



# THBB AKADEMİ

## TEKNİK BÜLTEN

7

ÖZEL KONU

# YÜKSEK SICAKLIĞIN BETONA ETKİSİ

TÜRKİYE HAZIR BETON BİRLİĞİ YAYINIDIR.

Ekim, 2022

## YÜKSEK SICAKLIĞIN BETONA ETKİSİ

Beton, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yanmazlığı ve düşük ısı yayılımı sayesinde oldukça iyi tepki verebilmektedir. Yangından zarar görmüş yüzden fazla beton yapıyı kapsayan bir araştırmada, bu yapıların çoğunun iyi performans gösterdiği ve çoğunun ilk performanslarını korumak için onarılabileceği sonucuna varılmıştır [1].

Yüksek sıcaklıklara maruz kalma, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişikliklerle birlikte basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinde azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda yapısal direnç kapasitesi ve sistemin kararlılığı tehlikeye girer [2-5]. Bu özelliklerin bozulması, doğrudan malzeme ile ilgili faktörlere (agrega ve çimento tipi, su/çimento oranı, katkılar ve lifler) ve çevreye (yangına maruz kalma süresi, ısı oluşum hızı, uygulanan yük ve nem) bağlıdır [4-6]. Bu bozulmanın analizi; yapının teşhisine ve onarım, güçlendirme ve hatta yıkım stratejilerinin tanımlanmasına yardımcı olur [7, 8].

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun özelliklerindeki değişiklikler, malzemenin mikro yapısındaki değişikliklerle ilgilidir [6]. Malzemenin artık mukavemeti; bu fiziksel, kimyasal ve mineralojik değişiklikleri tanımlayabilen test prosedürleriyle doğrulanabilir. Taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı, termogravimetrik analiz, cıva intrüzyon porozimetrisi, kolorimetri ve petrografi gibi teknikler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra betonarme yapının analiz çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 8, 9].

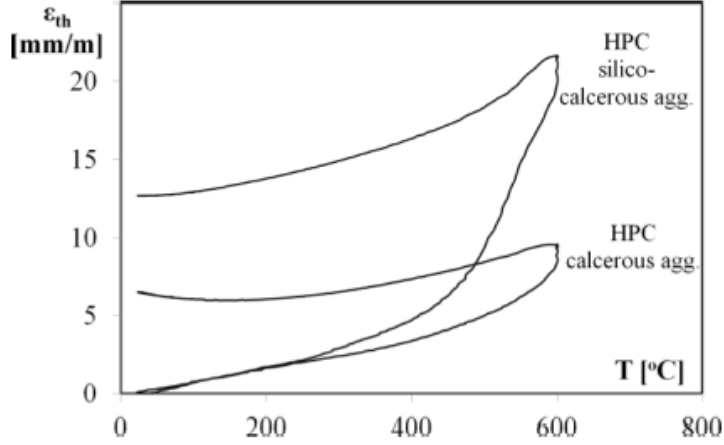
Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun bozulması üç faktöre bağlanır. Bunlar; çimento hamurundaki fizikokimyasal değişiklikler, agregalardaki fizikokimyasal değişiklikler ve bunlar arasındaki termal uyumsuzluktur. Sıcaklık ve ısı hızı gibi yangınla ilgili faktörler ve uygulanan yük ve nem gibi yapısal elemandaki koşullar da betonun bozulmasında rol oynar [5]. Bu nedenle, yüksek sıcaklıkların beton üzerindeki etkileri; agregadaki, hidrate çimento hamurundaki ve arayüz (geçiş) bölgesindeki mikroyapısal değişikliklere odaklanarak incelenmelidir.

### Yüksek Sıcaklıkların Agregalar Üzerindeki Etkileri

Agreganın doğası ve mikro yapısı, betonun stabilitesini ve ısı iletkenliğini etkileyerek artık dayanımı ve sıvı taşıma mekanizmalarını değiştirir [6, 10–12]. Yüksek sıcaklıklara maruz kalındığında fizikokimyasal değişiklikler agregaları etkiler; genleşmeyi, kristal mikro yapılarda kırılmaları ve hatta 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda erimeyi teşvik eder. Bu etkiler; agreganın termal stabilitesi, yani yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kimyasal ve fiziksel değişikliklere duyarlılığı ile ilgilidir. Bu özellik ve doğrulanmış bozulma, kullanılan agreganın tipine göre değişir [4, 6]. Bileşiminde kuvars bulunan silisli agregalar ve kum, yüksek sıcaklıklarda önemli değişikliklere uğrar. Kuvars kristal formunun  $\alpha$ 'dan  $\beta$ 'ya dönüşümü nedeniyle 573°C'de %5,7'lik hacimsel genleşme meydana gelir [6]. Bu dönüşüm tersine çevrilebilirliğine rağmen, oluşan genleşme nedeniyle agrega etrafında radyal çatlaklar meydana gelir [9].

Silisli-kalkerli agrega içeren betonların ısıl gerilmesi, kalkerli agrega içeren betonlara göre oldukça yüksektir (bkz. Şekil 1). 600°C sıcaklıkta silisli-kalkerli agrega içeren betonların ısıl gerilmesi kalkerli

agregaya oranla iki kat daha yüksektir. Bu gerçek, silisli agregaların daha yüksek termal genleşme katsayısı ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca 573°C'de meydana gelen kuvarsın faz dönüşümüne agrega hacminde önemli bir artış eşlik eder. Şekil 1'de görüldüğü üzere silisli agrega içeren betonda soğutma işlemi sonrasında önemli ölçüde daha yüksek artık gerilmenin yanı sıra daha yüksek genleşme gözlemlenmektedir. Bu da Şekil 2'de görüldüğü gibi numunelerin yüzeyinde görülen önemli sayıda çatlakların bir sonucudur [4].



Şekil 1. Silisli-kalkerli ve kalkerli agregalar içeren iki yüksek performanslı betonun (HPC) 600°C'ye ısıtılan ve geri oda sıcaklığına soğutulan numunelerinde termal genleşme [4]



Şekil 2. 600°C'ye ısıtıldıktan sonra numunelerin yüzeyinde görünür çatlaklar  
a) Kalkerli agrega içeren beton b) Silisli-kalkerli agrega içeren beton [4]

Dolomit gibi karbonatlı kayalar, kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) kalsiyum oksit (kireç -  $\text{CaO}$ ) ve karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ) dönüşmesi nedeniyle 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararsız hale gelir. 800°C'de zirveye ulaşan ve 898°C'de biten bu süreç endotermiktir ve beton üzerinde sıcaklık ilerlemesini geciktirme eğilimindedir [4, 6, 14]. Kalkerli agregalarda bu fenomen, kalsiyum karbonatın bozunması nedeniyle 600°C'de başlar. Bazalt agregaları büyük bir termal stabiliteye sahiptir ve 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda erimeye başlar. Bu işlem sırasında kayacın içinde tutulan gazlar genişleyerek serbest kalır [6].

### Yüksek Sıcaklıkların Hidrate Çimento Hamuru Üzerindeki Etkisi

Hidrate çimento hamurunun yüksek sıcaklıklardaki davranışı; su/çimento oranı, C/S (CaO/SiO<sub>2</sub>) oranı, Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandit) miktarı, hidrasyon derecesi ve nem gibi faktörlere bağlıdır [6, 12]. Yüksek sıcaklıklarda bozunma süreci, yaklaşık 80°C'de meydana gelen etrenjitin bozunmasıyla başlar [4, 15, 16]. Daha sonra, çimento hamuru kurur ve bu durum malzemedeki mikroyapısal değişikliklerle ilişkilidir. Başlangıçta Van der Waals çekim kuvvetlerinden etkilenmeyen kapiler su (serbest su) buharlaşır, ardından fiziksel bir süreç sonucunda katmanlı ve adsorbe olmuş su buharlaşır. Son olarak, kimyasal olarak C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ile ilişkili su kaybolur [4, 6, 17]. C-S-H dehidrasyonu, mikro gerilmelerin gevşemesine neden olan ve geçici sünmeden sorumlu olan fizikokimyasal bir süreçtir. Bu süreç, 100°C'de başlar ve gözeneklerde su buharı birikmesine ek olarak çatlama ve gözeneklilik artışı ile birlikte çimento hamuru kaybını başlatır ve bu da betonda kabarmaya ve dökülmeye katkıda bulunur. 700°C'de C-S-H fazı; β-C<sub>2</sub>S (belit), βCS (volastonit) ve suya ayrışır. Bu da çimento hamurunun büzülmesine ve dayanım azalmasına neden olur. C-S-H ile ilişkili su kaybı, gözeneklilikte bir artışa neden olur ve ayrıca dayanım kaybına katkıda bulunur [4, 6, 16, 17].

Portlandit kristalleri, 420°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bir dehidrasyon sürecinden geçerek çimento hamurunda artan büzülmeye ve mikro çatlama neden olur. Bu süreçte Ca(OH)<sub>2</sub>, CaO (kalsiyum oksit) ve suya ayrışır. Diğer bir değişiklik ise 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda CaO ve CO<sub>2</sub>'ye ayrışan kalsiyum karbonatın (CaCO<sub>3</sub>) dekarbonizasyonudur [6, 16].

Yüksek sıcaklıklar ayrıca hidrate çimento hamurunda bulunan hidrate olmayan klinker tanelerini de etkileyerek genleşmelerini destekler. Bu fenomen, C-S-H ve CH'deki değişikliklerin neden olduğu çimento hamurunun büzülmesiyle birleştiğinde, malzemeler arasında farklı termal genleşmeleri teşvik eder. Bu da betonda mikro çatlaklara neden olur ve gözenekliliği artırır [18]. Sıcaklıklar 1200°C'yi aştığında çimento hamuru erimeye başlar [5].

Gözeneklilik aynı zamanda yüksek sıcaklıklardan da etkilenir ve esas olarak ilerleyici C-S-H dehidrasyon işlemi nedeniyle doğrusal olmayan bir şekilde büyür. 20°C'den 300°C'ye kadar gözeneklilikteki artış, doğrulanmış kütle kaybından daha düşüktür. Bu ilişki 300°C'nin üzerinde, gözeneklilikte önemli bir artış ve mikro çatlakların yoğunlaşması ile tersine döner. Gözeneklilik artışının bir başka zirvesi 900°C üzerinde gerçekleşir [6]. Çimento hamurunun nemini kaybetmediği koşullarda hızlı ısı oluşumu, CaO/SiO<sub>2</sub> oranına bağlı olarak C-S-H veya diğer kristallerin ortaya çıkmasına neden olabilir [4, 5].

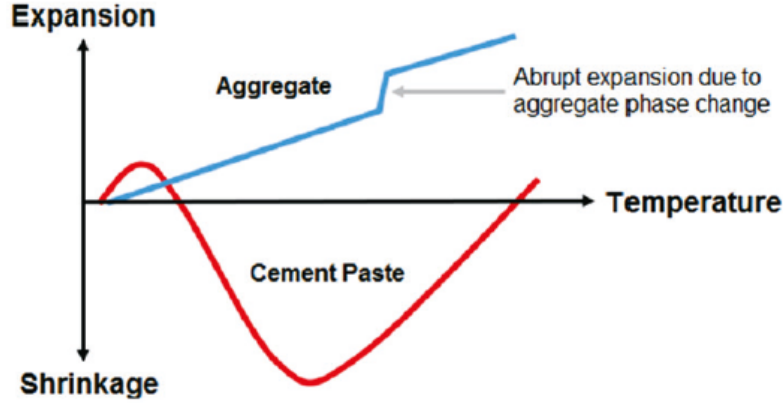
Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra soğutma, çimento hamurundaki değişiklikleri de teşvik eder. Hamur içindeki çimentolu ürünler yeniden hidratlanarak yeni jeller veya kristal bileşenler oluşturabilir. Oluşan kireç aynı zamanda yeniden hidrate olur ve genişleyerek yeni çatlaklar oluşturur.

### Yüksek Sıcaklıkların Arayüz (Geçiş) Bölgesi Üzerindeki Etkisi

Agregalar ve çimento hamuru arasındaki, genellikle 50 µm kalınlığındaki [19] arayüz, zayıf C-S-H kristalleri, portlandit ve etrenjitin yanı sıra bölgedeki büyük hacimli boşluklar ve çatlaklar nedeniyle betondaki "zayıf halka" olarak kabul edilir [20].

Betonun ısınması, agrega ve çimento hamuru arasında farklı bir termal genişlemeye yol açar. Dehidrasyon nedeniyle, çimento hamuru ısınma sırasında yoğun bir büzülme işlemine maruz kalırken

agregalar genişler (Şekil 3). Bu, daha yüksek kırılabilirliği nedeniyle başlangıçta arayüz bölgesinde ortaya çıkan çatlaklara yol açar [4, 6, 9].



Şekil 3. Agregat ve hidrate çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluk [13]

Arayüz bölgesinin zayıflaması, yüksek sıcaklıklarda betonun çatlamasına da yol açabilir [17]. Malzemenin iç kısmından gelen buhar basınçlarıyla indüklenen arayüz, beton elemanlarının enine kesitinde bir azalmayı teşvik eder ve direnç kapasitelerini azaltır [2-5]. Bu durum, maruz kalmanın ilk anlarında kabarıp dökülme başladığında gerçekleşir [17].

Tablo 1. Yüksek sıcaklıkta betonda meydana gelen değişiklikler [4]

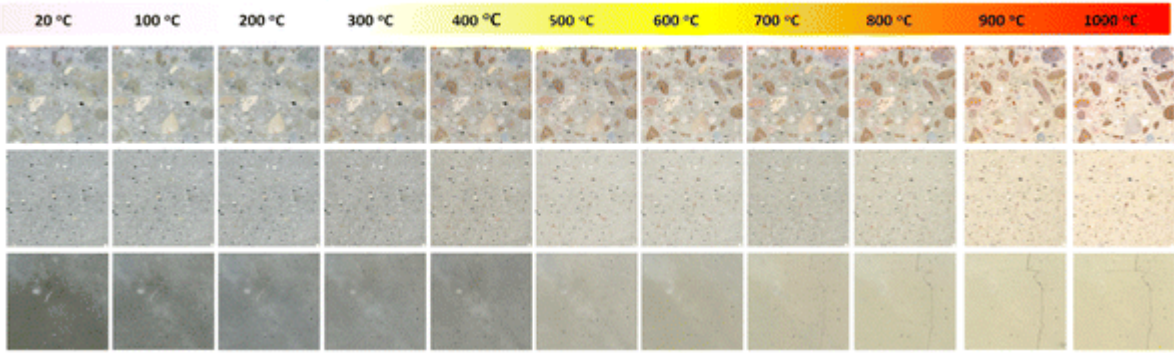
Sıcaklık	Portland Çimentosu Hamurundaki Etkiler	Agregadaki Etkiler
20 °C - 100 °C	Kapiler su kaybı meydana gelir. Su genişlemeye başlar. Etrenjitler ayrışmaya başlar.	
100 °C - 200 °C	– C-S-H jelleri dehidrate olur ve $\alpha\text{C}_2\text{SH}$ formuna dönüşür. – Alçı ayrışır. – Fiziksel olarak başlı olan su kaybı başlar.	
300 °C - 400 °C	374°C'de su kritik sıcaklığa ulaşır.	Silisli agregalar parçalanmaya başlar.
400 °C - 450 °C	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ayrışır. $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	
570 °C		Kuvartz minerali faz değişimine uğrar. $\alpha\text{SiO}_2 \rightarrow \beta\text{SiO}_2$
600 °C - 800 °C	İkincil C-S-H fazları ayrışır ve $\beta\text{C}_2\text{S}$ oluşur.	
800 °C - 1000 °C		– Dolomit agregat dağılır. – Kireçtaşı agregat dağılır. $\text{CO}_2$ açığa çıkar. Hidrolik bağlar seramik bağlara dönüşür. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1000 °C - 1200 °C	Dehidrate fazlar erimeye başlar.	Bazalt agregat dağılır.
>1200 °C	Beton tamamen dağılır ve erir.	



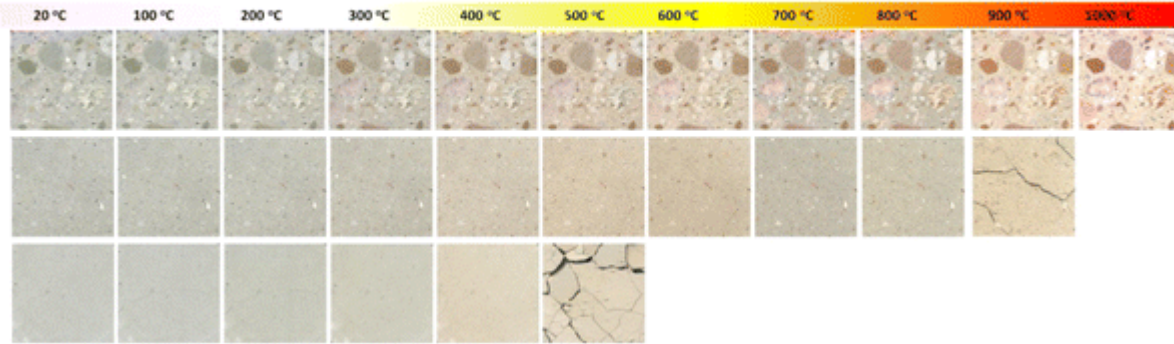
## Betonda Renk Değişimi

Betonun renk değişimi yangının etkisinin çok önemli bir göstergesidir. Renk değişimi, yangın sırasında betonun çeşitli derinliklerde maruz kaldığı sıcaklık aralığını tahmin etmek için çok iyi bir görsel kılavuzluk sağlar. Silisli agregaya içeren betonun rengi 300°C ile 600°C arasında ısıtıldığında kırmızı, 600°C ile 900°C arasında beyazımsı-gri, 900°C ile 1000°C arasında devetüyü rengine dönüşmektedir [21,22]. Isıtılmış betonun renk değişimi esas olarak; çimento hamurunun dehidrasyonundan, kademeli olarak suyun buharlaşmasından ve ayrıca agregaya içinde meydana gelen dönüşümlerden kaynaklanmaktadır [21-23]. En yoğun renk değişimi, demir içeren silisli nehir yatağı agregalarında gözlemlenir. Bu renklenmeye mineral bileşenlerin oksidasyonu neden olur [21–23]. Silisli agregalar ısıtıldığında kırmızıya dönerken, kalsiyum karbonat içeren agregalar beyazlaşır. Kalsinasyon işlemi sonucunda  $\text{CaCO}_3$  kirece dönüşerek beyaz ve gri gibi uçuk tonlar verir.

### HPC, mortar and cement paste



### OC, mortar and cement paste

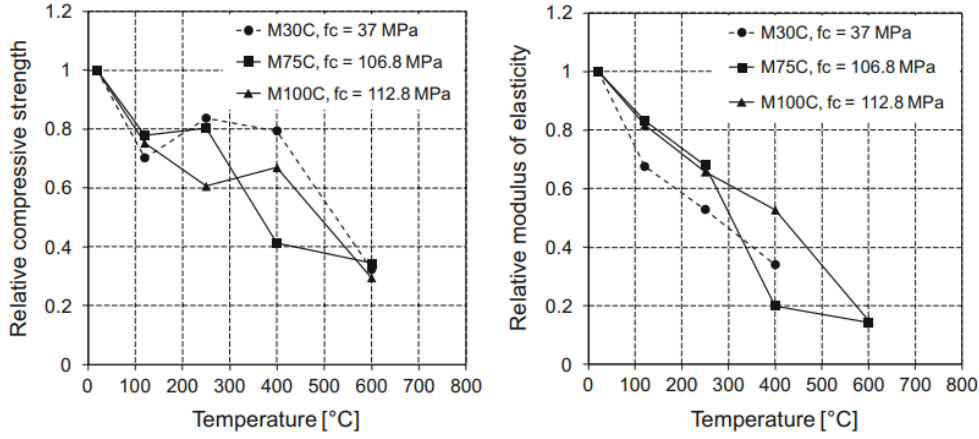


Şekil 4. Yüksek sıcaklıklarda yüksek performanslı (HPC) beton, harç ve hamurda (üst) ve normal (OC) beton, harç ve hamurda (alt) renk değişimi [8]

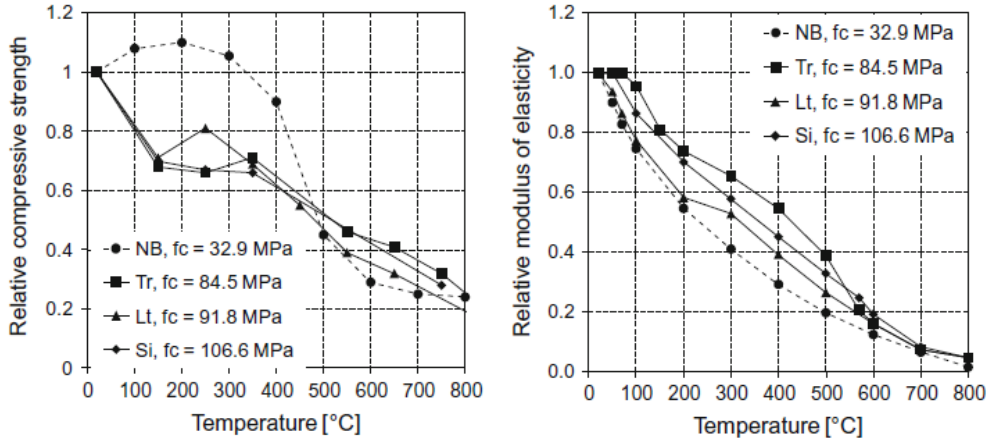
## Yüksek Sıcaklıkların Beton Basınç Dayanımına ve Elastisite Modülüne Etkisi

150°C-300°C sıcaklık aralığında, dayanım kaybı %5 ile %30 arasında değişmektedir. Beton sıcaklığı 300°C'ye ulaştığında %30-40 mertebesinde dayanım kaybı meydana gelir. Bu, ısıl genleşme nedeniyle çimento hamuru ve agregaların önemli ölçüde iç çatlamasının yanı sıra beton içindeki hamur ile çelik donatı arasındaki uyumsuzluğun sonucudur. Yaklaşık 500°C-600°C'nin üzerinde, gri ile devetüyü renk aralığında yer alan gevrek ve gözenekli mikro yapı nedeniyle %70 ila %80'den fazla dayanım azalması meydana gelir. 300°C'ye kadar olan sıcaklık aralığında, betonun elastisite modülündeki kayıp, dayanım kaybına benzer olarak %40 mertebesinde dir. 550°C civarında elastisite modülündeki kayıp %50 mertebesinde dir [24].

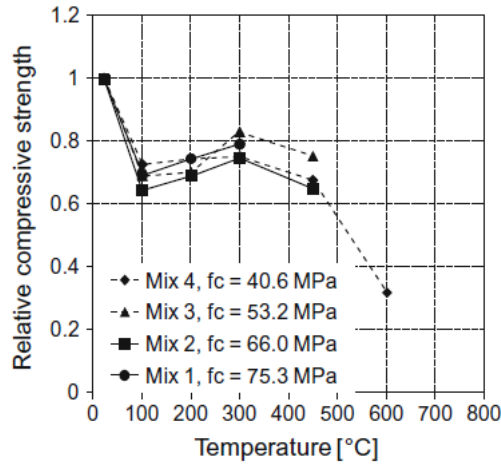
Şekil 5, 6 ve 7’de literatürde yer alan yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda bağıl basınç dayanımı ve elastisite modülü değişimleri görülmektedir.



Şekil 5. Normal ve yüksek dayanımlı betonun bağıl basınç dayanımı (solda) ve elastisite modülü (sağda) [25]



Şekil 6. Normal ve yüksek dayanımlı betonun bağıl basınç dayanımı (solda) ve elastisite modülü (sağda) [26]



Şekil 7. Farklı betonların bağıl basınç dayanımı [27]

## Kaynaklar

1. TOVEY, A. L.; CROOK, R. L. Experience of Fires in Concrete Structures. ACI Special Publication, v. 32, 1986, p. 1-14.
2. GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. Microstructure of fire damaged concrete. A case study. Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 2, 2005, p. 255–259.
3. GUO, Z.; SHI, X. Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, Waltham: Butterworth-Heinemann, 1ed, 2011, 311 p.
4. HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, v. 61, n. 1, 2013, p. 1–10.
5. KHOURY, G.A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in Structural Engineering and Materials, v. 2, n. 4, 2000, p. 429–447.
6. Fédération internationale du béton – FIB. fib Bulletin 38: Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, 2007, 106 p.
7. Fédération internationale du béton – FIB. fib Bulletin 46: Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment, 2008, 214 p.
8. HAGER, I. Colour Change in Heated Concrete, Fire Technology, v. 50, n. 4, 2013, p. 945-958.
9. ANNEREL, E.; TAERWE, L. Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 12, 2009, p. 1239–1249.
10. BRITTEZ, C. A. Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas, São Paulo, 2011, Thesis (PhD) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 252 p.
11. XING, Z.; BEAUCOUR, A.-L.; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDESERT, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 4, 2011, p. 392–402.
12. MINDEGUÍA, J.C.; PIMIENTA, P.; CARRÉ, H.; LA BORDERIE, C. On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature. European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 16, n. 2, 2012, p. 236–253.
13. Fernandes, Bruno & Gil, Augusto & Bolina, Fabricio & Tutikian, Bernardo. (2017). Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 10. 838-863. 10.1590/S1983-41952017000400004.
14. YOSHIDA, M.; OKAMURA, Y.; TASAKA, S.; SHIMODE, T. A Study On Temperature Estimation In Concrete Members After Fire. Fire Safety Science, v. 4, 1994, p. 1183–1194.
15. INGHAM, J.P. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. Materials Characterization, v. 60, n. 7, 2009, p. 700–709.
16. CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 9, 2004, p. 1633–1644.
17. BOLINA, F. L. Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado, São Leopoldo, 2016. Thesis (Master). Curso de Arquitetura, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 180p.
18. ZHANG, Q. Microstructure and deterioration mechanisms of portland cement paste at elevated temperature, Delft, 2013, Tese (PhD) - Technische Universiteit Delft, 175 p.
19. PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G.C. (Ed.), Concreto: Ciência e Tecnologia, IBRACON, São Paulo, 2011: p. 585.
20. Mehta, P. Kumar, and Paulo J. M. Monteiro. 2014. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.



21. N.R. Short, J.A. Purkiss, and S.E. Guise, “Assessment of fire damaged concrete using color image analysis”, *Construction and Building Materials* 15, 9–15 (2001).
22. M. Colombo and R. Felicetti, “New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures”, *Fire Safety J.* 42 (6–7), 461–472 (2007).
23. I. Hager, “Colour change in heated concrete”, *Fire Technology* 49, CD-ROM (2013).
24. Technical Note TN 102 - Fire Damaged Concrete – Vic Roads. <https://www.vicroads.vic.gov.au/-/media/files/technical-documents-new/technical-notes/technical-note-tn-102--fire-damaged-concrete.ashx>
25. Pimienta, P., Hager, I.: Mechanical behaviour of HPC at high temperature. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Utilisation of High Strength/High Performance Concrete*, 1291–1298, Leipzig, 16–20 June 2002 (2002)
26. Diederichs, U., Jumppanen, U.-M., Penttala, V.: *Behaviour of high strength concrete at high temperatures*, Report 92, Helsinki University of Technology, Espoo (1989)
27. Phan, L.T., Carino, N.J.: *Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures*. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Springfield (2001)



[www.thbb.org](http://www.thbb.org)

[www.thbbakademi.org](http://www.thbbakademi.org)

