

Jacek HALBINIAK, Bogdan LANGIER
Politechnika Częstochowska

OKREŚLENIE RACJONALNEJ GRANICY ZMIAN SKŁADU BETONÓW MROZOODPORNÝCH

W pracy przedstawiono analizę wpływu mikrokrzemionki i domieszki napowietrzającej na mrozoodporność, nasiąkliwość i wytrzymałość na ściskanie kompozytów betonowych. Badanie mrozoodporności wykonano dla 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń. Dla wybranych serii betonów wykonano badanie struktury porowatości stwardniałych betonów, które przeprowadzono przy użyciu urządzenia do automatycznej analizy obrazu z wykorzystaniem programu komputerowego Lucia Concrete. Wyznaczono m.in.: całkowitą zawartość powietrza w stwardniałym betonie, wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} , zawartość mikroporów A_{300} , oraz wykres rozkładu porów powietrznych. Wykonano oznaczenia konsystencji mieszanki betonowej oraz zawartości powietrza.

Słowa kluczowe: mrozoodporność, rozkład porów w betonie, domieszki i dodatki

WPROWADZENIE

W normie PN-EN 206-1 [1] wprowadzono klasy ekspozycji betonu od XF1 do XF4 ze względu na oddziaływanie mrozu na beton. Betony zakwalifikowane do klas ekspozycji XF2 do XF4 powinny być napowietrzane oraz spełniać następujące wymagania, zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania w zakresie składu mieszanki betonowej [1]

Typ zagrożenia	Klasa ekspozycji	Minimalna ilość cementu [kg/m ³]	Maksymalny stosunek W/C	Minimalna klasa wytrzymałościowa betonu
Agresja spowodowana zamrażaniem i rozmrażaniem	XF1	300	0,55	C30/37
	XF2	300	0,55	C25/30
	XF3	320	0,50	C30/37
	XF4	340	0,45	C30/37

Zgodnie z wymaganiami niemieckimi, minimalna zawartość powietrza w betonach do nawierzchni drogowych powinna wynosić: w przypadku betonów bez plastyfikatorów - 4% oraz z plastyfikatorami - 5% [2].

Według wymagań francuskich, minimalna ilość powietrza w betonach nawierzchniowych powinna wynosić 3%, a maksymalna 6% [3].

Zadaniem domieszek napowietrzających jest wytworzenie mikroskopijnych pęcherzyków powietrza o średnicy rzędu 50 μm . Pęcherzyki te rozłożone są w zaczynie cementowym i przerywają ciągłość kapilar, co prowadzi do podwyższenia odporności betonu na cykliczne zamrażanie i odmrażanie [4].

Domieszki napowietrzające powodują zmianę struktury zaczynu cementowego z mikrołuskowatej na mikroporowatą. Domieszka taka działa spieniająco, dzięki czemu tworzą się zamknięte pęcherzyki powietrza o średnicy nawet rzędu 20÷50 μm , równomiernie oddalone od siebie. W wyniku twardnienia betonu pęcherzyki ulegają mineralizacji na swojej powierzchni i stają się fazą stwardniałego betonu. Przerywają one sieć kapilar i zmniejszają podciąganie wody [5].

Wprowadzenie środka napowietrzającego do mieszanki betonowej niesie za sobą także niepożądane efekty. Prowadzi do wzrostu porowatości betonu oraz obniżenia jego wytrzymałości [6, 7].

Według Jamrożego [5], jeżeli beton zawiera mniej niż 250 kg/m^3 cementu, napowietrzenie może spowodować przyrost wytrzymałości na ściskanie. W przypadku betonów zawierających powyżej 250 kg/m^3 cementu wytrzymałość betonu obniża się i na każdy dodatkowy 1% powietrza następuje spadek o około 4%. Według Rusina [8], w betonach o współczynnikach $W/C = 0,45\div 0,72$ średni spadek wytrzymałości może wynieść nawet 5% na 1% powstałego w mieszance powietrza w wyniku jego napowietrzenia.

Napowietrzenie mieszanki betonowej nie daje jednak gwarancji uzyskania betonu w pełni odpornego na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Istotną sprawą w przypadku napowietrzania mieszanki betonowej jest sposób rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie oraz ich odległość między sobą. Duża odległość od miejsc powstawania lodu do najbliższej pustki prowadzi do wzrostu ciśnienia hydraulicznego. Niewielkie odległości między porami powietrznymi to efekt zbyt dużego napowietrzenia mieszanki betonowej, co prowadzi do dużego spadku wytrzymałości na ściskanie. Wskaźnikiem, który określa poprawne napowietrzenie mieszanki betonowej jest współczynnik przestrzennego rozmieszczenia porów w betonie \bar{L} (ang. spacing factor). Współczynnik ten określa średnią największą odległość od dowolnego miejsca w zaczynie cementowym (w betonie) do najbliższej pory powietrznej.

W normach PN-EN 206-1 oraz PN-EN480-11 nie podano wymagań w zakresie struktury porowatości stwardniałego betonu. Powszechnie uznaje się, że w celu uzyskania betonu odpornego na działanie mrozu prawidłowy rozstaw pęcherzyków powietrza powinien odpowiadać współczynnikowi: $\bar{L} \leq 0,20$ mm oraz zawartość mikroporów A_{300} o średnicy mniejszej od 300 μm (klasa 18) ma wynosić $A_{300} > 1,5\%$. Betony, które posiadają wartości: $\bar{L} \leq 0,18$ mm oraz $A_{300} > 1,8\%$, uznaje się za betony gwarantujące bardzo wysoki poziom mrozoodporności. Niektórzy autorzy uważają jednak, że ocena mrozoodporności betonów z dodatkiem popiołów lotnych na podstawie wartości \bar{L} oraz A_{300} nie znajduje zastosowania ze względu na występujące pory w ziarnach popiołu [8-11].

O jakości i trwałości betonu decyduje także prawidłowe formowanie, pielęgnacja i obróbka kompozytu betonowego [12, 13].

1. ZAKRES BADAŃ I WYNIKI OZNACZEŃ

Zaprojektowano beton kontrolny (K) na bazie kruszywa naturalnego o uziarnieniu do 16 mm i punkcie piaskowym mieszanki kruszyw PP = 36%, z cementu CEMI42,5R i stosunku W/C = 0,49. Beton kontrolny modyfikowano poprzez wprowadzenie do jego składu różnej zawartości mikrokrzemionki oraz domieszki napowietrzającej. Składy badanych serii betonów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Składy badanych serii betonów [kg/m³]

Składnik [kg/m ³]	Seria betonu						
	K	N2	N5	N8	N8M	M5	M10
Cement	394	394	394	394	394	394	394
Woda	195	195	195	191,9	191,9	195	195
Kruszywo	1780	1780	1780	1780	1747	1756	1733
Mikrokrzemionka	-	-	-	-	27,6	19,7	39,4
Domieszka napowietrzająca	-	0,8	1,97	3,15	3,15	-	-

Domieszkę napowietrzającą dozowano w ilości: 0,2% masy cementu (seria N2), 0,5% masy cementu (seria N5), 0,8% masy cementu (seria N8) oraz 0,8% masy cementu z równoczesnym dodatkiem mikrokrzemionki w ilości 7% masy cementu (seria N8M). Mikrokrzemionkę w seriach M5 oraz M10 dozowano odpowiednio w ilościach 5 i 10% w stosunku do masy cementu. W betonach serii N8 oraz N8M dokonano korekty ilości wody zarobowej ze względu na przekroczenie 3 l/m³ domieszki płynnej (napowietrzającej). W betonach z dodatkiem mikrokrzemionki dokonano korekty ilości kruszywa, polegającej na ujęciu objętości kruszywa równej objętości wprowadzonej mikrokrzemionki.

Dla wszystkich serii betonów wykonano oznaczenia: zawartości powietrza w mieszance betonowej, konsystencji, wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, nasiąkliwości oraz odporności na 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń. Dla wybranych serii betonów przeprowadzono oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.

2. WYNIKI BADAŃ MIESZANKI BETONOWEJ

Badane mieszanki betonowe mieszano w betoniarce o wymuszonym mieszanii przez 70 sekund, po czym przeprowadzono oznaczenia: konsystencji metodą opadu stożka [14] oraz zawartości powietrza metodą słupa wody [15]. Wyniki oznaczeń zestawiono w tabeli 3.

Mieszanka betonowa serii kontrolnej uzyskała opad stożka równy 62 mm oraz zawartość powietrza równą 2,5%. Dodanie domieszki napowietrzającej spowodowało wzrost ciekłości mieszanek betonowych oraz wzrost zawartości powietrza.

Odpowiednio dla serii N2, N5, N8 oraz N8M zawartość powietrza wyniosła: 3,7; 5,3; 6,7 oraz 5,0%.

Tabela 3. Wyniki badań mieszanek betonowych

Badanie	Seria betonu						
	K	N2	N5	N8	N8M	M5	M10
Opad stożka [cm]	6,2	7,0	8,9	10,2	5,1	4,2	2,0
Zawartość powietrza [%]	2,5	3,7	5,3	6,7	5,0	3,5	3,1

3. WYNIKI BADAŃ BETONÓW

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 4. Badania nasiąkliwości przeprowadzono w oparciu o normę PN-88/N-06250 [16] - tabela 4.

Tabela 4. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości

Badanie	Seria betonu						
	K	N2	N5	N8	N8M	M5	M10
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	59,7	55,2	48,0	45,0	57,1	63,6	70,0
Nasiąkliwość [%]	3,31	5,19	5,78	6,39	4,90	2,93	2,61

Beton kontrolny uzyskał średnią wytrzymałość na ściskanie równą $f_{cm} = 59,7$ MPa. Dodanie domieszki napowietrzającej spowodowało spadek wytrzymałości badanych betonów. Domieszka napowietrzająca w ilości 0,2% masy cementu spowodowała spadek średniej wytrzymałości na ściskanie o 7,5% w stosunku do betonu kontrolnego. Analogicznie dla betonów serii N5 oraz N8, w których dozowano domieszkę napowietrzającą w ilościach: 0,5 i 0,8% masy cementu spadek ten wyniósł odpowiednio: 19,6 oraz 24,6%. Oznacza to, że na każdy dodatkowo wprowadzony 1% powietrza nastąpił spadek wytrzymałości odpowiednio dla betonu N2, N5 oraz N8 o: 6,25; 7 oraz 5,9%.

Beton z dodatkiem 7% mikrokrzemionki oraz domieszką napowietrzającą w ilości 0,8% masy cementu uzyskał średnią wytrzymałość na ściskanie $f_{cm} = 57,1$ MPa, co jest wartością niższą o 7,5% w stosunku do betonu kontrolnego. Betony z dodatkiem mikrokrzemionki bez domieszki napowietrzającej uzyskały średnie wartości wytrzymałości większe odpowiednio: o 6,5% dla betonu serii M5 oraz 17,3% dla betonu M10 w stosunku do betonu kontrolnego (K).

Betony z domieszką napowietrzającą charakteryzowały się wyższymi wartościami nasiąkliwości w porównaniu do betonu kontrolnego. Beton z domieszką napowietrzającą w ilości 0,8% masy cementu (seria N8) i zawartością powietrza w mieszance betonowej na poziomie 6,7% uzyskał wartość nasiąkliwości równą 6,39%. Jest to wartość wyższa o 93% w stosunku do betonu kontrolnego. Betony z dodatkiem mikrokrzemionki uzyskały nasiąkliwość niższą od nasiąkliwości beto-

nu kontrolnego. Beton z mikrokrzemionką w ilości 10% w stosunku do masy cementu (seria M10) uzyskał nasiąkliwość mniejszą o 21% w porównaniu do betonu kontrolnego.

W normie PN-EN206-1 brak jest odniesienia do metody oznaczania odporności betonów na zamrażanie i odmrażanie. W normie PN-EN 206-1 podane jest, że w betonach zakwalifikowanych do klas ekspozycji od XF2 do XF4 należy zastosować domieszkę napowietrzającą. W obecnej chwili wszystkie betony pracujące na cykliczne zamrażanie i odmrażanie poddawane są zatem badaniu mrozoodporności wg normy PN-88/B-06250 [16]. Badane serie betonów poddano 150 cyklom zamrożeń i rozmrożeń. Wyniki badań zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Spadek wytrzymałości na ściskanie i ubytek masy po 150 cyklach mrozoodporności

Badanie	Seria betonu						
	K	N2	N5	N8	N8M	M5	M10
Spadek wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach zamrożeń i rozmrożeń	23,2	15,4	7,5	3,9	1,5	8,2	6,9
Spadek masy	1,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0

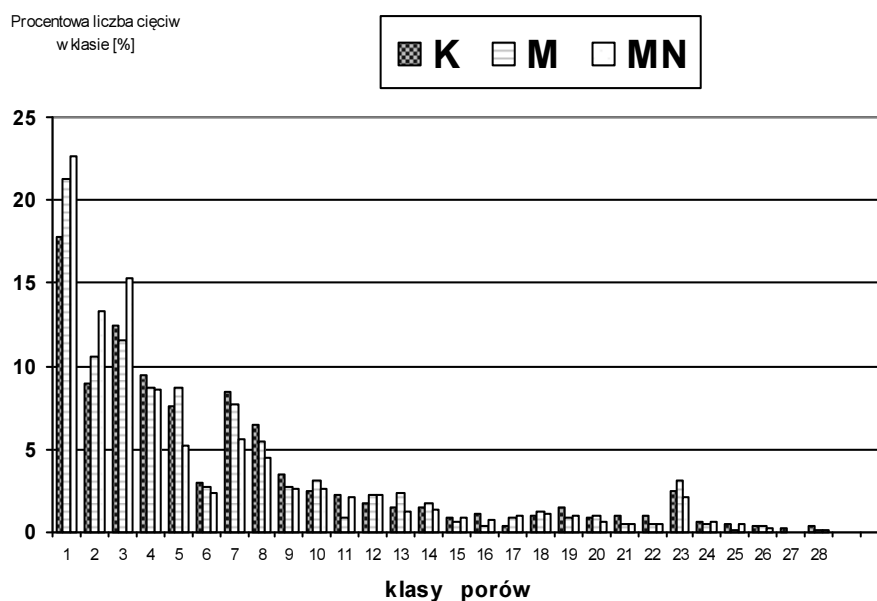
Dla betonu kontrolnego spadek wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach wyniósł 23,3%. Zgodnie z normą PN-88/B-06250 maksymalny spadek wytrzymałości nie może przekroczyć 20%. Oznacza to, że beton kontrolny nie posiadał odporności w zakresie 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń. Wszystkie pozostałe badane serie betonów wykazały odporność na 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń.

Badania charakterystyki porów powietrznych przeprowadzono dla trzech serii betonu: kontrolnego (K), z dodatkiem mikrokrzemionki w ilości 10% masy cementu (seria M) oraz z mikrokrzemionką w ilości 7% masy cementu z równoczesnym zastosowaniem domieszki napowietrzającej (seria MN). Przygotowanie próbek do badań oraz metodyka badawcza oznaczenia charakterystyki porów powietrznych w betonie zostały wykonane zgodnie z procedurą badawczą omówioną w normie PN-EN 480-11 [17]. Badanie przeprowadzono za pomocą automatycznego systemu do analizy obrazu porów powietrznych w betonie oraz programu komputerowego Lucia Concrete. Dla badanych serii betonów uzyskano następujące parametry, charakteryzujące strukturę betonów: całkowitą zawartość powietrza w betonie A, wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} zawartość mikroporów A_{300} (klasa 18), rozkład liczby cięciw w poszczególnych klasach wymiarowych porów. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 6 i na rysunku 1.

Uzyskane w badaniach wartości całkowitej zawartości porów w stwardniałym betonie (A) dość wyraźnie różnią się od zawartości powietrza w świeżych mieszankach betonowych. Największa różnica wystąpiła w betonie z domieszką napowietrzającą i mikrokrzemionką (seria MN), dla której zawartość powietrza w mieszance betonowej wyniosła 5%, natomiast całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie miała wartość ponad 2-krotnie większą, tj. $A = 10,5\%$.

Tabela 6. Wyniki badań charakterystyki porów powietrznych

Badana cecha	Seria betonu		
	K	M	MN
Całkowita zawartość powietrza w betonie A [%]	6,3	3,7	10,5
Wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} [mm]	0,3	0,3	0,2
Zawartość mikroporów A_{300} [%]	2,0	1,13	4,3



Rys. 1. Procentowy rozkład liczby cięciw w poszczególnych klasach wymiarowych porów powietrznych

Betony serii: kontrolnej (K) oraz z mikrokrzemionką (M) uzyskały wartość wskaźnika rozmieszczenia porów $\bar{L} = 0,3$ mm. Beton z domieszką napowietrzającą oraz mikrokrzemionką (MN) uzyskał wartość $\bar{L} = 0,2$ mm, co jest wartością gwarantującą dobrą odporność na działanie mrozu, co potwierdziło badanie mrozoodporności. Należy zwrócić uwagę, że beton serii M, dla którego uzyskano wartość $\bar{L} = 0,3$ mm, także posiadał dużą odporność na działanie mrozu.

Największą zawartość porów w klasie 18, a więc o rozmiarach $285 \div 300 \mu\text{m}$ uzyskał beton z domieszką napowietrzającą i mikrokrzemionką (seria MN). Wartość ta wyniosła $A_{300} = 4,3\%$, co znacznie przewyższa wartość gwarantującą dużą odporność na działanie mrozu ($A_{300} > 1,5\%$). Należy zwrócić uwagę, że beton serii kontrolnej (K) uzyskał zawartość mikroporów równą $A_{300} = 2,0\%$, niemniej nie posiadał on odporności na 150 cykli zamrożeń i rozmrożeń.

WNIOSKI

Domieszka napowietrzająca poprawia mrozoodporność betonu, zwiększa ciekłość mieszanki betonowej oraz poprawia jej urabialność. Domieszki napowietrzające powodują jednak znaczne obniżenie wytrzymałości na ściskanie, sięgające nawet 25% w porównaniu do betonu kontrolnego. Wprowadzenie dodatkowego powietrza do mieszanki betonowej powoduje także znaczne zwiększenie nasiąkliwości betonów. Oznacza to konieczność dokonywania korekty składu betonu już na etapie jego projektowania.

Dodatek mikrokrzemionki korzystnie wpływa na wszystkie parametry betonu. Zwiększa wytrzymałość na ściskanie, poprawia mrozoodporność i zmniejsza nasiąkliwość. Jedyny negatywny skutek to zwiększenie wodożądności mieszanki betonowej i tym samym pogorszenie jej ciekłości. Projektując betony mrozoodporne o dużej wytrzymałości na ściskanie oraz niskiej nasiąkliwości, konieczne jest równoczesne stosowanie domieszki napowietrzającej, mikrokrzemionki oraz superplastyfikatora. Na podstawie uzyskanych wyników badań uważa się, że betony niższych klas wytrzymałościowych (np. C30/37) o zawartości powietrza rzędu 4% nie muszą być odporne na 150 i więcej cykli zamrożeń i rozmrożeń. Postuluje się zatem wykonywanie badań mrozoodporności także dla betonów z domieszką napowietrzającą.

Prawidłowe napowietrzenie, dla którego $\bar{L} \leq 0,20$ mm oraz $A_{300} > 1,5\%$, uzyskał beton z domieszką napowietrzającą oraz pyłami krzemionkowymi. Beton ten uzyskał największą odporność na działanie mrozu. Spadek wytrzymałości na ściskanie po 150 cyklach zamrożeń i rozmrożeń wyniósł 1,5% przy zerowym ubytku masy. Beton z dodatkiem mikrokrzemionki bez środka napowietrzającego uzyskał także dobrą odporność na działanie mrozu, pomimo uzyskanej dla tego betonu zawartości mikroporów $A_{300} = 1,13\%$ oraz wskaźnika rozmieszczenia porów $\bar{L} = 0,3$ mm. Po 150 cyklach spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł 6,9%.

Projektując betony o dużej odporności na działanie mrozu, małej nasiąkliwości i dużej trwałości, konieczne jest nie tylko stosowanie domieszek napowietrzających, ale także mikrokrzemionki. Samo napowietrzenie mieszanki betonowej nie zawsze gwarantuje dostatecznie dużą odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Pyły krzemionkowe uszczelniają matrycę cementową, zmniejszają porowatość warstwy przejściowej kruszywo - zaczyn cementowy oraz rekompensują spadek wytrzymałości na ściskanie, który występuje w wyniku dodania środka napowietrzającego.

LITERATURA

- [1] PN-EN 206-1 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] ZTV Beton - StB01, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, 2001.
- [3] Chaussées en béton, Guide technique, LCPC, SETRA, 2000.
- [4] Budownictwo, technologie, architektura, Domieszki do betonu, Polski Cement, numer specjalny, Kraków 2003.
- [5] Jamróży Z., Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.

- [6] Halbiniak J., Pietrzak A., Beton napowietrzany, Drogownictwo, Miesięcznik Naukowo-Techniczny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, październik 2007.
- [7] Halbiniak J., Optymalizacja stosunku cementowo-wodnego w napowietrzanych mieszankach betonowych, [w:] Zwiększenie efektywności procesów budowlanych i przemysłowych, pod red. M. Rajczyk, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
- [8] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [9] Powers T.C., A working hypothesis for further studies of frost resistance, Journal of the American Concrete Institute 1945, 16(4).
- [10] Wawrzączak J., Molendowska A., Struktura porów, a mrozoodporność betonów napowietrzanych za pomocą mikrosfer, Cement Wapno Gips 2011, 5.
- [11] Nowak-Micha A., Identyfikacja porowatości napowietrzonych betonów z dodatkiem popiołu lotnego, Mat. konferencyjne Dni betonu, Kraków 2008.
- [12] Rajczyk J., Podstawy naukowe doboru struktury geometrycznej i kinematyki tarczowych narzędzi roboczych maszyn do obróbki powierzchni betonu, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [13] Rajczyk J., Technologia formowania konstrukcji betonowych, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2009.
- [14] PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [15] PN-EN 12350-7 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- [16] PN-88/B-06250 Beton zwykły.
- [17] PN-EN 480-11 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.

DETERMINATION OF RATIONAL BORDER OF FROST-RESISTANT CONCRETE COMPOSITION CHANGES

This paper presents the effects of addition of microsilica additives as well as frost resistance aeration and the characteristics of the studied concrete pores. The study was carried out for 150 frost cycles, freezing and thawing. The pore structure of concrete test was carried out using a device for automatic image analysis and utilization of the Lucia Concrete computer program. The set included: the total air content in hardened concrete, the pore distribution of the \bar{L} , the contents of micropores A_{300} , and a graph of the distribution of air pores. Furthermore, the following designations were made: the consistency and air content of the concrete mix, water absorption, resistance to compression.

Keywords: frost resistance. distribution of air pores, additives and admixtures