

ÍNDEX

| | |
|--|----------|
| CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ | 1 |
| 1.1. Antecedents | 1 |
| 1.2. Objectius Generals | 3 |
| 1.3. Objectius Secundaris | 3 |
| 1.4. Metodologia | 3 |
| | |
| CAPÍTOL 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT | 5 |
| 2.1. Introducció | 5 |
| 2.2. El formigó projectat reforçat amb fibres | 6 |
| 2.2.1. Definició | 6 |
| 2.2.2. Revisió històrica | 6 |
| 2.2.3. Tipus de fibres | 7 |
| 2.2.4. Perquè del reforç amb fibres? | 9 |
| 2.2.5. Sistemes de projecció | 10 |
| 2.2.6. Components i dosificació | 12 |
| 2.2.7. Fabricació i posada en obra del formigó projectat per via humida | 16 |
| 2.2.8. Normatives pel formigó projectat | 20 |
| 2.2.9. Aplicacions | 23 |
| 2.3. El formigó projectat amb fibres metàl·liques | 25 |
| 2.3.1. Aspectes generals | 25 |
| 2.3.2. Tipus de fibres metàl·liques | 25 |
| 2.3.3. Propietats del formigó projectat amb fibres metàl·liques | 26 |
| 2.3.3.1. Resistència a compressió | 26 |
| 2.3.3.2. Resistència a flexió | 27 |
| 2.3.3.3. Resistència a l'impacte | 27 |
| 2.3.3.4. Tenacitat | 28 |
| 2.3.3.5. Adherència fibra-matriu | 28 |
| 2.3.3.6. Retracció | 29 |
| 2.3.3.7. Rebot | 29 |
| 2.3.4. Aplicacions del formigó projectat amb fibres metàl·liques | 30 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.4. | El formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques | 32 |
| 2.4.1. | Aspectes generals | 32 |
| 2.4.2. | Tipus de fibres sintètiques | 32 |
| 2.4.3. | Propietats del formigó projectat amb fibres sintètiques | 33 |
| 2.4.3.1. | Resistència a compressió | 33 |
| 2.4.3.2. | Resistència a flexió | 33 |
| 2.4.3.3. | Resistència a l'impacte | 34 |
| 2.4.3.4. | Tenacitat | 34 |
| 2.4.3.5. | Adherència fibra-matriu | 35 |
| 2.4.3.6. | Retracció | 36 |
| 2.4.3.7. | Rebot | 36 |
| 2.4.4. | Aplicacions del formigó projectat amb fibres sintètiques | 37 |
| CAPÍTOL 3. CAMPANYA EXPERIMENTAL | | 39 |
| 3.1. | Introducció | 39 |
| 3.2. | Planificació de la campanya experimental | 40 |
| 3.3. | Disseny de la mescla | 42 |
| 3.3.1. | Caracterització dels materials usats | 42 |
| 3.3.2. | Dosificació de la mescla | 46 |
| 3.3.3. | Assaigs complementaris | 47 |
| 3.4. | Execució i conservació de les mostres | 47 |
| 3.5. | Descripció dels assaigs | 52 |
| 3.5.1. | Assaigs sobre el formigó fresc | 52 |
| 3.5.1.1. | Determinació de la consistència | 52 |
| 3.5.1.2. | Determinació de la densitat en el formigó fresc | 53 |
| 3.5.1.3. | Número de fibres | 54 |
| 3.5.2. | Assaigs sobre el formigó endurit | 54 |
| 3.5.2.1. | Assaig de compressió simple | 54 |
| 3.5.2.2. | Determinació del mòdul d'elasticitat | 55 |
| 3.5.2.3. | Determinació de la porositat aparent | 57 |
| 3.5.2.4. | Retracció per assecat | 58 |
| 3.5.2.5. | Recompte del número de fibres metàl·liques | 60 |

| | |
|--|------------|
| 3.5.2.6. Assaigs de Tenacitat | 61 |
| 3.5.2.6.1. EFNARC Plate Bending Test | 61 |
| 3.5.2.6.2. Australian Round Determinate Plate Test | 63 |
| 3.5.2.6.3. Assaig de Biga | 66 |
| | |
| CAPÍTOL 4. RESULTATS I ANÀLISI | 69 |
| | |
| 4.1. Introducció | 69 |
| 4.2. Caracterització del formigó fresc | 70 |
| 4.2.1. Consistència | 70 |
| 4.2.2. Densitat del formigó fresc | 71 |
| 4.2.3. Número de fibres incorporades a la mescla | 71 |
| 4.3. Caracterització del formigó endurit | 73 |
| 4.3.1. Resultats dels assaigs a compressió simple | 73 |
| 4.3.2. Resultats de l'assaig de determinació del mòdul d'elasticitat | 74 |
| 4.3.3. Pes específic i porositat | 76 |
| 4.3.4. Retracció per assecat | 77 |
| 4.3.5. Número de fibres en la mescla | 79 |
| 4.4. Assaigs de tenacitat | 79 |
| 4.4.1. EFNARC Plate Bending Test | 79 |
| 4.4.2. Australian Round Determinate Plate Test | 90 |
| 4.4.3. Assaigs de Biga | 98 |
| | |
| CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES D'INVESTIGACIÓ | 104 |
| | |
| 5.1. Introducció | 104 |
| 5.2. Conclusions Generals | 105 |
| 5.3. Conclusions Específiques | 105 |
| 5.3.1. Relatives al disseny de la mescla i al procés de projecció | 105 |
| 5.3.2. Relatives a la caracterització del formigó projectat | 106 |
| 5.3.3. Relatives a l'estudi de la retracció pes assecat | 107 |
| 5.3.4. Relatives a la realització dels assaigs de placa | 107 |
| 5.4. Línies futures d'investigació | 108 |

REFERÈNCIES I BIBLIOGRAFIA **110**

Referències 110

Bibliografia 113

ANNEX DE RESULTATS **114**

| | |
|---|-----------|
| <u>ÍNDIX DE FIGURES</u> | 5 |
| CAPÍTOL 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT | 10 |
| | 11 |
| Figura 2.1. Esquema de projecció per via seca. | 17 |
| Figura 2.2. Esquema de projecció per via humida. | 18 |
| Figura 2.3. Esquema d'un equip de projecció. | 18 |
| Figura 2.4. Secció d'un broc d'injecció. | |
| Figura 2.5. Fotografia d'un robot de projecció. | |
| Figura 2.6. Procés de projecció. | |
| (a) Fotografia d'un operari projectant. | 19 |
| (b) Efectes d'una col·locació correcta i incorrecta de l'operari. | 26 |
| Figura 2.7. Geometries dels diferents tipus de fibres metàl·liques. | |
| Figura 2.8. Gràfics de Càrrega – Desplaçament sota càrregues dinàmiques per diferents formigons projectats. | 27 |
| | 28 |
| Figura 2.9. Càrrega – Deformació de les fibres metàl·liques versus el reforç amb malla. | 29 |
| Figura 2.10. Fotografies dels assaigs de retracció sobre plaques. | 30 |
| Figura 2.11. Influència de la geometria de la fibra en el rebot. | |
| Figura 2.12. Aplicacions del formigó projectat amb fibres metàl·liques. | |
| (a) Estabilització d'un talús mitjançant formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques. | |
| (b) Rehabilitació del Baker's Tunnel, Tenesse, EUA. | 31 |
| Figura 2.13. Gràfics Càrrega – Fletxa del South Africa Water Bed Test . | 35 |
| Figura 2.14. Canal Olímpic a Syned, revestit amb formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques. | 37 |
| Figura 2.15. Revestiment definitiu d'un túnel a Ontario, Canadà | 38 |

CAPÍTOL 3. CAMPANYA EXPERIMENTAL 39

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 3.1. | Fotografies dels dos tipus de fibra utilitzades. (a) Vista comparativa de les dues fibres, metàl·lica i sintètica respectivament. (b) Aspecte de les noves fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic. | 45 |
| Figura 3.2. | Mesura de la consistència del formigó fresc. | 48 |
| Figura 3.3. | Equip de projecció utilitzat. | 48 |
| Figura 3.4. | Tipus de motlles utilitzats durant la projecció. | 49 |
| Figura 3.5. | Imatges de la projecció. (a) Projecció dels plafons. (b) Procés d'arrenjament superficial. | 50 |
| Figura 3.6. | Procés d'extracció de provetes. (a) Màquina perforadora. (b) Esquema final d'extracció de provetes. | 51 |
| Figura 3.7. | Sistema d'anells per la determinació del mòdul d'elasticitat. (a) Detall de la col·locació dels lvdts. (b) Posició dels anells durant l'assaig. | 56 |
| Figura 3.8. | Rellotge comparador per mesurar la retracció en proveta. | 59 |
| Figura 3.9. | Fotografia i esquema de la maquinària d'assaig del EFNARC Plate Bending Test. | 62 |
| Figura 3.10. | Fotografia i esquema maquinària RDP Test. (a) Vista general del bastidor. (b) Sensor de desplaçaments (c) Vista del plat de càrrega (d) Detall de les bases piramidals (e) Esquema del bastidor. | 65 |
| Figura 3.11. | Placa de FPFS preparada per a ser assajada. | 66 |
| Figura 3.12. | Fotografia d'una biga preparada per ser assajada. | 67 |
| Figura 3.13. | Detall de la col·locació de l'element de mesura de fletxes. | 67 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTOL 4. RESULTATS I ANÀLISI | 69 |
| Figura 4.1. Valors de l'assentament del tres tipus de formigó. | 70 |
| Figura 4.2. Resultats de l'assaig de recompte de fibres. | 72 |
| Figura 4.3. Evolució de la resistència a compressió simple. | 73 |
| Figura 4.4. Variació del mòdul d'elasticitat a 28 i 120 dies. | 75 |
| Figura 4.5. Evolució de la retracció per assecat. | 77 |
| Figura 4.6. Evolució de la pèrdua de pes durant el període de mesura de la retracció per assecat | 78 |
| Figura 4.7.a Corba Càrrega – Fletxa del punt central de les plaques de fibres metàl·liques i evolució de l'energia absorbida – Fletxa del punt central. EFNARC Plate Bending Test. | 81 |
| Figura 4.7. b Corba Càrrega – Fletxa del punt central de les plaques de fibres sintètiques polimèriques i evolució de l'energia absorbida – Fletxa del punt central. EFNARC Plate Bending Test. | 82 |
| Figura 4.7. c Corba Càrrega – Fletxa del punt central de les plaques de control i evolució de l'energia absorbida – Fletxa del punt central. EFNARC Plate Bending Test. | 82 |
| Figura 4.8. Estat de les plaques després de l'assaig. EFNARC Plate Bending Test. (a) Placa de formigó projectat de control (CTRL-p2). (b) Placa de FPFM. | 83 |
| Figura 4.9. Evolució del paràmetre d'energia relativa durant l'assaig EFNARC. | 84 |
| Figura 4.10. Relació entre la càrrega a diferents fletxes del punt central i la càrrega màxima de hardening. | 85 |
| Figura 4.11. Fotografia on s'observa la deformació soferta per la placa durant l'assaig. | 87 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 4.12. | Vista de les cares inferiors de les plaques. | |
| | (a) CTRL – p1. | |
| | (b) CTRL – p2. | |
| | (c) CTRL – p3. | |
| | (d) FPFS – p1. | |
| | (e) FPFS – p2. | |
| | (f) FPFS – p3. | |
| | (g) FPFM – p1. | |
| | (h) FPFM – p2. | |
| | (i) FPFM – p3. | 89 |
| Figura 4.13. | Corbes Càrrega – Fletxa del punt central i Energia Absorbida – Fletxa del punt central de les plaques de FPFM. RDP Test. | 91 |
| Figura 4.14. | Corbes Càrrega – Fletxa del punt central i Energia Absorbida – Fletxa del punt central de les plaques de FPFS. RDP Test. | 92 |
| Figura 4.15. | Corbes Càrrega – Fletxa del punt central i Energia Absorbida – Fletxa del punt central de les plaques de CTRL. RDP Test. | 92 |
| Figura 4.16. | Estat de les plaques un cop acabat l’assaig. RDP Test. | |
| | (a) Placa de formigó de control. | |
| | (b) Placa de formigó reforçat amb fibres sintètiques. | 94 |
| Figura 4.17. | Evolució de la tenacitat. RDP Test. | 95 |
| Figura 4.18. | Relació entre la càrrega a determinades fletxes del punt central i la càrrega de hardening. | 95 |
| Figura 4.19. | Vista de les cares inferiors de les plaques. | |
| | (a) CTRL – p1. | |
| | (b) CTRL – p2. | |
| | (c) CTRL – p3. | |
| | (d) FPFS – p1. | |
| | (e) FPFS – p2. | |
| | (f) FPFS – p3. | 97 |
| | (g) FPFM – p1. | |
| | (h) FPFM – p2. | |
| | (i) FPFM – p3. | 98 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura 4.20.a | Corbes Càrrega – Fletxa del punt Central i Corba Energia absorbida – Fletxa del punt Central per al FPFM. Assaigs de Biga. | 99 |
| Figura 4.20.b | Corbes Càrrega – Fletxa del punt Central i Corba Energia absorbida – Fletxa del punt Central per al FPFS. Assaigs de Biga. | 100 |
| Figura 4.21. | Evolució de la tenacitat. Assaig de biga. | 102 |
| Figura 4.22. | Relació entre la càrrega a determinades fletxes del punt central i la càrrega de hardening. | 103 |

ÍNDEX DE TAULES

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTOL 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT | 5 |
| Taula 2.1. Tipus de fibres i propietats. | 8 |
| Taula 2.2. Principals diferències entre el procés per via seca i el procés per via humida. | 12 |
| Taula 2.3. Fus granulomètric recomanat per l'EFNARC. | 13 |
| Taula 2.4. Fus granulomètric recomanat per l' ASCE. | 13 |
| Taula 2.5. Variables per la dosificació pel procés per via humida. | 16 |
| Taula 2.6. Variables durant el procés d'execució. | 19 |
| Taula 2.7. Valors de Pull-Out Strength. | 28 |
| Taula 2.8. Resultats de resistència a compressió de la investigació de Morgan et al. (1999). | 33 |
| Taula 2.9. Taula de l'EFNARC per classificar el formigó projectat en funció de la seva tenacitat. | 35 |
| CAPÍTOL 3. CAMPANYA EXPERIMENTAL | 39 |
| Taula 3.1. Planificació dels assaigs previstos a la campanya experimental. | 41 |
| Taula 3.2. Dades tècniques MEYCO MS 610. | 43 |
| Taula 3.3. Granulometries dels àrids. | 43 |
| Taula 3.4. Pesos específics dels àrids. | 44 |
| Taula 3.5. Dades tècniques de l'aditiu superfluidificant. | 44 |
| Taula 3.6. Característiques de les fibres. | 45 |
| Taula 3.7. Dosificació teòrica de partida dels formigons a fabricar. | 46 |
| Taula 3.8. Dosificacions reals dels formigons fabricats. | 48 |
| CAPÍTOL 4. RESULTATS I ANÀLISI | 69 |
| Taula 4.1. Valors de densitat del formigó fresc. | 71 |
| Taula 4.2. Resultats dels assaigs de compressió simple. | 74 |
| Taula 4.3. Valors del mòdul d'elasticitat a 28 i 120 dies. | 75 |
| Taula 4.4. Estimació mòdul d'elasticitat segons EHE. | 76 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Taula 4.5. | Densitats i porositat a 28 dies. | 76 |
| Taula 4.6. | Valors de la pèrdua de pes en proveta. | 78 |
| Taula 4.7. | Número de fibres metàl·liques en proveta. | 79 |
| Taula 4.8. | Valors d'Energia Absorbida a una fletxa del punt central de 25 mm. EFNARC Plate Bending Test. | 80 |
| Taula 4.9. | Valors de Càrrega màxima i Fletxa del punt central a l'assaig de placa EFNARC Plate Bending Test. | 83 |
| Taula 4.10. | Valors dels índexs de tenacitat per als formigons projectats amb fibres. EFNARC Plate Bending Test. | 84 |
| Taula 4.11. | Resultats principals de l'assaig de placa EFNARC Plate Bending Test. | 85 |
| Taula 4.12. | Valors de la càrrega en la primera fissura. EFNARC Plate Bending Test. | 86 |
| Taula 4.13. | Relacions entre la càrrega de fissuració i la fletxa en el punt central. EFNARC Plate Bending Test. | 86 |
| Taula 4.14. | Número de fissures de cada una de las plaques. EFNARC Plate Bending Test. | 88 |
| Taula 4.15. | Energia absorbida a l'assaig RDP Test. | 90 |
| Taula 4.16. | Valors de la càrrega màxima i de la fletxa del punt central associada. RDP Test. | 93 |
| Taula 4.17. | Valors dels índexs de tenacitat. RDP Test. | 94 |
| Taula 4.18. | Relació entre la càrrega a determinades fletxes del punt central i la càrrega de hardening. RDP Test. | 95 |
| Taula 4.19. | Comptatge del número de fibres a les superfícies de ruptura. RDP Test. | 96 |
| Taula 4.20. | Valors d'energia absorbida a l'assaig de biga. | 98 |
| Taula 4.21. | Caigudes de càrrega associats a la primera fissura. Assaig de biga. | 100 |
| Taula 4.22. | Valors de Resistència a flexotracció. Assaig de Biga. | 101 |
| Taula 4.23. | Valors del Índexs de tenacitat. Assaig de biga. | 102 |
| Taula 4.24. | Relació entre la càrrega a diferents valors de fletxa del punt central i la càrrega de hardening. | 103 |