

CAPÍTOL 2

ESTAT DEL CONEIXEMENT

2.1. INTRODUCCIÓ

Aquest capítol pretén donar un repàs general dels aspectes més rellevants que incideixen en el formigó projectat reforçat amb fibres, mostrant un especial interès en el procés denominat per via humida, mètode de projecció utilitzat en el desenvolupament d'aquesta tesina.

Primerament, es presenta un apartat on es desenvolupen, des d'un punt de vista generalista, una sèrie d'aspectes bàsics en l'àmbit del formigó projectat reforçat amb fibres, començant per una breu revisió històrica. Seguidament es presenten les raons per les que es continua avançant en el desenvolupament del reforç del formigó projectat mitjançant l'ús de fibres, així com els principals tipus d'aquestes en l'àmbit de la construcció. Amb l'objectiu de seguir profunditzant en el coneixement del formigó projectat es descriuen els principals components de la mescla, sistemes de posada en obra, i es fa un breu repàs sobre les normatives existents. Finalment, amb la intenció de donar una visió global de la potencialitat del formigó projectat, es descriuen les principals aplicacions d'aquest.

En segon lloc, es presenta un repàs del formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques. La importància d'aquest tipus de fibres en l'àmbit de les aplicacions en enginyeria del formigó projectat fa inevitable que, qualsevol estudi d'un nou tipus de fibra tingui com a punt de referència les fibres metàl·liques. Per tant, es resumeixen les principals propietats d'aquest tipus de fibra, així com les seves aplicacions habituals.

Finalment, es descriu el panorama actual dins del camp del formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques, per tal d'assentar les bases per estudiar la influència de la incorporació d'un nou tipus de fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic en el formigó projectat per via humida.

2.2. EL FORMIGÓ PROJECTAT REFORÇAT AMB FIBRES

2.2.1. Definició

El formigó projectat reforçat amb fibres pot definir-se com un morter o formigó al que se li han afegit una sèrie d'elements discrets i discontinus, transportat a través d'una mànega i projectat neumàticament a gran velocitat sobre una superfície. Si el tamany màxim de l'àrid és inferior a 8 mm, aquest es coneix com a morter projectat o gunita, i si és superior, es coneix com a formigó projectat.

2.2.2. Revisió històrica

El naixement del formigó projectat va anar directament relacionat amb l'establiment d'importantes empreses de la branca de l'acer a Lehigh Valley a l'est de Pensilvània a principis del segle XX. La "Lehigh Portland Cement Company" es va fundar a Allentown al 1897, zona on el suport de diferents negocis i professions, així com la "Lehigh University", van subministrar les eines necessàries per l'evolució de la producció del ciment i de l'acer. Així doncs, el desenvolupament tant del procés de gunitat com de la màquina coneguda com a "Cement Gun" a Allentown no va ser una coincidència. L'interès en nous mètodes de construcció amb formigó i el disseny d'una màquina comercial viable per aplicar materials va concretar-se en una nova màquina inventada per Carl K. Akely i presentada al mercat de la construcció al "Cement Show" de Nova York el desembre de 1910.

La "Cement Gun Company" va esdevenir en només cinc anys una de les més importants organitzacions constructores amb nombrosos projectes basats en l'aplicació de la nova tècnica, estenent el seu ús per tot el territori nord-americà, però no va ser fins a la fundació de la "UK Cement Gun Company" al 1915 que el formigó projectat va introduir-se a Europa.

L'ús d'aquest nou mètode constructiu va estendre's arreu del món durant les tres següents dècades, generalitzant-se el seu coneixement en més d'un centenar de països, durant els quals els avanços tecnològics i d'investigació milloraven dia a dia la qualitat dels resultats obtinguts.

A principis de la dècada dels 50 va començar una època de crisis al sector a causa de l'especulació econòmica i el procés de gunitat va perdre la credibilitat i qualitat que el va caracteritzar durant els seus primers 40 anys de vida. Tot i així, es van continuar desenvolupant noves màquines productives i senzilles d'usar, i l'aplicació del procés de gunitat es va seguir utilitzant en molts projectes constructius.

Les innovacions en maquinària durant els últims anys de la dècada dels 70 i molt especialment, el desenvolupament de la química aplicada al sector, van començar a

canviar la tendència dels últims vint anys. Un nou terme, “shotcrete”, es va introduir per definir la nova metodologia que començava a aplicar-se amb la intenció de diferenciar-la de la utilitzada fins aleshores. No va ser fins que l’ACI (American Concrete Institute) va definir el “shotcrete” com morter o formigó aplicat neumàticament tant pel procés de via seca o via humida, que es va generalitzar aquesta nomenclatura, evitant la confusió que predominava en aquells moments.

La nova tecnologia del formigó, incloent tant els accelerants químics com les noves addicions suplementàries (com el fum de sílice o l’ús de fibres), va passar a formar part de les dues metodologies de projecció (via seca i via humida), augmentant la versatilitat en el disseny de la mescla així com una major flexibilitat en les possibles aplicacions del procés de gunitat.

El reforç del formigó projectat usat durant els primers 50 anys de vida era l’acer convencional o la malla, i no va ser fins a principis de la dècada dels 70 quan la companyia americana “Batelle Research Corporation” va començar a desenvolupar el concepte de formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques. La primera aplicació pràctica de les fibres metàl·liques la van dur a terme la “US Army Corps of Engineers” usant el mètode de projecció per via seca per establir un talús.

Al mateix temps, i de manera experimental, es començava a treballar amb un nou tipus de fibres sintètiques orgàniques que no van ser introduïdes comercialment fins la dècada dels 80, tot i que no va ser fins l’aparició de les noves generacions de fibres sintètiques als 90 quan es va generalitzar el seu ús en projectes constructius.

L’extensió de l’ús de les fibres, tant metàl·liques com sintètiques, ha crescut mundialment fins al punt en què països com Noruega, on la tècnica del formigó projectat està molt desenvolupada, el 70% del volum de formigó projectat col·locat va reforçat amb fibres. Això demostra els avantatges que el seu ús proporciona en determinats projectes davant el reforç amb malla i obra la porta a la investigació sobre noves innovacions associades al reforçament amb fibres.

2.2.3. Tipus de fibres

Existeixen diferents tipus de fibres que s’utilitzen per reforçar morters o formigons. Un paràmetre usat per caracteritzar-les és la “relació d’aspecte”, definit com el quocient entre la llargada de la fibra i el diàmetre o diàmetre equivalent. Els valors habituals per aquest paràmetre van des de 30 fins a 150 per longituds de fibra de 6.4 a 76mm segons el publicat per l’ACI Committee 506 (1984).

Les fibres poden ser:

- Sintètiques orgàniques: com són les de propilè o el carbó.
- Sintètiques inorgàniques: com són les d’acer o vidre.
- Naturals orgàniques: com són la cel·lulosa o el sisal.
- Naturals inorgàniques: com és l’amiant.

Presentem a la taula 2.1 els diferents tipus de fibres i les seves propietats principals.

Fibre Type	Diameter (mm)	Specific Gravity	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain at Failure (%)
Steel					
High tensile	0.1 – 1.0	7.80	200000	345 – 1725	3.5
Stainless	0.01 – 0.33	7.80	160000	2075	3.0
Glass					
E	0.01	2.50	72000	3450	4.8
Alkali resistant	0.0125	2.70	80000	3500	3.6
Polimeric					
Polypropylene					
Monofilament	0.1 – 0.2	0.9	5000	450	18
Fibrillated	0.5 – 4.0	0.9	3500	550 – 750	8
Polyethylene	0.025 – 1.0	0.96	5000 – 175000	200 – 3000	3 – 80
Polyester	0.01 – 0.075	1.38	10000 – 17500	550 – 1200	10 – 50
Acrylic	0.005 – 0.018	1.18	18000	200 – 1000	28 – 50
Aramid					
Kevlar 29	0.012	1.44	62000	3600	3.6
Kevlar 49	0.01	1.44	118000	3600	2.5
Glass					
Crocidolite	0.0001 – 0.02	3.4	196000	200 – 1800	2 – 3
Chrysotile	0.00002 – 0.03	2.6	165000	3450	2 – 3
Carbon					
I High modulus	0.0075	1.9	380000	1800	0.5 – 0.7
II High strength	0.009	1.9	230000	2600	1.0 – 1.5
Natural					
Wood cellulose	0.02 - 0.12	1.50	10000 - 40000	300 - 900	**
Sisal	< 0.2	**	13000 - 26000	280 – 560	3 - 5
Coir	0.1 – 0.4	1.12 – 1.15	19000 – 26000	120 – 200	10 – 25
Bamboo	0.05 - 0.4	1.50	33000 – 40000	350 – 500	**
Jute	0.1 – 0.2	1.02 – 1.04	26000 - 32000	250 – 350	1.5 – 1.9
Akwara	1.0 – 4.0	0.96	525 - 3200	**	**
Elephant grass	0.425	**	5000	180	3.6

Taula 2.1. Tipus de fibres i propietats; presentada per Daniel (1993).

En l'àmbit del formigó projectat, els tipus de fibres utilitzats en projectes està més acotat, i tot i que la recerca de nous materials potencialment aplicables continua dia a dia, l'absoluta autoritat de les fibres metàl·liques és indiscutible.

2.2.4. Perquè del reforç amb fibres ?

El concepte de reforç del formigó projectat amb una sèrie d'elements discontinus i discrets va desenvolupar-se a inicis de la dècada dels 70 als Estats Units. La presència de les fibres de reforç modifica les propietats de la matriu original mitjançant dos efectes importants com són, la millora de les propietats resistents davant de qualsevol tipus de sol·licitació que indueixi tensions de tracció al formigó, i la millora de la capacitat de deformació i control del procés en una matriu fràgil.

L'addició de fibres al formigó millora les propietats del material pel què fa a la ductilitat, tenacitat, resistència a flexió, resistència a l'impacte, resistència a la fatiga i la resistència a compressió. La millora de les propietats va directament relacionada amb el tipus, mida, geometria i quantitat de fibres incorporades a la mescla.

Les fibres controlen el procés de fissuració no tant en el seu inici sinó en el seu desenvolupament posterior, treballant com a elements de cosit de les fissures, permeten una transmissió d'esforços que proporciona al material una resistència addicional.

Les diferències que aquest reforç presenta respecte els reforços convencionals de barres d'acer són varies, i les presentem a continuació:

- Les fibres es distribueixen uniformement a tota la secció transversal, convertint el material en isòtrop i homogeni, amb un comportament igual en les tres direccions. A causa d'aquestes propietats, el formigó reforçat amb fibres és ideal per aplicacions de càrrega no puntuals.
- Eviten els problemes de compactació a l'ombra de les barres d'acer convencional, que a la llarga impliquen problemes de durabilitat del material.
- Les fibres són de menor diàmetre i es situen més pròximes entre si que no pas les barres d'acer de reforç.
- La utilització de fibres permet la construcció d'estructures molt més esveltes, on els requeriments de recobriment en el formigó convencional implicaven la necessitat d'espessors majors als estructuralment necessaris. Un exemple d'això són les construccions de cúpules i cobertes d'espessors propers als 10 centímetres.
- Representa un estalvi econòmic important en ma d'obra, doncs les fibres s'incorporen com un agregat més a la mescla, evitant així els processos de ferrallat típics d'obres convencionals. Així mateix representen un estalvi de temps, important en aplicacions com el sosteniment d'obres subterrànies.

- L'addició de fibres redueix els problemes de retracció plàstica del formigó projectat, aspecte en el que l'efecte del reforç amb barres és encara un tema en discussió.

2.2.5. Sistemes de projecció

Es diferencien dos sistemes de projecció que es coneixen com procés per *via seca* i procés per *via humida*. Ambdós sistemes s'apliquen actualment en els projectes constructius on s'usa formigó projectat i tot i que històricament el procés per via seca ha estat el mètode més utilitzat, els avanços en el desenvolupament d'equips neumàtics durant la dècada dels 60 van aconseguir que el mètode per via humida fos practicable, arribant a nivells d'utilització superiors als del procés per via seca.

- *Via seca*: el procés per via seca es caracteritza principalment perquè l'aigua de la mescla s'introdueix al broc d'injecció, controlada per l'operari. El ciment i l'arena es mesclen en sec i s'emmagatzemen en un recipient mecànic pressuritzat anomenat llançador. Mitjançant una roda alimentadora la mescla s'introdueix en una mànega de descàrrega on es transporta per aire comprimit fins a un broc d'injecció especial, on s'addiciona l'aigua per hidratar el ciment amb un dosificador paral·lel.

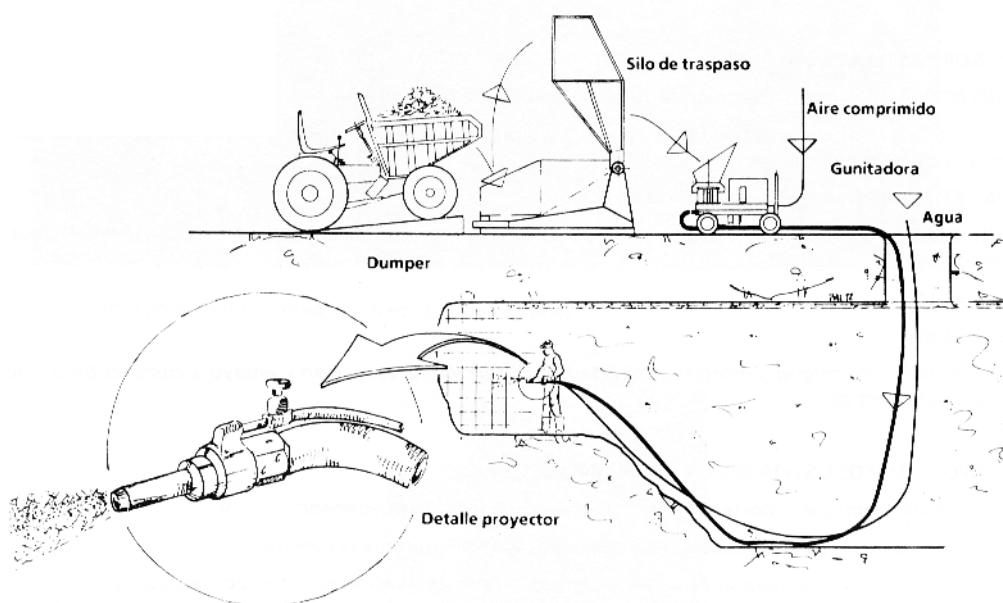


Figura 2.1. Esquema de projecció per via seca. AENOR (1998).

- *Via humida*: el procés per via humida es caracteritza principalment perquè el material que s'aboca a la tolva de recepció ja és formigó mesclat prèviament com si es tractés de formigó convencional. El formigó es transporta per una mànega fins al broc d'injecció mitjançant una bomba de formigó (moviment de pistó) i és al broc d'injecció on s'hi afegeix l'aire a pressió per projectar el formigó a la velocitat adequada.

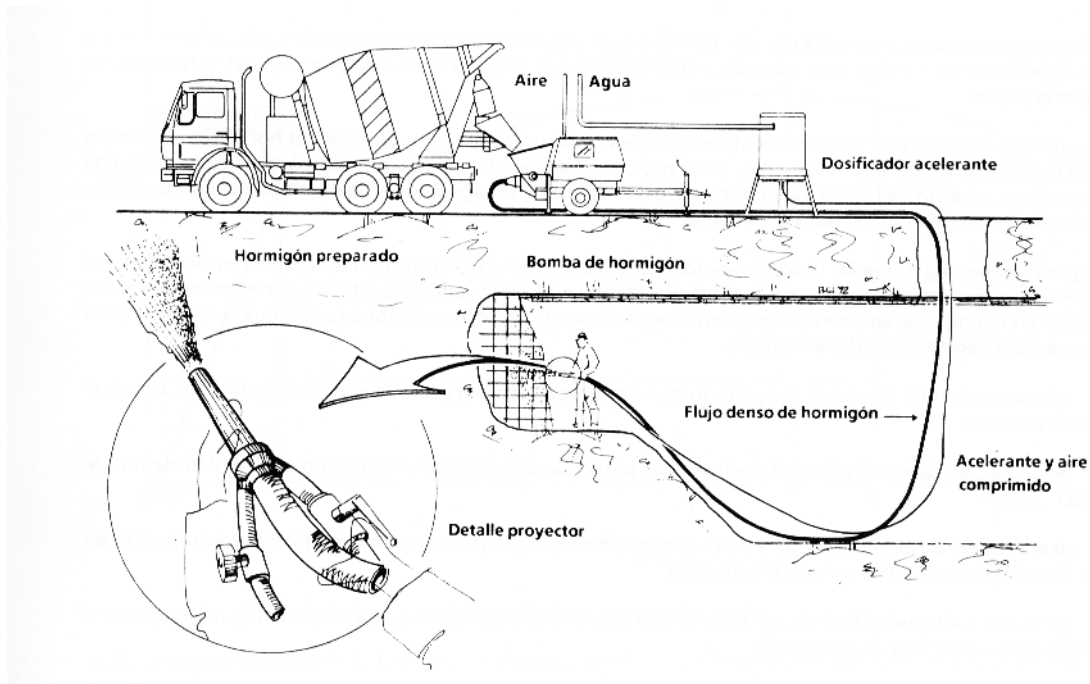


Figura 2.2. Esquema de projecció per via humida. AENOR (1998).

En els últims anys, i amb l'objectiu d'ampliar el rang d'aplicació dels processos de projecció, s'han desenvolupat modificacions en els equips que han donat lloc al que molts constructors anomenen *tercera via* o *via semi-humida*, que es caracteritza per donar un cert grau d'humitat als àrids, al voltant del 2 – 3 %, addicionant la resta de l'aigua al broc d'injecció. Així s'aconsegueix reduir la producció de pols, un dels grans problemes del procés per *via seca*, millorant les condicions ambientals de treball.

El formigó projectat resultant de l'aplicació de cada un dels processos presenta importants diferències, tot i que podem obtenir el formigó projectat apropiat per cada aplicació amb qualsevol dels dos processos. Alguns factors com el cost de l'equipament i el seu manteniment, les característiques de la superfície a aplicar i la qualitat del producte, poden fer que un dels processos resulti més atractiu per determinades aplicacions.

1. L'adherència del formigó projectat amb els materials existents és millor generalment en el procés per via seca, tot i que ambdós processos presenten millors propietats d'adherència que el formigó convencional.
2. La producció amb el procés per via humida és 3 o 4 vegades superior a la obtinguda pel procés de via seca. En funció de l'aplicació, la producció pot ser significativament inferior a causa d'obstacles, el rebot, i altres aspectes que poden implicar retards en el procés de projecció.
3. El rebot per formigons projectats convencionals per via seca, i en les millors condicions possibles, no és mai inferior al 20%, que és significativament superior al que presenta el procés per via humida, amb les conseqüències econòmiques que aquest implica.

4. L'ús d'additius per retenir aire (AEA, air-entraining admixtures) només és viable en el procés per via humida, proporcionant resistència contra els cicles de gel – desgel.

Presentem a la taula 2.2 les principals diferències entre els dos processos:

<i>Via seca</i>	<i>Via humida</i>
Control de l'operador al broc d'injecció de l'aigua de mesclat segons les condicions de la superfície a projectar	Control de l'aigua de mesclat en planta i mesura del temps de mescla
Permet majors distàncies de l'equip al punt d'aplicació	Distància màxima entre l'equip i el punt d'aplicació de 30 metres
Baixa resistència a les gelades	Acceptable resistència a les gelades
Les interrupcions no retarden el procés en excés	Apropiat per aplicacions contínues
Baixa producció	Alta producció
Major rebot	Menor rebot
Menor cost de l'equip i manteniment	Major cost de l'equip i manteniment
Millors condicions d'adherència	Males condicions d'adherència, però superiors al formigó convencional
Pitjors condicions ambientals de treball	Millor ambient de treball a causa de la reducció de la producció de pols
Espessors elevats mitjançant varies aplicacions	Permet espessors majors en una sola aplicació

Taula 2.2. Principals diferències entre el procés per via seca i el procés per via humida.

2.2.6. Components i dosificació

Els components del formigó projectat són similars als normalment utilitzats en la fabricació del formigó convencional:

- *Ciment*: els requeriments són pràcticament els mateixos que en un formigó convencional, tot i que si el projecte requereix altes resistències inicials, és habitual l'ús de ciments portland tipus I amb categories 42.5 i 52.5 d'enduriment ràpid. Quan el risc d'atac per sulfats sigui potencialment important s'hauran d'usar ciments especials (SFR). El contingut de ciment en formigons projectats per via humida és de 400 a 500 kg/m³, necessaris per a un millor transport de la mescla.
- *Puzzolanes*: és habitual l'addició de puzzolanes al formigó projectat per la via humida per millorar la seva treballabilitat i bombejabilitat. Es produeix també

una millora en la resistència a l'atac dels sulfats i es redueix l'expansió causada per les reaccions àlcali – silicats.

- *Microsilice*: la seva addició millora la resistència i la durabilitat del formigó projectat. A causa de la seva extrema finura, aquest material omple els buits microscòpics entre les partícules cementícies reduint la permeabilitat i augmentant-ne la seva densitat. La seva addició ha d'anar acompanyada del ús de reductors d'aigua per aconseguir bones condicions de treballabilitat sense necessitat de modificar la relació aigua – ciment.
- *Àrids*: com en el formigó convencional, són l'element de major volum i pes dels que intervenen en la fabricació del formigó projectat. En el formigó projectat per via humida s'usen tradicionalment àrids de tamany màxim de 12mm, tot i que en es pot usar un tamany màxim de 8 mm amb l'objectiu de reduir el rebot. S'han de considerar aspectes com el rebot potencial, l'adherència entre capes, la naturalesa del material i la granulometria. Presentem dues granulometries a mode d'orientació:

○ EFNARC:

Tamís	Percentatge que passa	
	Mín. %	Màx. %
0,125	4	12
0,250	11	26
0,500	22	50
1,000	37	72
2,000	55	90
4,000	73	100
8,000	90	100
16,00	100	100

Taula 2.3. Fus granulomètric recomanat per l'EFNARC (1999).

○ ASCE:

- Fus 1: granulometria usada en el cas de morters projectats.
- Fus 2: granulometria usada en el cas de formigons projectats convencionals.

Tamís	Percentatge que passa	
	Fus 1 (%)	Fus 2 (%)
¾ - inch	-	-
½ - inch	-	100
3/8 - inch	100	90-100
0.19 inch (No. 4)	95-100	70-85
0.093 inch (No. 8)	80-100	50-70
0.046 inch (No. 16)	50-85	35-55
0.024 inch (No. 30)	25-60	20-35
0.012 inch (No. 50)	10-30	8-20
0.006 inch (No. 100)	2-10	2-10

Taula 2.4. Fus Granulomètric recomanat per l'ASCE (1996).

- *Aigua*: sempre que sigui possible s'utilitzarà aigua de mesclat potable, però si no és possible s'assajarà la seva compatibilitat química. L'aigua haurà d'estar lliure de qualsevol substància que pugui perjudicar al formigó o als altres components de la mescla.
- *Addicions químiques*: a causa de les limitacions en l'equip de projecció les addicions en el formigó projectat no són les mateixes que en un formigó convencional. Moltes de les normes regulen l'ús d'aquestes addicions químiques. Algunes de les principals addicions químiques són:
 - Reductors d'aigua i retardants: no són aptes pels formigons projectats per via seca a causa de la seva ineffectivitat quan s'afegeix l'aigua al broc d'injecció.
 - Accelerants: són essencials en diverses aplicacions del formigó projectat com el sosteniment de túnels, on és necessari un ràpid desenvolupament de la resistència. El seu efecte és funció de la seva química, la química del ciment i la dosificació de l'additiu. S'han de realitzar tests previs per avaluar la compatibilitat amb els diferents components del formigó projectat.
 - Airejadors: només poden usar-se en els formigons projectats per via humida.
- *Fibres*: la introducció de fibres en el formigó projectat en millora les propietats, sobretot pel què fa a la capacitat de continuar suportant càrrega fins i tot després de produir-se la fissuració. Les dosificacions de fibres generalment venen indicades per cada un dels fabricants, i les normatives en recomanen seguir els criteris proposats.
 - Fibres metàl·liques: són el tipus de fibra més estès en la majoria d'aplicacions en l'àmbit de l'enginyeria civil. Les dosificacions habituals en projectes constructius en mouen entre els 25 i 40 kg/m³, arribant en determinades aplicacions als 70 kg/m³.
 - Fibres sintètiques: l'aparició de noves generacions de fibres sintètiques amb alts mòduls elàstics està permetent que aquest tipus de fibra s'introdueixi lentament en aplicacions fins ara exclusivament reservades a les fibres metàl·liques. Les dosificacions d'aquestes fibres sintètiques es mouen entre els 5 i 15 kg/m³, en funció del tipus de fibra i del fabricant.

Dosificació:

En general, la tecnologia del formigó convencional no pot ser aplicada al formigó projectat per tal de proposar una dosificació i és molt habitual dur a terme assaigs en trams de prova per verificar que la dosificació proposada compleix els requisits especificats al projecte. Pel formigó convencional es disposen de diferents

mètodes de dosificació com són, entre d'altres, Fuller (1907), Bolomey (1925), Faury (1944) o ACI (1980).

En el context del formigó projectat existeixen diferents procediments basats fonamentalment en l'experiència personal, tot i que no n'existeix cap de reconegut universalment. Vàries normatives proposen regles de dosificació amb l'objectiu de presentar les proporcions òptimes de la mescla associades a la tecnologia usada en la projecció, i en particular a aquelles que fan referència al comportament fresc del formigó, en el sentit de possibilitar el transport adequat fins al broc i permetre una projecció òptima minimitzant el rebot.

Les recomanacions de les diferents organitzacions incideixen en una sèrie de paràmetres que, amb petites variacions, són els mateixos per cada una d'elles. Per al formigó projectat per via humida els principals són:

- Relació aigua / ciment : proposen valors de la relació aigua – ciment generalment inferiors als que es proposen en el formigó convencional. Aquest valor és modificable en funció dels additius superplastificants que s'introdueixen en la dosificació.
- Contingut de ciment: la dosificació del formigó projectat es caracteritza per alts continguts de ciment, sempre superiors als 300 kg/m³. En el procés per via humida és habitual presentar quantitats de ciment properes als 450 kg/m³.
- Consistència: es proposen valors al voltant dels 75 mm, relacionats directament amb el valor mínim que accepten els equips de projecció.
- Corba Granulomètrica: defineixen la granulometria en funció del mida màxima de l'àrid gros. Algunes d'elles, com l' EFNARC (1999), presenten corbes granulomètriques de referència.
- Tamany màxim d'àrid: les diferents organitzacions limiten el tamany màxim de l'àrid, tot i que no existeix un consens sobre aquest. Els valors es mouen entre els 16 i 25 mm.
- Contingut d'accelerant: limiten el percentatge en funció de la naturalesa d'aquest. Aquestes prescripcions queden obsoletes ràpidament a causa de l'aparició de noves generacions de productes.
- Contingut de microsíllice: es considera la possibilitat de substituir un percentatge de ciment variable segons les recomanacions.
- Contingut en fibres d'acer: es limiten els continguts en percentatges en pes o volum segons l'organització.

Existeixen diferents metodologies de dosificació publicades per personal investigador i pels fabricants dels equips de projecció, que es caracteritzen per ser particularitzacions de les especificacions marcades per diferents organitzacions.

La taula 2.5 presenta alguns dels valors recomanats per les diferents normatives d'alguns dels paràmetres esmentats.

Variables principals	AFTES (1982)	ACI (1990)	AENOR (1994)	ASCE (1995)	EFNARC (1996)
Relació a/c	-	0.40-0.55	0.30-0.60	0.30-0.40	0.30-0.50
Quantitat de ciment (kg/m ³)	-	300-500	350-400	300-500	>300
Consistència (mm)	100-150	40-75	-	<75	-
Corba granulomètrica	Segons tamany màx.	Segons tamany màx.	Segons tamany màx.	Segons tamany màx.	Si
Tamany màx. Àrid	16	19	25	19	16
Contingut màx. Accelerant	-	2% clorur càlcic	Aluminats: 2-8% Silicats: 0-15%	2% clorur càlcic	-
Contingut microsilíce	-	-	5-10%	<15%	7-15%
Contingut fibres d'acer	-	2% en volum	2-5% en pes	0,5-2% en volum	-

Taula 2.5. Variables per la dosificació pel procés per via humida, presentada per Rodríguez (1997).

En la present tesina, la dosificació adoptada per realitzar la projecció es va basar en la proposta metodològica presentada per J. Rodríguez (1997) en l'àmbit del Laboratori de Tecnologia d'Estructures de la Universitat Politècnica de Catalunya. Aquesta metodologia, basant-se en investigacions realitzades per Prudència (1993), es fonamenta en les modificacions produïdes en la composició entre el formigó de partida i el material col·locat que el propi sistema de projecció introdueix en el material, com a conseqüència del rebot i de la incorporació d'aire com a sistema de transport i projecció.

2.2.7. Fabricació i Posada en Obra del formigó projectat per via humida

Els factors principals que influeixen en el procés de fabricació i posada en obra del formigó projectat són la planta de fabricació, l'equip de projecció i l'operador.

L'equip de projecció pel formigó projectat depèn del procés escollit pel projecte, via seca o via humida, doncs existeixen grans diferències entre l'equipament específic de cada un d'ells. En aquest treball ens centrarem en el procés per via humida, doncs és el procés de projecció escollit en el desenvolupament d'aquesta tesina.

La fabricació del formigó projectat per via humida ha de realitzar-se en plantes dotades de tots els elements necessaris per tal d'aconseguir les característiques físiques i químiques òptimes per obtenir les propietats demanades al projecte; mescladora i sistemes de dosificació tant d'àrids com d'additius. És habitual que aquest procés tingui lloc en instal·lacions a la mateixa obra.

Com hem explicat anteriorment, el procés per via humida es caracteritza perquè el ciment, els àrids, addicions i fibres, es mesclen conjuntament amb l'aigua. La mescla s'introdueix en una mànega que la transporta mitjançant aire comprimit o per bombes mecàniques fins al broc d'injecció, on s'injecta l'aire, que dispersa la mescla i genera la velocitat necessària per projectar el formigó.

Actualment existeixen varis tipus de sistemes; el manual, on l'operador és qui controla la distància, angle i espessor de projecció amb les seves pròpies mans, i l'automàtic, on sofisticats robots permeten controlar tot el procés de projecció a distància. Aquests últims han estat dissenyats especialment per aplicacions en obres subterrànies on les condicions d'espai i seguretat impliquen una disminució en el rendiment del procés. Un dels problemes que presenta el procés de projecció és aconseguir una homogeneïtat adequada del material col·locat a causa de la cadència d'impulsos dels pistons que provoca discontinuïtats a la embocadura injectora, aspecte que pren més èmfasi en el sistema manual. Per tant, un dels requisits de l'equip de projecció és que garanteixi un règim continu de formigó amb les mínimes pulsacions possibles. La figura 2.3 mostra l'esquema d'un equip de projecció per via humida:

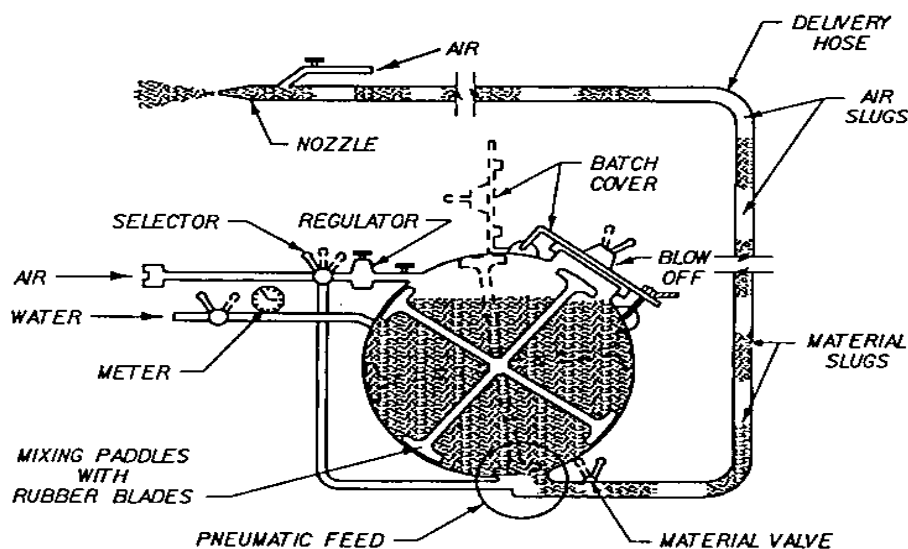


Figura 2.3. Esquema d'un equip de projecció. ASCE (1996).

Un dels elements específics del procés de col·locació del formigó projectat és el broc, que en el cas del procés per via humida consisteix en un broc de goma, amb un anell d'aire injectora, una vàlvula de control i el cos del broc. Aquestes parts es mostren en una secció típica de broc pel procés de via humida (figura 2.4).

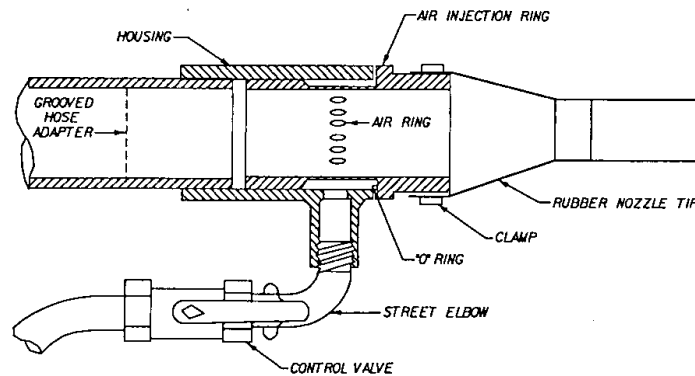


Figura 2.4 Secció d'un broc d'injecció. ASCE (1996).

L'equip auxiliar del procés de projecció el componen la planta de fabricació, els dispensadors d'additius, i el compressor d'aire. Actualment, aquest equipament ja es troba disponible en una sola màquina que anomenem robots automàtics de projecció (figura 2.5).



Figura 2.5. Fotografia d'un robot de projecció (Catàleg de WEBCON).

En la projecció manual, l'experiència de l'operador és un dels paràmetres fonamentals per aconseguir bones propietats del material col·locat, aspecte àmpliament tractat per Beaupré i Jolin (2001). La qualificació de l'operador varia substancialment en funció del tipus d'aplicació en particular. Un operador amb poca experiència pot ser capaç de projectar amb èxit projeccions sobre superfícies horitzontals, poc armades i espessors petits. La projecció d'una superfície vertical, on sigui necessari aplicar diferents capes, requereix l'experiència d'un bon operador, doncs el resultat final dependrà en gran mesura de factors com l'angle, distància o velocitat de projecció del material. Per aconseguir la homogeneïtat, característica fonamental per aconseguir bones qualitats, cal mantenir un flux uniforme del material a través del broc, aspecte difícil d'aconseguir en ubicacions estretes o amb gran diversitat de fronts.

La distància de projecció, distància entre el broc i la superfície a projectar, s'ha de mantenir constant entre 0.6 i 1.5 metres (figura 2.6-a) per aconseguir un equilibri raonable entre el rebot del material i la compactació proporcionada, segons la

bibliografia consultada. Un dels aspectes fonamentals en projeccions on l'armat convencional amb barres és abundant, és la capacitat de l'operador de reomplir les zones posteriors a les barres per tal de reduir al màxim els buits, evitant futurs problemes d'adherència entre el formigó i l'acer. Una mala col·locació de l'operador pot provocar problemes com es mostra a la figura 2.6-b. La presència del reforç amb fibres al formigó projectat soluciona aquest problema, posant de manifest una de les múltiples avantatges de l'ús de fibres respecte el reforç convencional amb barres.

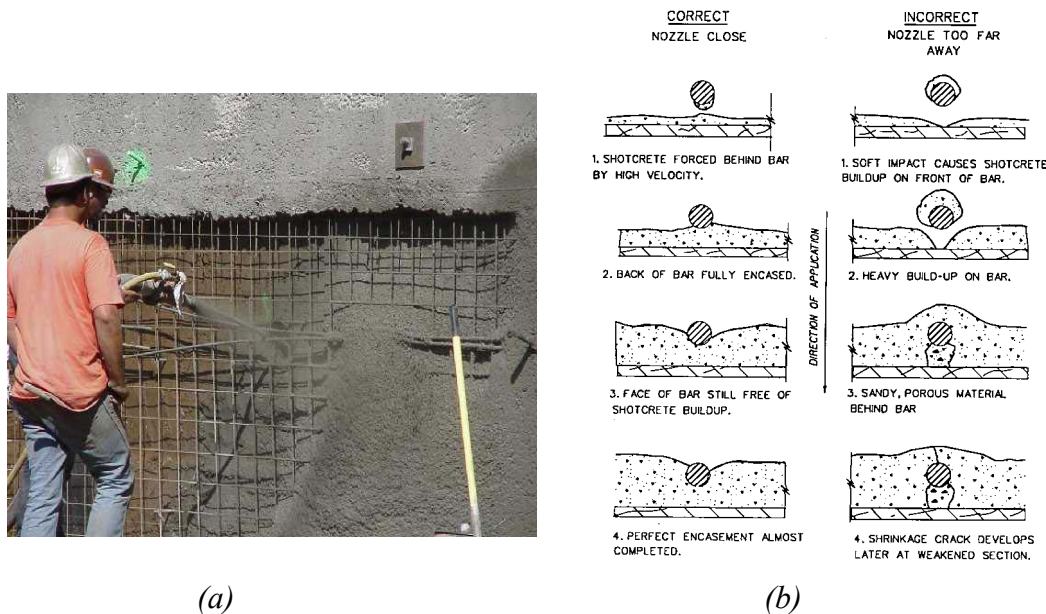


Figura 2.6. Procés de projecció. (a) Fotografia d'un operari projectant, (b) Efectes d'una col·locació correcta i incorrecta de l'operari segons Ryan (1990).

La velocitat de projecció és també un paràmetre important, doncs d'ella depèn en gran mesura el rebot del material, especialment important en aquelles aplicacions on s'utilitzen fibres per reforçar la matriu de formigó. Aquesta velocitat ve determinada per la pressió de l'aire introduït al broc, recomanant-se valors entre 5 i 7 bars.

A la taula 2.6 presentem l'efecte de diferents variables que influeixen directament en el procés de projecció:

Velocitat de projecció	
<p>Alta Major rebot Major compactació Major mesclat</p>	<p>Baixa Menor rebot Menor compactació Pitjor mesclat</p>
Distància	
<p>Allunyar-se Menys rebot Menor compactació Major porositat</p>	<p>Apropar-se Major rebot Major compactació Augment de la densitat</p>
Aigua	
<p>Major quantitat Menor rebot Menor porositat Menor resistència Augment de la permeabilitat</p>	<p>Menor quantitat Major rebot Major porositat Major resistència Disminució de la permeabilitat</p>

Taula 2.6. Variables durant el procés d'execució.

El procés de curat pren una importància vital en el formigó projectat, així com en el formigó convencional, per reduir la fissuració per retracció. Aquest fenomen intrínsec al formigó afecta negativament a la durabilitat i a l'estètica de l'element, i és especialment rellevant en el cas del formigó projectat a causa de les particularitats que aquest presenta, com són la seva aplicació en grans superfícies amb espessors relativament petits i les grans quantitats de ciment que la seva dosificació requereix.

Un mètode òptim de curat és mantenir la superfície del formigó humida durant un període mínim de 7 dies, tapant-la amb una arpillera. Actualment, s'usen agents de curat, que treballen com una membrana líquida que evita la lliure evaporació de l'aigua, tot i que presenten problemes d'adherència en aplicacions on hi ha més d'una capa, i en una nova evolució, s'estan duent a terme grans avanços en noves addicions que permetin al formigó autocurar-se. Són el que s'anomenen agents de curat intern.

En èpoques de fred, també es procedeix a tancar la superfície projectada per tal de què el formigó mantingui una temperatura adequada per permetre un desenvolupament adequat de la resistència.

Control de qualitat

El formigó projectat és un material amb diferents aplicacions inusuals que requereix una especial cura dels detalls, i per tant és essencial que el control de qualitat s'estableixi correctament per assegurar que el producte final funciona tal i com ha estat dissenyat, i es garanteixi la funcionalitat durant la vida útil per la que va ser dissenyat.

Diferents normatives (EFNARC; ASCE) presenten documents que serveixen de guia als constructors per tal de dur a terme aquest específic control de qualitat sobre cada una de les fases de construcció i execució del projecte. Aquestes normes fan referència a tots els components del formigó projectat (ciments, àrids, addicions, fibres, dosificacions, accelerants, certificats de l'operador, equipament i curat), així com els assaigs a realitzar per garantir la qualitat del material.

2.2.8. Normatives pel formigó projectat

Un dels principals problemes en l'expansió del formigó projectat com un dels processos d'execució en l'enginyeria civil ha estat, i és, la manca d'una normativa universalment reconeguda tant per constructors com pels enginyers. Aquest buit ha provocat que els projectistes es mostrin desconfiats a utilitzar el formigó projectat en multitud de potencials aplicacions. La indústria del sector ha reconegut aquestes mancances, i ha començat a participar activament en col·laboració amb diferents organitzacions, entre elles l' ACI, ASTM, EFNARC, amb l'objectiu de preparar documents de certificació del procés d'execució del gunitat que ajudin als projectistes a aplicar aquesta tecnologia amb confiança.

Durant la última dècada, i com a resposta als avanços tecnològics que en aquesta s'han desenvolupat, han sorgit diferents guies i normatives sobre el formigó projectat. Algunes d'aquestes, les més importants i innovadores, es citen a continuació:

- ACI: l'*American Concrete Institute* ha desenvolupat les especificacions que actualment tenen una major acceptació als Estats Units, tot i que actualment no existeix una guia específica per l'ús del formigó projectat en obres subterrànies de sosteniment.
 - “Specification for Shotcrete”. ACI 506.2-95 (1995)
 - “Guide to Shotcrete”. ACI 506R-90 (1990)
- EFNARC: l'*European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* ha publicat un document sobre les especificacions en aplicacions com la reparació d'estructures, però poc específic per una de les principals aplicacions del formigó projectat com és el sosteniment d'obres subterrànies. La nova publicació, al 1999, ja proveïa als constructors d'una guia útil per aplicacions en estructures de nova construcció, així com en obres subterrànies.
 - “European Specification for Sprayed Concrete”. (1993)
 - “European Specifications for Sprayed Concrete: Guidelines for Specifiers and Contractors.” (1999)
- Normatives Nacionals: diferents entitats i organitzacions nacionals han desenvolupat normatives d'aplicació exclusiva en el seu territori, però que gràcies a la seva qualitat s'estan incloent en normatives més generals i amb un àmbit d'aplicació més universal. El document més acceptat internacionalment en aplicacions en obres subterrànies és la “Austrian Concrete Society Sprayed Concrete Guideline: Application and Testing”, publicat al 1999. Anteriorment, la *International Tunnelling Association* va publicar al 1993 el document “Shotcrete for Rock Support, Guidelines and Recommendations – A Compilation”, que ràpidament va quedar obsolet a causa dels ràpids avanços en la última dècada.

Assaigs en el formigó projectat reforçat amb fibres

La controvèrsia que existeix en les normatives de formigó projectat és evidentment aplicable quan a aquest si li afegeix un reforç a base de fibres. Tot i així, existeixen diferents normes i especificacions sobre els assaigs a realitzar en els controls de qualitat.

Per continents, la producció de formigó projectat amb fibres es concentra principalment a Europa i als Estats Units. Com s'ha comentat anteriorment, l' EFNARC ha presentat un document on es tracten els principals temes relacionats amb el formigó projectat, incloent-hi una descripció dels principals assaigs a realitzar per avaluar les propietats del material.

A Nord – Amèrica, la metodologia d'assaig més àmpliament seguida ha estat la ASTM C 1018. Les limitacions que aquest document presenta han estat discutides per diferents autors com Bernard (2000), el què ha provocat que es dugui a terme una revisió del document.

Bernard S. , ha desenvolupat un nou assaig per l'avaluació de la tenacitat, definida com la capacitat de continuar suportant càrrega un cop produïda la primera fissura, conegut com Australian Round Determinate Panel Test, amb gran acceptació en la comunitat científica. Actualment, la ASTM està desenvolupant un nou document on s'introduirà aquest assaig de placa com a eina d'avaluació de la tenacitat del formigó projectat amb fibres.

La naturalesa del formigó projectat requereix metodologies específiques d'assaig per avaluar les seves propietats més representatives, i en la majoria d'aquestes, la metodologia està ben establerta. La principal diferència es troba en la manera d'obtenció i preparació de les mostres. Aquestes mostres poden obtenir-se projectant el formigó en plafons durant el procés de construcció en obra, o obtenir-les directament del formigó projectat in situ, metodologia que té l'avantatge de ser més representativa. Posteriorment, de les mostres s'obtidran les provetes o es tallaran els plafons per realitzar els assaigs de biga.

En general podem distingir entre dos tipus d'assaigs en funció de la propietat que es vol avaluar; aquells que es realitzen sobre provetes cilíndriques o cúbiques i aquells que es realitzen sobre elements tipus biga o placa.

- Assaigs en proveta: s'avaluen propietats com la retracció, la permeabilitat, la densitat, la porositat, la resistència al gel – desgel, l'adherència fibra – matriu, la resistència a compressió o el mòdul d'elasticitat. Aquests assaigs no presenten cap particularitat respecte els que es realitzen sobre el formigó convencional per avaluar les mateixes propietats, excepte el procés d'obtenció de la proveta.
- Assaigs de biga o placa: s'avaluen propietats com la resistència a flexió, la resistència a l'impacte o la tenacitat. Per l'avaluació d'aquesta última propietat, com a més representativa del formigó projectat amb fibres, s'han desenvolupat nombrosos assaigs específics;
 - Assaigs de biga:
 - ASTM C 1018 flexural toughness test.
 - JSCE SF-4 flexural toughness test.
 - Norwegian Concrete Association residual flexural stress method
 - Toughness Performance Level Method (Morgan)
 - Assaigs de placa:
 - EFNARC Bending Plate Test.
 - Australian Round Determinate Plate Test.
 - South African water bed test.

Alguns autors (Banthia et al., 1999 a) han realitzat importants campanyes experimentals per estudiar les propietats del formigó projectat amb fibres, incloent-hi assaigs de biga i assaigs de placa. Els resultats obtinguts en aquestes campanyes, amb els mateixos formigons amb el tipus de fibra com a única

variable, demostren que els dos tipus d'assaigs no són consistents quan es comparen els comportaments dels diferents tipus de fibres. Bernard (2000 b) ha publicat estudis on s'intenta correlacionar els resultats obtinguts en els dos tipus d'assaig, però la majoria d'investigadors consideren els assaigs de placa com a més representatius. Justifiquen aquesta afirmació explicant que el formigó projectat s'aplica generalment com un sosteniment bidimensional de poc espessor, i que per tant és esperable un comportament estructural bidimensional amb una flexió biaxial respecte el seu pla neutre.

Una de les propietats importants, com és l'avaluació del número de fibres presents a la matriu de formigó, es realitza generalment en el formigó fresc a causa de la impossibilitat de contar el número de fibres sintètiques de manera fiable en el formigó endurit, tot i que si que és possible en el cas de les fibres metàl·liques.

Una altra de les propietats que es mesura en obra sobre el formigó fresc és la seva consistència, generalment amb el Con d'Abrams, per tal de comprovar la bombejabilitat del formigó i per tant, si l'equipament del què es disposa serà capaç de projectat adequadament el material.

El rebot, que es defineix com la pèrdua de material durant el procés de projecció (generalment fibres i les fraccions majors de l'àrid), es mesura normalment en cambres especialment dissenyades. Posteriorment tractarem aquesta propietat amb major profunditat, tot i que a causa de les limitacions en les que va realitzar-se la tesina, no va ser possible avaluar el rebot.

2.2.9. Aplicacions

La flexibilitat i versatilitat del formigó projectat el fan ideal per nombroses aplicacions en diferents àmbits de l'Enginyeria Civil i a continuació en presentem algunes de les principals:

- *El formigó projectat com a material estructural*
 - Sosteniment en túnels i mines: el formigó projectat s'usa habitualment en sosteniment de túnels en roca, però en certes ocasions també s'ha aplicat en sols de mala qualitat. El formigó projectat constitueix una de les eines fonamentals en el Nou Mètode Austríac de construcció de túnels (NATM), juntament amb el bulonat i les cintes metàl·liques. L'evolució en les propietats del formigó projectat ha permès a aquest substituir la ferralla convencional com a element de sosteniment definitiu, doncs evita la penetració de l'aigua dins del túnel a través de la roca i en sols argilosos evita que els vapors de l'aigua arribin a les fissures reomplertes d'argila i el seu posterior inflament expansiu.
 - Cobertes: l'ús de formigó projectat en la construcció de cobertes d'edificis de geometria complicada ha estat una pràctica habitual des dels anys 50 gràcies a les propietats que aquest presenta.

- Canalitzacions: gràcies a les propietats d'adherència del formigó projectat amb el material impermeabilitzant o geotextil, aquest s'utilitza en la construcció de noves canalitzacions, obtenint grans rendiments productius apropiats per les obres lineals com les canalitzacions.
- Piscines i Dipòsits: la facilitat que el formigó projectat presenta per adaptar-se a qualsevol forma geomètrica ha permès a aquest material introduir-se en el mercat de la construcció de piscines. D'una manera ràpida i econòmica permet construir piscines de geometries complicades que amb el mètodes tradicionals implicarien elevats costos constructius. Per les mateixes raons, l'ús en construccions de dipòsits s'ha multiplicat sensiblement.
- Estabilització de talussos: el formigó projectat és molt útil en aquest camp, doncs impedeix l'exposició a l'aire i a l'aigua de la roca evitant-ne la seva alteració, així com revestir talussos de terra per evitar la presència de lliscades.

- *El formigó projectat com a element de protecció contra el foc:*

L'ús del formigó projectat com a element de protecció contra el foc en estructures metàl·liques, gràcies a les seves bones propietats resistents a la calor, ha minvat a causa de l'aparició de nous materials sintètics econòmicament molt viables tot i que encara té aplicació en aquest camp.

- *El formigó projectat com a element de reparació d'estructures:*

El formigó projectat pot ser utilitzat per reparar superfícies malmeses de diferents materials com el formigó, la fusta i les estructures metàl·liques, gràcies a la facilitat d'accés a qualsevol zona, juntament a no haver d'utilitzar cap tipus d'encofrat per a la seva col·locació. Presentem alguns exemples d'aquesta aplicació:

- Reparació de ponts: el formigó projectat s'ha aplicat amb èxit en la rehabilitació de revestiments de ponts, tot i que resulta no viable econòmicament per reparacions on són necessaris grans espessors de material.
- Reparació d'edificis: és usat principalment en les reparacions dels danys causats pel foc o per terratrèmols. És molt usual la seva aplicació en reparació d'elements com bigues o columnes.
- Reparació d'estructures marines: és habitual en el formigó armat convencional l'existència de problemes de durabilitat a causa de la corrosió de les armadures per la presència de fissures que permeten el pas de l'aire, amb els conseqüents problemes d'oxidació, sobretot en aquells ambients agressius amb gran presència de sals o sulfurs.

2.3. EL FORMIGÓ PROJECTAT REFORÇAT AMB FIBRES METÀL·LIQUES

2.3.1. Aspectes Generals

El formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques no és més que un formigó projectat convencional al que se li afegeixen fibres. En els últims anys s'han desenvolupat equips específics de mesclat i col·locació per aquest tipus de formigó projectat, però normalment s'usen equips convencionals amb grans resultats, tant pel mètode de via seca com pel de via humida.

El formigó projectat reforçat amb fibres incorpora un 2-4 % en volum total de la mescla de fibres i les millores que proporciona el seu ús fan que hagi desplaçat en moltes aplicacions al reforç amb malla habitual fins ara. La millora de la tenacitat i resistència a flexió es fan evidents en el mode de ruptura, doncs calen grans obertures de fissura per separar completament el formigó reforçat amb fibres metàl·liques, durant el qual es continua suportant càrrega després de la primera fissura. Aquesta resistència post-pic s'ha entès com un augment de la ductilitat del formigó projectat i per tant, el fa molt adequat en aquelles aplicacions on s'esperen grans fletxes com en el sosteniment de túnels o galeries de mines.

2.3.2. Tipus de fibres metàl·liques

Existeixen diferents tècniques de fabricació de fibres metàl·liques en funció de la forma del material usat en el procés de manufacturació, els principals dels quals són:

- *Sheet Shearing Process*: les fibres es produeixen esquilant làmines d'acer d'alta duresa laminat en fred de gruix aproximat entre 0,15 – 0,64 mm, aconseguint-se fibres de 0,25 a 2,03 mm d'amplada. Les fibres obtingudes amb aquest procés presenten rababes i deformacions per torsió, característiques que milloren l'adherència amb la matriu de formigó.
- *Melt Extracting Process*: un disc amb les vores oscades gira tocant suaument la superfície de l'acer fos, solidificant-se instantàniament. Els petits fragments d'acer solidificat s'extreuen del disc gràcies a la força centrífuga. Amb aquest procés es poden aconseguir fibres d'una longitud determinada si es fan osques especials a la vora del disc i produir el tipus de fibra conegut com “dog-bone-shaped fibers” (amb els extrems més amples). La superfície d'aquestes fibres és irregular i amb “shaped-cross section”. Algunes fibres es recullen en paquets per facilitar-ne el seu transport i mesclat.
- *Wire Cutting Process*: les fibres s'obtenen a partir de filferro d'acer manipulat per un tallador continu giratori. Les fibres obtingudes per aquest procés es caracteritzen per una alta resistència a tracció però amb una adherència baixa amb la matriu de formigó. Per tal de millorar-la, la superfície d'aquestes es fa irregular i es modifica la forma dels extrems, coneguda com “hooked-end”.
- *Mill Cutting Process*: una llosa gruixuda és tallada per un tallador pla de molí. S'aconsegueixen resistències a tracció el doble que el material original

2.3.3.2. Resistència a flexió

No existeix consens sobre l'efecte de l'addició de fibres metàl·liques en el formigó projectat en la resistència a flexió. Tot i que sembla clar que un cop produïda la primera fissura els avantatges del reforç amb fibres són clars, ja que les fibres treballen cosint les fissures, no està tant clar el seu efecte sobre la resistència a la primera fissura. De nou, l'augment de la demanda d'aigua a la mescla per millorar la bombejabilitat porta implícit una disminució de la resistència a flexió a la primera fissura, com assegura McAskill et al. (1988), tot i que s'obtenen valors similars al formigó de control si s'usen superplastificants per augmentar la treballabilitat sense modificar la relació aigua – ciment.

La presència de fibres metàl·liques redueix les fletxes obtingudes, així com l'obertura de fissura quan els elements de formigó estan sotmesos a càrregues de servei en dosificacions superiors al 2% en volum de la mescla. Alguns valors de resistència a flexió del formigó projectat amb fibres metàl·liques es mouen entre els 5 i els 10 MPa segons assaigs realitzats per Henager (1977) en bigues segons la ASTM C 78, tot i que s'han aconseguit resistències de 32 MPa. El procés de col·locació tendeix a orientar les fibres en el pla paral·lel a la superfície projectada, orientació que resulta beneficiosa en les propietats a flexió de les capes de formigó projectat.

2.3.3.3. Resistència a l'Impacte

L'addició de fibres metàl·liques millora sensiblement la resistència a l'impacte del formigó projectat, sent de 3 a 10 vegades superior al formigó convencional segons resultats presentats per l'ACI Committee 544 (1996). La millora depèn del tipus, longitud, configuració i la quantitat de fibres incorporades a la mescla.

S'han realitzat nombrosos estudis per investigadors com Banthia et al. (1999 b) sobre la influència de l'addició de fibres metàl·liques en la resistència a l'impacte tant en assaigs de biga i placa. Els seus resultats mostren l'eficiència de les fibres tant en condicions estàtiques com dinàmiques, i la importància de la velocitat de càrrega en els resultats finals. Un cop més, el tipus de fibra afegida és una variable fonamental a l'hora d'explicar els resultats, aspecte visible a la figura 2.8, on es mostren els resultats dels assaigs publicats per Banthia et al (1999 c).

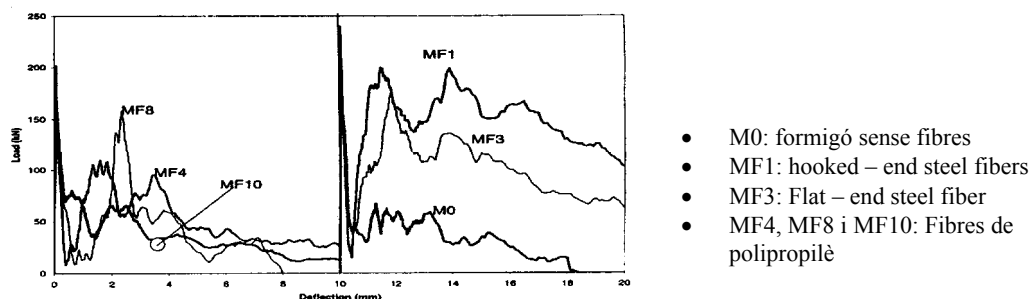


Figura 2.8. Gràfics de Càrrega – Desplaçament sota càrregues dinàmiques per diferents formigons projectats. Banthia et al. (1999 c).

2.3.3.4. Tenacitat

Aquesta propietat s'ha reconegut des dels inicis del desenvolupament del formigó reforçat amb fibres metàl·liques com aquella que el distingeix clarament dels formigons ordinaris sense reforç. Tant en condicions dinàmiques com estàtiques, la millora de les propietats es fa evident. L'energia necessària per provocar la separació total dels elements de formigó projectat amb fibres varia amb el tipus de fibra utilitzada així com amb la quantitat de fibres incorporades. Aquesta energia es mesura a partir de la integració de la corba Càrrega - Fletxa d'un element assajat a flexió fins a la separació total. La presència de fibres metàl·liques millora sensiblement la capacitat d'absorbir energia després de l'aparició de la primera fissura, doncs continua suportant càrrega encara que l'obertura de la fissura augmenti fins a valors de varis mil·límetres.

Nombrosos assaigs s'han realitzat per avaluar aquesta propietat, tant de biga com de placa, mostrant l'excel·lent comportament de les fibres metàl·liques comparant-les amb el reforç amb malla. Els resultats obtinguts per McAskill et al. (1988) es mostren a la figura 2.9.

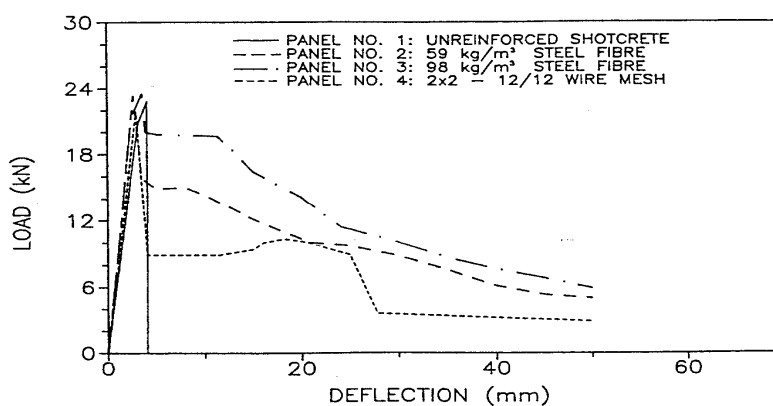


Figura 2.9. Càrrega – Deformació de les fibres metàl·liques versus el reforç amb malla.

2.3.3.5. Adherència fibra – matriu

Aquesta propietat és funció principalment del tipus i geometria de la fibra incorporada, i és un dels principals paràmetres que controla la tenacitat, segons les conclusions exposades per Banthia (1995). Com s'ha dit, es pot millorar aquesta adherència donant certa irregularitat superficial a la fibra així com modificant-ne la forma als seus extrems. Alguns assaigs duts a terme a Canadà per Parker et al. (1975) mostren els resultats obtinguts comparant un formigó projectat de control (sense fibres) i un formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques, presentats a la taula 2.7.

Mixture	Pull-out strength (MPa)
Plain Shotcrete	6.90
Fibrous Shotcrete	12.40

Taula 2.7. Valors de Pull-out Strength

2.3.3.6. Retracció

El fenomen de retracció s'entén com la pèrdua d'aigua durant el procés de fraguat del formigó, on l'aigua en excés s'evapora i el formigó exsuda, formant-se buits capil·lars per on circula l'aigua, provocant la contracció del formigó. A mesura que aquests buits es fan més grans i s'uneixen entre si es converteixen en potencials fissures del formigó.

Al ser el formigó projectat un element amb alts continguts de ciment, resulta susceptible a aquest fenomen de contracció per fraguat, que juntament amb les variacions de temperatura, crea tensions internes moltes vegades superiors a la baixa resistència mecànica que presenta el formigó en els primers dies de fraguat, provocant d'aquesta manera que el material arribi a fissurar-se.

La presència de fibres metàl·liques distribuïdes de manera uniforme i tridimensional ajuda a la reducció de la mida i quantitat de fissures per contracció i per canvis de temperatura, exercint el seu paper d'element de cosit. Així doncs, un dels papers de les fibres és el de controlar la microfissuració durant els primers dies des de la fabricació i posada en obra del formigó projectat.

Nombrosos articles coincideixen en l'efecte beneficiós de les fibres metàl·liques en el control de les fissures causades pel fenomen de la retracció. A la figura 2.10 poden observar-se els diferents comportaments de dos formigons projectats, un d'ells reforçat amb fibres metàl·liques, fruit de les investigacions realitzades per Banthia (2000).

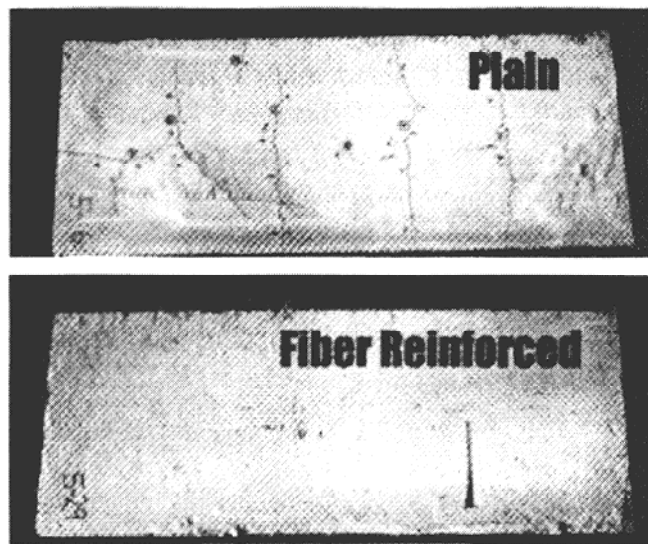


Figura 2.10. Fotografies dels assaigs de retracció sobre plaques.

2.3.3.7. Rebot

El formigó projectat amb fibres metàl·liques presenta nombrosos avantatges respecte el reforç convencional sobretot pel què fa al temps consumit durant el procés de col·locació de la malla i el perill per als operaris que aquest procés porta implícit,

però a causa de la forma en què aquest és aplicat es produeix una gran pèrdua de material a causa del rebot, fins a un 40% en el procés per via seca segons Austin (1995).

El rebot de les fibres metàl·liques pot arribar a un 70% segons els resultats presentats per Armelin i Banthia (1998), amb les implicacions econòmiques que això comporta, doncs les fibres són la part més costosa de la mescla. Experimentalment, Peaston (1993) ha provat que el rebot de les fibres metàl·liques es veu clarament influenciat pel disseny de la mescla i la tècnica de projecció, així com de la geometria de la fibra. Tot i que no existeix consens sobre els paràmetres geomètrics de la fibra que influeixen en el rebot, el què és clar és que les fibres metàl·liques van ser dissenyades pensant en aplicacions convencionals, i per tant no optimitzades per aplicacions en formigó projectat. Un dels objectius de varis estudis és el d'aconseguir dissenyar fibres específiques pel formigó projectat, reduint el rebot i maximitzant la tenacitat.

Els resultats mostren que un dels paràmetres importants en el rebot és la longitud de la fibra, sent les llargues aquelles que presenten un major rebot. Un altre aspecte és el diàmetre de la fibra, mostrant un major rebot aquelles amb diàmetres majors. La influència de la geometria de la fibra pot observar-se a la figura 2.11, presentada per Armelin i Banthia (1998).

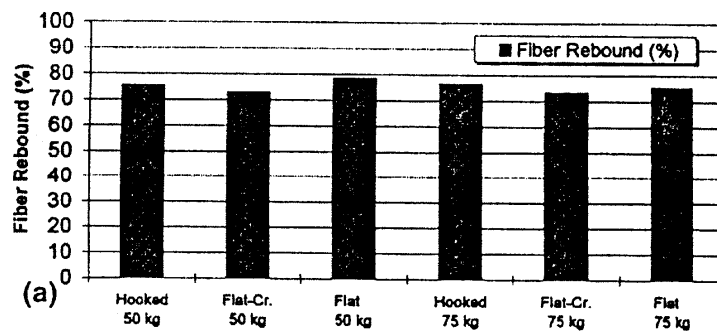


Figura 2.11. Influència de la geometria de la fibra en el rebot.

2.3.4. Aplicacions del formigó projectat amb fibres metàl·liques

Des de la introducció de les fibres metàl·liques com a reforç en el formigó projectat, s'han realitzat nombrosos projectes on l'aplicació d'aquesta tècnica ha estat un element fonamental. Presentem algunes de les principals d'aquestes aplicacions en l'àmbit de l'enginyeria civil:

- Sosteniment inicial i final en túnels de carretera, ferrocarril i conduccions d'aigua.(figura 2.12-b)
- Sosteniments permanents en grans espais com polisportius, estacions hidroelèctriques, estacions de ferrocarril i instal·lacions militars.
- Sosteniment de pous de ventilació en túnels de carretera i ferrocarril, i conduccions d'alta pressió en projectes hidroelèctrics.

- Construccions de sistemes de control d'aigua i gel en túnels de carretera i ferrocarril.
- Reparació d'infraestructures, presses, ponts i estructures marines.
- Estabilització de talussos. (figura 2.12 – a).



Figura 2.12-a. Estabilització d'un talús mitjançant formigó projectat reforçat amb fibres metàl·liques.

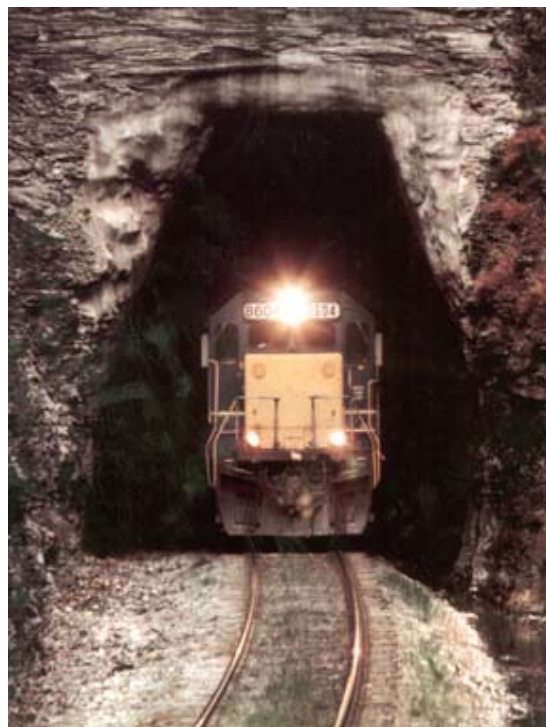


Figura 2.12 – b. Rehabilitació del Baker's Tunnel, Tennessee, EUA.

2.4. EL FORMIGÓ PROJECTAT REFORÇAT AMB FIBRES SINTÈTIQUES

2.4.1. Aspectes generals

A principis de la dècada dels 80 van començar a utilitzar-se les fibres sintètiques de polipropilè com a element de reforç del formigó projectat, però les seves propietats només les feien aptes en aplicacions on calia controlar la retracció plàstica. No va ser fins a principis dels 90, quan l'aparició d'una nova generació de fibres polimèriques que permetien dosificacions de fins a 20 kg/m³ sense problemes de bombejabilitat, quan l'aplicació d'aquest tipus de fibres va introduir-se com a element de reforç en substitució de les barres d'acer.

Recentment, i gràcies a la investigació realitzada per les empreses de productes sintètics, ha aparegut un nou tipus de fibres sintètiques (mescla de polipropilè i polietilè) potencialment competidores a les fibres metàl·liques. Aquestes noves fibres permeten ja, amb la dosificació apropiada, proporcionar al formigó projectat propietats equivalents a les conferides per les fibres metàl·liques.

Les excel·lents propietats mostrades per aquestes noves fibres sintètiques permetran, a dissenyadors i constructors, la utilització d'aquestes en aplicacions fins ara només reservades a les fibres metàl·liques, contribuint al permanent desenvolupament del formigó projectat com a material constructiu eficient i econòmic.

2.4.2. Tipus de fibres sintètiques

Els principals tipus de fibres sintètiques accessibles comercialment són de polipropilè, polièster i de niló, amb varietat de longituds, espessors i geometries. Gràcies al constant augment de fabricants de fibres en les últims anys, s'introdueixen constantment nous tipus, amb l'objectiu de millorar les prestacions dels seus productes.

- fibres de polipropilè: són el tipus de fibra sintètica més àmpliament utilitzada als Estats Units. Es tracta d'un tipus de fibra que es caracteritza per ser no – absorbent, i per tant, no tenen efecte sobre la demanda d'aigua en la mescla. Aquestes fibres es produeixen tant fibrilades com en monofilaments, i són resistents als àlcalis i altres elements químics presents normalment en el formigó.
- Fibres de polièster: tot i que no són tant utilitzades com les de propilè, alguns fabricants presenten aquest tipus de fibra, amb configuració monofilament, i comercialment accessibles en longituds de ¼ a 2 polsades. Són no – absorbents, però presenten alguns problemes en l'ambient àlcali del ciment portland.
- Fibres de niló: com les fibres de polièster, són de configuració en monofilament. El que principalment les diferencia de les anteriors és la seva capacitat d'absorció, amb les conseqüents limitacions que això implica.

2.4.3. Propietats del formigó projectat amb fibres sintètiques

2.4.3.1. Resistència a compressió

L'aparició en els últims anys de noves fibres sintètiques s'ha vist reflectit en un gran nombre d'investigacions sobre les prestacions que aquestes presenten. En principi, l'addició de fibres sintètiques a la matriu no millora la resistència a compressió significativament, tot i que com s'ha dit en el cas de les fibres metàl·liques, la bibliografia no és unànime en les conclusions obtingudes en diferents estudis. Morgan et al. (1999) va presentar uns valors de resistència a compressió d'un formigó projectat per via humida amb fibres sintètiques (taula 2.8).

Tipus formigó projectat		R. compressió (MPa)	
		7 dies	28 dies
Formigó de control (sense fibres)		44.0	72.5
Formigó amb fibres sintètiques (dosificacions en kg/m ³)	4.6	61.9	71.4
	5.0	59.4	75.2
	9.3	56.3	72.0
	14	55.5	68.9

Taula 2.8. Resultats de resistència a compressió de la investigació de Morgan et al. (1999)

Morgan et al. (1999) va justificar els valors de resistència en algunes de les mescles a causa de les diferents temperatures ambient en el moment de projecció, aspecte que va poder modificar parcialment les velocitats de reacció.

En altres campanyes experimentals amb fibres sintètiques, en l'àmbit de l'estudi de les resistències a l'impacte, Bantia et al. (1999 b) va presentar valors de resistències al voltant dels 50 MPa, molt similars als obtinguts en el formigó de control.

Per tant, els resultats presentats per diferents autors mostren que l'addició de fibres sintètiques no té un efecte massa important en els valors de la resistència a compressió, quan els comparem amb valors obtinguts amb formigons de control. A la bibliografia consultada es justifiquen certes disminucions de resistència previsible a causa del menor grau de compactació que pot presentar el formigó projectat a causa de la presència de fibres, però es deixa ben clar que es poden aconseguir valors de resistència adequats als requeriments en projectes actuals.

2.4.3.2. Resistència a flexió

L'efecte de l'addició de fibres sintètiques en els valors de resistència a flexió ha estat estudiada en nombroses campanyes, tant en el formigó convencional com en el formigó projectat, amb resultats que no permeten assegurar totalment el seu efecte. En estudis realitzats per Zollo R. (1984) sobre formigó convencional amb reforç de fibres

de polipropilè, es reporten petits increments de resistència (1-2%) quan el contingut de fibres en volum és del 0.1%, mentre que per continguts del 0.2 –0.3 % en volum existia una reducció de la resistència a flexió a la primera fissura.

En els estudis realitzats per Morgan et al. (1999) es mostra un petit augment en la resistència a flexió en el formigó projectat per via humida amb reforç de fibra sintètica. Aquests valors estan al voltant dels 7 MPa en el formigó de control, i 8.50 MPa en el formigó amb fibres de polipropilè, amb dosificacions entre 5 i 10 kg/m³.

2.4.3.3. Resistència a l'impacte

Banthia et al. (1999 b) va presentar uns exhaustius estudis sobre l'efecte de l'addició de fibres, tant metàl·liques com sintètiques, en el formigó projectat per via humida pel què fa a la seva resistència a l'impacte. Tot i que les fibres sintètiques milloren les propietats del formigó, la seva millora era sensiblement inferior a la presentada pels formigons amb fibres metàl·liques, sent generalment millors en condicions estàtiques que no pas en condicions dinàmiques.

La millora de la resistència a l'impacte depèn de la velocitat de càrrega a la que aquesta és aplicada, doncs tant el formigó de control com el reforçat amb fibres presenten millors resistències sota càrregues d'impacte.

2.4.3.4. Tenacitat

La tenacitat, o capacitat d'absorció d'energia després de la primera fissura, s'ha convertit en un dels principals paràmetres de control en les obres on el formigó projectat reforçat amb fibres té funcions estructurals. Per mesurar aquesta propietat, existeixen nombrosos assaigs de biga i placa, tot i que aquests últims s'estan generalitzant a causa de la menor dispersió de resultats que presenten respecte als de biga.

La presència de fibres sintètiques, i principalment l'ús de les noves generacions de fibres sintètiques, milloren la tenacitat del formigó projectat. Aquestes noves fibres, caracteritzades per tenir un mòdul elàstic superior a les existents al mercat, presenten propietats equivalents a les proporcionades per les fibres metàl·liques pel què fa a la tenacitat. Gràcies a això, les fibres sintètiques comencen a utilitzar-se com a substitució del reforç amb barra d'acer convencional.

Morgan et al. va realitzar assaigs comparatius del comportament d'un formigó projectat per via humida reforçat amb malla d'acer (reforç convencional en aplicacions com el sosteniment d'obres subterrànies) i el mateix formigó reforçat amb fibres sintètiques. Els resultats obtinguts per Morgan et al. (1999) es mostren a la figura 2.13. on pot observar-se el diferent comportament entre els dos reforços: les fibres sintètiques presenten un millor comportament quan la deformació del punt central és superior als 60 mm. L'assaig escollit va ser South African Water Bed Test, on un plafó de 1600x1600x80 mm és assajat sota una càrrega uniforme.

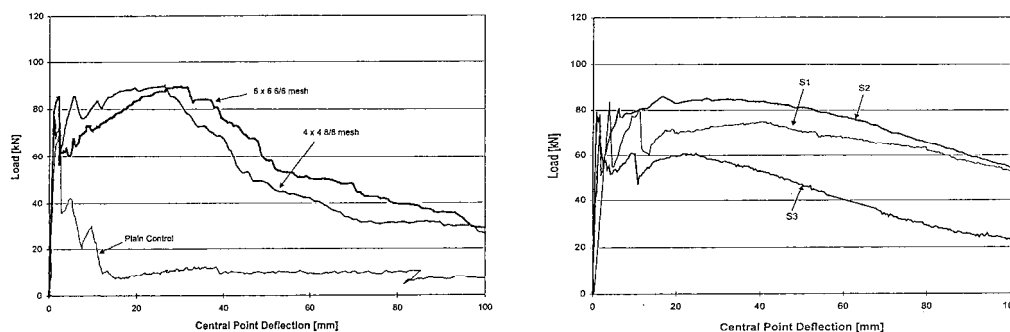


Figura 2.13. Gràfics Càrrega – Fletxa del South Africa Water Bed Test .

Actualment, en molts projectes s'exigeix una classe, classificació que va associada a la energia absorbida en un assaig de placa normalitzat. Aquesta classificació es presenta a la taula 2.9.

Toughness Classification	Typical Application	Performance Requirement: Energy Absorption up to 25mm deflection
A	“Cosmetic” and sound ground/rock conditions	500 Joules
B	Fractured Rock – medium ground/rock conditions	700 Joules
C	Difficult ground/rock conditions	1000 Joules

Taula 2.9. Taula de l'EFNARC per classificar el formigó projectat en funció de la seva tenacitat, EFNARC (1999).

2.4.3.5. Adherència fibra – matriu.

La transmissió d'esforços entre les fibres i la matriu de formigó, es produeix per adherència i encreuament mecànic. El paràmetre que s'utilitza per mesurar l'efectivitat de cada un dels tipus de fibres és l'anomenada relació d'aspecte, definida com el quocient entre la longitud i el diàmetre de la fibra. Tot i que aquest paràmetre apareix per les fibres d'acer, es pot extrapolar a les fibres sintètiques amb funcions estructurals

Quan sotmetem el formigó projectat reforçat amb fibres a un assaig d'arrencament, poden produir-se dues situacions de fallada; o que la fibra falli per adherència o que ho faci per resistència a tracció. Que succeeixi una o altra depèn de la longitud de la fibra.

A través de diverses investigacions s'ha comprovat que amb relacions d'aspecte superiors a 100 s'obté una mala treballabilitat del formigó, amb els conseqüents problemes de bombejabilitat, i una mala distribució de les fibres. Amb valors de relació d'aspecte inferiors a 100 la falla del compost es deu generalment a l'arrencament de la fibra.

Les fibres tenen propietats inherents al seu material i a la seva geometria, que han de ser superiors a les de la matriu pel què fa a resistència a flexió i a la seva deformabilitat, factor que en general es compleix a causa del caràcter fràgil de la matriu.

En el cas de fibres de polipropilè, l'adherència química existents entre elles i la matriu és baixa, però la seva distribució multidireccional provoca que existeixi un efecte de lligadura que crea una adherència mecànica en la seva distribució. En particular, les fibres fibrilades es comporten millor que les monofibrilades a causa de l'efecte de encreuament que es genera al penetrar la pasta de ciment als intersticis deixats per la fibrilació.

En les fibres de polipropilè, que són rectes i llises en el seu contorn, existeix la fallida per lliscament entre la fibra i la matriu, aspecte que es reflecteix en un arrencament sobtat de la fibra.

En el cas de les noves fibres sintètiques d'alt mòdul elàstic, les bones propietats d'adherència resulten de la capacitat d'aquestes de transformar-se en fibres monofilament amb varies fibrilacions en els seus extrems, que actuen com a àncores en el formigó.

2.4.3.6. Retracció

La principal aplicació de les fibres sintètiques en el camp del formigó projectat abans de l'aparició de les noves generacions de fibres era la d'actuar com a reforç secundari per controlar la retracció, especialment la retracció plàstica.

El tema de la retracció és tractat per Morgan i Chan (2001), on garanteix que baixes dosificacions de fibres sintètiques del tipus monofilament (1 kg/m^3) representen un ajut significatiu en la mitigació dels efectes de la retracció plàstica en el formigó projectat, reduint-se la fissuració provocada per aquest fenomen intrínsec al formigó. No obstant, i referint-se a la retracció per assecat, Morgan conclueix que són necessàries dosificacions més elevades ($7 - 10 \text{ kg/m}^3$) per tal de poder observar millores sensibles en el comportament del formigó.

2.4.3.7. Rebot.

El rebot és un dels principals problemes que presenta el mètode de col·locació del formigó projectat, i a causa de les seves repercussions econòmiques, és un dels aspectes principals en molts dels estudis realitzats.

La bibliografia consultada és unànime en assegurar que el percentatge de fibres sintètiques perdut a causa del rebot és significantment inferior al que presenten les fibres metàl·liques, tot i que tots els estudis coincideixen en reconèixer que els valors obtinguts en assaigs són inferiors als que s'obtenen en aplicacions en obres reals. A obra, els factors que influeixen en el rebot, com són l'orientació i distància de projecció, la dosificació d'accelerant, etc. poden no ser els òptims i per tant els valors presentats per diferents autors són generalment superiors als obtinguts al laboratori, on s'intenten controlar les condicions de projecció per ser el més properes possibles a les ideals.

Morgan et al. (1999) va estudiar el rebot que diferents tipus de fibres presentaven, tant metàl·liques com sintètiques. Els resultats deixen clar que el rebot en les fibres sintètiques és inferior, amb valors mitjans del 20 % mentre que en el cas de les fibres metàl·liques s'assolien percentatges superiors al 30 %.

2.4.4. Aplicacions del formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques.

A principis de la dècada dels 80, les fibres sintètiques van començar a aplicar-se com a elements de reforç del formigó projectat. Les primeres fibres usades en aquestes aplicacions eren fibres de polipropilè fibrilades, en dosificacions d'entre 4 i 6 kg/m³. Les primeres aplicacions d'aquesta tecnologia inclouen:

- Estabilització de talussos en roca.
- Revestiments de canals.
- Sosteniment permanent de túnels de drenatge de petit diàmetre.

L'aparició a mitjans de la dècada dels 90 de noves generacions de fibres sintètiques, amb millors característiques que les feien aptes per dosificacions superiors (entre 7 i 20 kg/m³), va significar l'ampliació dels àmbits d'aplicació d'aquestes. Algunes de les primeres aplicacions en el camp de l'enginyeria civil van ser:

- Estabilització de talussos.
- Construcció d'autopistes a Nova Scotia, Canadà.
- Segellat de l'incinerador municipal de Vancouver, Canadà.
- Reparació de l'amarrador al port de Saint John, New Brunswick, i del port de Montreal, Quebec, Canada.



Figura 2.14. Canal Olímpic a Sydney, revestit amb formigó projectat reforçat amb fibres sintètiques.



Figura 2.15. Revestiment definitiu d'un túnel a Ontario, Canadà.