

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PRAKIS16

2020

Jere-Matias Vuorio

SEKOITUSSÄILIÖAUTON VAIKUTUS BETONIN HUOKOISUUTEEN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka

Ohjaaja Maarit Järvinen

2020 | 38+12

Jere-Matias Vuorio

SEKOITUSSÄILIÖAUTON VAIKUTUS BETONIN HUOKOISUUTEEN

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Finnsementti Oy:n tuotteiden Plussementti II/B-M (S-LL) 42,5N, Sola-parmix ja Ilma-parmix yhteisvaikutuksia betonin huokostukseen, kun valmistunutta betonimassaa seisotettiin sekoitussäiliöautossa.

Opinnäytetyötä varten valmistettiin kaksi betonimassaa kahdella eri betoniasemalla, joita seisotettiin sekoitussäiliöautossa. Betonimassoista mitattiin lämpötila, tiheys, ilmamäärä, painuma. Betonimassoille tehtiin näiden lisäksi huokosjakoanalyysi AVA-laitteella. Betonimassoista mitattiin arvot 30-, 60-, ja 90 minuutin kohdalla.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin selville pitkittyneen seisottamisen negatiivinen vaikutus tutkittavien betonimassojen suojahuokosten muodostumiselle. Pitkittänyt seisotus vähensi suojahuokosten kokonaispinta-alaa ja nosti huokosjakoa.

Tulosten pohjalta esitettiin jatkotutkimusten aloittamista. Opinnäytetyötä ehdotettiin käyttämään jatkotutkimuksen pohjana selvittämään mitkä Finnsementti Oy:n tuotteet toimivat parhaiten lyhyillä sekoitusajoilla ja mitkä tuotteet kestävät parhaiten pitempiä seisotusaikoja.

ASIASANAT:

betoni, sementti, sekoitus, huokostus, notkistin, huokoistin, sekoitussäiliöauto

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering

Supervisor Maarit Järvinen

2020 | 38+12

Jere-Matias Vuorio

THE EFFECT OF MIXING IN MIXER-TRUCK ON CONCRETE POROSITY

The purpose of the thesis was to study the Finnsementti Ltd. product's Plussementti II/B-M (S-LL) 42,5N, Sola-parmix and Ilma-parmix interaction together, when mixing air-entrained concrete effects of stagnation in a mixer-truck.

Two concrete masses were produced at two different concrete stations and stagnated in mixer-trucks. From these masses the following measurements were taken: temperature, density, air volume and depression. In addition to these measurements, the masses were subjected to air void analysis with an AVA-device. Measurements were taken at 30, 60 and 90 minutes after mixing.

As a result of the thesis, a negative effect of prolonged stagnation on the formation of protective pores was discovered. Prolonged stagnation reduced the total surface area of the protective pores and increased the pore distribution.

Based on the results it was suggested that further research is needed. This thesis was proposed to be a basis for the next research which would study Finnsementti Oy products that would work best for shorter mixing times and be the most resistant to longer stagnation times.

KEYWORDS:

concrete, cement, mixing, air-entraining, superplasticier, air-entraining admixtures, mixer-truck

SISÄLTÖ

| | |
|---|-----------|
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 BETONI | 8 |
| 2.1 Betonin komponentit | 8 |
| 2.2 Kiviaines ja rakeisuus | 9 |
| 2.3 Sementti | 10 |
| 2.4 Vesi | 11 |
| 2.5 Lisäaineet | 12 |
| 2.5.1 Notkistimet | 12 |
| 2.5.2 Huokostimet | 13 |
| 2.6 Seosaineet | 14 |
| 2.6.1 Lentotuhka | 15 |
| 2.6.2 Masuunikuona | 15 |
| 2.6.3 Silika | 15 |
| 2.7 Betonin ominaisuudet | 16 |
| 2.7.1 Betonin rasitusluokat ja P-luku | 16 |
| 2.7.2 Notkeus | 18 |
| 2.7.3 Huokosrakenne | 18 |
| 2.7.4 Pakkasenkestävyys ja mittaus | 19 |
| 2.8 Sekoitus | 22 |
| 2.8.1 Vapaapudotussekoitin | 23 |
| 2.8.2 Tasosekoitin | 23 |
| 2.8.3 Pakkosekoitin | 23 |
| 2.8.4 Sekoitussäiliöauto | 23 |
| 3 TUTKIMUS | 24 |
| 3.1 Tutkimus- ja mittausmenetelmät | 24 |
| 3.1.1 Ilmamääränmittaus | 25 |
| 3.1.2 Notkeuden määrittäminen painumakokeella | 26 |
| 3.1.3 Huokosanalyysi AVA-laitteilla | 26 |
| 3.1.4 Lämmön ja tiheyden määrittäminen | 28 |
| 3.2 Tulokset | 28 |
| 3.2.1 Ilmamäärä | 28 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 3.2.2 Painuma | 29 |
| 3.2.3 Lämpötila | 30 |
| 3.2.4 Tiheys | 30 |
| 3.2.5 AVA-tulokset | 31 |
| 3.3 Testit koulun laboratoriossa | 32 |

4 JOHTOPÄÄTÖKSET **35**

LÄHTEET **38**

LIITTEET

Liite 1. AVA-tulokset.

KUVAT

| | |
|--------------------------------------|----|
| Kuva 1. Suojahuokosen toiminta. | 20 |
| Kuva 2. Ilmamäärämittari. | 25 |
| Kuva 3. Painumalierio. | 26 |
| Kuva 4. Näytteenotto AVA-laitteelle. | 27 |
| Kuva 5. AVA-laite. | 27 |

TAULUKOT

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Sementtien koostumusvaatimukset. | 11 |
| Taulukko 2. Veden kloridipitoisuudet. | 12 |
| Taulukko 3. Notkistavien lisäaineiden annostukset ja veden vähennys. | 13 |
| Taulukko 4. P-luvun huokosjako vaatimukset. | 17 |
| Taulukko 5. Notkeusluokat. | 18 |
| Taulukko 6. Pakkasenkestävyyden vaatimukset 50 v. | 21 |
| Taulukko 7. Pakkasenkestävyyden vaatimukset 100 v. | 21 |
| Taulukko 8. Ilmamäärät. | 28 |
| Taulukko 9. Painumat. | 29 |
| Taulukko 10. Lämpötilat. | 30 |
| Taulukko 11. Tiheydet. | 30 |
| Taulukko 12. AVA-mittaukset. | 31 |
| Taulukko 13. Tulokset koulu massa 1 _k , Turku AMK. | 33 |
| Taulukko 14. Tulokset koulu massa 2 _k , Turku AMK. | 34 |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Finnsementti Oy. Suomen suurin sementin valmistaja on Finnsementti Oy. Yritys on osa kansainvälistä CRH-konsernia, joka on yksi suurimmista rakennusmateriaalien toimittajista maailmassa.

Opinnäytetyö sai alkunsa Finnsementti Oy:n tarpeesta tutkia betonin huokoisuuden eli suojahuokosten muodostumista, kun betonimassan sekoittaminen pitkittyy. Opinnäytetyö keskittyy etenkin suojahuokosten muodostukseen, kun käytetään yhdessä Finnsementti Oy:n tuotteita Plussementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5N:ää, Sola-parmix-notkistinta ja Ilma-parmix-huokostinta.

Syynä tähän tutkimukseen olivat betonien lujuusongelmat, jotka johtuvat huokostuksen epäonnistumisesta. Liikenneviraston tekemissä pistokokeissa on löydetty lujuuden puutteita vuonna 2011–2016 rakennetuista silloista, kuten vuonna 2011 rakennetussa Kehä 3:n sillassa Vantaan Länsisalmessa, Tampereella autovarikon sillassa, vuonna 2015 rakennetuissa silloissa Seinäjoen Takamäen risteyssillassa, Rovaniemen Veitikan risteyssillassa, vuonna 2016 rakennetussa Oulun Niemenrannan alikulkusillassa ja Hiukkavaarassa olevassa alikulkusillassa.

Näiden lisäksi betoniongelmista julkisuuteen ovat nousseet vuonna 2016 rakennettu Kemijärven Kallaanvaarassa oleva rautatiesilta, joka purettiin kokonaan sillan lujuuden riittämättömyyden takia, ja vuonna 2016 marraskuussa havaittu Turun yliopistollisen keskussairaalan T3-sairaalan perustusten lujuudenpuutteet. Yhtenä syynä betonin lujuusongelmassa on epäilty liian suurta huokoisuutta. Suuren huokosmäärän aiheuttajana on todennäköisesti pitkä sekoitusaika.

Mainitut ongelmat eivät koskeneet tutkittavia Finnsementin tuotteita. Tutkimuksella haluttiin varmistaa yrityksen betonituotteiden varma toimivuus.

Tässä työssä betonimassoja käytiin valmistamassa kahdella betoniasemalla. Betonimassoja sekoitettiin asemien sekoittimissa, jonka jälkeen massat siirrettiin sekoitussäiliöautoihin. Näin pyrittiin simuloimaan mahdollisimman tarkasti myös kuljetuksen aiheuttamat mahdolliset haittavaikutukset. Massoista otettiin näytteitä sekoituksen eri aikoina ja näytteistä suoritettiin testejä massan ominaisuuksien selvittämiseksi. Lisäksi vastaavia betonimassoja pyrittiin valmistamaan ja testaamaan Turun ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, vaikuttaako tutkittavan betonin sekoitus ja seisottaminen sekoitussäiliöautossa betonin huokosrakenteeseen ja suojahuokosten muodostumiseen.

2 BETONI

Betoni on ihmisen kehittämä seoskivi. Betoni koostuu nykyisin viidestä pääraaka-aineesta. Nämä ovat kiviaines eli runkoaine, sementti, seosaineet, lisäaineet ja vesi. Betonia on käytetty rakennusaineena jo muinaisina aikoina. Esimerkiksi pyramidien sideaine oli alkukantainen sementtimassa, jossa käytettiin poltettua kipsiä. Myöhemmin antiikin kreikkalaiset lisäsivät poltettuun kalkkiin vulkaanista tuhkaa, joka aiheutti hydraulisen reaktion ja kovettui reagoimalla veden kanssa. (By 201, 18.)

Yksi kuuluisimmista säilyneistä antiikin ajan betonirakennelmista on Pantheonin temppli. Tosin alkuperäinen temppli tuhoutui täysin vuonna 27 eKr., mutta se rakennettiin uudestaan vuosien 120–124 jKr. aikana. Tempplin kupoli on maailman suurin raudoittamaton betonikupoli. (By 201, 18.)

Rooman valtakunnan rappingon myötä betonitekniikan osaaminen jäi unholaan. Betonirakentaminen heräsi uudestaan eloon vuonna 1824, kun englantilainen muurari Joseph Aspdin kuumensi keittiössään jauhettua kalkkikiveä ja saven sekoitusta keskenään. Aspdin havaitsi seoksen kovettuvan reagoidessa veden kanssa, hän patentoi keksintönsä ja antoi tuotteelle nimeksi portlandsementti. Nykyisen kaltaisen portlandsementin keksijänä pidetään Isaac Johnsonia, joka vahingossa poltti Aspdinin sementtiä liian korkeassa lämpötilassa. (By 201, 18–19.)

Suomeen moderni sementti rantautui tuontitavarana jo vuonna 1856 ja ensimmäisen kotimaisen sementin valmistus aloitettiin vuonna 1869. Tosin kysyntää ei sementille tuolloin ollut vielä riittävästi, joten tuotanto lopetettiin vuonna 1894. Tämän jälkeen Paraisten Kalkkivuori Oy aloitti sementin tuottamisen vuonna 1914, ja sitä voidaan pitää ensimmäisenä onnistuneena yrityksenä valmistaa kaupallisesti sementtiä Suomessa. (By 201, 19.)

2.1 Betonin komponentit

Moderni betoni koostuu viidestä pääraaka-aineesta: kiviaineksesta, sementistä, seosaineista, lisäaineista ja vedestä. Näiden ainesosien sekoitussuhteet määrittävät betonin ominaisuudet. (By 201, 24.)

2.2 Kiviaines ja rakeisuus

Kiviainesta on betonimassassa eniten kaikista osa-aineista. Kiviainesta on noin 65–80 % betonimassan tilavuudesta. Kiviaineena voidaan käyttää mitä tahansa luonnonkiveä, kunhan se on riittävän tiivistä, lujaa ja rakeista materiaalia eikä vaikuta sementin reaktioihin tai raudoituksen ominaisuuksiin. Kiviaineena voidaan myös käyttää keinotekoisia kiviaineita, kuten kevytsoraa, masuunikuonaa, lentotuhkaa, tiilimurskaa tai vanhaa betonimurskaa. (By 201, 43; By 43, 24–33.)

Suomessa käytetään yleisesti graniittipohjaista luonnonkiviainesta. Betonimurskeen käyttö on myös viime vuosina lisääntynyt, mikä johtuu muuttuneesta kestävästä kehityksen ajattelutavasta. (By 201, 43.)

Kiviaineen tulee olla puhdasta eli kiviaines ei saa sisältää epäpuhtauksia, kuten roskaa, savea, öljyä tai muita jätteitä, jotka vaikuttaisivat tuoreen- ja kovettuneen betonin tai raudoituksen ominaisuuksiin. Kiviaineessa ei saa myöskään esiintyä lunta tai jäätä. Mikäli kiviaines tulee sellaiselta alueelta, jossa tiedetään maaperän taustasäteilyn olevan normaalia suurempi, on kiviaineesta mitattava radioaktiivisuus. Suomessa talonrakennuselementeissä käytettävä kiviaines on mitattava. (By 201, 44–45. By 43, 29–31.)

Keinotekoisien kiviainesten tulee täyttää luonnonkiviaineksen vaatimukset, mutta niille voidaan asettaa lisävaatimuksia tai vaatimusluokat voivat olla erilaisia. Mikäli käytettävä betonimurske ei ole jaettu lajikkeisiin, saa mursketta olla viisi prosenttia kiviaineksen kokonaismassasta. Kun mursketta on yli viisi prosenttia, katsotaan murskeen olevan kierätyskiviainesta. (By 43, 32–33.)

Rakeisuudella tarkoitetaan kiviaineksen kivien kokoa, jakaumaa ja painosuhdetta. Rakeisuus määritetään seulonnan avulla. Tämä tarkoittaa kiviaineksen läpäisyä erikokoisista seulontaritilöistä. Seulontasarjaan kuuluvat koot 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, ja 63 mm. (By 201, 45.)

Rakeisuuden tulisi olla betonimassassa mahdollisimman tasaisesti jakautunutta, koska näin sementin käyttömäärä vähenee ja betonin huokostus helpottuu. Mikäli betonimassassa käytettäisiin vain suuria raekokoja, sementtiliimalle jäisi vain vähän pinta-alaa liimattavaksi ja rakeiden väliin jäisi paljon tyhjää tilaa täytettäväksi sementtiliimalla. Kun taas pienellä rakeisuudella liimattava pinta-ala olisi suuri, vaikka rakeiden välissä ei olisi

paljoo tyhjää tilaa. Kivilaadun tulee olla mahdollisimman tiivis seos, jossa on yhteen laskettu pinta-ala mahdollisimman pieni. (By 205, 19.)

Mikäli käytettävässä kiviaineksessa hienoaineisuus on suuri, vaikeutuu betonin huokostus, koska ilmasta tulee epästabiliia, jolloin suojahuokokset alkavat yhdistyä. Kiviaineksen rakeiden muoto vaikuttaa myös siihen, miten ilmaa muodostuu betonimassaan. Murskatun kiviaineksen kanssa huokostus on vaikeampaa ja vaatii suurempaa annostelua huokoistimen määrässä. Käytettäessä luonnonkiviaineksia huokostaminen helpottuu. (Tepponen, 11; By 201, 49; By 43, 18–19.)

2.3 Sementti

Sementti on hydraulinen sideaine. Sementti alkaa reagoida betonimassassa veden kanssa alkuvaiheessa ja muodostaa liimamaisen tuotteen, josta käytetään nimitystä sementtiliima. Sementin reaktiota veden kanssa kutsutaan hydrataatioreaktioksi. Reaktio on kemiallinen, jossa sementtiliima kovettuu sementtikiveksi. Reaktion seurauksena vapautuu lämpöä, mutta reaktio tarvitsee yli 0 °C:n lämpötilan pysyäksään aktiivisena. Reaktion nopeus riippuu mm. käytettävästä sementtilaadusta, betonimassan lämpötilasta, käytettävistä seos- ja lisäaineista. Syntyvän sementtikiven tarkoitus betonimassassa on ympäröidä muut raaka-aineet täyttäen tyhjät välit ja liimaten nämä toisiinsa kiinni. (By 205, 10,12.)

Sementin pääraaka-aine on kalkkikivi. Kalkkikivi sisältää pääosin kalsiumkarbonaattia, muut osa-aineet sementissä ovat piidioksidi, rautaoksidi ja alumiinioksidi. (By 201, 24.)

Suomessa käytetään sementin valmistukseen kuivamenetelmää. Kiviaineet murskataan hienoksi jauheeksi, jonka jälkeen jauhe esilämmitetään ja syötetään kiertouunin, missä tapahtuu sementtiklinkkerin poltto. Uunissa kalsiumkarbonaatti hajoaa 900 °C:n lämmössä kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Uunin lämmön noustessa 1450 °C:seen kalsiumoksidi reagoi pii-, rauta- ja alumiinioksidin kanssa muodostaen sementtiklinkkerin. Syntyneessä klinkkerissä päämineraaleina ovat aliitti, beliitti, aluminaatti ja ferriitti. Näiden neljän mineraalin suhdetta sekoittamalla vaikutetaan sementin ominaisuuksiin. (By 201, 25.)

Suomessa sementtien tulee olla CE-merkittyjä ja täyttää sementtistandardin SFS-EN 197-1 vaatimukset. Yleisesti sementin valmistukseen käytetään portlandklinkkeriä ja seosaineita. Standardissa on ryhmitelty sementit viiteen pääluokkaan:

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonasementti
- CEMIV Pozzolaaniseimentti
- CEM V Seossementti.

Pääluokat on edelleen jaettu yhteensä 27 erilaiseen sementtilajiin riippuen seosaineen ja seosaineiden määrien perusteella (taulukko 1). (By 201, 29.)

Taulukko 1. Sementtien koostumusvaatimukset.

| Sementtilaji | Koostumusvaatimukset (%) | | | | | |
|--------------|--------------------------|---------|--------|------------|------------|-------|
| | Klinkkeri | Kuona | Silika | Lentotuhka | Kalkkikivi | Muut |
| CEM I | 95...100 | - | - | - | - | 0...5 |
| CEM II/A-S | 80...94 | 6...20 | - | - | - | 0...5 |
| CEM II/B-S | 65...79 | 21...35 | - | - | - | 0...5 |
| CEM II/A-D | 90...94 | - | 6...10 | - | - | 0...5 |
| CEM II/A-V | 80...94 | - | - | 6...20 | - | 0...5 |
| CEM II/B-V | 65...79 | - | - | 21...35 | - | 0...5 |
| CEM II/A-LL | 80...94 | - | - | - | 6...20 | 0...5 |
| CEM II/A-M | 80...88 | 12...20 | | | | 0...5 |
| CEM II/B-M | 65...79 | 21...35 | | | | 0...5 |
| CEM III/A | 35...64 | 36...65 | - | - | - | 0...5 |
| CEM III/B | 20...34 | 66...80 | - | - | - | 0...5 |

2.4 Vesi

Vesijohtoverkosta otettu vesi tai muu juomakelpoinen vesi kelpaa yleensä betonin valmistukseen. Betonin valmistukseen ei sovi teollisuuden ja asumajätteiden saastuttamat vedet tai humuspitoiset vedet kuten suovesi. Vesi ei saa sisältää leviä tai muita pieneliöitä, eikä vesi saa sisältää öljyjä tai rasvoja. Lisäksi betonimassaan ei saa sekoittua so-

keria, sillä jo 0,1 % sokerimäärä vedessä estää betonin kovettumisen. Betonin valmistuksessa suurin sallittu kloridimäärä on 0,1 %-1 % käytetyn sementin painosta. (By 201, 59–60.)

Taulukko 2. Veden kloridipitoisuudet.

| Loppukäyttö | Suurin kloridipitoisuus (mg/l) |
|--|--------------------------------|
| Jännitetty betoni tai injektiolaasti | 500 |
| Raudoitettu tai metalliosia sisältävä betoni | 1000 |
| Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni | 4500 |

Jälkihoitovesi ei saa ylittää taulukossa esitettäviä kloridipitoisuuksia (taulukko 2).

2.5 Lisäaineet

Lisäaineita käyttämällä voidaan säädellä betonimassan ominaisuuksia, sitoutumista, kovettumista ja ominaisuuksia kovettuneena. Lisäaineet vaikuttavat betonimassaan fyysikaalisesti tai kemiallisesti. Lisäaineita käytetään muihin osa-aineisiin nähden huomattavasti pienempiä määriä. (By 201, 60.)

2.5.1 Notkistimet

Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka toimivat sementin ja veden välillä parantaen betonimassan työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä. Notkistavien lisäaineiden avulla voidaan alentaa veden ja sementin määriä betonimassassa. Tämä mahdollistaa korkealujuusbetonimassojen valmistuksen. (By 201, 62.)

Notkistavat lisäaineet jaetaan kahteen ryhmään niiden tehokkuuden perusteella. Normaali tehoinen notkistin vähentää veden tarvetta 5–15 %, tehonotkistimilla veden tarve vähenee 12–30 %. Tehonotkistimia voidaan käyttää, myös työstettävyyden parantamiseen. Normaalikäytössä betonin valmistajat hyödyntävät molempia tehonotkistimen ominaisuuksia. (By 201, 62.)

Notkistavat lisäaineet ovat yleisesti ligosulfonaatti-, melamiini-, polykarboksylaatti-, ja naftaleenipohjaisia. Modernin betonin valmistuksessa polykarboksylaattipohjaiset tehonotkistimet ovat lähes kokonaan syrjäyttäneet muut vanhat notkistimet. (By 201, 62.)

Yleisesti notkistavien lisäaineiden annostus on noin 0,3–1,0 % sideaineen kokonaismäärästä (taulukko 3). Käytettävästä notkistimesta on kuitenkin tarkistettava valmistajan annostelu suositus. (By 201, 63.)

Taulukko 3. Notkistavien lisäaineiden annostukset ja veden vähennys.

| Aineen koostumus | Tyypillinen annostus (sideaineen määrästä) | Veden vähennys korkeimmillaan |
|-----------------------|--|-------------------------------|
| Lignosulfonaatti | 0,2–0,6 % | 10 % |
| Melamiini | 1–3 % | 25 % |
| Polykarboksyyliesteri | 0,3–1,0 % | 40 % |

2.5.2 Huokostimet

Betonissa on normaalisti ilmaa noin 1–2 prosenttia. Tiiviissä tai korkealujuusbetonissa ilmaa voi olla alle prosentti. Kun betonin pakkasenkestävyyttä halutaan parantaa pitää betonimassa huokostaa. Huokostaminen nostaa betonimassan ilmamäärän haluttuun neljästä kahdeksaan prosenttiin. Huokostimen toiminta perustuu sen molekyylien toimintaan. Näillä molekyyleilla on hydrofiilisiä eli vesihakuisia ja hydrofobisia eli vettähylläviä molekyyliiryhmiä. Näiden molekyyliiryhmien yhteisvaikutus muodostaa keinotekoisia ilmahuokosia, joiden tarkoitus on ottaa vastaan jäätyessä veden aiheuttama paine mikä estää betoni rikkoutumisen. (By 201, 63; Tepponen, 4.)

Huokostimien annostukset ovat vain 0,01–0,03 prosenttia sementin kokonaismäärästä ja kuten notkistimien annostuksessa on valmistajalta tarkistettava suositeltava annostus. Huokostimen määrä kuitenkin lisääntyy mitä hienojakoisempaa sementti on. Huokostimen määrään vaikuttaa myös käytetty sementtilaatu. Mahdollisesti runkoaineena tai sementtiin lisätyt seosaineet vaikuttavat myös huokostimen annosteluun ja toimintaan. (By 201, 63–64.)

Huokostimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään, vinsolhartsipohjaisiin ja tensideihin. Vinsolhartsipohjaiset huokostimet valmistetaan kemiallisesti ja synteettisesti kantopihkasta. Tensidit valmistetaan täysin käyttämällä kemiallisia aineita. (Tepponen, 9.)

Huokostimet parantavat betonimassan muokattavuutta, notkeutta, koossapysyvyyttä ja vähentävät osa-aineiden erottumista. Huokostus lisää betonin kuljetuskestävyyttä, mutta alentaa betonin lujuusarvoja. Betonitekniikan oppikirjan arvion mukaan yhden prosentin ilmamäärän lisäys aiheuttaa viiden prosentin lujuuden heikkenemisen.

Huokostuksen onnistumista on vaikea varmistaa, koska tuoreen betonimassan ilmapiitoisuusmittaus ei paljasta, miten huokokset ovat jakautuneet massaan tai minkä kokoisia suojahuokokset ovat. Varsinkin notkistimien ja huokostimien yhteiskäyttö voi estää huokosten synnyn. Huokostimien kanssa on suositeltavaa käyttää melamiinipohjaisia notkistimia. Nykyään käytetyt polykarboksylaattipohjaisten notkistimien käyttö vaikeuttaa huokostuksen onnistumista, koska notkistimeen lisätään valmistuksen aikana vaahdonestoainetta, minkä kemiallinen funktio on rikkoa syntyneitä ilmakuplia.

Betonimassan sekoitusjärjestys vaikuttaa myös huokostuksen onnistumiseen. Yleissääntönä on, että huokostin sekoitetaan betonimassaan sekoituksen alussa, jonka jälkeen noin minuutin kuluttua massa sekoitetaan notkistin. Muita huokostukseen vaikuttavia tekijöitä ovat sekoittimen laatu, teho ja sekoitusaika, sementtityyppi, lämpötila, vesimäärä, hienoainepitoisuus, kiviaineksen laatu, betonin seisonta-aika ja tiivistystapa. (By 201, 63–64; Tepponen, 6, 9.)

2.6 Seosaineet

Betonin side- ja runkoaineina voidaan käyttää myös mineraalisia seosaineita kuten lentotuhkaa, masuunikuonaa, ferrokromikuonaa ja silikaa. Suomessa käytetään näistä aineista lentotuhkaa, masuunikuonaa ja silikaa. Seosaineita käytetään pienentämään sideainekustannuksia, parantamaan ympäristöystävällisyyttä sekä lisäämään betonille uusia ominaisuuksia.

Seosaineiden käytöllä vähennetään tarvittavan sementin määrää. Näin betonista tulee ympäristöystävällisempää, koska sementin valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt pienenevät. Seosaineiden käyttöä ja määriä ohjaa betonimassan rasitusluokka ja käytettävä rakennussementti. (By 201, 58)

2.6.1 Lentotuhka

Lentotuhka on jauhetun kivihiilen poltossa syntyvä sivutuote eli pozzolaani. Lentotuhkan käyttö runkoaineena parantaa betonimassan työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä. Lentotuhka heikentää betonin varhaislujuutta mutta parantaa myöhäislujuuksia. Lentotuhkan käyttö sementin korvikkeena aiheuttaa betonimassan hydratoitumislämmön pienene- mistä. (By 201, 56)

Lentotuhkan käytössä syntyvät ongelmat ovat aineen tasalaatuisuudessa, mikä vaikeut- taa tasalaatuisen betonimassan valmistamista. Lentotuhkan sisältämä hiili myös vaikeut- taa betonin huokostumista. (By 201, 56)

2.6.2 Masuunikuona

Masuunikuona on raakaraudan valmistuksessa syntyvä sivutuote. Masuunikuonan omi- naisuudet riippuvat sulan kuonan jäähdystavasta. Yleisin jäähdystapa on nopea jääh- dytys vedellä eli granulointi, näin kuonalle muodostuu sementin kaltaisia ominaisuuksia.

Masuunikuonan käyttö notkistaa, alentaa hydratoitumislämpöä, alentaa varhaislujuuksia ja nostaa myöhäislujuuksia. Masuunikuona myös tekee betonimassan sulfaatinkestä- väksi, mikäli kuonaa on 70 % sideaineen määrästä. Masuunikuonan käyttö lisää betonin virumaa eli rasituksessa tapahtuvaa muodonmuutosta. (By 201, 57)

2.6.3 Silika

Silika on piin ja ferropiin valmistuksessa syntyvän SiO_2 -kaasun kiinteä muoto. Silika lisää betonimassan lujuutta huomattavasti ja parantaa massan kemiallista kestävyyttä, koos- sapysyvyyttä, tiiveyttä ja vedenpitävyyttä. Silika vähentää betonimassan työstettävyyttä ja lisää betonimassan vedentarvetta. (By 201, 57–58)

2.7 Betonin ominaisuudet

Betonin ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen luokkaan: betonimassan ominaisuudet, alle vuorokauden ikäisen sitoutumisvaiheessa ja varhaisessa kovettumisvaiheessa olevan betonin ominaisuudet ja kovettuneen yli vuorokauden ikäisen betonin ominaisuudet. (By 67, 9,12,20.)

Betonimassan perusominaisuudet ovat seuraavat:

- notkeus
- maksimiraekoko
- ilmamäärä
- lämpötila
- muokattavuus (tiivistyvyys ja koossapysyvyys)
- tilavuuden muutokset, kutistuminen.

Betonimassassa alkaa heti sekoituksen jälkeen sementin ja veden kemialliset reaktiot eli hydrataatioreaktio. Betoni alkaa saavuttaa lujuutta jo muutaman tunnin sisällä sekoituksen lopettamisesta. Alle vuorokauden ikäisen sitoutumisvaiheessa ja varhaisessa kovettumisvaiheessa olevan betonin ilmiöt ovat seuraavat:

- työstettävyyden menetys
- plastinen painuma
- plastinen kutistuma
- tilavuuden muutokset > kemialliset reaktiot
- tilavuuden muutokset > vedenhaihtuminen ja poistuminen
- tilavuuden muutokset > lämpötila muutokset.

Kovettuneen betonin tärkeimmät ominaisuudet ovat lujuus ja säilyvyys rasituksia vastaan. Kovettuneella betonilla on myös muodonmuutosominaisuuksia kuten kuivumiskutistuminen, kimmoinen muodonmuutos, viruminen ja tiiviys. (By 67, 9,12,20.)

2.7.1 Betonin rasitusluokat ja P-luku

Betonin rasitusluokan määrää suunnittelija. Suunnittelija määrää myös betonin tavoitteellisen käyttöiän. Yleisesti käytössä olevat käyttöiät ovat 50 vuotta ja 100 vuotta.

Suunnittelija valitsee rasisitusluokat ympäristöolosuhteiden perusteella. Rasisitusluokkia on yhteensä 18 luokkaa. Mikäli ympäristöolosuhteet vaativat, voi betonilla olla useampia rasisitusluokkia. (By 65, 15–19.)

Huokostuksen kannalta oleelliset rasisitusluokat ovat:

- XF1 jäätymis-sulamisrasitus; betoni on kohtalaisesti kyllästynyt vedellä ilman jäänsulatusaineita, kuten sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat, julkisivut, sokkelit ja suolaamattomien teiden siltojen osat.
- XF2 jäätymis-sulamisrasitus; betoni on kohtalaisesti kyllästynyt vedellä ja jäänsulatusaineilla, kuten sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman kuljettamalle jäänsulatusaineille, meluseinät, sokkelit tien vieressä ja suolattavien teiden siltojen osat.
- XF3 jäätymis-sulamisrasitus; betoni on suuresti kyllästynyt vedellä ilman jäänsulatusaineita, sama kuten XF1.
- XF4 jäätymis-sulamisrasitus; betoni on suuresti kyllästynyt vedellä ja jäänsulatusaineilla tai merivedellä, sama kuten XF2 lisäksi meressä olevan sillan suojaamattomat rakenteet tasolta NW-1 ylöspäin.

Näiden lisäksi Suomessa on käytössä pakkasenkestävyyslukumenettely. P-lukumenettely perustuu useiden vuosikymmenien aikana tehtyjen laboratorio- ja kenttäkokeiden antamiin pakkasenkestävyyskokeiden tuloksiin. Ennen P-luvun määrittämistä betonimassalle suoritetaan ennakkokokeita, joissa tutkitaan betonin puristuslujuus, tiheys, ilmamäärä ja ne tekijät, joiden avulla pakkasenkestävyys lasketaan.

Jos ennakkokoe tehdään määrittämällä betonista huokosjako, tulee tuloksen täyttää taulukossa esitetyt vaatimukset (taulukko 4).

Taulukko 4. P-luvun huokosjako vaatimukset.

| Vesi-sementtisuhde | Huokosjakovaatimus eri P-lukutasoille (mm) | |
|--------------------|--|--------|
| | P < 50 | P ≥ 50 |
| > 0,40 | ≤ 0,25 | ≤ 0,23 |
| ≤ 0,40 | ≤ 0,30 | ≤ 0,27 |

P-luku voidaan määrittää ennakkokokeiden tuloksien, suhteitustietojen, jälkihoidon ja työmaalla mitattujen ilmamäärien perusteella. P-luku voidaan myös määrittää 56 kierroksen pakkasuolakokeen, suhteitustietojen ja ennakkokokeiden tuloksien avulla.

2.7.2 Notkeus

Notkeus tarkoittaa betonimassan plastisuutta eli kuinka helposti työstettävää massa on. Betonimassojen notkeuden määrittelevät raudoituksen tiheys, betonointimenetelmät varsinkin yleisesti käytössä oleva pumppausmenetelmä ja miten betonimassaa pystytään tiivistämään. Notkeutta voidaan säädellä muuttamalla sementin ja veden määrää, mutta yleisesti muutokset saadaan aikaan notkistavilla lisäaineilla, jolloin betonimassan vesi-sementtisuhte ei muutu. (By 201, 70; By 205, 27.)

Betonimassan notkeus voidaan mitata joko painumakokeella, leviämäkokeella tai muodonmuutosaikakokeella eli VB-kokeella. (By 205, 29.)

Yleisesti käytettyjä luokkia ovat nestemäinen S4 tai vetelä S3 (taulukko 5). (By 201, 70.)

Taulukko 5. Notkeusluokat.

| Notkeusluokka | Notkeuden likimääräiset raja-arvot | |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| | Painuma kartiokokeella (mm) | VB-koe muodonmuutosaika (s) |
| Nestemäinen S5 | ≥220 | - |
| Nestemäinen S4 | 210–160 | - |
| Vetelä S3 | 150–100 | 1–2 |
| Notkea S2 | 90–50 | 2–3 |
| Plastinen S1 | 40–10 | 3–5 |
| Jäykkä | 10–0 | 5–10 |
| Hyvin jäykkä | - | 10–20 |
| Maakostea | - | 20–40 |
| Puristustärytettävä | - | >40 |

2.7.3 Huokosrakenne

Betoni ei ole yhtenäinen tiivis massa vaan sisältää myös paljon erikokoisia onteloita. Näitä onteloita kutsutaan huokosiksi. Huokokset jaetaan viiteen ryhmään koon mukaan.

Pienimmät huokosrakenteet betonimassassa ovat geelihuokokset. Huokosia täyttää yleensä vesi, joka edes Suomen suhteellisen ankarissa olosuhteissa ei pääse jäätymään, joten näitä huokoisia ei yleensä oteta huomioon betonin suunnittelussa. (By 201, 81.)

Seuraavan huokosrakenteen muodostavat kapillaarihuokokset. Huokosia muodostuu, koska betonin työstettävyys yleisesti määrää vesi-sementtisuhteeksi yli 0,4 suuremman vesimäärän käytön. Tämän takia sementtikivien väliin jää suhteessa suuria vesitäytteisiä tiloja. Kapillaarihuokokset ovat haitallisia betonille, koska niiden kautta pääsee imeytymään haitallisia aineita betonirakenteisiin kuten suoloja. Kapillaarihuokosia ei muodostu, mikäli vesi-sementtisuhte on alle 0,4 täysin hydratoituneesta betonista. Mikäli vesi-sementtisuhte on alle 0,6 täysin hydratoituneesta betonista kapillaarihuokokset eivät ole jatkuvia, mikä estää kapillaarisen liikkeen betonissa. Nämä arvot ovat kuitenkin todellisuudessa pienempiä, sillä betoni ei koskaan saavuta täydellistä hydratoitumista. (By 201, 81–84.)

Kolmannen huokosrakenteen muodostavat suojahuokokset, joiden tarkoitus on ottaa vastaan jäätyessään veden muodostama paine. Huokosia syntyy tarvittava määrä suojaamaan betonia, kun betonimassaan lisätään huokostin lisäainetta. (By 201, 84.)

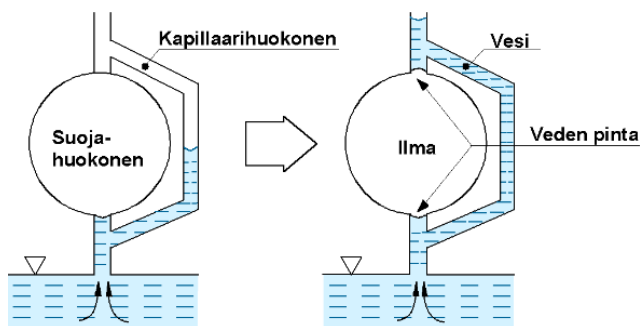
Viimeisen huokosrakenteen muodostavat tiivistyshuokokset. Näitä huokosia syntyy, kun valun aikana muottia vasten kertyy vettä ja ilmaa. Nämä huokokset ovat nähtävillä betonin pinnalla. (By 201,84.)

2.7.4 Pakkaskestävyys ja mittaus

Mikäli betoni on suunniteltu tulevaksi ympäristöön, jossa on riski betonin kastumisella ja jäätymiselle tulee betonin olla pakkasenkestävää.

Kun betoni kastuu, sen kapillaarihuokokset täyttyvät vedellä. Kun kapillaarihuokosia isommat suojahuokokset jäävät ilman täyttämiksi, ne voivat ottaa vastaan kapillaarihuokosissa olevan jäätyneen veden aiheuttaman paineen. Mikäli betoni on pitkään vedessä alkavat myös suojahuokokset täyttyä vedellä. Tämä prosessi kuitenkin vie paljon aikaa, sillä suojahuokosissa olevan ilman pitää liueta kapillaarihuokosissa olevaan veteen. Ensimmäisenä täyttyvät pienikokoisimmat suojahuokokset, sillä niissä ilmanpaine on suurin. (By 201, 117–118.)

Kuva esittää miten suojahuokokset pysyvät ilmatäytteisinä veden imeytyessä betonin kapillaarihuokosiin (kuva 1). Veden pintajännitys estää veden tunkeutumisen suojahuokoseseen. (By 201, 118.)



Kuva 1. Suojahuukosen toiminta. (By 201, 118.)

Vedessä tai jäässä olevat suolat vaikuttavat myös betonin pakkasenkestävyyteen. Suolat aiheuttavat suojahuukosissa suolojen epätasapainoa, kun suurimpiin huokosiin syntyy suolarikasta jäätyvätöntä vettä. Epätasapaino korjaantuu, kun pienemmistä huukosista siirtyy vettä suuriin huukosiin aiheuttaen lisää painetta. (By 201, 104.)

Betonin pinta voi myös rapautua suolojen vaikutuksesta, kun suoloja käytetään sulattamaan jäätä betonin pinnalta. Jään sulattamiseen tarvittava lämpö siirtyy betonin pinnasta jäähän, jolloin betoni pinta jäähtyy nopeasti ja saattaa vaurioitua. (By 201, 104.)

Suojahuukosten pitää olla sopivan kokoisia. Halkaisijaltaan alle 0,3 mm huukoisten määrä pitää olla kokonaisuudesta suuri. Ihanteellinen koko huukoille on noin 0,05 mm – 0,025 mm halkaisijaltaan. Suojahuukoiset pitävät myös olla riittävän lähellä toisiinsa noin 0,2 mm etäisyydellä, mitä kutsutaan huukosjaksi. (By 205, 37; Tepponen, 5.)

Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan testata monilla eri tavoilla, mutta yksikään testi ei pysty itsenäisesti määrittämään onko betoni pakkasenkestävä. Ilmamäärämittauksella tuoreesta betonimassasta saadaan massan ilmamäärä, mutta tämä ei selvitä suojahuukosten kokoa tai huukosjakoa, joita pystytään tutkimaan AVA-laitteella.

Pinta- tai ohuthiekappaleista voidaan mikroskooppisesti tutkia kovettuneen betonin pakkasenkestävyyttä. Näiden lisäksi on mahdollista suorittaa jäähdytys-sulatus- tai pakkasuolakokeita, joko valamalla tuoretta betonimassaa muotteihin tai poranäytteillä jo kovettuneesta betonirakenteesta. (By 201, 64.)

Betoninormien 2016 mukaan pakkasenkestävyyden vaatimukset ovat jakautuneet eri käyttöikäalueille (taulukko 6 ja 7). Taulukoista voidaan tulkita raja-arvot eri testausmetodeille. Tyhjät kohdat taulukossa tarkoittavat kyseisen testausmenetelmän kelpaamatto-

muutta rasisluokassa. Mikäli tuotantomenetelmä edellyttää käyttämään sellaista notkeutta, josta ei pystytä SFS-EN 12350-7 standardin mukaisesti määrittämään ilmamäärää, ei ilmamäärävaatimuksia tarvitse noudattaa. Tällöin pakkasenkestävyys todetaan pakkaskokeilla. (By 65, 157–158; Tepponen, 5.)

Taulukko 6. Pakkaskestävyyden vaatimukset 50 v.

| Käyttöikä 50 v | Jäätymis-sulamisrasitus v/s > 0,4 | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Luokka | XF1 | XF2 | XF3 | XF4 |
| Vedellä kyllästyminen | kohtalainen | kohtalainen | suuri | suuri |
| Suola mukana | ei | kyllä | ei | kyllä |
| Maksimi v/s | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,45 |
| Minimisementtimäärä | 270 | | 300 | |
| P-luku | | 25 | | 40 |
| Ilmamäärä | 4 % | 5 % | 4 % | 5,5 % |
| Huokosjako | <0,27 mm | <0,25 mm | <0,23 mm | <0,25 mm |
| Jäähdytys/sulatussykliä | 100 | | 300 | |
| Laattakoe/rapauma | <500 g/m ² | <500 g/m ² | <200 g/m ² | <200 g/m ² |

Taulukko 7. Pakkaskestävyyden vaatimukset 100 v.

| Käyttöikä 100 v | Jäätymis-sulamisrasitus v/s > 0,4 | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------|----------|
| Luokka | XF1 | XF2 | XF3 | XF4 |
| Vedellä kyllästyminen | kohtalainen | kohtalainen | suuri | suuri |
| Suola mukana | ei | kyllä | ei | kyllä |
| Maksimi v/s | 0,6 | | 0,5 | |
| Minimisementtimäärä | 270 | | 300 | |
| P-luku | | 50 | | 80 |
| Ilmamäärä | 5,5 % | | 5,5 % | |
| Huokosjako | <0,25 mm | <0,25 mm | <0,22 mm | <0,25 mm |
| Jäähdytys/sulatussykliä | 300 | | | |
| Laattakoe/rapauma | <200 g/m ² | | <100 g/m ² | |

Suojahuokosten mittaus

Suojahuokosten mittaus voidaan tehdä mikroskoopilla kovettuneesta betonista, joko pintahie tai ohuthiemenetelmällä.

Pintahiemenetelmässä näytepalan pinta hiotaan, jonka jälkeen näytettä voidaan tarkastella pintavalomikroskoopilla. Mikroskoopin kuvasta lasketaan suojahuokosten koko ja määrä, joko käsin tai ajamalla mikroskoopin kuva tietokoneohjelman läpi, joka on ohjelmoitu tunnistamaan kuvasta suojahuukokset.

Ohuthiemenetelmässä valmistetaan ohuthiepreparaatti, joka voidaan läpivalaista polarisaatiomikroskoopilla. Ohuthiepreparaatin valmistus sisältää monia eri työvaiheita ja kestää noin kaksi viikkoa. (By 72, 4.)

Tuoreesta betonimassasta voidaan mitata suojahuokosten koko ja määrä air void analyzer-laitteella eli ava-laitteella. Betonimassasta otetaan näyte, joka sekoitetaan ava-laitteessa olevaan lieriöön. Näyte sekoittuu lieriön pohjalla olevaan sekoitusnesteeseen, joka erottaa näytteessä olevat ilmakuplat. Mikäli sekoitusnesteen viskositeetti ja hydrofiiliset ominaisuudet ovat asianmukaiset eivät ilmakuplien koko muutu. Ilmakuplat kulkeutuvat sekoitusnesteen jälkeen vesikerroksen läpi lieriön yläosaan. Stokesin lain mukaan suuremmat ilmakuplat nousevat vesimassassa nopeammin kuin pienemmät ilmakuplat. Lieriön yläosassa on herkkä keräysastia, mikä mittaa massan muutoksia keräysastiassa, kun ilma syrjäyttää veden keventäen keräysastian massaa.

Keräysastian massan muutoksista tietokoneen algoritmi laskee ilmakuplien koon ja jakauman. Algoritmi perustuu kovettuneen betonin mikroskooppi tutkimuksiin ja mittauksiin standardin ASTM C457 mukaisesti. (Germann Products 2017.)

2.8 Sekoitus

Betonin sekoitukseen betoniasemilla käytetään yleisesti yhtä kolmesta sekoitintyypistä: vapaapudotus-, taso- tai pakkosekoitin. Sekoitusaika betoniasemilla vaihtelee betonimassan mukaan mutta on yleisesti 90–180 sekunnin välillä. Betonitehtailla yleisesti sekoitus on automatisoitu. Betonimassan kuljetuksen aikana sekoitussäiliöauto sekoittaa massaa pienellä nopeudella. Ennen massan purkua kohteessa massaa sekoitetaan tehostetusti noin viisi minuuttia. (By 201, 307–308, 315.)

2.8.1 Vapaapudotussekoitin

Vapaapudotussekoitin soveltuu parhaiten notkeiden betonimassojen valmistukseen. Sekoitin käsittää lieriömäisen rummun, jonka sisällä on siivekkeitä auttamassa massan tasaista sekoittumista. Sekoittimen rummussa on kulutuslevyjä, jotka pitää vaihtaa noin 100 000–200 000 kuution valmistuksen jälkeen. Rumpu pyörii pystysunnassa rullastojen tai kannatuspyörien varassa. Sekoitin tyhjennetään kääntämällä pyörimissuuntaa. Sekoittimen tilavuus voi vaihdella puolen ja kahdeksan kuution välillä. (By 201, 307.)

2.8.2 Tasosekoitin

Tasosekoitin on kiinteä lieriömäinen astia, jossa on sisällä pystyakselilla pyörivät sekoitussiivet. Siipiä voi olla kahdessa tai kolmessa kehässä. Sekoitin tyhjennetään pohjassa olevasta luukusta. Käytetään yleisesti jäykkien massojen valmistukseen. (By 201, 307.)

2.8.3 Pakkosekoitin

Pakkosekoittimen rumpu on saman tyyppinen kuin tasosekoittimessa mutta pakkosekoittimessa on yleensä kaksi sekoitustähteä, joissa on kolme tai neljä sekoitussiipeä. Pakkosekoittimessa on myös korkeanopeuksinen aktivaattori. Pakkosekoitin on paras sekoitintyyppi huokoisen betonin valmistukseen. (By 201, 307; Tepponen, 7.)

2.8.4 Sekoitussäiliöauto

Sekoitussäiliöauto on varustettu pyörivällä kuljetussäiliöllä. Säiliön koko vaihtelee kolmesta yhdeksään kuution. Betonimassaa voidaan sekoittaa säiliössä kuljetuksen aikana tai sekoittaa kohteessa. Nestemäiset, tehonotkistetut, ja erikoisbetonimassat on hyvä kuljettaa sekoitussäiliöautoissa, koska näin voidaan varmistaa massan tasalaatuisuus, mikäli massassa on tapahtunut erottumista. (By 201, 314.)

3 TUTKIMUS

Tutkimustyö suoritettiin yhdessä Finnsementti Oy:n edustajien kanssa kahdella betoni- asemalla, joita tässä työssä nimitetään betoniasema A:na ja betoniasema B:nä. Testat- tavat betonimassat sovittiin betoniasemilla yhdessä laatuinsinöörin ja Finnsementin edustajan kanssa. Tutkimustyössä betoniasemilla pyrittiin simuloimaan todenmukaisia olosuhteita, joten betonimassa siirrettiin valmistuksen jälkeen sekoitussäiliöautoihin si- muloimaan kuljetus- ja seisonta-aikaa työkohteisiin.

Betoniasema A:n massaksi päätettiin P-lukubetoni P40. Kiviaineksen raekoko oli välillä 0/16 mm ja käytetty sementtilaatu oli Plussementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5N. Lisäaineina käytettiin Ilma-parmix-huokostinta ja Sola-parmix-notkistinta. Massan vesi-sementti- suhde oli 0,42. Massan notkeudeksi tavoiteltiin S3. Massa pyrittiin valmistamaan pak- kaskenkestäväksi. Tuoreen massan ilmamäärä pyrittiin saamaan 3,9 prosentin ja 5,3 pro- sentin väliin, kun massaa oli sekoitettu 180 sekuntia. Massaa valmistettiin kaksi kuutiota.

Betoniaseman A:n sekoitin oli malliltaan vapaapuodoitussekoitin, jonka tilavuus oli 4,5 kuutiota ja sekoittimen annostelu oli tietokoneohjattu. Betoniasema A:n sekoitussäiliöau- ton kuljetussäiliö sisälsi erikoissiivekkeet massan sekoitettavuuden parantamiseksi. Au- ton säiliön tilavuus oli 6,5 kuutiota. (Betoniasemien laatuinsinöörin haastattelu.)

Betoniasema B:n massa pyrittiin valmistamaan samalla reseptillä, kuten betoniasema A:n massa, vain sillä muutoksella, että huokostinta lisättiin 0,1 prosenttia sementin ko- konaismäärästä. Massaa valmistettiin kaksi kuutiota. Betoniasema B:n sekoitin oli va- paapudotussekoitin tilavuudeltaan kolme kuutiota ja sekoittimen annostelu oli tietoko- neohjattu. Betoniasema B:n sekoitussäiliöautossa ei ollut erikoissiivekkeitä. Auton säi- liön tilavuus oli 7,5 kuutiota. (Betoniasemien laatuinsinöörin haastattelu.)

3.1 Tutkimus- ja mittausmenetelmät

Betonimassoista otettiin näytteet sekoituksen eri vaiheissa 90, 120 ja 180 sekunnin koh- dalla ja mitattiin ilmamäärät. Mikäli massa oli 180 sekunnin kohdalla halutussa ilmamää- rässä siirrettiin massa sekoitussäiliöautoon. Sekoitussäiliöautosta otettiin näytteet 30, 60 ja 90 minuutin välein. Sekoitussäiliöauto sekoitti massaa viisi minuuttia ennen näytteen ottamista.

Massoista testattiin ilmamäärän ollessa haluttu 3,9–5,3 prosenttia 180 sekunnin kohdalla myös painuma, tiheys ja lämpötila. AVA-mittaus suoritettiin 180 sekunnin, 60 minuutin ja 90 minuutin näytteistä.

3.1.1 Ilmamääränmittaus

Ilmamäärän mittauksessa käytettiin painemittarimenetelmää (kuva 2). Mittarissa oli standardin SFS-EN 12350-7 mukainen viiden litran säiliö. Mittalaite oli kalibroitu betoniasemien laboranttien toimesta. Mittarin tarkkuus oli $\pm 0.1 \%$.

Säiliö täytettiin betonimassalla ja tiivistettiin tärysauvalla. Tiivistyksen jälkeen massan pinta tasattiin ja säiliön tiivisteet puhdistettiin roiskeista. Kansi kiristettiin paikoilleen ja paineentasausventtiili suljettiin. Mittarin vesihanat avattiin ja täytettiin vedellä. Säiliötä koputettiin varovaisesti kuminuijalla ylimääräisen ilman poistamiseksi. Mittarin ilmaventtiili suljettiin ja mittariin pumpattiin ilmaa, kunnes mittarin viisari oli kalibroidussa alkupainessa. Vesihanat suljettiin ja paineentasausventtiili avattiin ja luettiin tulos mittarista.

Mittauksen suoritti betoniasemilla sama laborantti tulosten tasalaadun parantamiseksi.



Kuva 2. Ilmamäärämittari.

3.1.2 Notkeuden määrittäminen painumakokeella

Painumalieriö oli SFS-EN 12350-2 mukainen teräs lieriö, jonka mitat olivat korkeus 300 mm, pohjan halkaisija 200 mm ja yläosan halkaisija 100 mm (kuva 3). Sulloinsauva oli pituudeltaan 600 mm ja halkaisijaltaan 16 mm. Sauva oli valmistettu teräksestä. Alustana käytettiin leviämäpöytää.

Muotti ja alusta kostutettiin vedellä, jonka jälkeen mittauksen suorittaja seiso jalkatukien päällä ja alkoi täyttää lieriötä. Lieriön täytyttyä noin kolmanneksen massaa tiivistettiin 25:llä sauvan iskulla. Vaihe toistettiin lieriön täytyessä kolmanneksella, kunnes lieriö oli täynnä. Ylimääräinen betonimassa tasoitettiin lieriön päältä pois sauvalla. Lieriön ympäriltä poistettiin yli valunut massa. Lieriö nostettiin tasaisella nopeudella suoraan ylöspäin. Painuma mitattiin lieriön korkeuden ja massan korkeimman kohdan erotuksesta.

Mittauksen suorittivat betoniasemien laborantit.



Kuva 3. Painumalieriö.

3.1.3 Huokosanalyysi AVA-laitteilla

Ennen analysointia AVA-laitteeseen kytkettiin kannettava tietokone, jossa oli asennettuna AVA-laitteen analysointiohjelma. Ohjelmaan syötettiin massan koostumustiedot ja ilmamäärämittauksesta saatu tulos.

Betonimassa tiivistettiin ennen näytteenottoa kuutiomuottiin tai ilmamäärämittarin säiliöön. Betonimassasta otettiin näyte porakoneen päähän kiinnitettävällä suutinkappaleella. Suuttimeen asennettiin ruisku, jonka jälkeen muotin päälle laitettiin asetinlevy,

jossa oli suuttimelle sopiva reikä (kuva 4). Porakoneen käynnistyksen jälkeen näyte siivilöityi suutinkappaleen läpi. Näytteitä otettiin kaksi jokaista massaa kohden.



Kuva 4. Näytteenotto AVA-laitteelle.

Ruiskussa oleva näyte asetettiin AVA-laitteeseen, jossa betonimassa sekoittui pohjalla olevaan glykolinesteeseen, jonka jälkeen massasta vapautui ilmakuplia. Kuplat nousivat pohjalta vesipatsasta pitkin ylös upotettuun keräinmaljaan, joka roikkui herkässä vaa'assa mitaten kuplien aiheuttamaa painon muutosta (kuva 5). Yhden näytteen analysointi kesti noin 25 minuuttia.



Kuva 5. AVA-laite.

Analysoinnin jälkeen AVA-laitteen tietokoneohjelma piirsi kaavion suojarahokosten koon jakautumisesta sekä pylväskaavion suojarahokosten koon mukaan.

AVA-laitetta käytti ja näytteen oton suoritti AVA-laitteen käyttöön koulutettu laborantti.

3.1.4 Lämmön ja tiheyden määrittäminen

Betonimassasta mitattiin lämpötila digitaalisella lämpömittarilla, jossa oli teräskärki. Mittarin tarkkuus oli ± 0.1 °C.

Vaakaa käytettiin betonin tiheyden määrittämiseen. Tyhjä ilmamäärämittarin säiliö punnittiin ja tulos merkittiin muistiin. Massat punnittiin ilmamäärämittarin säiliössä, jonka jälkeen suoritettiin tiheyden laskenta kaavalla

$$p = \frac{m - m_s}{V},$$

jossa p on betonin tiheys, m betonimassan massa, m_s säiliön massa ja V säiliön tilavuus.

3.2 Tulokset

Tulokset kirjattiin kokeiden aikana muistilehtiöön. Lehtiöstä tulokset syötettiin tietokoneelle Excel-taulukoihin. Ava-mittauksen tuloksista saatiin myös ohjelman tuottamat käyrät, jotka ovat opinnäytetyön liitteenä.

3.2.1 Ilmamäärä

Taulukko 8. Ilmamäärät.

| Ilmamäärä-tila | Betoniasema A | Betoniasema B | | |
|---------------------|---------------|---------------|---------|---------|
| | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | Massa 4 |
| Sekoitusajaksi | Ilmamäärä (%) | | | |
| 90 s Mylly | 3,7 | 5,9 | 5,9 | 5,0 |
| 120 s Mylly | 3,9 | - | - | 5,4 |
| 180 s Mylly | 3,9 | 5,9 | - | 5,4 |
| 25 min+5 min Auto | 3,7 | - | - | - |
| 55 min + 5 min Auto | 4,4 | - | - | 5,6 |
| 85 min + 5 min Auto | 4,6 | - | - | 5,3 |

Betoniasema A:n betonimassa 1 onnistuttiin saamaan heti haluttuun väliin, joten massaa voitiin käyttää jatkokokeissa. 30 minuutin kohdalla havaittiin ilmamäärän pieni lasku, tämä selittynee ilmamäärämittarin toleranssi heittelyllä. Taulukosta voidaan todeta ilmamäärän lähteneen nousuun vasta tunnin kohdalla (taulukko 8).

Betoniasema B:ssä tehtyjen betonimassojen 2 ja 3 ilmamäärät olivat jo 90 sekunnin kohdalla yli tavoitellun 5,3 prosentin, joten massat hylättiin. Huokostimen määrää laskettiin massa 4:ssä samalle tasolle kuin betoniasema A:n massa 1. Massa 4:n ilmamäärä oli 180 sekunnin kohdalla 5,4 prosenttia eli yli tavoitellun maksimi raja-arvon 5.3 prosenttia. Massasta päätettiin kuitenkin tehdä jatkokokeet. Taulukosta voidaan havaita massa 4:n ilmamäärän pysyneen huomattavan tasaisena eri aikaväleillä (taulukko 8). 90 minuutin kohdalla ilmamäärä laski hieman mikä on epätavallista. Ilmiö voi selittyä mittaajan vaihduttua viimeiseen testiin, joka saattoi vaikuttaa tulokseen.

Verrattaessa massoja keskenään huomataan massa 1:n ilmamäärän nousseen myöhäisessä vaiheessa suhteessa enemmän kuin massa 4. Yksi syy voi olla betoniasema A:n käyttämä sekoitussäiliöauto, jossa oli lisäsiivekkeet.

3.2.2 Painuma

Taulukko 9. Painumat.

| Painuma-taulukko | Betoniasema A | Betoniasema B | | |
|---------------------|---------------|---------------|---------|---------|
| | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | Massa 4 |
| Sekoitus aika | Painuma (mm) | | | |
| 90 s Mylly | - | - | - | - |
| 120 s Mylly | - | - | - | - |
| 180 s Mylly | 155 | 160 | - | 140 |
| 25 min + 5 min Auto | 175 | - | - | - |
| 55 min + 5 min Auto | 180 | - | - | 100 |
| 85 min + 5 min Auto | 160 | - | - | 100 |

Taulukosta voidaan havaita betoniasema A:n 180 sekunnin massan olleen jäykempää kuin myöhemmät massat syynä ilmiölle on massan seisominen kottikärryissä muita testattavia massoja pidempään, jolloin massa ehti jäykistyä muita enemmän (taulukko 9).

Voidaan myös todeta betoniasema B massa 4:n olleen huomattavasti jäykempää luokkaa S3 kuin vastaava massa 1 betoniasema A:lla mikä oli luokkaa S4/S5. Tavoite notkeuteen päästiin betoniasema B massa 4:n kohdalla (taulukko 9).

3.2.3 Lämpötila

Taulukko 10. Lämpötilat.

| Lämpötila-taulukko | Betoniasema A | Betoniasema B | | |
|---------------------|----------------|---------------|---------|---------|
| | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | Massa 4 |
| Sekoitus aika | Lämpötila (°C) | | | |
| 90 s Mylly | 18,9 | 19 | 18,8 | 19 |
| 120 s Mylly | 18,9 | 19 | 18,9 | 19 |
| 180 s Mylly | 17,8 | 17,1 | 18,5 | 18,5 |
| 25 min + 5 min Auto | 16,8 | - | - | - |
| 55 min + 5 min Auto | 15,7 | - | - | 15,5 |
| 85 min + 5 min Auto | 14,1 | - | - | 14,4 |

Massojen lämpötilat laskivat odotetusti, kun massat olivat sekoitussäiliöautossa. Huomattavaa ulkolämpötila oli noin 10 °C (taulukko 10).

3.2.4 Tiheys

Taulukko 11. Tiheydet.

| Tiheys-taulukko | Betoniasema A | Betoniasema B | | |
|---------------------|-----------------------------|---------------|---------|---------|
| | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | Massa 4 |
| Sekoitus aika | Tiheys (kg/m ³) | | | |
| 90 s Mylly | 2287 | 2212 | - | 2222 |
| 120 s Mylly | 2289 | - | - | 2218 |
| 180 s Mylly | 2305 | 2209 | - | 2213 |
| 25 min + 5 min Auto | 2308 | - | - | - |
| 55 min + 5 min Auto | 2289 | - | - | 2224 |
| 85 min + 5 min Auto | 2288 | - | - | 2212 |

Massojen tiheys ei muuttunut merkittävästi testien aikana (taulukko 11). Massa 1 ja massa 4 erot näkyvät myös hyvin ilmamäärämittauksissa.

3.2.5 AVA-tulokset

Taulukko 12. AVA-mittaukset.

| | Betoniasema A | Betoniasema B |
|---------------------|--|---------------|
| | Massa 1 | Massa 4 |
| Sekoitusaika | Ava-mittaus ilmamäärä (%) | |
| 180 s Mylly | 3,8 | 3,6 |
| 55 min + 5 min Auto | 6,6 | 6,1 |
| 85 min + 5 min Auto | 7,9 | 5,1 |
| | Betoniasema A | Betoniasema B |
| | Massa 1 | Massa 4 |
| Sekoitusaika | Huokosten kokonaispinta-ala (mm^{-1}) | |
| 180 s Mylly | 39,5 | 30,1 |
| 55 min + 5 min Auto | 39,3 | 19,6 |
| 85 min + 5 min Auto | 32,4 | 22,5 |
| | Betoniasema A | Betoniasema B |
| | Massa 1 | Massa 4 |
| Sekoitusaika | Huokosjako (mm) | |
| 180 s Mylly | 0,145 | 0,193 |
| 55 min + 5 min Auto | 0,112 | 0,234 |
| 85 min + 5 min Auto | 0,116 | 0,220 |

AVA-mittauksen ilmamäärissä on selviä eroavaisuuksia varsinaisen ilmamäärämittauksen kanssa. Massa 1:n 60 minuutin ja 90 minuutin ilmamäärät olivat huomattavasti korkeammat AVA-mittauksessa. Massa 2:n 180 sekunnin kohdalla sen sijaan on havaittavissa selkeästi pienempi ilmamäärä.

Huokosjako kertoo massojen olleen By 65 Betoninormien mukaisia pois lukien massa 4:n 60 minuutin kohdalla, joka ylittää rasiusluokan XF 3:n 50 vuoden ja 100 vuoden käyttöiällä (taulukko 12).

Huokosten kokonaispinta-alan tuloksia tarkastelemalla nähdään massa 4:n 60 minuutin ja 90 minuutin kohdalla arvot $19,6 \text{ mm}^{-1}$ ja $22,5 \text{ mm}^{-1}$, jotka alittavat tavoitellun arvon $25\text{--}40 \text{ mm}^{-1}$.

Tarkastelemalla liitteistä löytyviä AVA-mittauksesta saatuja pylväskäyrästäjä voidaan todeta miten suojahuokokset ovat jakautuneet koon mukaan. Pylväskäyrästäön tulisi olla mahdollisimman tasainen. Varsinkin alle 300 µm suojahuokosia tulisi olla suuri määrä.

Massa 1:n ja massa 4:n kolmen minuutin kohdalla tehdyn mittauksen perusteella molempien massojen käyrästäöt ovat tasaiset. Massojen suurien suojahuokosten osuus oli noussut mitä pidemmän aikaa massat olivat seisoneet sekoitussäiliöautossa. Massa 1:n arvot olivat pysyneet hyväksyttävissä rajoissa, mutta massa 4:n pienimmät ilmakuplat olivat hävinneet ja suuret ilmakuplat olivat käyrästäöjen mukaan lisääntyneet.

3.3 Testit koulun laboratoriossa

Testejä päätettiin jatkaa Turun ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa. Testaajana koulun laboratoriossa toimi insinööriopiskelija Jere-Matias Vuorio.

Testeissä pyrittiin valmistamaan samanlaisia massoja, joita aikaisemmin oli valmistettu betoniasemilla, mutta pienemmällä määrällä ja ilman massan seisottamista sekoitussäiliöautossa. Tavoitellut ominaisuudet massoille koulussa olivat, vesi-sementtisuhde 0.42, notkeutena S3, ilmamääränä kolmen minuutin sekoituksen kohdalla 3,8–5,3 % ja P-lukuna 40. Näytteitä oli tarkoitus ottaa massoista kolmen, kuuden ja 12 minuutin kohdalla. Kolmen minuutin kohdalla massasta testattaisiin notkeus, ilmamäärä, lämpötila ja tiheys. Kuuden ja 12 minuutin massoista oli tarkoitus testata vain ilmamäärä, lämpötila ja tiheys. Seuraava testierä oli tarkoitus suorittaa tuplaamalla huokostimen määrä ja suorittaa identtiset testit massoille.

Käyttämällä betoniasemilta saatuja raaka-aine tietoja suhteutettiin 50 litran annos betonimassaa, joka arvioitiin riittäväksi määräksi kaikkien sekoitusaikojen kokeiden suorittamiseen. Koulun laboratoriossa kaikki raaka-aineiden punnitukset mitattiin vaa'alla käsin. Koulun tasosekoitin ei kuitenkaan ollut riittävän tehokas sekoittamaan näin kuivaa ja jäykkää massaa vaan jumittui, jonka takia massa jouduttiin lisäämään vettä. Massan vesi-sementtisuhde muuttui, jolloin massasta ei voitu ottaa näytteitä.

Massan annosta pienennettiin viiteentoista litraan ja tämän takia testaussuunnitelmaa piti muuttaa, siten että jokaiselle sekoitusajalle valmistettiin oma massa. Ensimmäisestä

pienemmästä massasta tuli kuitenkin liian jäykkää ja kuivaa eikä näin ollen testejä tästä massasta suoritettu.

Tämän jälkeen yritettiin muokata kiviaines koostumusta poistamalla hienojakoinen filleri ja kompensoimalla fillerin puutetta 0–8 raekoon soralla ja 8–16 raekoon soralla. Ainekset punnittiin ja sekoitettiin, mutta massa oli edelleen hyvin jäykkää. Massasta kuitenkin päätettiin testata painuma ja ilmamäärä. Massan painuma oli 20 mm. Massasta ei saatu luotettavasti mitattua ilmamäärää, koska ilmamäärämittarin painelaitteiston putkisto oli tukkeutunut. Mittari lähetettiin huoltoon ja uusi mittari lainattiin kokeiden ajaksi.

Edellisen massan jäätyä liian jäykäksi päätettiin notkistimen määrä tuplata. Massa valmistettiin uudella notkistimen määrällä ja mittaukset suoritettiin.

Taulukko 13. Tulokset koulu massa 1_k, Turku AMK.

| Tulokset koulu | Massa 1 _k |
|----------------|------------------------|
| Ilmamäärä | 2 % |
| Lämpötila | 27 °C |
| Tiheys | 2401 kg/m ² |
| Painuma | 30 mm |

Taulukosta voidaan havaita ilmamäärän jääneen hyvin alhaiseksi vain kaksi prosenttia, mikä tarkoittaa, ettei huokostin ollut vaikuttanut massaan. Tiheyden arvo 2401 kg/m² myös viittasi huokostuksen epäonnistumiseen. Massan painuma oli 30 mm eli hyvin jäykkää (taulukko 13).

Finnsementin tilaajan kanssa käytiin konsultointia, jonka seurauksena päätettiin nostaa notkistimen määrää suhteessa sementin määrään yli suositellun rajan. Uudessa massassa oli notkistinta kolme prosenttia sementin määrästä. Massa valmistettiin ja mitattiin.

Taulukko 14. Tulokset koulu massa 2_k, Turku AMK.

| Tulokset koulu | Massa 2 _k |
|----------------|------------------------|
| Ilmamäärä | 1,45 % |
| Lämpötila | 26,2 °C |
| Tiheys | 2402 kg/m ² |
| Painuma | 230 mm |

Notkistimen määrän noston vaikutukset olivat selvästi havaittavissa. Painumakoetta tehdessä havaittiin silmämääräisesti selkeää vedenerottumista. Painuman arvoksi mitattiin 230 mm mikä tarkoitti massan olleen liki nestemäistä. Massan ilmamäärä oli hieman pienempi 1,45 prosenttia eli huokostin ei ollut vaikuttanut massaan. Tiheydessä ei ollut merkittävää eroa (taulukko 14).

Tulokset raportoitiin heti tilaajalle, jonka kanssa yhdessä päätettiin kokeiden keskeyttämisestä koulun laboratorioissa.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Betoniasemilla tehtyjen massojen kohdalla havaittiin eroja massojen ilmamäärissä, vaikka käytetty resepti olikin sama. Syitä tähän voi tietysti olla monia, kuten opinnäytetyöstä käy ilmi, eikä näitä syitä välttämättä varmuudella voida selvittää. On kuitenkin hyvin todennäköistä, että kiviaines on ollut eri laatua, sekä todennäköisesti kiviaineksen koostumus ja raekoko ovat olleet eriävät betoniasemilla. Muita mahdollisia syitä ovat sekoitusmyllyn puhtaus, koko ja teho, tai sekoitettavien aineiden annoskoot ovat vaihdelleet sekoituksen automatiikassa eriävästi.

Tuloksista voidaan kuitenkin arvioida massojen pakkasenkestävyyttä ja onko nähtävissä vaikutuksia massan seisomisesta sekoitussäiliöautossa. Valitettavasti testejä ei pystytty järjestämään sekoitussäiliöautojen kanssa kahta testikertaa enempää, joten testausmäärä jäi pieneksi.

Betoniasema A:n massa 1 on tehtyjen kokeiden perusteella pakkasenkestävä. Ilmamäärä, suojahuokosten koko ja huokosjako ovat sallituissa rajoissa. Suojahuokosten kokonaispinta-alat ovat myös hyvät. Tarkasteltaessa testien tuloksia voidaan kuitenkin havaita ilmamäärien nousua betonimassassa ja sementtiliimassa sekä halkaisijaltaan suurien suojahuokosten huomattava nousua. Tämä kuitenkin viittaa vahvasti siihen, että betonimassan seisottaminen on vaikuttanut massan huokosten muodostumiseen.

Betoniasema B:n massat 2 ja 3 hylättiin ilmamäärien oltua liian suuret sekoituksen alussa. Massa 4:n varhaiset testit osoittivat massan olleen pakkasenkestävää, mutta myöhemmät testit osoittivat, kuten massa 1:n kohdalla, että halkaisijaltaan suurien suojahuokosten määrä nousi. Massa 4:n pakkasenkestävyys todettiin riittämättömäksi myöhäisissä vaiheissa, koska pienimpiä huokoskokoja ei havaittu AVA-mittauksissa, sekä suurten huokosten määrä kasvoi. Massa 4:n AVA-mittauksesta mitattu huokosten kokonaispinta-ala oli myös liian alhainen alle 20 mm^{-1} 60 minuutin kohdalla. Massa 4 voi kuitenkin todellisuudessa olla pakkasenkestävää, sillä AVA-mittauksista saadut tulokset ovat hyvin lähellä tavoitteellisia arvoja. Massa 4:n kohdalla tulisi suorittaa, joko pintahietai ohuthietesti ja mahdollinen pakkaskoe, mikäli massa olisi ollut todellisessa käytössä rakenteissa.

Tutkimustietoa on saatu ilmamäärien kohoamisesta esimerkiksi Aalto-yliopiston Robust Air -tutkimuksen osalta, jossa arvioitiin modernien polykarboksylaattipohjaisten tehonotkistimien vaativan tehokkaan sekoituksen ja pidemmän sekoitusajan, ilman pitkää sekoitusta ilmamäärä voi nousta myöhemmin. Vaadittavan ilmamäärän saamiseksi lyhyellä sekoitusajalla huokostinannostus on korkea, mikä voi uudelleen johtaa ilmamäärän nousuun myöhemmin. Tutkimus esitti korjaaviksi toimenpiteiksi muun muassa lisäaineiden kehittämisen, sekoittimien kehittämisen ja suurien ilmamäärien yli kuuden prosentin välttämistä. Tutkimus arvioi kokeiden olevan käytännön näkökulmasta pahin ääripää, varsinkin jälkisekoituksen osalta todennäköisesti huomattavasti tehokkaampi kuin sekoitussäiliöauton sekoitus.

Robust Air -tutkimus huomioiden massa 1:n suuri ilmamäärän nousu verrattuna massa 4:n, saattoi johtua betoniasema A:n sekoitussäiliöautossa olleista lisäsiivekkeistä. Tuloksia tehokkaammalla sekoitussäiliöautolla on kuitenkin tässä tapauksessa yksi, mikä on liian vähän johtopäätöksen tekemiseksi lisäsiivekkeiden vaikutuksesta käytännön tilanteessa.

Koulun laboratoriotesteistä voidaan päätellä, että ilman vesi-sementtisuhteen muutosta ei pystytty toistamaan betoniasemilla tehtyjä massoja, koska todennäköisesti koulun laboratorion kiviaines, kiviaineksen raekoot ja raekokojen suhteet olivat liian eriäviä verrattaessa betoniasemilla käytettyihin kiviaineksiin.

Kahdesta massasta vain toinen oli tehtyjen testien perusteella pakkasenkestävää ja suojahuokoset muodostuneet halutulla tavalla. Vaikka testejä oli vain kaksi tämän tutkimuksen osalta, on selvää – kun tarkastellaan tämän tutkimuksen lisäksi muita tutkimuksia, jotka ovat tutkineet huokostuksen onnistumista – että pitkittyneellä betonimassojen seisottamisella on negatiivisia vaikutuksia betonin pakkasenkestävyydelle ja suojahuokosten muodostumiselle.

Kahden testimassan jäädessä hyvin vähäiseksi vertailupohjaksi näille kyseisille osaineyhdistelmille, esitän vastaavien kokeiden jatkamista Plussementillä CEM IIB-M (S-LL) 42,5N Ilma-Parmix-huokostimen ja Sola-Parmix-notkistimen yhdistelmällä. Lisäksi kannattaa tutkia muita mahdollisia Finnsementin tuotteiden yhdistelmiä ja käyttää sekoitussäiliöautoa massan seisottamiseen mahdollisuuksien mukaan tai vastaavaa simulointia laboratorio-olosuhteissa.

Testit voisivat keskittyä selvittämään, mikä huokostimen, notkistimen ja sementin yhdistelmä olisi paras lyhyelle sekoitusajalle ja mikä yhdistelmä kestää parhaiten seisottamista ilman ilmamäärän suurta nousua ja pienten suojuhuokosten häviämistä.

LÄHTEET

By 43 Betonin kiviainekset 2018. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-Koulutus.

By 65 Betoninormit 2016. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-Koulutus.

By 67 Betonin kutistuma ja halkeilun hallinta 2016. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-Koulutus.

By 72 Betonin laadunvarmistus 2020. Osa 1 – Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut-
hieistä. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: BY-Koulutus.

By 201 Betonitekniikan oppikirja 2018, seitsemäs painos. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki:
BY-Koulutus.

By 205 Betonityöt, yhdeksäs painos. Rakennustieto Oy. Tampere: Kirjapaino Tammerprint Oy.

Germann Products tuoteseloste. Viitattu 21.4.2017 www.germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava.

Tepponen, Pirjo 2014. Betonin huokostus. Semtu Oy. Viitattu 17.4.2017 www.semtu.fi/fi/ratkaisu/betonin-huokostus.

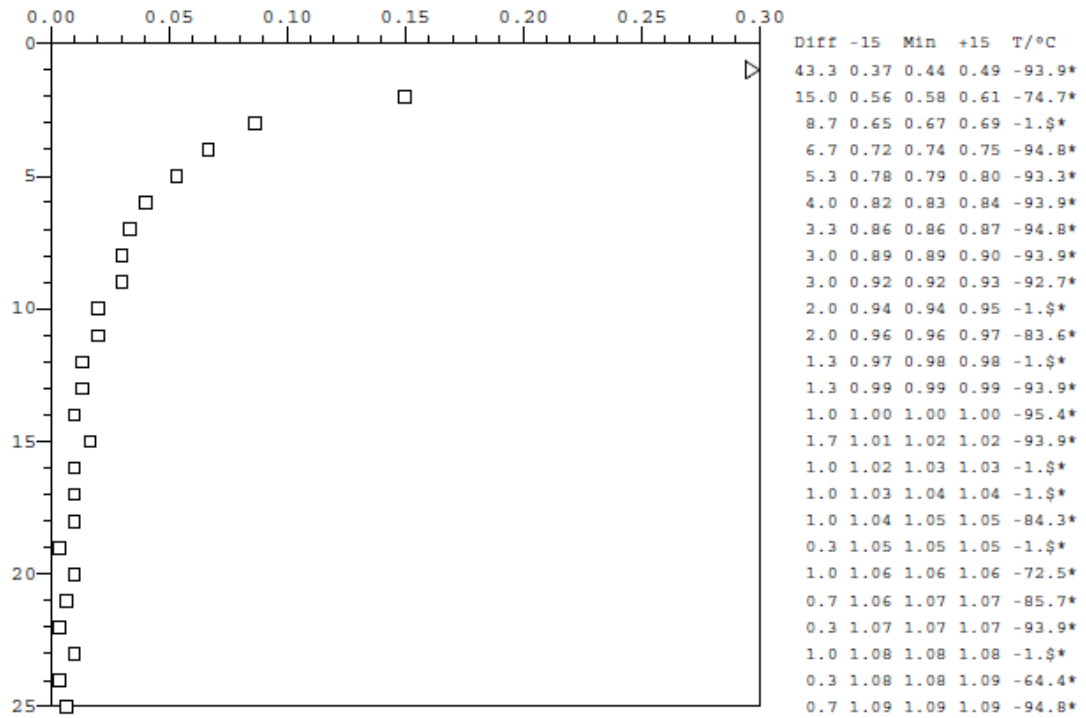
AVA-tulokset

Massa 1 Ava-tulos 3 min.

Mortar <6mm : 67.4 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 3.9 % Sample volume : 20.0 cm³

Analysis

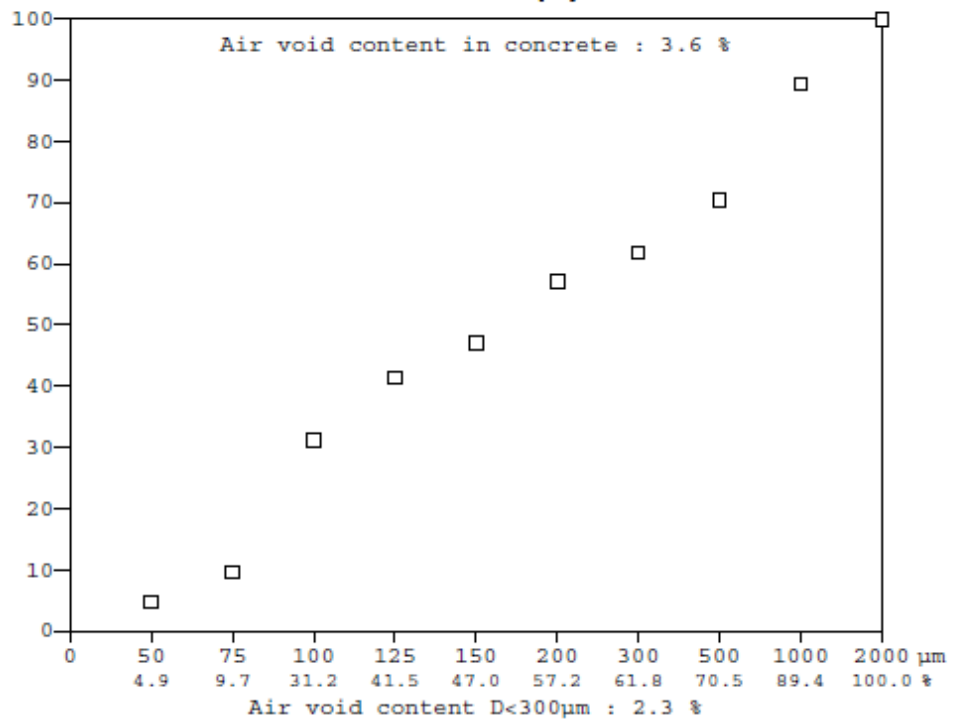
Start:0.00g +5sec:0.07g +30sec:0.29g Temp:-92.6°C



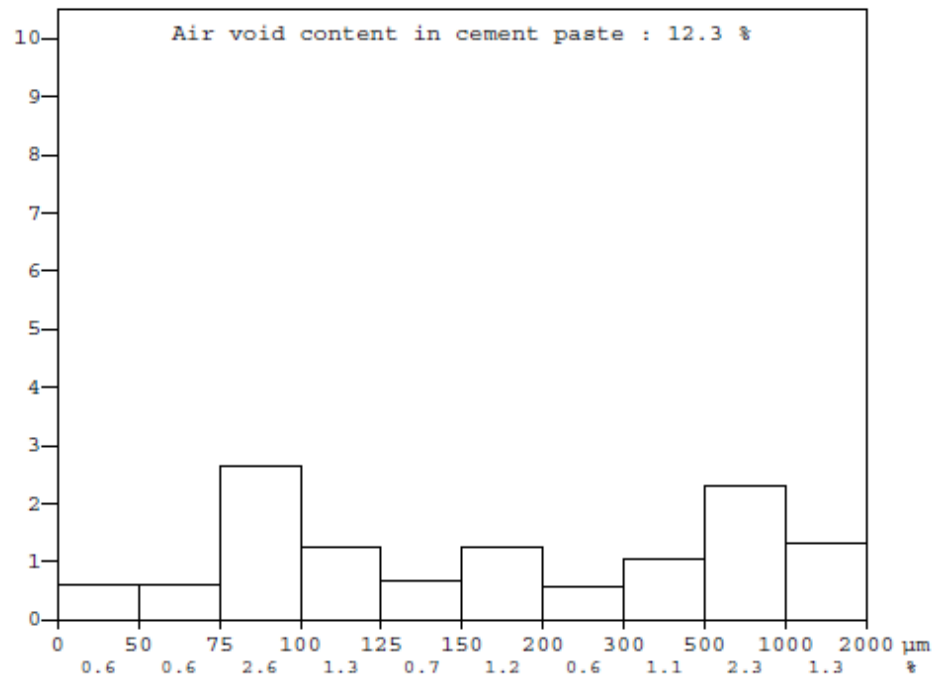
Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 3.8 % 2.7 %
 Air-% paste : 12.6 % 9.2 %
 Air-% putty : 11.2 % 8.1 %
 Specific surface : 39.5 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.145 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

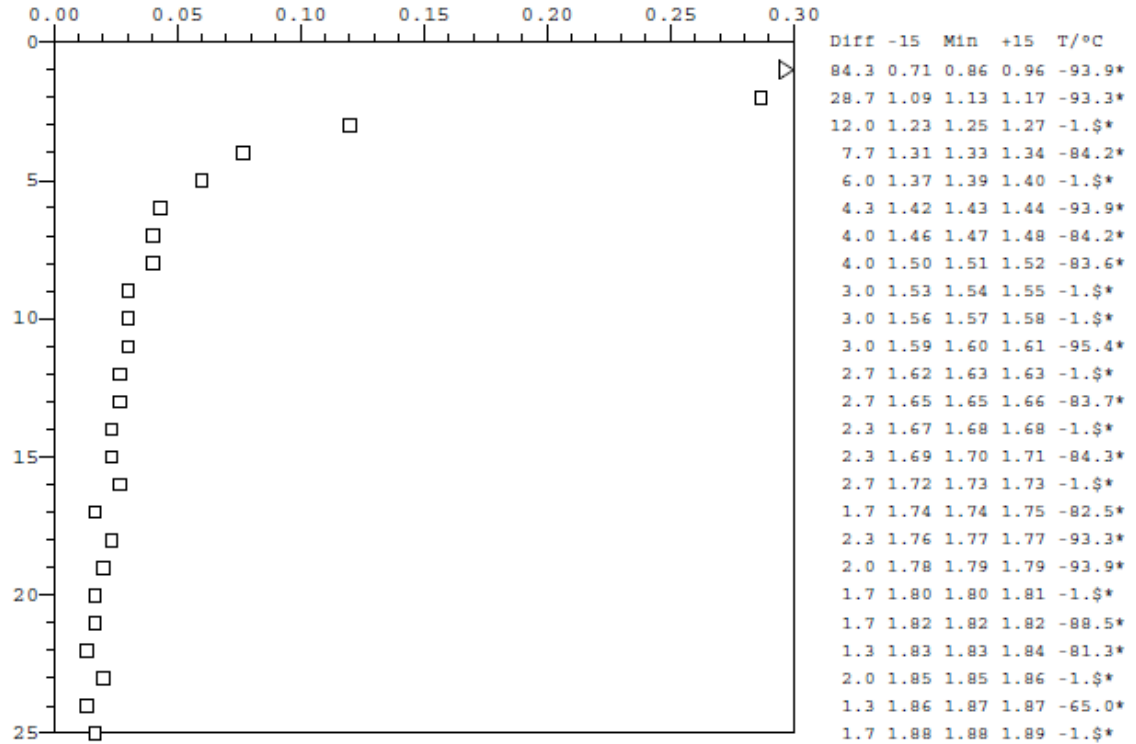


Massa 1 Ava-tulos 60 min.

Mortar <6mm : 67.4 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 4.4 % Sample volume : 20.0 cm³

Analysis

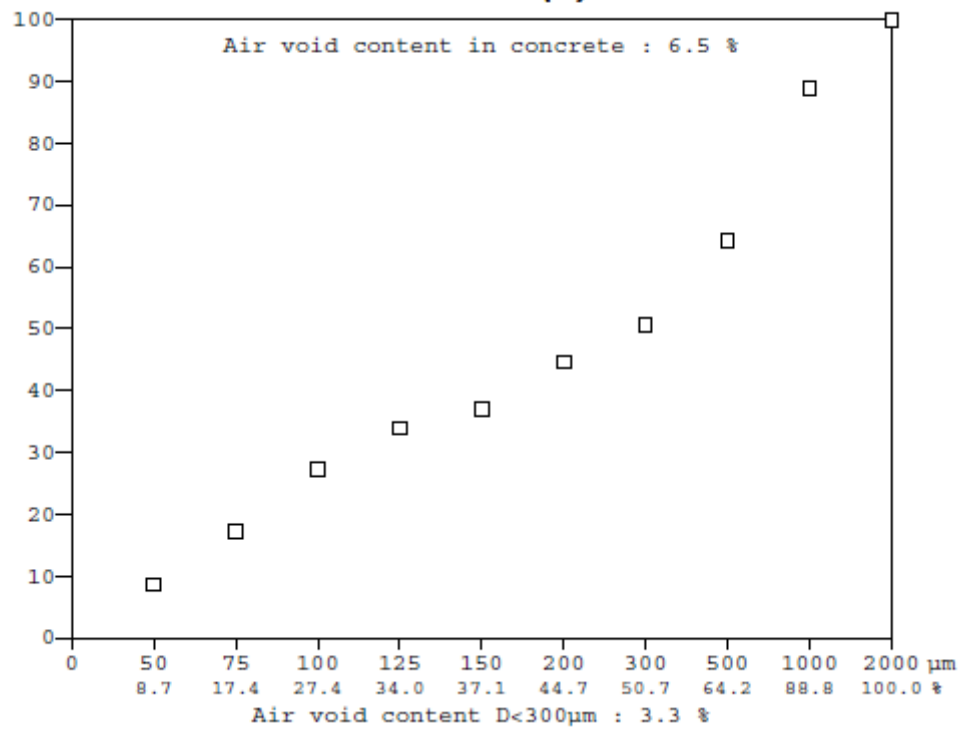
Start:0.00g +5sec:0.11g +30sec:0.54g Temp:-93.9°C



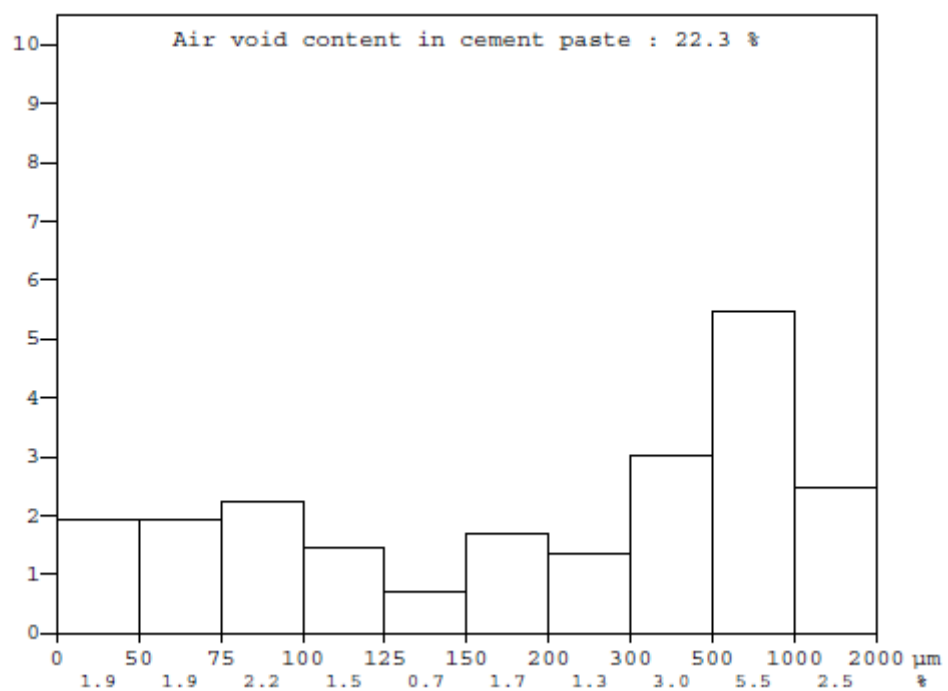
Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 6.6 % 4.5 %
 Air-% paste : 22.8 % 15.6 %
 Air-% putty : 18.6 % 12.7 %
 Specific surface : 39.3 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.112 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

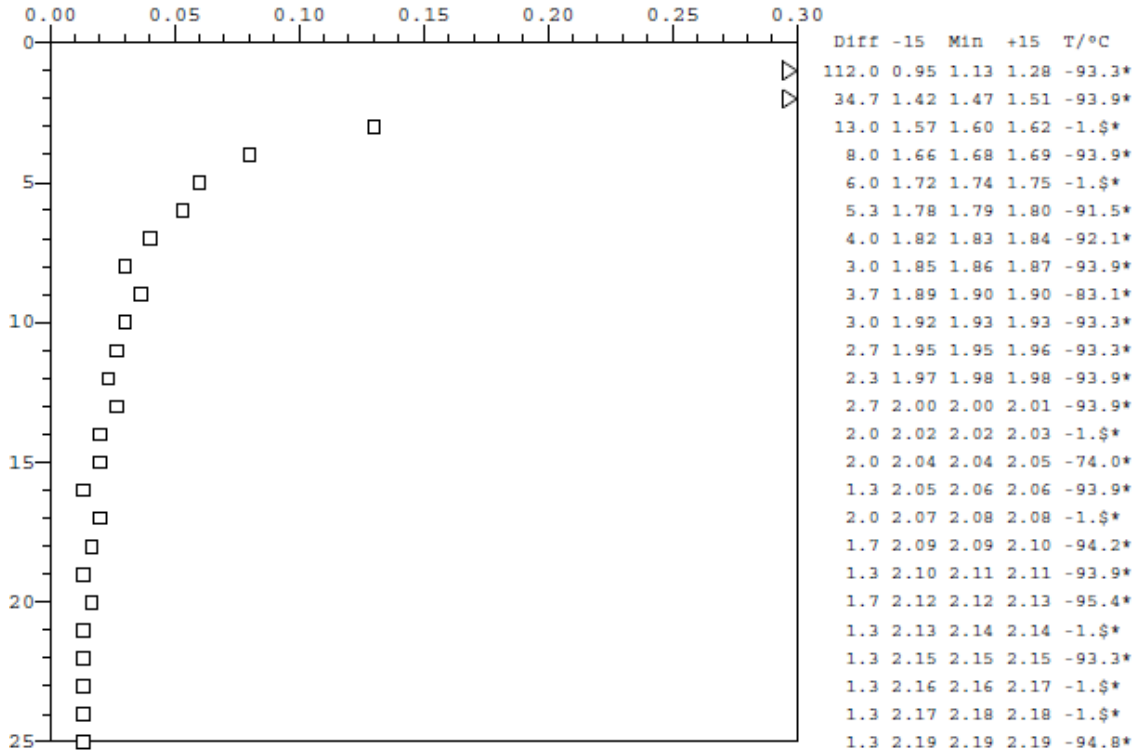


Massa 1 Ava-tulos 90 min.

Mortar <6mm : 67.4 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 4.4 % Sample volume : 20.0 cm³

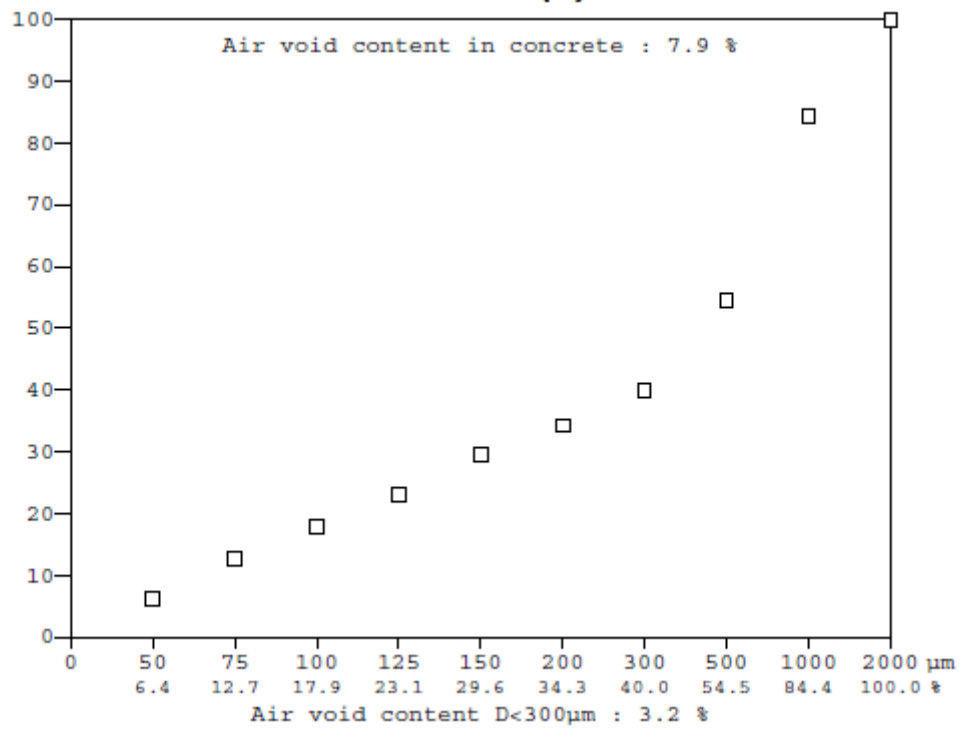
Analysis

Start:0.00g +5sec:0.03g +30sec:0.71g Temp:-1.5°C

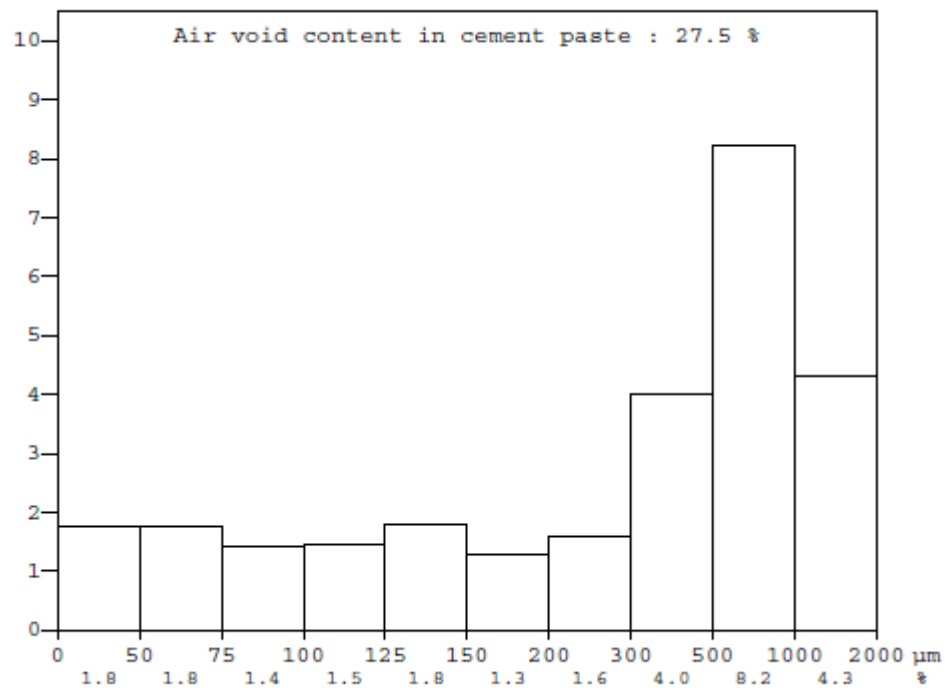
**Results (adjusted to correlate with ASTM C457)**

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 7.9 % 4.9 %
 Air-% paste : 27.7 % 17.3 %
 Air-% putty : 21.7 % 13.5 %
 Specific surface : 32.4 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.116 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

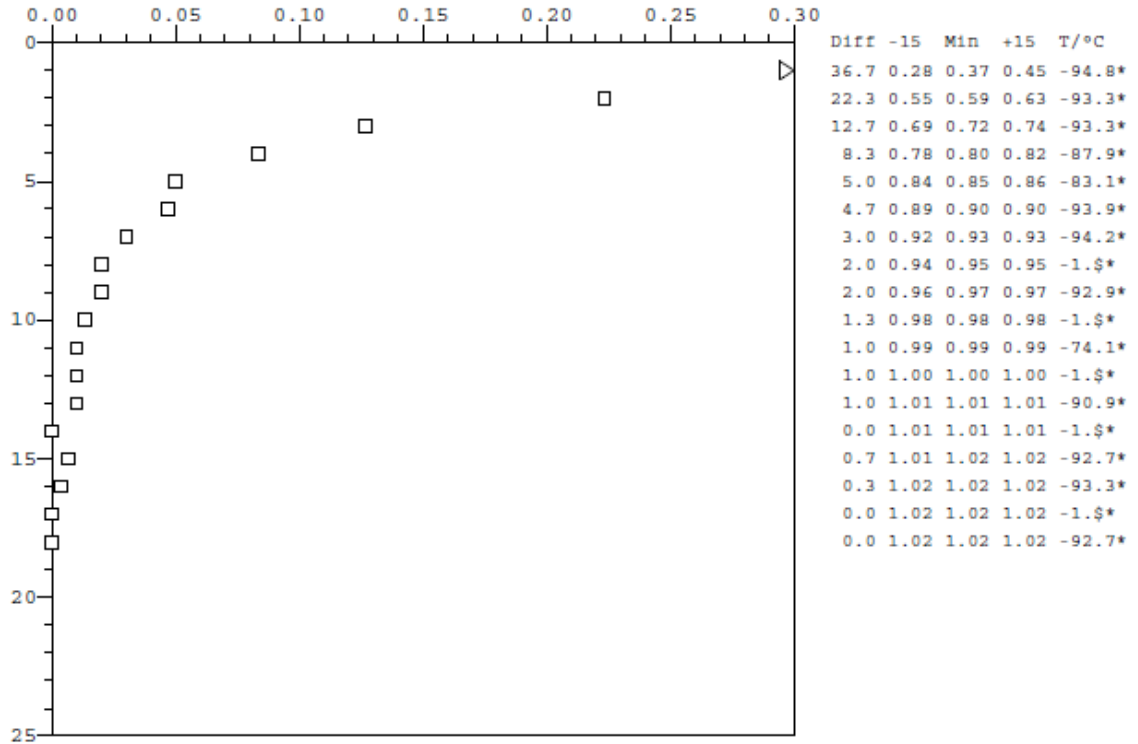


Massa 4 Ava-tulos 3 min.

Mortar <6mm : 65.8 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 5.4 % Sample volume : 20.0 cm³

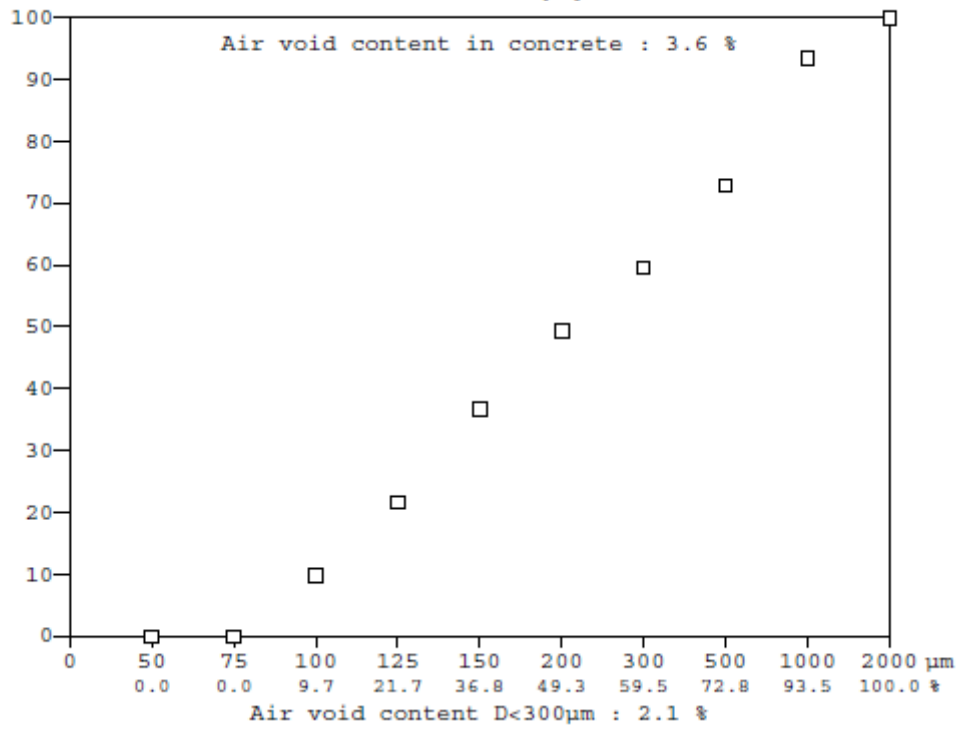
Analysis

Start:0.00g +5sec:0.00g +30sec:0.18g Temp:-74.6°C

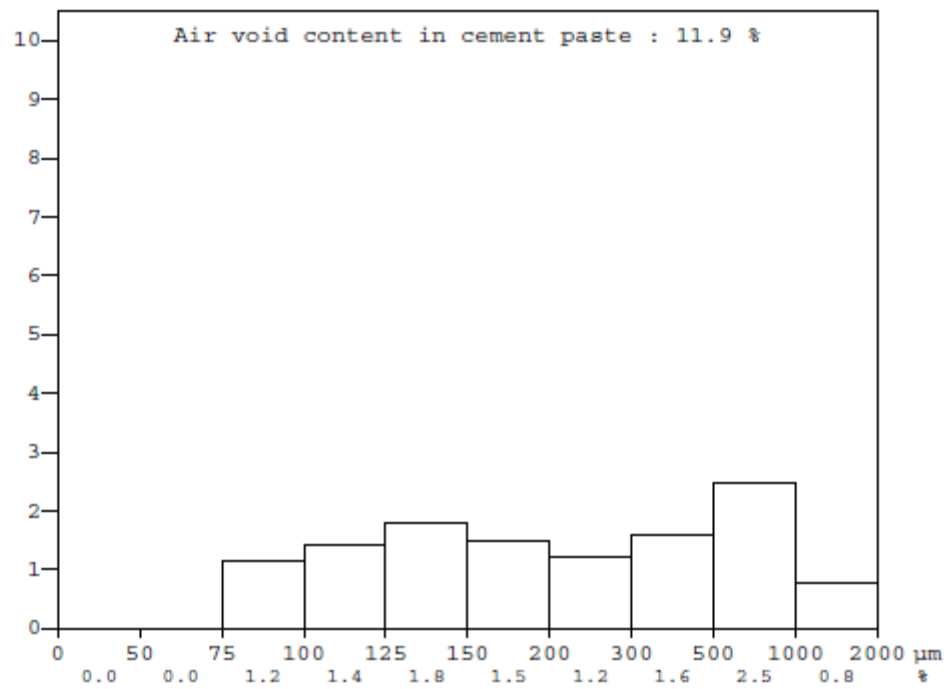
**Results (adjusted to correlate with ASTM C457)**

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 3.6 % 2.8 %
 Air-% paste : 11.9 % 9.2 %
 Air-% putty : 10.6 % 8.2 %
 Specific surface : 30.1 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.193 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

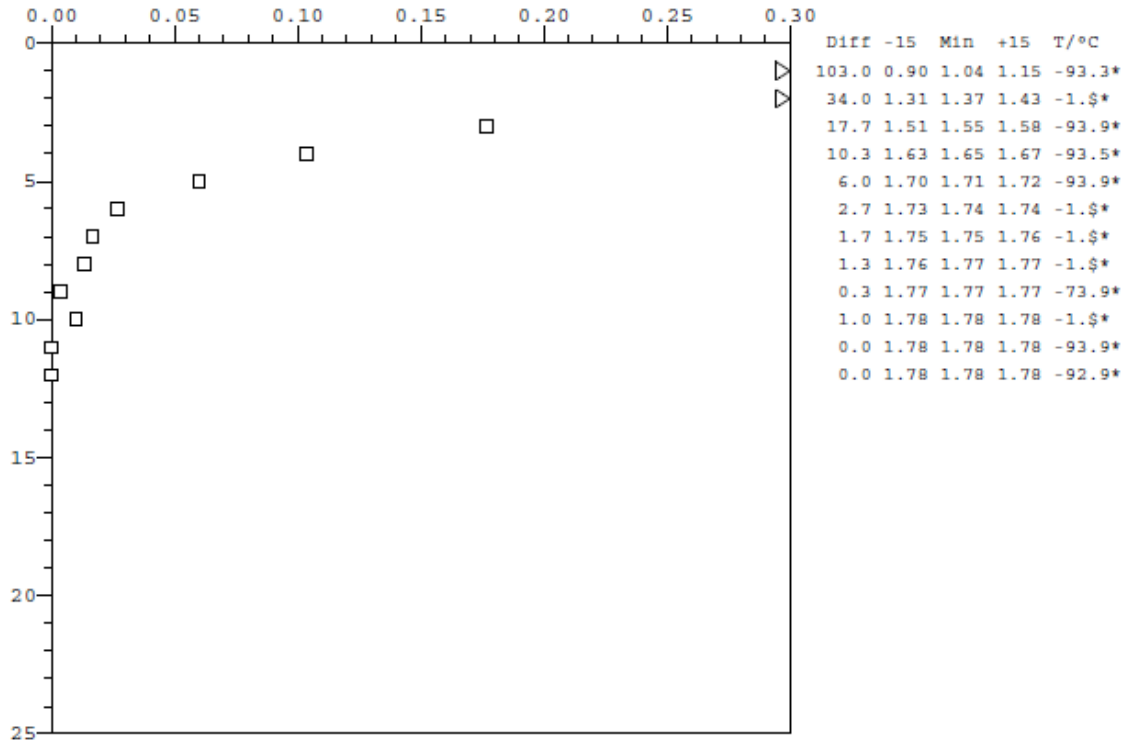


Massa 4 Ava-tulos 60 min.

Mortar <6mm : 65.8 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 5.6 % Sample volume : 20.0 cm³

Analysis

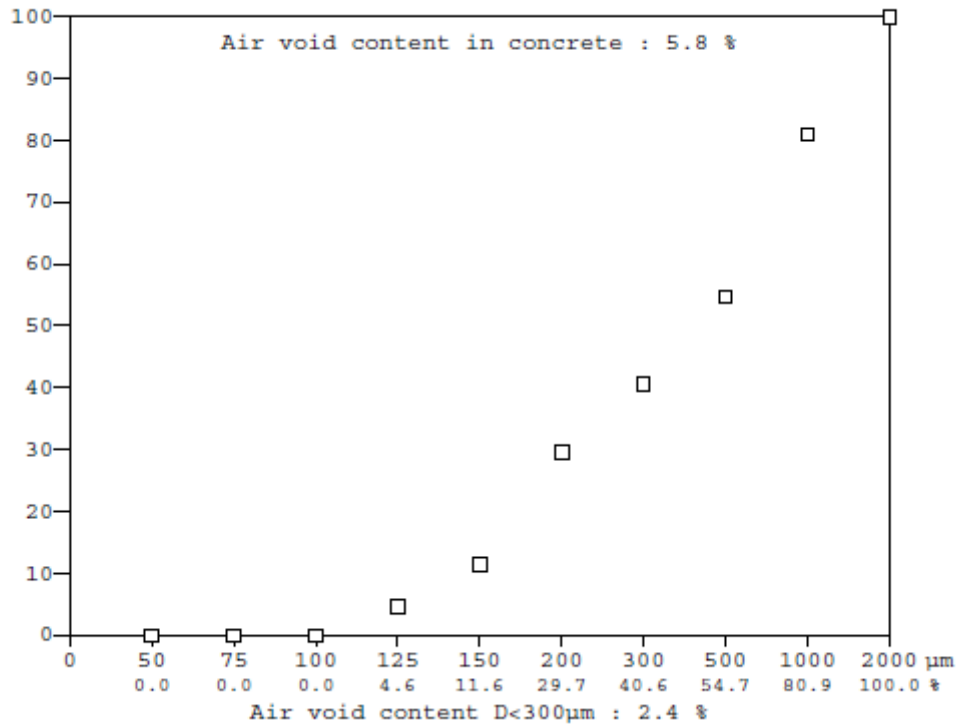
Start:0.00g +5sec:0.16g +30sec:0.72g Temp:-102.5°C



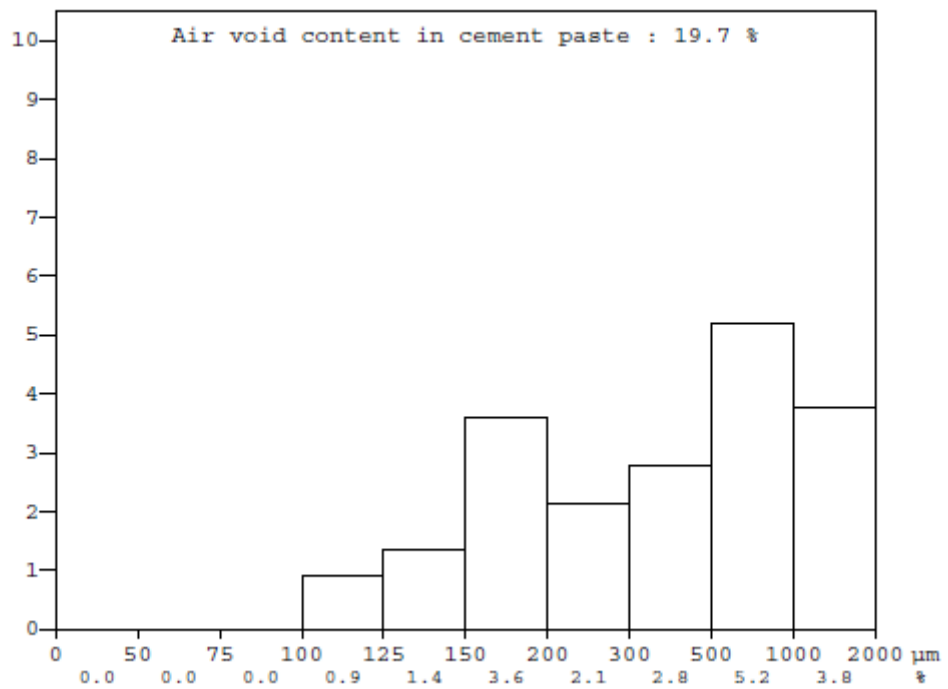
Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 6.1 % 3.5 %
 Air-% paste : 20.6 % 11.9 %
 Air-% putty : 17.1 % 9.9 %
 Specific surface : 19.6 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.234 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

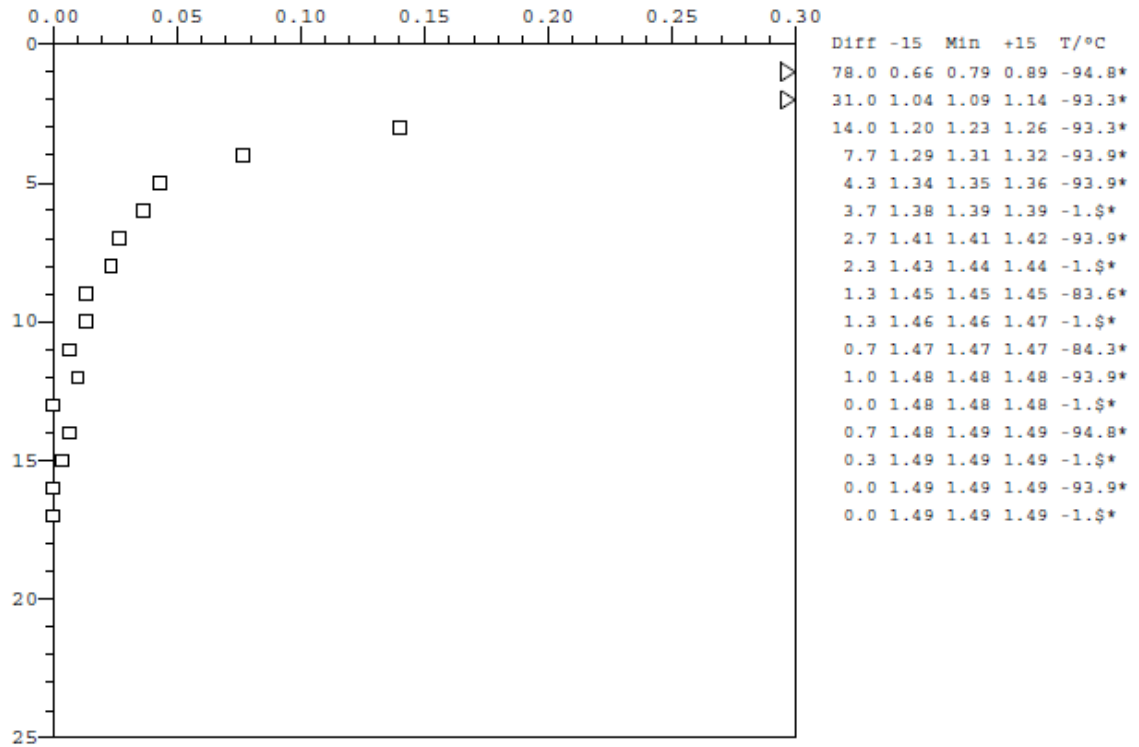


Massa 4 Ava-tulos 90 min.

Mortar <6mm : 65.8 % Paste : 29.7 %
 Expected air % : 5.3 % Sample volume : 20.0 cm³

Analysis

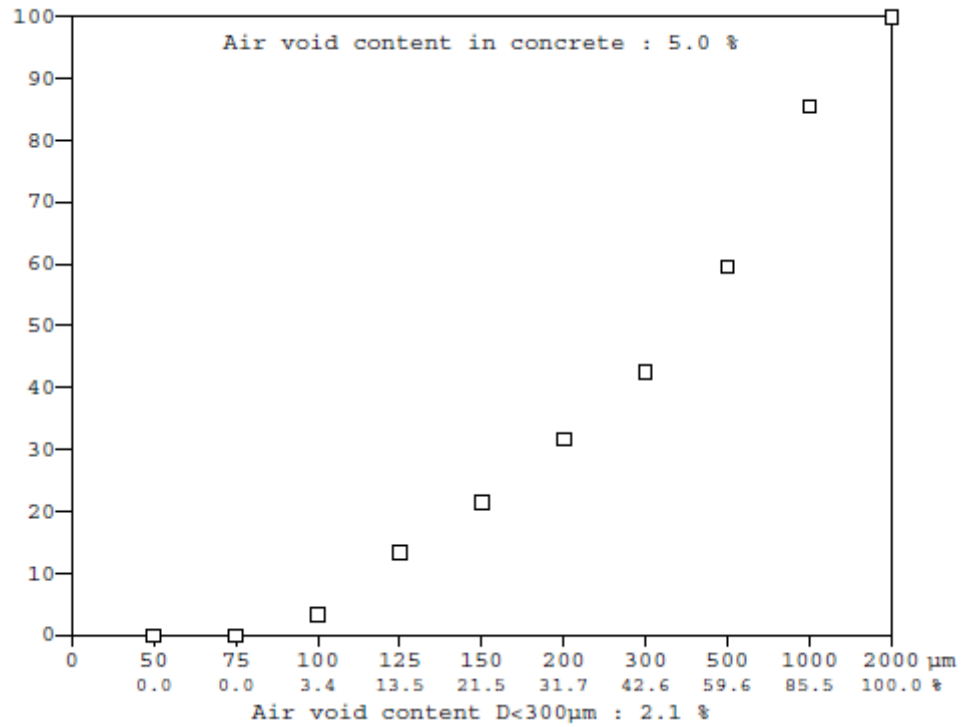
Start:0.00g +5sec:0.09g +30sec:0.50g Temp:-1.5°C



Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 5.1 % 3.2 %
 Air-% paste : 17.2 % 10.8 %
 Air-% putty : 14.7 % 9.2 %
 Specific surface : 22.5 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.220 mm

Distribution of air void content for voids < 2mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)

