influência de baixas temperaturas externas nas primeiras idades do concreto, a fim de determinar suas propriedades mecânicas sob essa condição.

## 2. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi comparar as resistências à compressão a 1, 7, 28 e 91 dias e à tração aos 28 dias para concretos curados a temperaturas variando de zero a 25°C, com intervalos de 5°C, analisando assim a influência da temperatura externa no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto.

## 3. Programa Experimental

Para a realização do programa experimental buscou-se reproduzir o efeito da temperatura externa sobre o concreto, através do controle da temperatura de cura dos corpos-de-prova. Com isso, as amostras foram condicionadas a curas variadas nos primeiros sete dias, para a realização dos ensaios de resistência à compressão e à tração.

Foi determinado um traço para obter resistências à compressão usuais de projeto, em torno dos 25 MPa aos 28 dias. Para isso, definiu-se o traço, em massa, de 1: 2: 2,5 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), com a consistência, realizada através do procedimento especificado na ABNT NBR NM 67:2003 [16], fixada em  $90 \pm 10$  mm.

### 3.1 Caracterização física e química dos materiais

As características dos materiais empregados no concreto estão diretamente relacionadas ao desempenho e propriedades da mistura. Para a caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de acordo com as normas da ABNT.

#### 3.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP II E 32. Foi especificado por se tratar de um cimento com menor índice de adições, entre os comercialmente disponíveis, e por não se tratar de um cimento com alta resistência inicial. A massa específica do cimento Portland utilizado foi de  $\rho = 3000$  kg/m<sup>3</sup>, determinada conforme ABNT NBR NM 23:1998 [17], enquanto que as propriedades mecânicas e químicas são detalhadas na Tabela 1.

#### 3.2.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi areia extraída de rio, que apresentou massa unitária de  $\rho = 1419$  kg/m<sup>3</sup>, determinada conforme o preconizado pela ABNT NBR NM 45:2006 [18], e massa específica de  $\rho = 2618$  kg/m<sup>3</sup>, determinada conforme ABNT NBR 9776:1987 [19]. Já o agregado graúdo é constituído por rocha

**Tabela 3 – Relação água/cimento e consistência das moldagens**

Temp. Cura (°C)	Relação a/c	Consistência (mm)
1ª 25° C	0,58	80
2ª 20° C	0,56	90
3ª 15° C	0,57	100
4ª 10° C	0,56	100
5ª 5° C	0,55	90
6ª 0° C	0,57	100

basáltica britada, apresentando a massa unitária de  $\rho = 1197$  kg/m<sup>3</sup>, realizada conforme ABNT NBR NM 45:2006 [18]. A massa específica foi determinada em  $\rho = 2590$  kg/m<sup>3</sup>, através do método da balança hidrostática.

O ensaio de análise granulométrica dos agregados foi realizado conforme a ABNT NBR NM 248:2003 [20], que prevê a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto. Os resultados estão representados na Tabela 2.

#### 3.2.3 Água

Foi utilizada para execução dos concretos, água proveniente da rede pública de abastecimento.

### 3.3 Mistura do concreto e moldagem dos corpos-de-prova

Nesta etapa foram moldados 62 corpos-de-prova cilíndricos para ensaios à compressão e 10 amostras para ensaios à tração, totalizando 72 corpos-de-prova moldados em formas metálicas com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo dois para cada idade, para seis temperaturas de cura.

A mistura foi realizada em betoneira com eixo vertical, com capacidade máxima de 56 litros e velocidade de rotação de 29 rotações por minuto (RPM). O tempo da adição de todos os materiais e homogeneização da mistura para todas as moldagens foi de  $18 \pm 2$  min. A ordem de colocação dos materiais no misturador foi à seguinte:

- Agregado graúdo;
- 80% de água;
- Cimento;
- Agregado miúdo;
- 20% de água;

Após a etapa da mistura dos materiais na betoneira, foi medida a consistência do concreto através do ensaio do abatimento de tronco de cone, conforme ABNT NBR NM 67:1996 [16]. Buscou-se fixar as relações a/c, o tempo de cura e a consistência dos concretos, para avaliar unicamente a influência das temperaturas de cura nas propriedades mecânicas dos materiais. O tempo para a realização deste ensaio foi de  $8 \pm 2$  minutos. Os resultados dos abatimentos e a relação água / cimento estão apresentados na Tabela 3. Os concretos analisados são similares, com todas as

**Tabela 4 - Condições de tempo e temperatura ambiente de cura das moldagens**

Moldagens	Tempo e temperatura ambiente de cura	
	0 a 7 dias	8 a 91 dias
1ª	25° C	20° C
2ª	20° C	20° C
3ª	15° C	20° C
4ª	10° C	20° C
5ª	5° C	20° C
6ª	0° C	20° C

propriedades fixadas, para se analisar apenas a influência da temperatura de cura nas propriedades finais do material. Posteriormente, foram moldados os corpos-de-prova, em um período de 25 ± 2 minutos. Assim, o tempo total entre o contato do cimento com a água e o armazenamento dos corpos-de-prova no ambiente de cura com temperatura controlada foi de 51 ± 6 minutos.

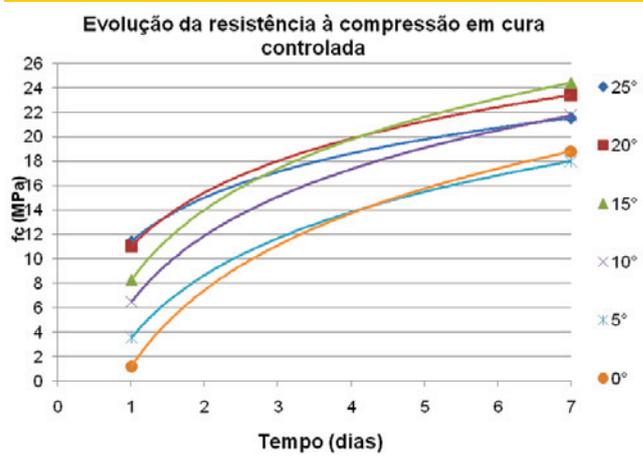
### 3.4 Condições de cura

A condição de cura dos corpos-de-prova foi realizada em ambiente de baixas temperaturas controladas, simulando assim o comportamento do concreto quando submetido a essa incidência, conforme apresentado na Tabela 4, e umidade relativa de 50%. O equipamento utilizado foi uma caixa vedada com controle de temperatura digital, que permite a fixação da temperatura sem afetar a umidade relativa do ar, por tempo pré-determinado, no caso do estudo, de 7 dias. Nessa condição, ao conservar as amostras em temperaturas variadas de cura nos sete primeiros dias, pode-se analisar o comportamento das reações iniciais, que ocorrem nas primeiras idades. Após os 7 primeiros dias, curados nas temperaturas de 0°C a

**Tabela 5 - Evolução de resistência à compressão em cura controlada**

°C	Resistência à compressão	
	1 dia (MPa)	7 dias (MPa)
25	11,4	21,5
20	11	23,4
15	8,3	24,4
10	6,5	21,7
5	3,5	18
0	1,2	18,8

**Figura 1 - Evolução da resistência à compressão nos 7 primeiros dias, em cura controlada**



25°C, os cp's foram acondicionados em câmara úmida até as datas de rompimento.

## 4. Apresentação e Análise dos Resultados

Após os rompimentos dos corpos-de-prova nos ensaios mecânicos, pode-se comparar os resultados e chegar às conclusões a respeito do tema.

### 4.1 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

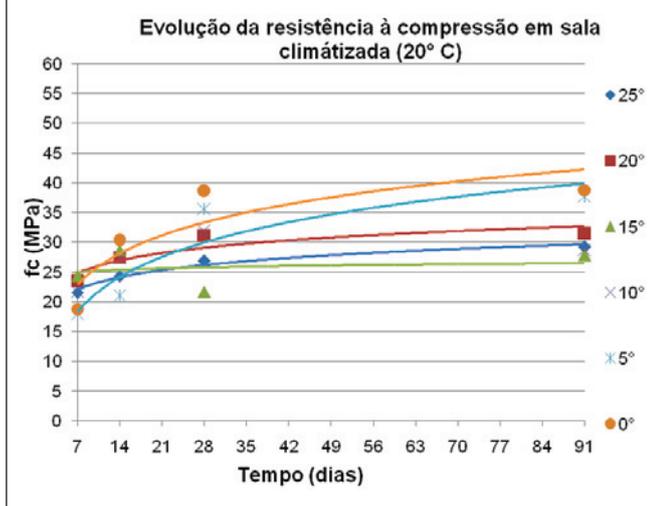
A análise dos resultados de resistência à compressão foi dividida em duas etapas, por apresentar comportamentos diferentes. A primeira englobou de 1 até os 7 dias, enquanto a segunda etapa foi realizada dos 8 aos 91 dias.

A Tabela 5 apresenta a evolução das resistências à compressão

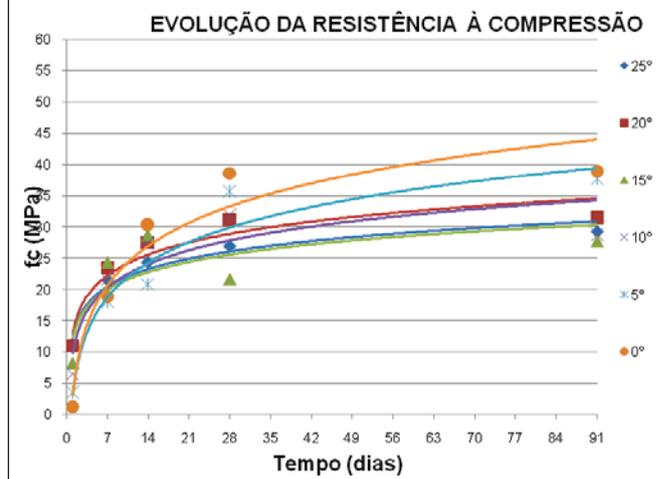
**Tabela 6 - Evolução de resistência à compressão em sala climatizada (20° C)**

°C	Resistência à compressão		
	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
25	24,3	26,9	29,2
20	27,5	31	31,4
15	28,7	21,7	27,8
10	27,3	31,8	28,7
5	20,9	35,6	37,6
0	30,3	38,6	38,8

**Figura 2 - Evolução da resistência à compressão em sala climatizada (20° C)**



**Figura 3 - Evolução da resistência à compressão**



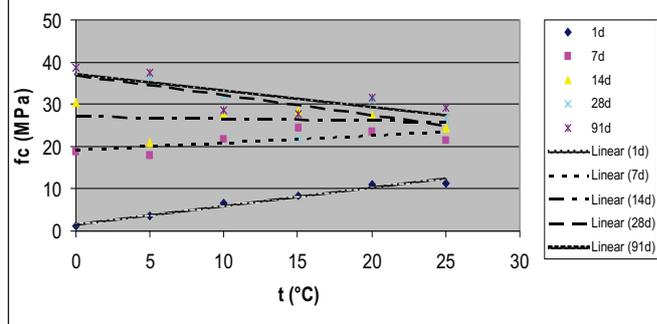
nos 7 primeiros dias, quando as amostras foram condicionadas a cura controlada em baixas temperaturas, variando de 25° a 0° C em intervalos de 5° C.

Para uma melhor visualização, apresenta-se os resultados na Figura 1, relacionando a resistência à compressão, em MPa, no eixo 'y' com a idade de ruptura dos corpos-de-prova no eixo 'x', em dias.

Neste primeiro período de cura pode-se observar uma maior variação de resistência no primeiro dia de medição, que foi de 11,4 MPa para a temperatura de 25° C, a 1,2 MPa para a temperatura de 0° C. As temperaturas de cura mais altas apresentaram resultados de resistência à compressão superiores e a diminuição de resistência foi gradativa até a temperatura mais baixa com o pior desempenho, como era de se esperar.

No sétimo dia essa variação foi de 24,4 MPa para a temperatura de 15° C, a 18 MPa para a temperatura de 5° C. A diferença entre o maior e o menor valor reduziu 37,25% em comparação com o primeiro período. Ou seja, nos 7 dias de cura, a influência das

**Figura 4 - Evolução da resistência à compressão em função da temperatura de cura**



temperaturas iniciais de cura já foi menor, chegando, inclusive, a sobrepor diferentes curvas. Ainda o ganho de resistência foi mais

**Tabela 7 - Evolução de resistência à compressão em 91 dias**

°C	Resistência à compressão				
	1 dia MPa	7 dias MPa	14 dias MPa	28 dias MPa	91 dias MPa
25	11,4	21,5	24,3	26,9	29,2
20	11	23,4	27,5	31	31,4
15	8,3	24,4	28,7	21,7	27,8
10	6,5	21,7	27,3	31,8	28,7
5	3,5	18	20,9	35,6	37,6
0	1,2	18,8	30,3	38,6	38,8

**Tabela 8 – Equações de comportamento relacionando a resistência à compressão e a temperatura de cura**

Propriedade	Equação de comportamento
1 dia	$f_c = 0,4303 * t + 1,6048$
7 dias	$f_c = 1,1851 * t + 18,986$
14 dias	$f_c = -0,0503 * t + 27,129$
28 dias	$f_c = -0,4709 * t + 36,819$
91 dias	$f_c = -0,3857 * t + 37,071$

expressivo para os concretos curados a temperaturas inferiores, chegando a resistência do concreto curado a 0°C aumentar cerca de 1.600% entre o 1° e o 7° dia, contra um a ganho de 88% dos curado a 25°C.

Na Tabela 6 observa-se a evolução da resistência a partir dos 14 até os 91 dias de cura. Ainda ilustra-se, na Figura 2, os resultados em forma de gráfico, para melhor visualização.

No segundo período de cura se observa a aproximação dos resultados a partir 7° dia, ocorrendo a inversão nos valores das resistências a partir do 14° dia, com os concretos curados a temperaturas inferiores apresentando melhores resultados do que os curados a temperaturas superiores.

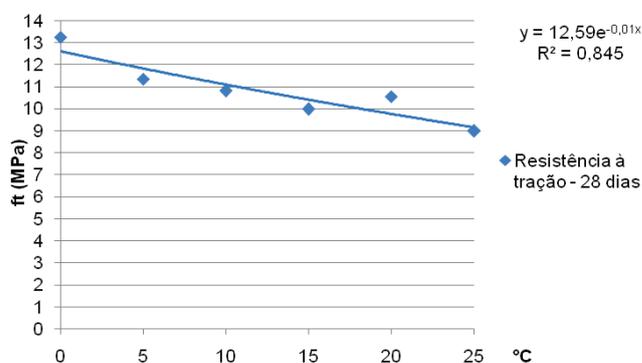
Aos 28 dias a relação de resistências com a idade anterior seguiu a tendência de maior crescimento para as temperaturas mais baixas. A variação de resistência nesta idade foi de 21,7 MPa para a temperatura de 15° C, a 38,6 MPa para a temperatura de 0°C, contemplando uma redução de 43% no intervalo de 15° C, já para o intervalo total de 25°C a redução de foi de 30%, similares aos resultados da bibliografia referenciada. Para a idade de 91 dias a relação de resistências entre os concretos manteve a tendência, com os curados a zero e 5° C apresentando os maiores valores de resistência à compressão. Apresenta-se então a Tabela 7 com todos os valores agrupados.

A Figura 3 mostra o comportamento em forma de gráfico, onde observa-se as maiores resistências à compressão para os concretos curados em temperaturas elevadas nas primeiras idades, com a

**Tabela 9 – Resistência à tração aos 28 dias**

Resistência à tração	
Temperatura (°C)	28 dias (MPa)
25	9,0
20	10,5
15	10,0
10	10,8
5	11,3
0	13,2

**Figura 5 – Resistência à tração aos 28 dias**



inversão ocorrendo aos 14 dias, mostrando que a hidratação lenta é uma vantagem ao longo do tempo para a estrutura de concreto. Este comportamento fica evidenciado na Figura 4, que correlaciona a resistência à compressão, em MPa, no eixo 'y', com a temperatura de cura, em °C, no eixo 'x', para as idades de rompimento das amostras. Observa-se que o comportamento dos resultados a 1 dia é crescente, ou seja, quanto maior a temperatura de cura maior a resistência à compressão nesta idade. Esta tendência novamente é observada aos 7 dias, porém de forma mais suave. Aos 14 dias a equação é praticamente linear, assim independente da temperatura de cura a resistência à compressão é similar. Enquanto que aos 28 e aos 91 dias o comportamento dos resultados é decrescente, ou seja, a resistência à compressão dos concretos é prejudicada pelo aumento da temperatura de cura.

Para todas as idades foram determinadas as equações de comportamento, expressas na Tabela 8. Os comportamentos descritos podem ser analisados através das equações, pois o primeiro número, que multiplica o 't' (temperatura de cura) é positivo para resultados crescentes, a 1 e 7 dias, próxima a zero aos 14 dias, mostrando a linearidade, e negativo, quando os valores decrescem aos 28 e 91 dias. Ainda a parcela isolada da equação representa o valor que a reta intersecciona o eixo 'y', ou seja, a resistência à compressão quando curado a 0°C. Este valor é maior para as temperaturas de cura que propiciaram as maiores resistências à compressão e menor para as que atingiram os menores valores, ou seja, maior para as temperaturas maiores.

#### 4.2 Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos

As apresentações dos resultados de resistência à tração aos 28 dias de cura estão expressos na Tabela 9. A Figura 5 ilustra a equação de comportamento, relacionando a resistência à tração, no eixo 'y', com a temperatura de cura em °C, no eixo 'x'. Observa-se que, novamente, os resultados aos 28 dias foram superiores aos concretos curados com temperaturas inferiores, ratificando o comportamento visto para as resistências à compressão. A variação de resistência para a idade foi de 9,0 MPa para a tem-

peratura de 25° C, a 13,2 MPa para a temperatura de 0° C, contemplando uma redução de 31% no intervalo de 25° C, se aproximando dos resultados apresentados na bibliografia referenciada. E o coeficiente de correlação foi de 0,85, considerado aceitável para este tipo de ensaio.

## 5. Conclusões

Após a realização deste trabalho, pode-se observar que nas primeiras idades, entre 1° e 7° dia, as resistências à compressão dos concretos curados a temperaturas mais elevadas foram superiores em relação às resistências com temperaturas de cura inferiores, como era de se esperar. Nestas idades o aumento de resistência foi devido ao elevado grau de hidratação dessas peças, explicado pelo alto valor da energia de ativação. Destaca-se as temperaturas de cura de 20 e 25°C ao 1° dia, que apresentaram os maiores valores. Porém, ao 7° dia, quando a energia de ativação não exerce tanta influência sob as peças, as resistências tiveram maior proximidade.

A partir do 14° dia verificou-se a inversão nos corpos-de-prova de maiores resistências, ou seja, os que inicialmente foram curados em temperaturas baixas obtiveram os melhores resultados, porém com baixas diferenças entre as mesmas. Essas diferenças aumentaram aos 28 dias, tendo o melhor desempenho as peças inicialmente curadas a 0°C. Por fim, comprova-se que, quanto mais lenta for a hidratação do cimento Portland, melhor será a formação de sua estrutura cristalina, justificando assim, desempenhos superiores para as peças curadas nas suas primeiras idades em baixas temperaturas, ou seja, temperaturas que retardam e/ou desaceleram o processo de hidratação.

## 6. Referências Bibliográficas

- [01] HELENE, P. R. L.; LEVY S. M. "Estado da arte" do concreto como material de construção. São Paulo: Exacta, 2003. 8p.
- [02] SHOUKRY, S. N.; WILLIAM, G. W.; DOWNIE, B.; RIAD, M. Y.; Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. USAL: Elsevier, 2010.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [04] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.
- [05] ISAlA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 1600p.
- [06] ANKA ILC; GORAN TURK; FRANCI KAVCIC; GREGOR TRTNIK. New numerical procedure for the prediction of temperature development in early age concrete structures. USAL: Elsevier, 2009.
- [07] NEVILLE, A M. Propriedades do concreto. Tradução Eng. Salvador E. Giannusso. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- [08] KIRCHHEIM, A. P.; SOUZA, R. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. Alcalis incorporados ao aluminato tricálcico: efeitos na hidratação. Ambiente construído. 2010. 14p.
- [09] TAYLOR H. F. W. La química de los cementos. Bilbao: Urmo, 1967. 512 p.
- [10] ZHANG, J.; CUSSON, D.; MONTEIRO, P.; HARVEY, J.; New perspectives on maturity method and approach for high. USAL: Elsevier, 2008.
- [11] PINTO BARBOSA, M.; BERTOLUCCI, F. S.; PINTO, R. C. A.; PERES, L. D. P. Avaliação da energia aparente de ativação do cimento CP-II E CP-V com adição de superplastificantes. Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006. 15 p.
- [12] KIM, J. K.; HAN, S. H.; SONG, Y. C.; Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results. USAL: Elsevier, 2002.
- [13] HUSEM, M.; GOZUTOK, S.; The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete. USAL: Elsevier, 2004.
- [14] CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: PINI, 1988. 522 p;
- [15] DEMIREL, B.; KELESTEMUR, O.; Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. USAL: Elsevier, 2010.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23. Cimento. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. Determinação da Massa Unitária de Agregados. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776. Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos - Por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.