

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND, REFORÇADOS COM FIBRAS DE PET, POR ENSAIOS DE ULTRA-SONOGRAFIA E CONDUTIVIDADE TÉRMICA⁽¹⁾

Sávia Cristina Lacerda Poubel Bastos⁽²⁾, Evandro Tolentino⁽³⁾

Neste trabalho foram analisados concretos de três composições: sem fibras e com fibras de PET de 30 mm e 60 mm. Os concretos foram submetidos a tratamentos térmicos a 250°C e 600°C. O desempenho residual dos concretos foi avaliado por ensaios de determinação da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico e condutividade térmica. Os resultados dos ensaios de ultra-sonografia e condutividade térmica mostraram que as três composições de concretos estudadas degradaram-se de maneira praticamente igual, independentemente de possuírem fibras de PET ou não.

Palavras-chave: Concreto, condutividade térmica, velocidade ultra-sônica.

1. Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais; de 25 a 28 de julho de 2005; MINASCENTRO – Belo Horizonte.
2. Estudante de Graduação do curso de Engenharia de Materiais, do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE MG.
3. Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG; Professor do curso de Engenharia de Materiais do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE MG.

INTRODUÇÃO

A utilização de fibras em materiais da construção civil já ocorria no Antigo Egito, conforme descrito em Êxodo 5, 6-7: não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico de tijolos. Na realidade, diversas fibras, tais como aço, carbono, vidro, asbesto, kevlar, polipropileno, sisal, coco e bambu, podem ser utilizadas como reforço de matrizes cimentícias. As fibras podem ser divididas de acordo com sua elasticidade, em fibras de baixo ou alto módulo. Fibras de alto módulo melhoram a resistência do compósito, principalmente à tração, enquanto as de baixo módulo propiciam melhor resistência ao impacto e permitem ao compósito trabalhar nos estágios pós fissurados, aumentando consideravelmente sua tenacidade quando aplicadas em teores adequados

As fibras de polipropileno, nylon e polietileno podem ser classificados como fibras de baixo módulo, o que restringe sua aplicação ao controle de fissuração quando as matrizes possuem baixo módulo de elasticidade, como é o caso da retração plástica em argamassas. No entanto, estas fibras podem ser utilizadas em peças submetidas à alta temperatura, pois se fundem produzindo um caminho livre para a saída do vapor de água, evitando a ruptura do concreto pela pressão de vapor.

Segundo RESENDE (2003), apesar de todo o progresso do concreto, os materiais cimentícios continuam sendo materiais frágeis com baixa resistência à tração. Uma alternativa proposta para amenizar esta deficiência foi a de utilizar fibras como reforço desses materiais. Inicialmente a inserção de fibras discretas e adequadamente espaçadas em matrizes cimentícias, tais como pasta de cimento, argamassa e concreto, originou a hipótese de que a deformação de primeira fissura poderia ser significativamente aumentada. Entretanto, estudos experimentais mostraram que apenas a tensão sob a qual a matriz fissurariam poderia ser ligeiramente aumentada quando fossem utilizadas fibras de alto módulo de elasticidade como reforço. Após o surgimento da primeira fissura, porém, os resultados mostraram uma considerável modificação no comportamento do material, pois as fibras que interligavam as fissuras possibilitaram um aumento de tenacidade pós-fissuração no compósito. Portanto, embora a deformação de fissuração não aumente devido à presença das fibras, a deformação tratativa de ruptura aumenta, uma vez que elas possibilitam a ocorrência de mecanismos de absorção de energia relacionados com os processos de deslocamento e arrancamento das fibras que atravessam as fissuras. Segundo TEZUKA (1989), *apud* PERUZZI (2002), a argamassa de cimento Portland é um material de construção durável, barato e dotado de adequada resistência à compressão e rigidez, entretanto, apresenta ruptura frágil, baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação. Uma maneira eficiente de conferir a essas argamassas uma maior resistência à tração, ao impacto e à fadiga, além de tenacidade e ductilidade, é adição de fibras curtas à mistura. Quando se adicionam fibras ao concreto, este deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Segundo FIGUEIREDO (2000) isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Com isto tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudodúctil, ou seja, apresenta uma certa capacidade portante pós-fissuração.

Hoje em dia, surge a necessidade de promover a educação ambiental e organizar a cadeia de poli(tereftalato de etileno) (PET) pós-consumo. A reciclagem

do PET é benéfica, pois, do volume de lixo coletado e que é removido para aterros sanitários, a ausência do PET proporciona melhorias sensíveis no processo de decomposição da matéria orgânica, pois o plástico impermeabiliza as camadas em decomposição, prejudicando a circulação de gases e líquidos. E quando aquecidos a temperaturas adequadas, esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados. Apesar do PET ser um polímero comercializado há várias décadas na forma de fibras, a reciclagem de PET ganhou impulso após o surgimento das garrafas de PET em 1977, que são hoje em dia a principal aplicação deste poliéster. A grande visibilidade das garrafas, que facilita a identificação e separação do material, somada ao volume crescente introduzido no mercado, se constituiu num incentivo à reciclagem deste material. Aproximadamente 68% de todos os refrigerantes produzidos no país são embalados em garrafas PET.

Este trabalho buscou obter informações quanto ao desempenho residual de concretos de cimento Portland, reforçados com fibras de PET, após serem submetidos a altas temperaturas. O desempenho foi avaliado por meio de ensaios não destrutivos: condutividade térmica e velocidade de propagação de pulso ultrassônico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A moldagem dos corpos de prova e o processo de cura seguiram a Norma NBR 5738 (1994). Após o procedimento de moldagem, os corpos de prova foram mantidos no ambiente por 24 horas e em seguida, levados para um tanque onde foi feita a cura úmida. Os corpos de prova cilíndricos apresentavam as dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e foram moldados utilizando fôrmas metálicas.

A Tabela 1 apresenta a composição estabelecida para o traço de concreto de alto desempenho sem adições de fibras de PET. Este concreto será referenciado no texto como **Concreto I**.

Tabela 1 – Composição estabelecida para o concreto I.

Materiais	Agregados Secos	Teor de Umidade	Agregados Úmidos
Cimento	12,6 kg	–	–
Escória	0,0 kg	–	–
Areia	16,6 kg	4,7%	17,4 kg
Pedrisco	2,9 kg	1,0%	2,9 kg
Brita 1	34,8 kg	0,4%	34,9 kg
Microssílica	1260,0 g	–	–
Água	5,4 kg	0,9 kg	4,4 kg
Aditivo Químico	189,0 g		
Slump Test		70mm	

A Tabela 2 apresenta a composição estabelecida para o traço do concreto de alto desempenho com adições de fibras de PET de 60mm de comprimento. Este concreto será referenciado no texto como **Concreto II**.

Tabela 2 – Composição estabelecida para o concreto II.

Materiais	Agregados Secos	Teor de Umidade	Agregados Úmidos
Cimento	8,5 kg	–	–
Escória	0,0 kg	–	–
Areia	11,2 kg	4,7%	11,7 kg
Pó de pedra	1,9 kg	1,0%	1,9 kg
Brita 1	24,5 kg	0,4%	23,6 kg
Microsilica	850,0 g	–	–
Água	3,6 kg	0,6 kg	2,9 kg
Fibras 60mm	80,4 g	–	–
Aditivo Químico	127,5 g	–	–
Slump Test	50mm		

A Tabela 3 apresenta a composição estabelecida para o traço do concreto de alto desempenho com adições de fibras de PET de 30mm de comprimento. Este concreto será referenciado no texto como **Concreto III**.

Tabela 3 – Composição estabelecida para o concreto III.

Materiais	Agregados Secos	Teor de Umidade	Agregados Úmidos
Cimento	9,4 kg	–	–
Escória	0,0 kg	–	–
Areia	12,2 kg	6,1%	12,9 kg
Pedrisco	2,1 kg	3,5%	2,2 kg
Brita 1	26,2 kg	0,4%	26,3 kg
Microsilica	940,0 g	–	–
Água	4,0 kg	0,9 kg	3,1 kg
Fibras 30mm	141,0 g	–	–
Aditivo Químico	141,0 g	–	–
Slump Test	50mm		

Os tratamentos térmicos foram realizados nas temperaturas 250°C e 600°C. Os corpos de prova não estavam selados, ou seja, foi permitido ao concreto secar durante os tratamentos térmicos. Nos tratamentos foram usados três corpos de prova para cada temperatura. Após atingirem a temperatura máxima prevista, os corpos de prova permaneceram nela por 3 horas, sendo então desligado o forno. O resfriamento dos corpos de prova até a temperatura ambiente aconteceu dentro do forno. A título de comparação alguns corpos de prova não foram submetidos aos tratamentos térmicos. Estes serão referenciados como concretos de “controle”.

Para o ensaio de ultra-sonografia, as amostras utilizadas nas análises foram os próprios corpos de prova em seu tamanho natural. O aparelho empregado foi o PUNDIT MK V. Os ensaios foram realizados em três posições ao longo da altura dos corpos de prova e, para cada altura, duas posições perpendiculares. Os corpos de prova ensaiados estavam na temperatura ambiente e na umidade de equilíbrio com o ambiente (aproximadamente 26°C e 60%, respectivamente). A velocidade de propagação do pulso ultra-sônico foi medida em três posições ao longo da altura do corpo de prova e, para cada posição, duas direções perpendiculares, conforme

mostra a Figura I. A **Posição I** é aquela que corresponde à última camada a ser adensada num corpo de prova durante sua moldagem; ou seja, é a camada de cima.

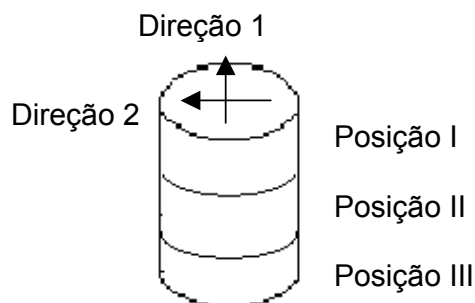


Figura I – Ilustração das posições e direções consideradas para cada corpo de prova no ensaio de ultra-sonografia.

Para os ensaios de condutividade térmica, as amostras utilizadas nas análises foram os próprios corpos de provas em seu tamanho natural. Os corpos de prova ensaiados estavam na temperatura ambiente e na umidade de equilíbrio com o ambiente (aproximadamente 26°C e 60%, respectivamente). Os valores de condutividade térmica obtidos então são valores residuais. Foi empregado o aparelho KEMTHERM QTM-D3 que utiliza o método do fio transiente quente. A condutividade foi avaliada no topo dos corpos de prova, correspondendo a **Posição I** indicada na Figura I.

RESULTADOS

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados do ensaio de condutividade térmica obtidos na temperatura ambiente. Cada valor é a média de 3 ensaios.

Tabela 4 – Condutividade térmica medida na temperatura ambiente.

Concreto	Tratamento Térmico	Média (W/m.K)	Desvio Padrão (W/m.K)
I	Controle	1,9	0,2
	250°C	1,7	0,1
	600°C	0,8	0,1
II	Controle	1,9	0,2
	250°C	1,5	0,05
	600°C	1,1	0,04
III	Controle	1,8	0,3
	250°C	1,6	0,2
	600°C	0,8	0,1

Utilizando-se os resultados dos ensaios de condutividade térmica, foram determinados os valores da razão entre o valor da condutividade térmica, obtida na temperatura ambiente para o corpo de prova submetido ao tratamento térmico especificado, pela condutividade térmica do corpo de prova do concreto não submetido a tratamento térmico. Estes resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores da razão entre a condutividade térmica obtida na temperatura ambiente para o corpo de prova submetido a tratamento térmico pela condutividade térmica do concreto não submetido a tratamento térmico.

Concreto	Tratamento Térmico	Razão entre a κ para concreto sem tratamento térmico, pela κ obtida para o tratamento térmico especificado.
I	Controle	1
	250°C	0,9
	600°C	0,4
II	Controle	1
	250°C	0,7
	600°C	0,6
III	Controle	1
	250°C	0,9
	600°C	0,5

A Figura II apresenta os valores residuais obtidos no ensaio de condutividade térmica para cada tipo de concreto.

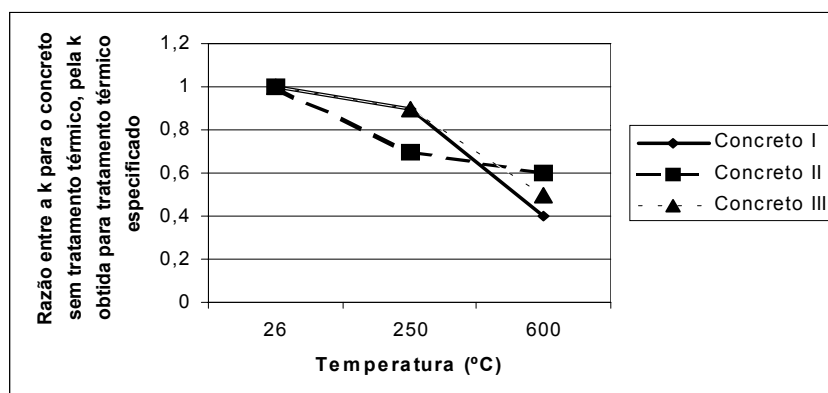


Figura II – Valores residuais obtidos do ensaio de condutividade térmica.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de ultrasonografia. Cada valor apresentado é a média de 3 ensaios.

Tabela 6 – Velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.

Concreto	Tratamento Térmico	Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico (m/s)		
		Posição I	Posição II	Posição III
I	Controle	4259	4193	4196
	250°C	2307	2505	2625
	600°C	1029	996	1290
II	Controle	4361	4286	4288
	250°C	2239	2595	2594
	600°C	943	1136	1177
III	Controle	4329	4401	4310
	250°C	2356	2715	2738
	600°C	1619	1482	1114

Utilizando-se os resultados dos ensaios, foram determinados os valores da razão entre o valor da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, obtido para o corpo de prova submetido ao tratamento térmico especificado, pela velocidade de propagação do pulso ultra-sônico do corpo de prova do concreto não submetido a tratamento térmico.

Tabela 7 – Valores da razão entre o valor da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, obtida para o corpo de prova submetido ao tratamento térmico especificado por aquela obtida para o corpo de prova de controle.

Concreto	Tratamento Térmico	Posição I	Posição II	Posição III
I	Controle	1	1	1
	250°C	0,5	0,6	0,6
	600°C	0,2	0,2	0,3
II	Controle	1	1	1
	250°C	0,5	0,6	0,6
	600°C	0,2	0,3	0,3
III	Controle	1	1	1
	250°C	0,5	0,6	0,6
	600°C	0,4	0,3	0,3

A Figura III mostra um gráfico com os valores apresentados na Tabela 7 para a posição I.

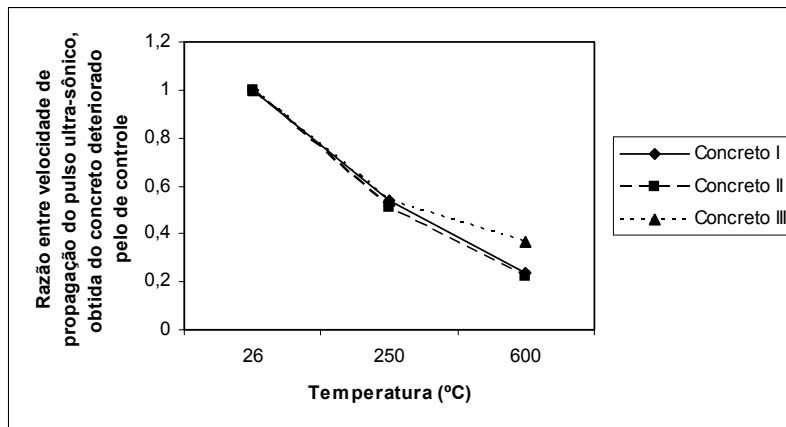


Figura III – Valores normalizados de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico vs. Temperatura para a posição I.

A Figura IV mostra um gráfico com os valores apresentados na Tabela 7 para a posição II.

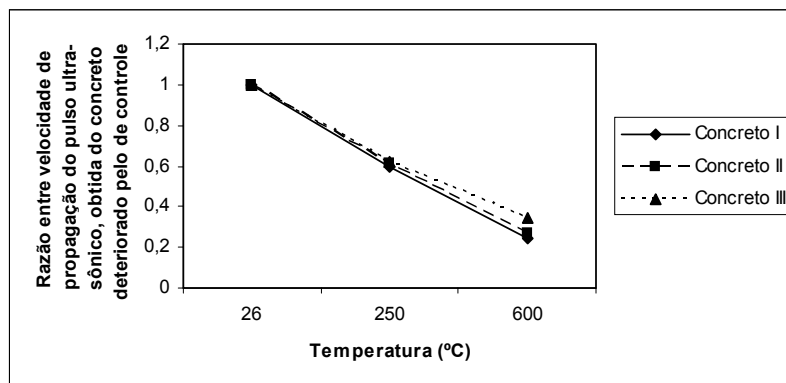


Figura IV – Valores normalizados de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico vs. Temperatura para a posição II.

A Figura V mostra um gráfico com os valores apresentados na Tabela 7 para a posição III.

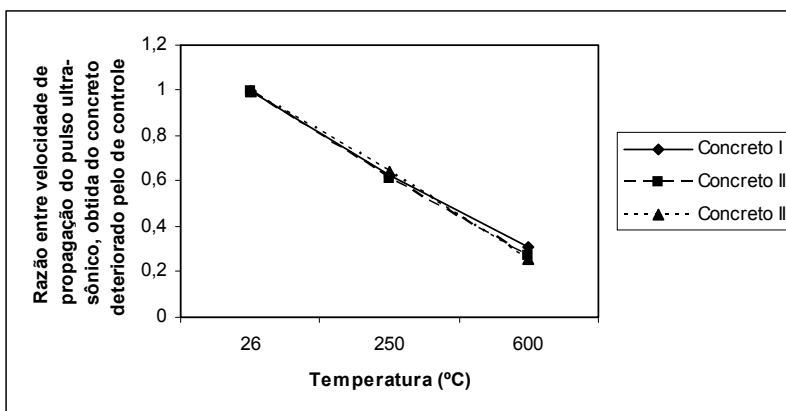


Figura V – Valores normalizados de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico vs. Temperatura para a posição III.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 4 comprova-se que as três composições de concretos possuem praticamente os mesmos valores de condutividade térmica, independentemente de serem corpos de prova de controle ou submetidos a tratamentos térmicos. A Tabela 5 e a Figura II mostram que o menor valor de condutividade térmica residual é aquele obtido para os corpos de prova tratados termicamente a 600°C. Como a condutividade térmica de um material é inversamente proporcional a sua porosidade interna, atribuiu-se este comportamento ao coalescimento de trincas formadas em alta temperatura. Estes resultados coincidem com aqueles obtidos em TOLENTINO et al. (2002), para concretos de alto desempenho sem adição de fibras.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 6 comprova-se que concreto dos corpos de prova de controle pode ser avaliado, em relação à sua resistência, conforme a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, como “bom”. Já os concretos referentes aos corpos de prova tratados termicamente a 250°C e 600°C são avaliados como “ruins”, segundo critério sugerido por LESLIE e CHEESMAN, *apud* BAUER (1982). A razão para os baixos valores de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, obtidos para os concretos degradados termicamente, pode ser o aumento e o coalescimento de trincas internas nos corpos de prova. Observando-se os resultados apresentados na Tabela 7 e nas Figuras III, IV e V comprova-se que os menores valores residuais de velocidade de propagação de pulso ultra-sônico foram aqueles obtidos para os concretos tratados termicamente a 600°C, independentemente de serem os valores obtidos para as posições I, II e III. Como existe uma correlação entre módulo de elasticidade e resistência de compressão, e a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico pode-se obter o módulo de elasticidade, pode-se inferir que os valores residuais de resistência de compressão, para as três composições, reduzem-se similarmente.

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica e ultra-sonografia mostraram que as três composições de concretos estudadas degradaram-se de maneira praticamente igual, independentemente de possuírem fibras de PET ou não. Os baixos valores de condutividade térmica e velocidade de propagação de pulso ultra-sônico, obtidos para os concretos degradados termicamente, foram atribuídos ao coalescimento de trincas formadas em alta temperatura. A partir dos ensaios de ultra-sonografia pode-se inferir que o valor residual da resistência de compressão está entre 20% e 40%, para concretos tratados termicamente a 600°C.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, da CAPES e da Fundação Geraldo Perlingeiro de Abreu. Os autores agradecem também ao Eng. Romério Sales Pereira e ao Técnico Geraldo José Carvalho, da Concreteira Pedreira Um & Valemix, ao Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos, do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Prof. Msc. Gerson Corrêa Filho, do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE MG).

REFERÊNCIAS

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. Rio de Janeiro, UFRJ, 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ Engenharia Civil, 2003.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. São Carlos, UFScar, 2002. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de São Carlos, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo, PCC USP, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5738, **Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto**, 1994. ABNT, Rio de Janeiro, 1994. 9 p.

TOLENTINO, E. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para a avaliação do desempenho térmico de concretos de cimento Portland**. Belo Horizonte, UFMG, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

TOLENTINO, E., LAMEIRAS, F. S., GOMES, A. M., SILVA, C. A. R., VASCONCELOS, W. L. **Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes**. Materials Research, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 301-307, 2002.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, Livros Científicos e Técnicos Editora S. A., 1982. 529 p.

ABSTRACT

This paper presents the residual thermal conductivity and ultrasonic velocity of Portland cement concretes evaluated at room temperature after heat-treating at 250°C e 600°C. The effects of different lengths of PET fibers (30 mm and 60 mm) on performance of Portland cement concretes were investigated. It was found that the residual thermal conductivity and ultrasonic velocity of Portland cement concretes of all mixtures decreased with the raise of heat-treatment temperature, as a result of heat-induced degradation.

Key-word: concrete, thermal conductivity, ultrasonic velocity.