

11
29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"

CONCRETO DE MUY ALTA RESISTENCIA
CON ADITIVO " SILICA - FUME "

T E S I S

Que para obtener el título de :
INGENIERO CIVIL

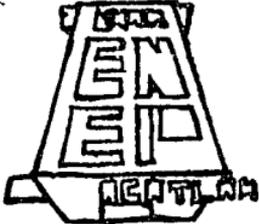
P r e s e n t a n :

MANUEL GOMEZ GUTIERREZ
RICARDO JAVIER HUACUJA ACEVEDO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ASESORES: ING. MIGUEL MOISES ZURITA EZQUIVEL
(Interno)

ING. ROBERTO COLIN MURRAY CAMPBELL D.
(Externo)



Acatlán, Edo. de México

Abril de 1993



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	Pag.
INTRODUCCION	VI
CAPITULO I	
FABRICACION DEL CONCRETO DE MUY ALTA RESISTENCIA	1
1.1. CEMENTO Y ALTA RESISTENCIA	2
1.1.1. GENERALIDADES SOBRE EL CEMENTO	2
1.1.2. EFECTO DE LAS CARACTERISTICAS DEL CEMENTO SOBRE LA RESISTENCIA	5
1.1.3. INFLUENCIA DE LA RIQUEZA DE LA MEZCLA EN LA RESISTENCIA	5
1.1.4. EFECTO DEL CEMENTO EN LA OBTENCION DE ALTAS RESISTENCIAS	8
1.2. USO DE ADITIVOS	9
1.2.1. SILICA-FUME	10
1.2.2. SUPERFLUIDIFICANTES	15
1.2.2.1. <i>Obtención de altas resistencias con el uso exclusivo de Superfluidificantes</i>	16
1.2.2.2. <i>Propiedades de los superfluidificantes en el concreto</i>	17
1.2.2.3. <i>Aplicaciones</i>	20
1.3. AGREGADOS	24
1.3.1. NATURALEZA Y CALIDAD	25
1.3.2. AGREGADOS COMUNES	25
1.3.3. CARACTERISTICAS DE IMPORTANCIA	27

	Pag.
1.4. MEZCLADO, TRANSPORTE Y COLOCACION	29
1.4.1. MEZCLADO	30
1.4.1.1. <i>Tiempo de mezclado</i>	31
1.4.1.2. <i>Generalidades del concreto premezclado</i>	33
1.4.2. TRANSPORTE	34
1.4.2.1. <i>Concreto transportado y mezclado en camión</i>	34
1.4.2.2. <i>Transporte de concreto mezclado en planta</i>	35
1.4.3. COLOCACION	36
1.4.3.1. <i>Importancia de la disgregación de los elementos del concreto en su colocación</i>	36
1.4.3.2. <i>Equipo más usual de colocación</i>	37
1.4.3.3. <i>Vibrado</i>	40
1.5. CONTROL DE CALIDAD	44
1.5.1. PRELIMINARES A LA ELABORACION DEL CONCRETO	45
1.5.2. ENSAYES AL CONCRETO YA ELABORADO	49
1.6. CURADO	52
1.6.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE CURADO	52
1.6.2. METODOS Y MATERIALES DE CURADO	53
1.6.2.1. <i>Curado con agua</i>	53
1.6.2.2. <i>Materiales selladores</i>	53
1.6.3. EFECTIVIDAD EN EL CURADO	54
1.6.3.1. <i>La resistencia como base de la efectividad</i>	54
1.6.4. TECNICAS DE CURADO PARA DIVERSAS OBRAS	54
1.6.4.1. <i>Losas sobre el suelo</i>	55
1.6.4.2. <i>Estructuras</i>	55
1.6.4.3. <i>Construcciones especiales</i>	55

	Pag.
CAPITULO II	
PRUEBAS DE LABORATORIO, COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES	57
2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO	58
2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESION	59
2.2.1. DESCRIPCION DE PRUEBAS	69
2.2.2. OTRAS PRUEBAS	75
2.3. RESISTENCIA A LA FLEXION	76
2.3.1. DESCRIPCION DE PRUEBAS	83
2.3.2. OTRAS PRUEBAS	102
2.4. RESISTENCIA A LA TENSION	103
2.4.1. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA	106
2.5. MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON	109
2.5.1. MODULO DE ELASTICIDAD	109
2.5.2. RELACION DE POISSON	112
2.6. PROPIEDADES GENERALES	112
2.6.1. PERMEABILIDAD	112
2.6.2. RESISTENCIA QUIMICA	113
2.6.3. RESISTENCIA A LA CONGELACION, DESHIELO, ABRASION Y DESCASCARAMIENTO	114
2.6.4. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	116

CAPITULO III	
APLICACIONES EN EL MEDIO DE LA CONSTRUCCION	117
3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL	118
3.1.1. RESISTENCIA A LA COMPRESION	119
3.1.1.1. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria ($\sigma-\epsilon$)</i>	119
3.1.1.2. <i>Módulo de elasticidad</i>	120
3.1.2. RESISTENCIA A LA TENSION	121
3.1.3. COEFICIENTE DE FLUENCIA	121
3.1.4. FLEXION EN VIGAS	122
3.1.4.1. <i>Flexión en vigas de concreto presforzado</i>	128
3.1.5. CORTANTE EN VIGAS	128
3.1.5.1. <i>Cortante en vigas de concreto reforzado sin estribos</i>	129
3.1.5.2. <i>Cortante en vigas de concreto reforzado con estribos</i>	130
3.1.5.3. <i>Cortante en vigas de concreto presforzado</i>	135
3.1.5.3.1. <i>Cortante en vigas de concreto presforzado sin estribos</i>	136
3.1.5.3.2. <i>Concreto en vigas de concreto presforzado con estribos</i>	137
3.1.6. REFUERZO LATERAL EN COLUMNAS	138
3.1.6.1. <i>Relaciones analíticas $\alpha-\epsilon$</i>	138
3.1.6.2. <i>Respuesta de columnas confinadas sujetas a cargas laterales</i>	143
3.2. PRINCIPALES APLICACIONES	143
3.2.1. EDIFICIOS	144
3.2.1.1. <i>Aplicación de los concretos de muy alta resistencia en zonas de Alta Sismicidad</i>	149
3.2.2. PUENTES	150
3.2.2.1. <i>Elementos presforzados en puentes</i>	151
3.2.3. CONCRETO LANZADO	153

	Pag.
3.3. APLICACIONES ESPECIALES	157
CAPITULO IV	
POSIBILIDADES DE MERCADO EN MEXICO	160
4.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	161
4.1.1. ANALISIS DE COSTOS	164
4.1.2. ANALISIS COMPARATIVO CON OTROS CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA	167
CONCLUSIONES	VIII
BIBLIOGRAFIA	XIII

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

INTRODUCCION

Concretos de muy alta resistencia, específicamente, aquellos que pueden obtenerse con un aditivo, el SILICA-FUME, el cual es la puzolana más efectiva que existe, superando en sus características a las puzolanas naturales, escorias de alto horno finamente divididas y cenizas volantes; aditivo con el cual pueden obtenerse resistencias que hace algunos años se hubiese pensado imposible: De resistencias usuales de 250 kg/cm^2 hasta aproximadamente $1,200 \text{ kg/cm}^2$.

Por otra parte, es del conocimiento general que el concreto permite el paso del agua en cierto grado a través de él, es decir, es un material permeable; ahora bien, con el uso del aditivo SILICA-FUME, el concreto se vuelve un material impermeable, evitando así los destructivos efectos en regiones frías de congelación y deshielo.

Otras de sus características es su gran resistencia ante agentes químicos externos, como puede ser el ataque de cloruros, que en el caso de concreto reforzado, corroen el acero de refuerzo creando expansión de volumen del mismo y en consecuencia, pérdida del recubrimiento de concreto que de alguna manera lo protegía perdiendo además su capacidad de tomar carga.

Dichas características tan impresionantes son las que motivaron en gran medida la realización de este trabajo.

El desarrollo y uso de este material ha sido un proceso en constante evolución. En un principio, el mayor desarrollo que tuvieron los concretos de alta resistencia, fue en la industria del concreto presforzado en la que se buscaba tener una gran resistencia de edades tempranas de las mezclas de concreto producidos por las empresas dedicadas a ese negocio.

En los años cincuenta, un investigador norteamericano, de apellido Klieger, definió técnicas de uso de materiales, compactación y curado, obteniendo en sus ensayos experimentales, resistencias a un solo día de 280 kg/cm^2 a los 28 días de $527-597 \text{ kg/cm}^2$, manejando contenidos de cemento de 279 a 670 kg/m^3 , este último material de importancia básica en toda mezcla de concreto y del cual dependerá la resistencia del concreto en íntima relación con la cantidad de agua aplicada a la mezcla.

Basado en sus experimentos, Klieger estableció las siguientes recomendaciones para la obtención de concretos de alta resistencia:

- Baja relación agua/cemento (ambas cantidades en peso).

- Cemento que asegure un rápido incremento de resistencia.
- Curado a Vapor.
- Control riguroso de la grava y de la arena a utilizar (granulometría, peso, finura, limpieza, etc.).

Otro investigador de la misma nacionalidad, Perenchio, en el año de 1973, en un programa experimental que consideraba un amplio número de combinaciones de mezclas y sus componentes, obtuvo resistencias de hasta 931 kg/cm^2 .

De sus experimentos formuló lo siguiente:

- La pasta de cemento, es decir, la mezcla de agua y cemento, es un factor importante para obtener altas resistencias.
- Relaciones bajas de agua/cemento son necesarias, ya que observó que entre menos agua tenía la mezcla, mayor era la resistencia obtenida.
- El curado por humedad dentro de las primeras horas es de regular importancia.
- Las características de los agregados como resistencia, adherencia, absorción y granulometría son importantes.

En algunos países como los Estados Unidos, Japón, Francia, Noruega y Alemania, principalmente, el desarrollo y aplicación práctica de concretos de muy alta resistencia tiene ya camino recorrido, progreso en el cual nuestro país, no debe quedar al margen, ya que la industria de la construcción es uno de los pilares de la economía nacional.

En este trabajo, se presenta un panorama específico de las características y perspectivas de uso del aditivo silica-fume en la obtención de concretos de alta resistencia.

Así mismo, se analizan diversos tópicos asociados específicamente a sus propiedades, aplicación, producción desarrollo y posibilidades de uso en nuestro país.



**FABRICACION
DEL
CONCRETO
DE
MUY
ALTA
RESISTENCIA**

CAPITULO I

FABRICACION DEL CONCRETO DE MUY ALTA RESISTENCIA

1.1. CEMENTO Y ALTA RESISTENCIA.

1.1.1. Generalidades sobre el Cemento.

El nombre del cemento, y más específicamente, cemento Portland, fue concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento ya fraguado y una caliza obtenida en la cantera de Portland, Inglaterra.

El cemento Portland es un ligamento hidráulico, que se obtiene cuando se entremuele finamente el Clinker con un 4 a 5% de yeso. Aquí cabe mencionar qué es el Clinker. Se define éste como un material sintético granular resultante de la cocción a una temperatura del orden de 1,450 grados centígrados, de materias trituradas, proporcionadas, mezcladas, pulverizadas y homogeneizadas. Esencialmente el Clinker está constituido por silicatos, aluminio y aluminoferrito cálcicos.

"Cemento Portland" es la definición general para los cementos fabricados de materias primas calcáreas y arcillosas sintetizadas a una temperatura aproximada de 1,450 grados centígrados.

La Norma Oficial Mexicana NOM-C-1, da la siguiente definición de cemento:

"Es el conglomerado hidráulico que resulta de la pulverización del Clinker frío, a un grado de finura determinado, al cual se le adicionan sulfato de calcio natural o agua con sulfato de calcio natural."

Además, pueden añadirse a la molienda, materiales auxiliares para obtener así alguna característica final en especial, mismos que se encuentran especificados en la NOM-C-133. (Coadyuvantes de molienda empleados en la elaboración de concretos hidráulicos).

Los principales elementos constitutivos del cemento son:

Silicato tricálcico (C3S).- De este elemento dependerán las resistencias que puedan obtenerse a los 28 días aproximadamente.

Silicato dicálcico (C2S).- De éste depende la resistencia que pueda obtener después de los 28 días.

Aluminio tricálcico (C3A).- Es el elemento que más calor genera. Este elemento provoca las variaciones de volumen y favorece la formación de grietas, su concentración en la mezcla debe de ser bajo, según las características esperadas del cemento.

Ferroaluminato tetracálcico (C4AF).- Ayuda a acelerar la hidratación en el concreto.

Los elementos antes mencionados constituyen aproximadamente un 90% del cemento. El otro 10% constituyen materiales como el yeso, cal libre, álcalis, etc..

Yeso (SO4Ca).- La velocidad con que se desarrolla el endurecimiento del cemento debe ser controlada dentro de ciertos límites. Dicho control es logrado dosificando yeso adecuadamente durante la molienda del Clinker, el cual regulará la acción química entre el cemento y el agua, controlando así el tiempo de fraguado.

Varias son las características o propiedades físicas del cemento, pero para efectos de este tema por su importancia sólo mencionaremos las siguientes: **fraguado**, **finura**, **calor de hidratación** y **peso específico**.

Fraguado (NOM-C-58, C-59, C-132).- La pasta que se forma cuando el cemento se mezcla con agua permanece plástica durante un período corto de tiempo. Durante esta etapa aún es posible alterar el material y remozcarlo sin causarle daño, pero a medida de que las reacciones químicas continúan, la masa pierde su plasticidad. Este período de endurecimiento es llamado "período de fraguado".

Finura (NOM-C-150, C-49, C-55, C-56).- La finura del cemento interviene determinadamente en la resistencia y la hidratación del mismo. Al aumentar la finura del cemento aumenta la rapidez a la que se hidrata el mismo, acelerando la adquisición de resistencia. Si se aumenta hasta cierto punto la finura del cemento, se reduce la cantidad requerida del agua de mezclado y también disminuye el sangrado del concreto; el sangrado es un tipo de segregación en la que parte del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del concreto recién colado (esto se debe a que los componentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua de mezclado cuando se asientan en el fondo).

Calor de Hidratación.- Las reacciones que produce el endurecimiento del cemento se caracterizan por la liberación de calor. Este calor es llamado calor de hidratación y depende básicamente de la composición química del cemento; característica muy importante en la obtención de concretos de alta resistencia, por la evaporación de agua que éste provoca modificando la relación agua/cemento, y a la vez, varía los requerimientos de agua de curado.

Peso Específico (NOM-C-152).- El peso específico de un cemento nos indica la calidad del mismo, siendo su uso primordial para el diseño de mezclas. El peso específico del cemento Portland generalmente es de 3.15 ton/m³.

Como ya se mencionó, al Clinker se le adicionan durante su molienda, diferentes cantidades de yeso, etc. lo que da como resultado la obtención de distintos tipos de cemento, que buscan dar al concreto fresco o endurecido ciertas características especiales. Entre los tipos más comunes que se fabrican tenemos:

(Clasificación según NOM-C-1 Y Norma ASTM C-150).

CEMENTO TIPO I

Normal.- Para uso general en construcciones de concreto cuando no se requieran las propiedades especiales de los tipos II, III, IV y V. Es decir, se usa donde el cemento o el concreto no esta sujeto al ataque de factores específicos, o a elevaciones perjudiciales de temperatura, debido al calor de hidratación (se entiende por calor de hidratación como el incremento de temperatura generado al reaccionar el cemento Portland con el agua; y es la cantidad de calor medida en calorías por gramo de cemento deshidratado, dispersado por una hidratación completa a una temperatura dada).

Usos: Pavimentos, aceras, concreto reforzado, depósitos, tanques, mamposteo, etc..

CEMENTO TIPO II

Modificado.- De uso en construcciones de concreto expuestas a un ataque moderado de sulfatos o cuando se requiera un calor de hidratación moderado.

Usos: Estructuras de drenaje, estructuras de gran masa, presas, naves industriales , etc., de gran uso en climas cálidos.

CEMENTO TIPO III

De Rápida Resistencia Alta.- Utilizado en concretos en los que se requiere una alta resistencia inicial, independientemente del desarrollo posterior de resistencia. Produce más calor que el cemento tipo I.

Usos: Elementos estructurales presforzados, o siempre que se requiera descimbrar lo más pronto posible.

CEMENTO TIPO IV

De Bajo Calor de Hidratación.- Cuando se requiera bajo calor de hidratación.

Usos: En estructuras de concreto masivo, por ejemplo en presas.

CEMENTO TIPO V

De Alta Resistencia a los Sulfatos.- Cuando se requiera una alta resistencia a la acción de los sulfatos. Cuando se emplea este tipo de cemento, su contenido en la mezcla de concreto con agregado máximo de 3/4" no debe ser menor que 280 kg/m³ y su relación agua/cemento no debe ser mayor de 0.55. Produce menos calor que el cemento normal.

Usos: De uso en concretos expuestos al agua de mar o en los que están situados debajo del nivel del terreno, donde se sabe que hay presencia de sulfatos.

1.1.2. Efecto de las características del cemento sobre la resistencia.

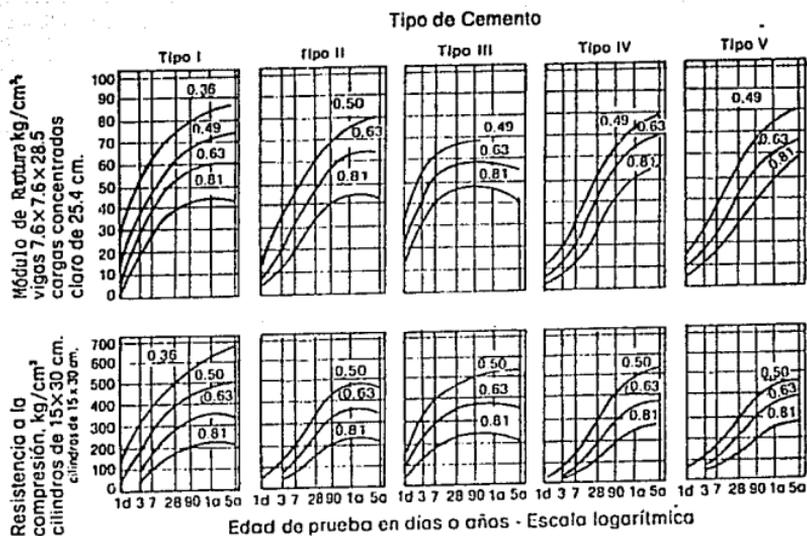
Todos los cementos se conducen más o menos en forma similar, aunque el incremento de la resistencia con la edad no es el mismo siempre. Algunos cementos, como ya se mencionó en el inciso anterior, aumentan su resistencia más rápidamente al principio, en cambio otros cementos muestran mayores incrementos a períodos posteriores. Lo anterior es aplicable no únicamente a los cinco tipos tratados anteriormente, si no también a los distintos cementos dentro del mismo tipo.

La **Figura 1.1.** muestra las resistencias a la compresión y a la flexión de especímenes de concreto fabricados con los cinco tipos de cemento especificados en la NOM-C-1, sometidos a curado húmedo y ensayados a edades entre 1 día y 5 años. Como se observa, las resistencias de los cementos, para una relación agua/cemento no variable, muestran las mayores diferencias en las primeras edades. Se observa también que después de los 90 días las diferencias se hacen menores.

1.1.3. Influencia de la riqueza de la mezcla en la resistencia.

Generalizando, mientras más cemento se utilice, es mayor la resistencia, pero es importante aclarar que el cemento en si mismo no es una medida de resistencia. Esto es debido a que un alto contenido de cemento da, con la cantidad de agua necesaria para la trabajabilidad, una relación agua/cemento menor, la cual está directamente relacionada con la resistencia. Entre dos mezclas de trabajabilidad comparable, la de más baja relación agua/cemento tendrá mayor resistencia independientemente de la cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto.

Es cierto también, que entre dos mezclas de trabajabilidad comparable y con la misma relación agua/cemento (misma resistencia potencial), puede existir una diferencia considerable en el contenido de cemento, dependiendo de la granulometría y características especiales del agregado.



Efecto del tipo de cemento y de la relación agua-cemento sobre la resistencia a la compresión y al módulo de ruptura de especímenes de concreto, con curado continuo en cámara húmeda y probados en estado húmedo.

FIGURA 1.1

No hay lugar a dudas de que la relación "agregado/cemento" es un factor secundario únicamente en relación con la resistencia del concreto, aunque se ha descubierto que para una relación agua/cemento constante, una mezcla más pobre (con alta relación agregado/cemento) produce una resistencia mayor. Probablemente este comportamiento esté relacionado con la absorción de agua por parte del agregado; una cantidad más grande de agregado absorbe más agua y, por lo tanto se reduce la relación agua/cemento. Sin embargo, existen otros factores que influyen, por citar un ejemplo, el contenido total de agua por m³ de concreto es menor para las mezclas más pobres que para las ricas. Como resultado, en las mezclas más pobres los huecos forman una fracción más pequeña del volumen total del concreto, y esos mismos huecos son los que ejercen un efecto adverso sobre la resistencia.

Estudios recientes sobre la influencia del contenido de agregado en relación con la resistencia del concreto hecho con pasta de cemento de determinada calidad indica que, cuando el volumen de los agregados (% del volumen total) aumenta de 0 a 20, hay un descenso gradual de la resistencia a la compresión, pero entre 40 y 80 ésta aumenta. En la figura 1.2. aparece éste patrón de comportamiento.

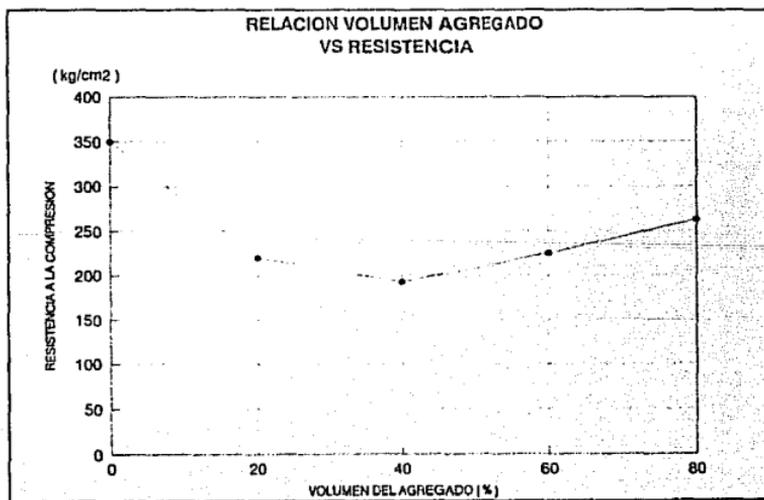


FIGURA 1.2

1.1.4. Efecto del Cemento en la obtención de altas resistencias.

La selección de cemento es un importante parámetro del efecto de la resistencia última a la compresión para concretos de alta resistencia. Cuando se preparan proporciones de mezcla específicas, para pruebas de mortero de diferente tipo de cemento, disponibles en el área del proyecto, debe ser conducido a pruebas de edades más grandes, incluidos los 28 días. Comparando datos, a lo largo de la respectiva proporción de la mezcla de concreto y su resistencia a la compresión se obtiene suficiente información para una elección óptima de cemento, cuando se toman otros parámetros como constantes.

Altos contenidos de cemento, en el rango de 500 a 600 kg/m³, han sido utilizados en programas de investigación de Laboratorio, la trabajabilidad de la mezcla en función de su viscosidad, es un efecto adverso, de este modo la interacción del Silica-fume y la arena debe ser evaluada. La solución generalmente es el utilizar una arena gruesa con un alto módulo de finura.

En pruebas realizadas, 5 muestras de cemento Portland tipo I fueron probadas con cubos de mortero rotos a la compresión a edades de 1, 3, 7, 28, 45 y 63 días. Los resultados se expresan en la Tabla 1.1..

TABLA 1.1..

E D A D (Días)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Kg/cm ²)				
	A	B	C	D	E
1	201	256	196	170	245
3	349	290	292	283	284
7	422	335	339	300	307
28	490	411	420	399	402
45	496	413	425	403	405
63	493	411	423	410	408

Repasando los datos de la resistencia a la compresión que se encuentran en el rango de los 400 a los 500 kg/cm² a los 63 días se observa un incremento de resistencia casi horizontal a partir de los 28 días. Esta horizontalidad no es, de cualquier manera, encontrada en todos los cementos, de este modo, los cubos de prueba deben de ser conducidos no sólo para los 28 días de resistencia, sino también para un desarrollo de la misma entre los 28 y los 90 días.

1.2. USO DE ADITIVOS.

"Aditivo. Es un material diferente del agua, de los agregados y del cemento hidráulico que se emplea como componente del concreto o mortero y que se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado" (Norma ASTM C-125 y ACI SP-19)".

Se define así a todos los aditivos de uso común, teniéndose la excepción de aquellos que den como resultado un tipo específico de concreto.

Estos se emplean para modificar las propiedades del concreto haciéndolo más adecuado para un fin determinado, o para alcanzar un resultado específico.

Muchas son las aplicaciones de los aditivos según el fin que se persiga; a continuación se mencionan algunos casos que, para efectos de nuestro estudio, tienen un significado importante:

- En la mezcla para reducir el contenido de agua para una trabajabilidad específica o cuando se requiera una mayor trabajabilidad.
- Para mejorar la penetración y la bombeabilidad.
- Para incrementar la resistencia.
- Para incrementar la durabilidad o resistencia ante condiciones degradantes ambientales o propiciadas por el hombre.
- Reducir o retardar el tiempo de fraguado así como sus características de desarrollo de resistencia.
- Reducción de permeabilidad.

Es necesario, para el uso de todo aditivo el seguir cuidadosamente las instrucciones y recomendaciones del fabricante así como las mismas provenientes de las asociaciones de estudio de materiales (ASTM, ACI, IMCYC, etc.), ya que los aditivos aportan propiedades, pero pueden así mismo afectar alguna otra. Deben cuidarse los siguientes aspectos:

- Modificaciones en la cantidad de los materiales.
- Relaciones de a/c y tiempo de mezclado.

- Evaluación de los resultados en procesos lo más aproximados a las realidades en obra.
- Compatibilidad de aditivos.
- Secuencia de mezclado y momento de aplicación del aditivo.
- Cuidado en la carga y descarga de los materiales o mezcla preparada.
- Especificaciones recomendadas del equipo a utilizar.

Los aditivos, en lo concerniente a su aplicación, pueden ser en forma de solución líquida o como polvo, aplicándose por volumen y peso respectivamente.

Para la correcta dosificación de los aditivos líquidos se requieren recipientes debidamente graduados.

Los aditivos aplicados en forma seca (puzolanas naturales, cenizas volantes; polvos de sílice (Silica-fume), etc.) son fácilmente dosificables.

Cabe aquí mencionar, para no cometer errores posteriores, la diferencia entre un aditivo y un adicionante.

Aditivo: es cuando el material se agrega a la mezcla separadamente, antes o durante el mezclado.

Adicionante: es cuando el material se agrega mezclándose con el cemento, antes o durante el mezclado.

1.2.1. SILICA FUME

Se considera a éste como un aditivo mineral finalmente dividido; tal como lo establece el IMCYC, se tienen cuatro tipos de aditivos minerales finamente divididos:

- Cementantes.
- Puzolánicos.
- Combinación de los anteriores.
- Otros.

Los tres primeros, contribuyen a la resistencia del concreto, requiriendo en su caso, menos cemento para producir cierta resistencia.

Muchos aditivos minerales finamente divididos son productos secundarios de bajo costo, que ocasionalmente se usan para reducir el costo del cemento.

Ahora bien, toca clasificar al Silica-fume que por sus características, se define como Puzolana (ACI-19).

Silica-fume "Es un producto secundario de la industria de metales con aleaciones de silicio, resultando así ser un material silíceo o sílico aluminoso que en sí no posee poco o ningún valor cementante, pero que, en presencia de humedad reacciona con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para formar compuestos con propiedades cementantes".

El Silica-fume reacciona con la liga libre en el cemento, para formar una nueva sustancia cementante, llamada: "silicato de calcio hidratado", el cual incrementa la resistencia a largo plazo en relación directa con la finura y el contenido de sílice.

El Silica-fume ha sido probado por la Portland Cement Association (PCA) y se encuentran todos sus requerimientos en la Norma ASTM 618-78. Los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 1.2, mostrada a continuación:

TABLA 1.2. CARACTERISTICAS PUZOLANICAS:

	SILICA FUME	CENIZA VOLANTE
Area superficial	200,000 cm ² /gm	5,000 cm ² /gm
Contenido de SiO ₂	93 al 98 %	44 al 48 %

Cuando se comparan las características de la ceniza volante el Silica-fume es superior con un área superficial de 200,000 cm^2/gm contra 5,000 cm^2/gm para la ceniza volante, con un contenido de sílice amorfo que va de un 93 a un 98 % contra un 44 a un 48 % de la ceniza volante, el aditivo ha sido probado también por la PCA para la especificación estándar de aditivos químicos para concreto, ASTM C 494-81; desde la ASTM 618 que fue revisada, en 1980 removiendo la clase -S-, la cual fue la única categoría apropiada para el Silica-fume en esa especificación de puzolanas. El problema del bajo contenido de sílice de la ceniza volante y del alto porcentaje en contenido de carbón y sulfuros del Silica-fume es el enfrentamiento en el que, en la ceniza volante, éstos no existen.

Por consiguiente el humo de sílice es un material más reactivo que la ceniza volante, con el Hidróxido de Calcio que se forma por la hidratación del cemento y da lugar a concretos aún más " tixotrópicos " (fluidos pero muy cohesivos). Tienen la particularidad además, en función de su pequeñísimo tamaño que las partículas de Silica-fume se sitúan entre las partículas de cemento más gruesas, formando así una pasta de cemento aún más densa y compacta.

Substancialmente, el Silica-fume actúa con el cemento al igual que la arena con la grava.

En resumen, el Silica-fume nos lleva a obtener las siguientes características principales:

En CONCRETO FRESCO:

- Disminuye la expansión del mortero causada por la reacción Alkali-Agregado.
- Incrementa la plasticidad y reduce el sangrado.

En CONCRETO ENDURECIDO:

- Una bajísima permeabilidad a la intrusión de iones de cloro, que previene la corrosión. (Ver figura 1.3)
- Resistencias últimas a la compresión de 560 a 1,190 kg/cm^2 . (Ver figure 1.4).

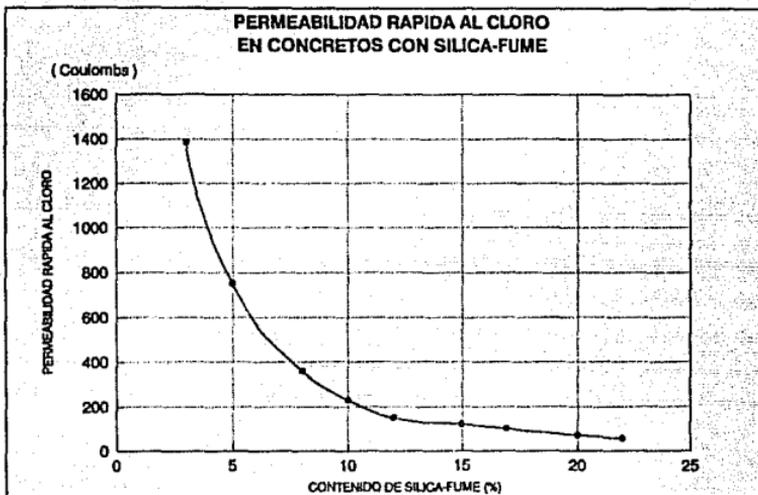


FIGURA 1.3

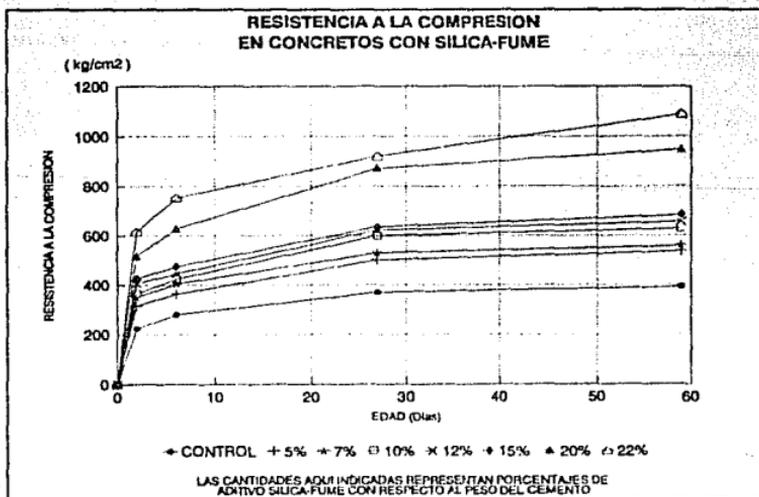


FIGURA 1.4

- **Altas resistencias tempranas (sin curado a vapor) de 300 kg/cm² en 24 hrs., de 420 kg/cm² a los 3 días, (con un curado a vapor estas resistencias pueden incrementarse de un 50 a un 100 %).**
- **Resistencias al ataque químico de cloruros, ácidos y sulfatos.**
- **Incremento en la resistencia a la abrasión y la durabilidad.**
- **Incremento en la durabilidad por efecto de congelación y deshielo.**

Actualmente este producto se encuentra disponible en cantidades relativamente elevadas en el norte de Europa (Noruega) y en los EEUU.

Por sus características, el Silica-fume es de fácil manejo (mejor que manejar un bulto de cemento) y puede ser almacenado en silos ordinarios o tanques masivos de cemento.

Puede ser movido de dichos silos por medio de líneas automáticas o cucharones elevadores.

El Silica-fume, muy comercializado por la empresa norteamericana NORCEM, puede ser transportado vía tanques de cemento ordinarios con capacidades de 23 a 25 Ton o en "Super Sacos", que son bolsas largas de 2 m3 de polipropileno, las cuales pueden almacenar aproximadamente 1 Ton. de Silica-fume compactado. La doble densidad permite métodos de manejo a mano y también ayuda a reducir los costos por acarros.

El aditivo Silica-fume se encuentra disponible en el mercado norteamericano en bolsas de 25 kg para proyectos pequeños y uso en campo.

Observamos que debido a altos contenidos de cemento y de puzolanas finas, como el Silica-fume, en los diseños de mezclas de concretos de Muy Alta Resistencia se tiene como demanda principal el uso de Reductores de Agua de Alto Rango o Superfluidificantes. Los reductores de agua son usados en grandes dosificaciones para compensar el incremento de la demanda de agua de los materiales finos y para permitir colocar el concreto con revenimientos razonables.

1.2.2. SUPERFLUIDIFICANTES

Los superfluidificantes o "reductores de agua de alto rango" constituyen una categoría relativamente nueva de aditivos químicos. Su uso comercial se remonta a 1972 en Alemania y finales de la década de los sesentas Japón. Sin embargo, su desarrollo y experimentación marcan un período básico de hasta los últimos 5 a 8 años.

Superfluidificante: " Es una sustancia química, o una combinación de sustancias químicas que, cuando se adicionan al concreto normal:

- a) Le imparten una trabajabilidad extrema.
- b) Le proporcionan una gran reducción de agua.

Las aplicaciones más importantes de los aditivos superfluidificantes son básicamente:

- a) La producción de concreto fluido.
- b) La producción de concreto con reducción de agua, más bien conocido como: Concreto de Alta Resistencia.

Existen cuatro tipos básicos de superfluidificantes:

Categoría A	-	Condensados de Formaldehido Melamina Sulfatados.
Categoría B	-	Condensados de Formaldehido Naftalina Sulfatados.
Categoría C	-	Lignosulfonatos Modificados.
Categoría D	-	Otros.

Los aditivos superfluidificantes poseen una gran capacidad de dispersión, sin presentar efectos colaterales no deseados, estos aditivos se absorben en las partículas de cemento, causando que se repelan estas partículas en forma mutua como resultado de la naturaleza aniónica de los superfluidificantes, que origina que las partículas de cemento se cargen negativamente.

Como se mencionó para los dos diferentes tipos de concreto obtenidos a partir de superfluidificantes se observa que su función básica es el reducir en forma considerable el contenido de agua de morteros y concretos, modificando o no su consistencia y su tiempo de fraguado.

Al usarse para incrementar en buena medida el revenimiento, sin aumentar el contenido de agua se logran reducciones de la misma de un 25 al 30 % o más, dependiendo de la dosificación mezclado, tipo de mortero o concreto, etc..

Al ser usados para incrementar la fluidez el concreto pierde su revenimiento adicional dentro de 30 a 60 minutos después de aplicado el aditivo en la mezcla.

El efecto que causa este tipo de aditivos sobre los diferentes tipos de cemento es variable y de consideración ya que puede provocar un endurecimiento tardío o prematuro.

Como resultado de la gran trabajabilidad que la adición de un superfluidificante proporciona al concreto, es posible hacer concretos con una trabajabilidad convencional, es decir, con un revenimiento de 50 a 75 mm y una relación a/c mínima.

Cabe mencionar que una relación a/c de 0.27 teóricamente es la más adecuada para la hidratación del cemento y que cualquier contenido excedente a esta relación disminuirá la resistencia a la compresión (f'c), que pudiera alcanzarse.

En la práctica cotidiana en lo referente a colados de concreto, generalmente se pide una trabajabilidad que resulta difícil de obtener sin la adición de una poca o, en la mayoría de los casos, de mucha agua, afectando así, primeramente, la relación a/c y, consiguientemente, la resistencia.

Se hace necesario mencionar por su gran importancia en la obtención de concretos de muy alta resistencia, la Ley de Abrahams, que relaciona el contenido de agua de una mezcla con el peso del cemento (a/c): " A más baja relación a/c es mayor la resistencia y viceversa ".

1.2.2.1. Obtención de altas resistencias con el uso exclusivo de superfluidificantes:

Usando los dispersores de alto rango o superfluidificantes, es posible obtener concretos de muy alta resistencia mecánica con una relación a/c muy disminuida y una trabajabilidad convencional (Revenimiento de 5.0 a 7.0 cm). Es importante mencionar, que para una correcta hidratación del concreto, basta tan sólo una relación a/c de 0.27 y que un contenido extra de agua disminuirá la resistencia que pudiera obtenerse. Se hace la observación que para obtener altas resistencias resulta más importante disminuir la relación a/c que aumentar el contenido de cemento en la mezcla de concreto.

Como características más importantes de los concretos con reducción de agua tenemos:

- Alta resistencia temprana y última.
- Durabilidad.
- Permeabilidad.

1.2.2.2. Propiedades de los superfluidificantes en el concreto

Concreto Fresco:

Analicemos primeramente, cuál es la capacidad de los aditivos superfluidificantes para reducir el agua de la mezcla. Para ésto se tomó el siguiente ejemplo:

Mezcla 1:2:4 (cem:grava:arena).
Contenido de cemento : 300 kg/m³.
Aditivo superfluidificante: Categoría B.

TABLA 1.3

DOSIFICACION (*)	A / C	REDUCCION DE AGUA (%)	REVENIMIENTO (CM)
0	0.60	0	10
NORMAL	0.57	5	10
DOBLE	0.52	20**	10
TRIPLE	0.48	15	10

(*) Nota : El hablar de dosificaciones de esta manera no se relacionan directamente estos aditivos con las recomendadas por los diferentes fabricantes de aditivos de este tipo, pero sí da una idea de su efecto en proporción a la cantidad dosificada.

Obsérvese en la Tabla 1.3 que para una dosificación dos veces la normal (doble) se obtiene una reducción de agua óptima(**). Se ve entonces la gran capacidad que tienen los aditivos superfluidificantes en la reducción de agua de la mezcla. La importancia de esta reducción de agua radica en los aumentos considerables de resistencia que pueden obtenerse. También se ha comprobado que el uso de superfluidificantes no altera el endurecimiento del concreto.

Concreto Endurecido:

La relación entre el tiempo y la resistencia a la compresión de concretos con diferentes relaciones a/c y usando un aditivo superfluidificante Categoría A se muestra en la figura 1.5. En dicho ensayo de laboratorio se logró una reducción de agua sobre el concreto de control de 24.5 % sin modificarse la trabajabilidad y como consecuencia se obtuvo un incremento aproximado de resistencia de un 45.0 %.

Los detalles de dosificación de la mezcla utilizada se muestran en la Tabla 1.4.

TABLA 1.4

MEZCLA	CONTROL	DOSIFICACION	
		NORMAL	DOBLE
RELACION AGREGADO-CEMENTO	5.35	5.35	5.35
ARENA, ZONA 3 (%)	40	40	40
AGREGADO GRUESO (%) (20-5MM)	60	60	60
A/C	0.61	0.55	0.46
REVENIMIENTO (cm)	7.30	7.50	8.50
PESO VOLUMETRICO PLASTICO (KM/M3)	2.295	2.335	2.345

NOTA: Obsérvese los patrones de mezcla que se mantuvieron constantes y los que variaron.

Otra característica de resistencia importante, es que conforme aumenta la resistencia a la compresión, se incrementa también la resistencia a la flexión y la relación entre ambas disminuye.

Se tiene como antecedente, que la variación en la resistencia se atribuye en forma directa a la relación a/c, no considerando algún factor adverso a la presencia de superfluidificantes.

Resistencia Temprana:

Aprovechando la capacidad de los superfluidificantes para reducir considerablemente el contenido de agua en el concreto, es posible lograr resistencias altas a edad temprana.

Esta alta resistencia a temprana edad es de gran utilidad en la industria del preesfuerzo y de prefabricados varios, puesto que facilita un rápido desmoldeo.

Analizando dicha característica se tomó como ejemplo un concreto con un contenido de cemento de 400 kg/m³, al cual se le aplicaron diferentes dosificaciones de un aditivo superfluidificante de Categoría A, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 1.5, (vease la figura 1.5.).

Es de importancia observar que la resistencia alta a temprana edad resulta óptima con una dosificación doble del aditivo, característica ya mencionada al examinar las relaciones de dosificación del aditivo y reducción de agua.

Una dosis excesiva de aditivo bien puede originar que el aumento de resistencia sea menor a la mezcla óptima. Sin embargo, aún para dosificaciones bajas de aditivo es ponderable su uso en vez de aumentar las cantidades de cemento en la mezcla.

TABLA 1.5

DOSIFICACION ADITIVOS	A/C 1 DIA	RESISTENCIA (KG/CM)		CAMBIOS EN LA RESISTENCIA (%) *	
		7 DIAS	1 DIA	7 DIAS	7 DIAS
O	0.42	184	560	-----	-----
NORMAL	0.36	388	637	+ 111	+ 14
DOBLE	0.33	506	778	+ 176	+ 39
CUADRUPLE	0.32	501	773	+ 173	+ 38

(*) Porcentaje del cambio de resistencia en relación a la muestra de control.

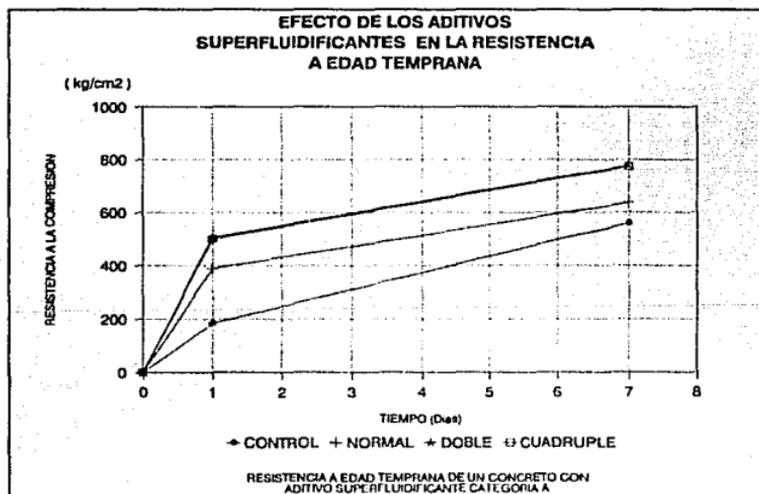


FIGURA 1.5

Tenemos que, mediante una reducción de agua del 25 al 30 % puede obtenerse un incremento del 50 al 75 % en la resistencia a las 24 horas, reduciéndose dicha diferencia al paso de los días. Se tiene entonces, como regla general, que al aplicar un aditivo superfluidificante en combinación con la reducción de agua, para una mezcla de revenimiento igual al de control, que la resistencia obtenida generalmente en 7 días se obtendría en 3, y que la esperada a los 28 días se obtendrá a los 7 días.

Obsérvese la figura 1.6 donde se aprecia claramente la alta resistencia obtenida a edad temprana.

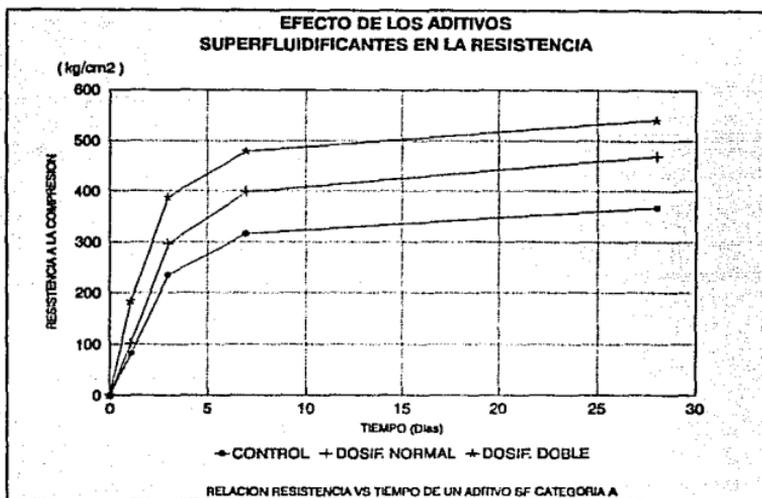


FIGURA 1.6

Durabilidad:

Refiriéndonos al efecto de los aditivos dispersores de agua de alto rango a largo plazo, se tiene la experiencia de que éstos, no alteran la resistencia inicial obtenida.

En lo que se refiere a la relación que existe entre el uso de este tipo de aditivos y la corrosión en el acero de refuerzo, existe la experiencia de estudios realizados en Japón de que los aditivos superfluidificantes al no tener cloruros y por estar constituidos por compuestos dispersantes muy estables, no alteran las características principales del acero.

1.2.2.3. Aplicaciones:

Entre las aplicaciones más importantes de los superfluidificantes en mezclas de concreto tenemos:

- a) **Elementos de concreto preesforzado. Se ha comprobado que al curar a altas temperaturas, los superfluidificantes no sufren ningún problema adverso.**
- b) **Concretos de alta resistencia a temprana edad. Para permitir un rápido desmoldeo en elementos prefabricados o una rápida transferencia del preesfuerzo del cable a concreto.**
- c) **Concretos de alta resistencia última. En aquellas aplicaciones donde la resistencia última se requiera de un valor alto.**

A continuación se muestran las características principales de dos superfluidificantes que existen en el mercado nacional:

1. SIKAMENT 100

A) Descripción:

Es un aditivo líquido, café oscuro, fabricado a base de polímeros. Es un reductor de agua de alto rango, autonivelante y acelerante de una densidad igual a 1.24 +/- 0.01 lt/kg.

B) Ventajas:

- **Superfluidificante acelerante.**
- **Incrementa la eficiencia del cemento por la reducción del mismo.**
- **Reductor de agua de alto rango, que permite reducciones considerables de cemento.**
- **Bombeo del concreto a mayores altura que los convencionales, por lo cual se obtiene mayor eficiencia y menor desgaste en el equipo de bombeo.**
- **Incrementa el uso de la cimbra.**

- Reduce el vibrado y compactación por ser autonivelante.
- No provoca segregación ni sangrado.
- Reduce la permeabilidad.
- Produce excelentes acabados.
- Permite reducir el costo de: colocación, vibrado, cimbra y tiempos de construcción.

C) Dosificación:

Para concretos superfluidificantes del 1 al 3 %, respecto al peso del cemento según granulometría de los agregados y consumo de cemento.

D) Modo de empleo:

Adicionar a la olla revoladora el aditivo al concreto ya mezclado, tiempo de incorporación de 2 a 3 minutos.

2. RHEOBUILD 2000.

A) Descripción:

Es un aditivo compuesto por polímeros sulfonados hidrosolubles, con diferente peso molecular. Cada fracción de polímero presenta una acción fluidificante especificada.

Al añadirse éste al concreto., las moléculas del polímero cargado negativamente son absorbidas en la superficie de las partículas de cemento, provocando una repulsión electrostática entre las mismas, facilitando así su dispersión en el agua y haciendo en consecuencia que la mezcla sea más fluida.

B) Ventajas:

- Permite obtener concretos rheoplásticos (fluidos y no segregables).

- **Obtención de una relación a/c menor a la obtenida con los superfluidificantes líquidos normales; de 0.3 a 0.4.**
 - **Revenimiento promedio de 200 a 260 mm.**
 - **Favorece altas resistencias mecánicas a cortos tiempos.**
 - **Mejora la permeabilidad, durabilidad y adherencia al acero, entre otras.**
- C) Dosificación:**

La dosificación óptima de este aditivo es generalmente de 3 lts/100 kg de cemento (3%). Son posibles variaciones en las dosis, dependiendo de las particulares condiciones de trabajo.

- D) Modo de empleo:**

La mejor manera de utilizar este producto es la siguiente:

- a) **Mezclar de la forma tradicional, cemento, arena, grava y una parte de agua (25 al 30 % del cemento) hasta obtener una mezcla seca pero homogénea.**
- b) **Añadir el aditivo y seguir mezclando por 30 - 60 segundos más., con la finalidad de asegurar una distribución homogénea del aditivo.**
- c) **Sin dejar de mezclar se añade por fin, el agua restante hasta obtener la trabajabilidad requerida.**

Debido al hecho de que este aditivo fue proyectado para producir concretos de altísima calidad, las dosificaciones de cemento aconsejadas son relativamente elevadas (aproximadamente 400 kg/m³). El uso de cenizas volantes o humo de sílice es particularmente útil, donde estos materiales sean disponibles, para producir concretos autonivelantes y muy cohesivos.

Como se pueda observar, pueden ser muchos y muy variados los diferentes tipos de superfluidificantes pero en sus características básicas todos conllevan a las siguientes ventajas.

Principalmente, -alta resistencia a la compresión, baja permeabilidad, durabilidad, aumento de resistencia, acelerante de resistencia, fluidez y fluidez con fraguado prolongado-.

En segundo término -protección a la corrosión, durabilidad, abrasión hidráulica y resistencia a la flexión.

Como conclusión del uso del Silica-fume y de los aditivos superfluidificantes se observa que, la adición del primero únicamente al concreto, no trae gran ventaja, es más el Silica-fume debido a su elevada superficie específica requiere una gran cantidad de agua y el concreto que lo contiene presentaría así una relación agua cemento alta. En cambio, el uso conjunto de superfluidificantes y Silica-fume permite obtener concretos con una relación agua/cementante (Cementante = Silica-fume + cemento) inferiores con menor porosidad y como consecuencia mayor resistencia mecánica.

1.3 AGREGADOS

El 100 % de los concretos que se elaboran en México, se encuentran constituidos por agregados de origen ya sea natural o producto de trituración de roca. La perspectiva de los agregados en el campo de la producción de concretos de muy alta resistencia tiene como principal mercado la Ciudad de México ya que en esta zona geográfica es donde se da la mayor densidad de edificios en el país. El problema que aquí se presenta es que en los alrededores de la Ciudad de México es difícil obtener agregados de óptima calidad, obligando dicha situación a la búsqueda de dichos materiales en lugares lejanos trayendo como consecuencia un incremento en el costo del concreto.

Agregados: Materiales inertes que se mezclan con el aglomerante para obtener así concretos. La NOM-C-111 los define como " Material natural, natural procesado y artificial que se mezcla con un cementante hidráulico para hacer morteros o concretos ". Se tienen dos tipos básicos:

- Arenas -Se clasifican así a aquellos materiales que atraviesan la malla NOM G 4.75. También es llamado agregado fino.

- Gravas -Se clasifican así, a aquellos materiales que quedan retenidos en la malla NOM G 4.75. También es llamado agregado grueso.

Dichos materiales deben de estar limpios de impurezas como carbón, escorias, yeso, mica, restos vegetales; esto es, porque dichos materiales comprometen la resistencia del concreto y en el caso de las gravas su adherencia con el mortero.

En caso de las gravas la limpieza se realiza con lavado de los materiales finos adheridos a la misma. El estudio de la medición del peso antes y después del lavado nos da el porcentaje del peso que constituyen los finos en relación al total.

El control de la limpieza de la arena se lleva a cabo con la prueba de equivalente de arena (E.S.) que en el caso de arenas puras se tiene un 100 % y en el de arcillas puras de 0 % se recomienda un valor de E.S. = 75 % para concretos de mucha calidad.

1.3.1. Naturaleza y calidad.

La naturaleza del material viene dada por la roca o producto que constituyen los granos: basalto, pórfido, cuarcita, sílex, calcáreas, arenisca, baritina, piritita, escoria, piedra pómez, etc..

Todo agregado se puede obtener de dos diferentes formas:

- a) Origen natural: cantos rodados (más o menos redondeados).
- b) Producto de trituración (aspecto anguloso).

Sus dos principales características en relación a la resistencia esperada del concreto son:

- Adherencia con el mortero.
- Resistencia del agregado.

1.3.2. Agregados comunes:

- Sílex, calcáreas duros, y síliceo-calcáreas: de origen aluvial, pueden ser duros o frágiles, los calcáreas son menos duros que los sílex pero presentan mayor adherencia.

- **Basalto, agregado muy duro, de alta densidad absoluta (de 2.8 a 3.0). De origen ígneo extrusivo, presenta una textura afanítica vesicular. Presenta una alta resistencia a la compresión y a la abrasión.**
- **Cuarzitas, extremadamente duras, agregado ideal para obtener concretos de muy alta resistencia por sus características de coherencia entre los granos de sílice que las constituyen. Requieren un análisis de laboratorio antes de su utilización ya que pueden contener sílice del tipo reactivo con los álcalis del cemento.**
- **Arenisca; formados por granos de sílice aglomerados, siendo estas duras, resultan ser buenos agregados, mientras no contengan cementantes silíceos que sean reactivos con los álcalis del cemento.**
- **Pórfidos; duros, compactos y resistentes. No almacenables sus arenas por presentar descomposición arcillosa al contacto con la humedad.**
- **Granitos; la presencia de mica en éstos es nociva. Algunos presentan descomposición al contacto con la humedad. Agregados no recomendables por ser altamente intemperisables.**
- **Esquisto; no recomendable. Estructura hojosa laminar y descomposición con la humedad, muy deslizable.**
- **Caliza; se encuentra constituido básicamente por calcita, es un agregado que presenta una textura cristalina y es altamente soluble, presentando una buena resistencia mecánica.**
- **Riolita; de buena resistencia mecánica pero altamente reactiva con los álcalis del cemento.**
- **Gabro; de origen ígneo intrusivo, presenta una textura fanerítica. Es un agregado de alto peso específico.**

Agregados pesados: Se utilizan en concretos cuya finalidad es dar protección biológica, a los alrededores de construcciones que produzcan cierta radioactividad.

- Baritina; densidad absoluta de 4.2 a 4.7.
- Magnetita; densidad absoluta de 4.5 a 5.1.
- Chatarras; densidad absoluta de 7.6 a 7.8.

Agregados ligeros; se utilizan para producir concretos ligeros., presentan estos concretos resistencias bajas, en relación directa con lo ligero del agregado.

- Arcilla expandida, esquistos expandidos, escorias expandidas, piedras pómez y puzolanas.
- Agregados muy duros: su fin principal en aplicaciones de antidesgaste.
- Cuarzo, dorindón y carborundo.

1.3.3. Características de importancia:

Arenas:

- Granulometría de 0.05 a 2.00 mm finas de 2.00 a 5.00 mm gruesas.

Se considera como arena óptima a aquella constituida por 65 % de arena fina y 35 % de arena gruesa.

- Peso específico de 1450 kg/m³ a 1600 kg/m³
Peso específico húmedo de 2000 kg/m³.
- Control de calidad: toda arena debe estar limpia de arcillas, carbón, lignito y materia orgánica teniendo una granulometría distribuida para evitar vacíos. la NOM-C-111 es específica en

cuanto a los límites y fronteras granulométricas que debe tener una arena estableciendo la siguiente Tabla:

TABLA 1.6

CRIBA	% RETENIDO ACUMULADO		
G 4.75	0	-	5
G 2.36	0	-	20
M 1.18	15	-	50
M 0.60	40	-	75
M 0.30	70	-	90
M 0.15	90	-	98
CHAROLA			100

En cuanto a su forma, son preferibles aquéllas que son angulares por asentarse mejor que las redondas.

Gravas:

- Granulometría básica 3/4" o 19 mm.
- Debe tener forma redondeada u ovalada (equidimensional), preferentemente, ya que una forma tabular (pieza plana y alargada) puede provocar disminución en la trabajabilidad y afectar la durabilidad de la estructura, además, provoca mayores requerimientos de arena haciéndose necesaria más agua para la mezcla, consecuencia nefasta en la búsqueda de altas resistencias.
- Rocas más adecuadas: arenisca, cuarzita, pórfido y basalto.

Y principalmente, hay que tomar en cuenta que a mayor calidad del agregado se obtendrá una mayor calidad y resistencia en el concreto.

Nota: Para mayor comprensión del tema se anexas las siguientes definiciones:

- **Densidad específica:** masa de un cuerpo por unidad de volumen de materia llena (sin huecos).
- **Densidad absoluta:** relación de la densidad específica y la masa de volumen igual de agua a 24 grados C, es decir, 1000 kg. La densidad absoluta es pues la milésima parte de la densidad específica
- **Módulo de la finura:** Es la centésima parte de la suma de los retenidos en las mallas NOM siguientes: G 75, G68, G19, G 9.5, G 4.75, M 1.18, M 2.36, M 0.30, y M 0.150 expresados en porcentajes (aplicable solo a arenas). Un buen valor a este respecto va de 2.3 a 3.1, abajo de éste, demasiados finos que requerirán más agua, arriba de estos valor, indica carencia de finos, lo que trae como consecuencia menos manejabilidad de la mezcla.

Por lo que se observa, el módulo de finura no es un índice de granulometría si no más bien, una medida del grosor del material.

1.4 MEZCLADO, TRANSPORTE Y COLOCACION.

La selección de materiales para concreto de alta resistencia y el proporcionamiento de la mezcla es más crítica que el diseño de mezclas normales de concreto. Cada material, específicamente el cemento, arena, agregado grueso, Silica-fumo y aditivos dispersores de agua, deben ser evaluados por sus características según su resistencia, granulometría, finura, entre otras, además de su interacción con alguna otra.

Muchos proporcionamientos experimentales de mezclas requieren necesariamente el dato que permita escoger los materiales óptimos y sus respectivos proporcionamientos.

Una importante consideración al preparar diseños de mezclas de concreto de alta resistencia, es la resistencia con respecto al tiempo, según se especifique. Tales aplicaciones en precolados, pavimentos, etc., usualmente requieren altas resistencias tempranas que pueden ser requeridas estrictamente de las 6 a las 24 hrs.. Las proporciones de mezcla para este tipo de concreto de muy alta resistencia requieren de una o más combinaciones de materiales tal como: cemento Portland y sus diferentes tipos, aditivos acelerantes y/o procedimientos especiales de curado.

Otras aplicaciones de los concretos de alta resistencia, tales como las columnas de los rascacielos, vigas de puentes, etc., los cuales no reciben el total de la carga sino hasta los

tradicionales 28 días de edad de prueba, muestran ganancias significativas de resistencia en periodos posteriores de tiempo, por ejemplo, de los 90 días al año, de este modo, la prueba de edad se determinará según la aplicación.

1.4.1. MEZCLADO

El objeto del mezclado es recubrir las partículas del agregado con pasta de cemento y mezclar así todos los componentes del concreto hasta lograr una masa uniforme; esta uniformidad no debe perderse en el proceso de descarga de la mezcladora.

Existen varios tipos de máquinas de mezclado, de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- **MEZCLADORA DE VOLTEO (O TAMBOR) :** En este tipo, la descarga se hace volcando el concreto.
- **MEZCLADORA NO DE VOLTEO:** En ésta, el eje de la mezcladora siempre está en posición horizontal y se descarga insertando un tobogán en el tambor o invirtiendo la dirección de rotación del mismo.
- **MEZCLADORA DE ARTESA:** Esta mezcladora opera de manera muy similar a una batidora doméstica y son especialmente eficientes cuando se trata de mezclas rígidas y cohesivas, es por ello que son muy utilizadas en la elaboración de concreto prefabricado.

Existen diversos tamaños de mezcladoras, la mayor de ellas de aproximadamente 13 m³ de capacidad. Es de considerar el hecho de que si la cantidad a mezclar es pequeña en relación a la capacidad de la mezcladora, la mezcla puede resultar no uniforme y en la práctica incosteable. En el caso contrario de sobreutilizar la capacidad del equipo, esto será posible mientras no se exceda en un 10 % su capacidad de diseño.

También hay mezcladoras especiales que se usan para concreto lanzado. En este tipo, el agua y el cemento se mezclan en una lechada, los cuales pasan por una brecha angosta a una velocidad de 2,000 revoluciones por minuto, para después añadir los agregados. Este tipo de mezcladoras resulta de uso muy interesante, ya que el premezclado del cemento con el agua permite que haya una mejor hidratación y a su vez, que se obtenga una mayor resistencia a una relación a/c específica.

1.4.1.1. Tiempo de Mezclado.

En general, no existe un criterio único para lo que se refiere al tiempo de mezclado del concreto, en obra se acostumbra hacerlo de la manera más rápida posible, lo cual nos lleva a establecer como parámetro de diseño de la mezcla el tiempo mínimo necesario para esta tarea, la cual debe establecer los requisitos de uniformidad y resistencia.

En sentido amplio, no es el tiempo lo que más importa como criterio de una mezcla adecuada, pues el factor de importancia es el número de revoluciones por minuto de la mezcladora. Dependiendo del fabricante de la mezcladora, se tiene una velocidad óptima de rotación, por lo que el número de revoluciones y el tiempo de mezclado son independientes, pero como regla general se utiliza un valor que generalmente oscila alrededor de 20 revoluciones por minuto para concreto normal. Para Concretos de Muy Alta Resistencia se requiere una máquina mezcladora de alta revolución.

De las pruebas de Shalon, investigador norteamericano, las cuales expresan sus resultados en forma coeficientes de variación contra tiempo de mezclado, se observa que mezclar de 1 a 1.25 minutos produce un concreto muy variable; pero después de este tiempo no se observa mejoría en la uniformidad. Véase la figura 1.7.



FIGURA 1.7

Se observa de lo anterior que dentro del primer minuto, el tiempo de mezclado es de gran importancia en la resistencia.

En la Tabla siguiente se expresan algunos valores recomendados por la norma ASTM C-94-78A y el A.C.I. de tiempos de mezclado en máquinas normales. Estos tiempos van a partir de que se han colocado los materiales sólidos en la mezcladora. Es importante aclarar que el agua debe añadirse antes de que transcurra una cuarta parte del tiempo de mezclado.

TABLA 1.7

TIEMPO MINIMO DE MEZCLADO RECOMENDADO	
CAPACIDAD DE LA MEZCLADORA	TIEMPO DE MEZCLADO
(M3)	(MIN)
0.8	1.00
1.5	1.25
2.3	1.50
3.1	1.75
3.8	2.00
4.6	2.25
7.6	3.25

En lo que se refiere al orden en el que los materiales debe de introducirse en la mezcladora, no existe un criterio muy definido, ya que depende de las características de la mezcladora y de las propiedades de la mezcla. En forma general, debe de suministrarse un poco de agua al principio, seguida de los componentes sólidos, introducidos a la mezcladora en forma uniforme y simultanea. Siempre que sea posible, la mayor parte del agua debe de introducirse al mismo tiempo, agregando el resto del líquido después de haber incorporado los materiales sólidos en mezclas muy secas, es conveniente colocar un poco de agua al principio, junto con el agregado grueso, con el fin de que la superficie de este quede húmeda. Además, si al principio la máquina carece de agregado grueso, el cemento y el agregado fino al mezclarse se pegan generalmente en el cabezal de la mezcladora y no se incorporan a la mezcla.

Hasta aquí hemos considerado los efectos de mezclar las partes constitutivas del concreto en un lapso óptimo de tiempo, por lo que conviene ahora analizar los efectos en el concreto de un período largo de tiempo, cuando éste no se puede evitar, como en el caso de los camiones revolvedores de las plantas de concreto premezclado.

El principal problema que se presenta es la evaporación del agua de la mezcla, con la consecuente disminución de trabajabilidad y aumento de la resistencia. Es común adicionar agua para restaurar la trabajabilidad, proceso que disminuirá inevitablemente la resistencia de diseño de la mezcla. Es importante hacer aquí un breve análisis del efecto de "Retemplado" en la mezcla: el agua que se pierde por evaporación, no debe ser incluida en la relación a/c efectiva, pero si el agua adicionada sustituye el agua que se utiliza en la hidratación, entonces el agua añadida formará parte del agua efectiva, misma que gobernará en la resistencia del concreto endurecido.

1.4.1.2. Generalidades del Concreto Premezclado.

Se llama concreto premezclado a aquél que en vez de ser dosificado y mezclado en obra, es producto de una planta de producción específica de este material, y de ahí llevado al lugar donde será colocado.

Si bien es cierto que el concreto premezclado resulta más caro que el concreto manufacturado en obra, es muy ventajoso al organizar la obra y en el cuidado del personal de supervisión así como también proporciona un ahorro significativo en el consumo de cemento.

En relación al momento en el que el concreto es mezclado y dosificado, se tienen dos tipos de concreto premezclado:

- 1.- Mezclado en planta.
- 2.- Mezclado en tránsito.

El primero de ellos, como su nombre lo indica, el concreto es elaborado en una planta central, para después ser llevado al sitio de la obra mediante revolventoras de una capacidad que va de los 6 a los 7 m³, las cuales remueven al concreto lentamente para evitar segregación.

El concreto mezclado en tránsito es aquel en el cual los elementos constitutivos de la mezcla de concreto son dosificados en planta, para después ser mezclados en un camión diseñado para este fin, ya sea en circulación del vehículo o momentos antes de la aplicación de la mezcla. Ambos métodos, usualmente se combinan según necesidades específicas.

Surge aquí la interrogante si el concreto premezclado es tan ventajoso como se menciona, la respuesta es que sí, pero como todo, tiene algunas desventajas o problemas: el principal problema que afecta en la fabricación del concreto premezclado es el de mantener la trabajabilidad de la mezcla hasta el momento de colar. Es sabido que el concreto pierde esta característica debido a su manejo y al factor tiempo, de mucha importancia cuando la planta de mezclado se encuentra a gran distancia del sitio de la obra. Una solución a este problema es la aplicación de dispersantes de agua normales o de alto rango (Superfluidificantes), ya sea aplicados en planta, o momentos antes de colocar en su sitio el concreto, evitándose así el "retemplado" de la mezcla o adición de agua, con la consecuencia nefasta de alterar la relación a/c, y consecuentemente la resistencia final esperada. Obsérvese la Figura 1.8 que ilustra el efecto del agua de retemplado en la resistencia del concreto.

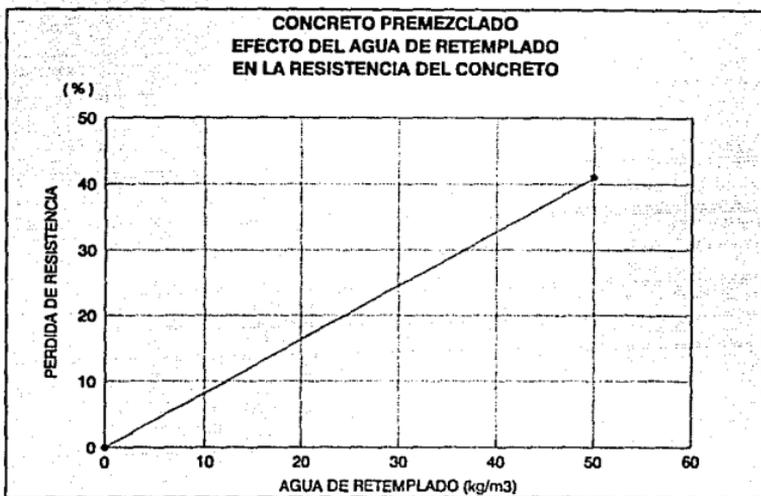


FIGURA 1.8

1.4.2. TRANSPORTE

Como ya se mencionó en forma general, el concreto puede ser transportado por métodos y equipos diversos, tales como, el camión revoledor, camión de caja fija (sin agitadores), por conductos o mangueras, etc..

Cada tipo de transportación posee ventajas y desventajas que dependen de las condiciones de uso, la accesibilidad y ubicación del sitio de colocación, de los ingredientes de la mezcla, de la capacidad y tiempo de entrega requeridos, y las condiciones ambientales.

Los métodos más usuales de transporte se mencionan y se explican brevemente a continuación.

1.4.2.1. Concreto Transportado y Mezclado en Camión:

El mezclado en camión es un proceso en el cual los materiales para concreto previamente dosificados en planta se transfieren a un camión revoledor donde se realiza el mezclado final.

El método más usual consiste en, cuando el tambor se está cargando, debe girarse a la velocidad designada por el fabricante. Después de cargar completamente todos los materiales, el tambor debe girarse a la velocidad de mezclado (entre 70 y 100 revoluciones) para completar el mezclado bajo condiciones normales.

Si transcurre tiempo adicional después del mezclado y antes de la descarga, la velocidad del tambor se reduce a velocidad de agitación. Antes de la descarga, el tambor debe girarse de nuevo a velocidad de mezclado (ahora entre 10 y 15 revoluciones). El volumen absoluto total de todos los ingredientes dosificados para mezclado completo en un camión de tambor giratorio no debe exceder el 63 % de la capacidad del tambor.

1.4.2.2. Transporte de Concreto Mezclado en Planta

- Mediante tambor Giratorio:

Por este método, el camión revoladora sirve como unidad agitador de transporte. El tambor gira a velocidad de mezclado durante la carga y luego se reduce a velocidad de agitación o se detiene después de completar la misma. El tiempo transcurrido para la descarga del concreto puede ser el mismo que en el caso de mezclado en camión, y el volumen transportado puede aumentarse a un 80 % de la capacidad del tambor.

- Mediante camión de caja Fija:

Las unidades empleadas en esta forma de transporte constan de una caja abierta, montada sobre un camión. La caja metálica debe ser lisa y diseñada para descargar el concreto por la parte de atrás, cuando la caja es volteada. Una puerta de descarga y vibradores montados en la caja deben proveerse en el punto de descarga para controlar el flujo. El uso de cubiertas protectoras para las cajas de camión durante mal clima, la limpieza apropiada y caminos de transporte llanos, contribuyen a la calidad y eficiencia de esta forma de transportación. El tiempo de entrega varía usualmente entre los 30 y 45 minutos, dependiendo, claro está, de las condiciones de temperatura del medio ambiente.

Como conclusión, el método de transporte que se utilice debe entregar eficazmente el concreto al punto de colocación, sin alterar de manera significativa las propiedades deseadas de revenimiento, relación a/c, contenido de aire y homogeneidad. Cada método tiene sus pros y sus contras bajo condiciones particulares de uso, que atañen a renglones como diseño y mezcla de materiales, tipo y accesibilidad de colocación, volumen de entrega requerido, ubicación de la planta premezcladora o dosificadora, entre otros. Estas condiciones deben estudiarse al seleccionar el tipo de transporte más apropiado para lograr concreto de calidad y dentro del marco de la economía.

1.4.3. COLOCACION

Mencionaremos en esta parte, las prácticas usuales recomendadas para la colocación de concretos ya sean normales o de alta resistencia.

La colocación del concreto se efectúa generalmente con recipientes, tolvas, conductos o tubos de caída, métodos de bombeo, etc..

Un requisito básico del equipo y métodos de colocación, como todos los demás equipos y métodos de manejo, es que debe conservar la calidad del concreto en lo relacionado a homogeneidad, contenido del aire, revenimiento y relación a/c.

La selección del equipo a utilizar debe estar basada en su capacidad del manejo eficientemente del concreto en las condiciones más ventajosas, de tal forma que pueda ser consolidado fácilmente en su lugar mediante vibrado. No debe emplearse equipo en el que sea necesario ajustar las proporciones de la mezcla fuera de los límites recomendados por la Norma ACI-211.7-70.

Antes de colocar debe de preverse que se tenga suficiente capacidad de colocación, mezclado y transporte, de tal forma que el concreto se mantenga plástico y libre de juntas frías al ser colocado. Debe ponerse en capas horizontales que no excedan de 60 cm de espesor (generalmente), evitando capas inclinadas y juntas de construcción. Siempre que se busque tener una construcción monolítica, las capas deben colocarse de tal forma que la capa subyacente responda todavía a la vibración, siendo estas capas lo suficientemente poco profundas para permitir uniones entre si mediante un vibrador adecuado. El concreto debe depositarse en su posición de colocación final o cerca de ella, eliminándose así la tendencia de segregación al al ser movido lateralmente.

En superficies inclinadas , el concreto debe colocarse primero en la parte más baja de la pendiente para después proseguir hacia arriba de esta manera se aumenta la consolidación natural del concreto.

Debe tenerse cuidado de que el acero de refuerzo al momento de colocar el concreto, se encuentre limpio, en posición correcta y bien asegurado.

1.4.3.1. Importancia de la disgregación de los elementos del concreto en su colocación.

El equipo y el método utilizados para colocar el concreto deben evitar la separación o disgregación de sus elementos constitutivos. El caso más general es la disgregación del mortero con el agregado grueso.

Es un error común creer que la segregación del agregado se eliminará con las operaciones de colocación y consolidación subsecuentes.

El equipo debe disponerse de manera que el concreto no tenga restricción en la caída vertical al centro del lugar de colocación o del recipiente que lo reciba. El chorro de concreto no debe separarse permitiendo que caiga libremente sobre varillas, espaciadores, refuerzos, etc..

Si las cimbras son suficientemente limpias y abiertas de tal forma que no obstaculicen la caída vertical del concreto a su lugar final, es generalmente deseable la descarga directa sin empleo de tolvas, conductos o vertederos.

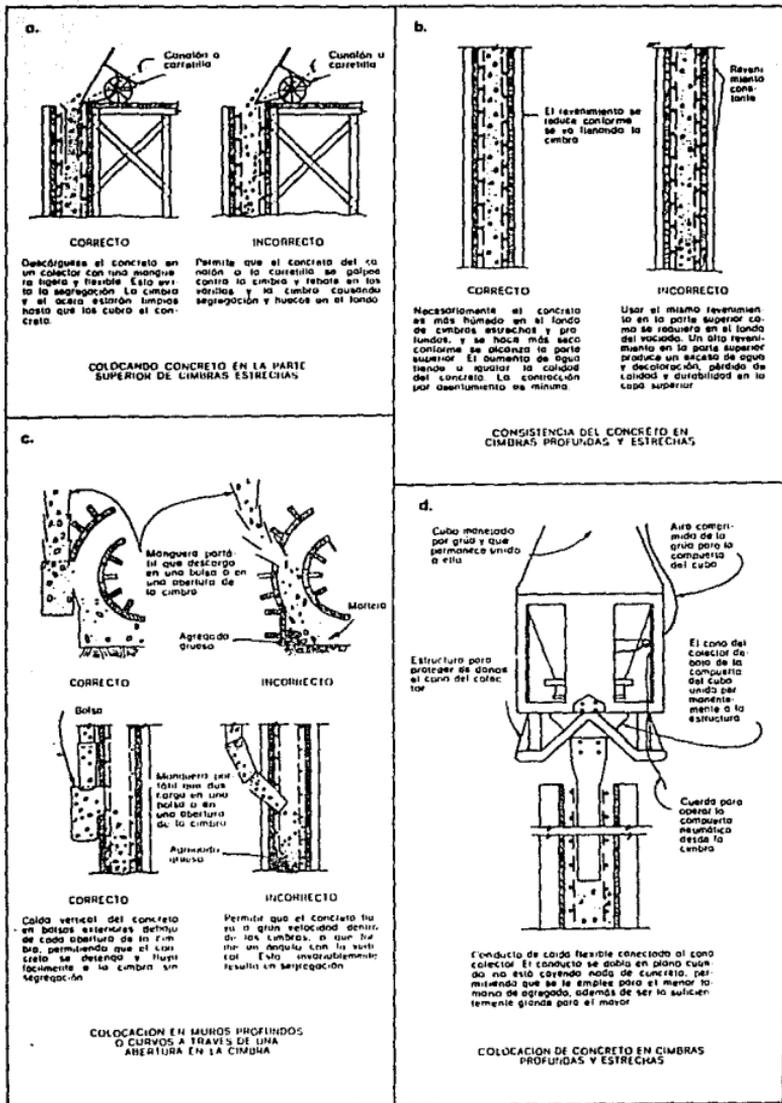
En las páginas siguientes se anexan algunos esquemas de colocación correcta del concreto que impiden la segregación indeseable del agregado grueso, Figuras 1.9 y 1.10 respectivamente.

1.4.3.2. Equipo más usual de colocación.

TOLVAS DE SECCION CIRCULAR Y RECTANGULARES:

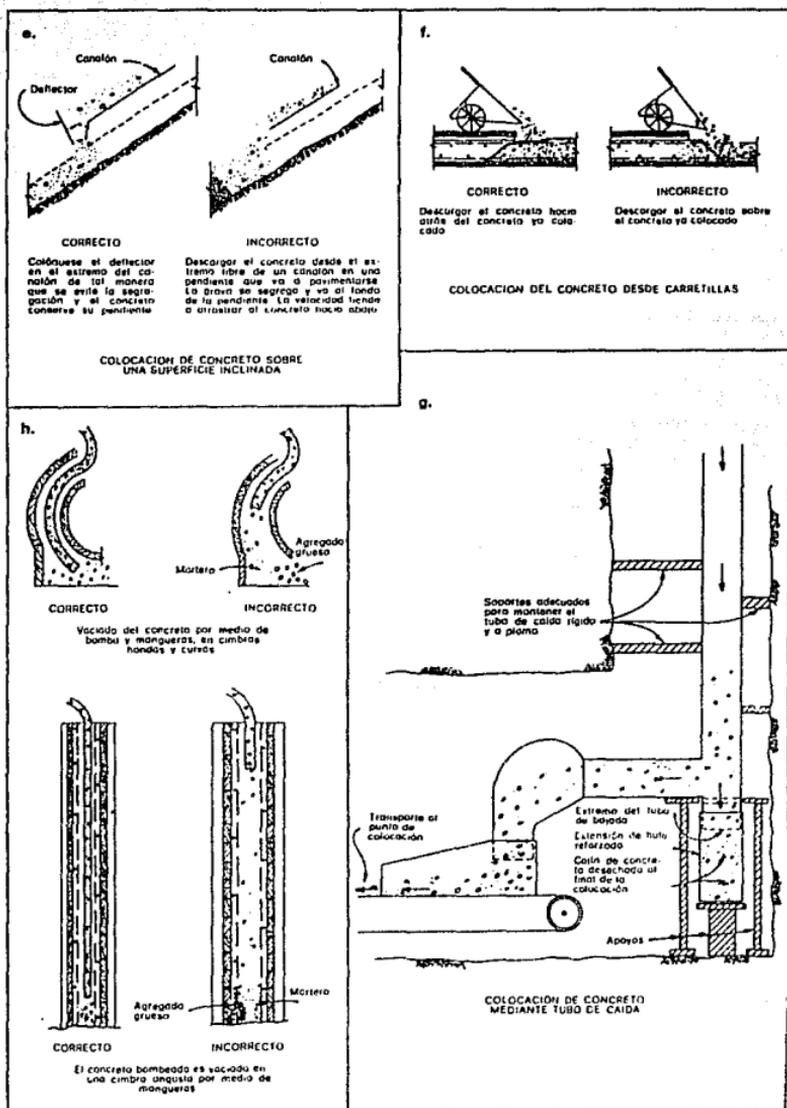
El empleo de tolvas con descarga por la parte inferior, permiten la colocación del concreto con el más bajo revenimiento posible, muy importante en concretos de muy alta resistencia, compatible con la consolidación mediante el vibrado. Las puertas de descarga deben de tener una salida libre que equivaiga a no menos de una tercera parte del área máxima horizontal interior o cinco veces el tamaño máximo del agregado utilizado. Las paredes deben estar inclinadas por lo menos 60 grados respecto a la horizontal. Los controles en las puertas deben permitir que el operador de la misma las abra o las cierre en cualquier momento del ciclo de descarga.

Deben de observarse los principios de llenado y descarga, empleando las caldas verticales libres de obstrucciones. El amontonamiento del concreto por la descarga de las tolvas demasiado arriba o muy cerca a la superficie, o mientras están en movimiento, dan lugar a causas comunes de segregación. Es un error muy común que el concreto derramado se recoja con palas y se devuelva a la tolva para su uso subsecuente.



Colocación correcta del concreto

FIGURA 1.9



Colocación correcta del concreto

FIGURA 1.10

CANALONES Y TUBOS DE CAIDA:

Los canales se emplean con frecuencia para trasladar concreto de un nivel superior a uno inferior. Deben ser preferentemente de fondo curvo y contruidos o forrados de metal y tener suficiente capacidad para evitar derrames. La inclinación de éstos debe ser constante y suficiente para permitir que el concreto fluya continuamente por el canalón sin segregarse, los canales demasiado largos y descubiertos deben cubrirse para evitar la evaporación y la pérdida del revenimiento.

Los tubos de caída que se emplean para trasladar verticalmente el concreto desde altos niveles deben ser circulares. Estos conductos tienen un diámetro aproximado de por lo menos ocho veces el tamaño máximo del agregado, deben ser firmes y a plomo para asegurar que el concreto caiga en forma vertical. Un método satisfactorio para disipar la energía acumulada de caída libre es hacer que el concreto caiga sobre un colchón amortiguador de concreto al extremo del tubo.

La colocación se inicia cubriendo al tubo con una lechada de mortero antes de depositar el primer concreto. En forma general, los concretos transportados por este método tienen un alto contenido de arena y un revenimiento que va de los 7.5 a los 15 cm.

BOMBAS, TUBOS Y ACCESORIOS:

Al hablar de métodos y equipos de colocación, merecería un capítulo aparte el método de Concreto Bombeado, pero para efectos de este trabajo lo clasificamos en este inciso.

El Concreto bombeado se define como concreto transportado mediante presión a través de tubos rígidos o mangueras flexibles que descargan directamente dentro del área deseada.

La versatilidad de este método hace que sea muy común su uso en la urbe de la Ciudad de México por las limitaciones de espacio que se tienen en las grandes construcciones.

El sistema consiste primordialmente en una tolva que descarga el concreto de la mezcladora, una bomba para concreto y tubos a través de los cuales se inyecta el mismo.

Se tienen dos tipos básicos de bombas:

- Bombas de acción directa.
- Bombas de Presión.

Las bombas de acción directa, se encuentran construidas por un pistón horizontal y válvulas semigratorias, que siempre permiten el paso de las partículas más grandes de los agregados en uso; por lo tanto, no hay un cierre completo, el concreto llega a la bomba por gravedad y se succiona parcialmente durante la carrera de succión. Las válvulas se abren y se cierran a intervalos definidos, para que el concreto se mueva en una serie de impulsos y las tuberías siempre están llenas. Se tiene un rendimiento aproximado de bombeo de concreto de 60 m³/hr con una tubería de 220 mm de diámetro.

Las bombas de presión, emplean tubos de pequeño calibre (75-100 mm). El concreto colocado en una tolva recolectora se desplaza haciendo girar unas paletas hasta llegar a un tubo flexible ubicado en la cámara de bombeo. El vacío dentro de la cámara es de alrededor de 660 mm de mercurio. Esto asegura que el tubo tenga una forma cilíndrica para que el flujo del concreto sea continuo. Hay dos rodillos que giran y ejercen presión continua contra el tubo, de tal forma que bombea el concreto que está en el tubo de succión hacia el tubo de salida. Este tipo con frecuencia va montado en un camión. Se tiene un rendimiento aproximado de 20 m³/hr con una tubería de 75 mm de diámetro.

Las bombas de presión desplazan al concreto a distancias de hasta 90 m en el sentido horizontal y 30 m en el sentido vertical. Las bombas de pistón pueden desplazar 450 m horizontalmente y 40 m verticalmente.

Es importante destacar que la relación de equivalencia entre distancias verticales y horizontales varía según la consistencia de la mezcla y la velocidad del concreto dentro de la tubería: cuanto mayor sea la velocidad, menor será la relación. Por citar un ejemplo, a 0.1 m/s es de 24, pero a 0.7 m/s es sólo de 4.5. Es posible bombear con bombas de relajo.

El bombeo de concreto sólo será costeable cuando se emplee durante períodos largos de tiempo y mientras éste sea ininterrumpido, ya que requiere de coordinación y un esfuerzo considerable para limpiar las tuberías.

Se facilita la colocación si se ubica un trozo de manguera flexible cerca del extremo de descarga. Así mismo es fácil hacer rápidas alteraciones en el sistema de tubos ya que éstos se unen mediante coples especiales.

El concreto bombeado no se segrega, sin embargo, debe de cumplir ciertos requisitos: En forma general, el concreto que se vaya a bombear deberá de estar muy bien mezclado, dicha mezcla no debe ser áspera ni pegajosa, ni demasiado seca ni húmeda, por lo que se observa que su consistencia es decisiva.

Si el contenido de agua es menor, las partículas sólidas, en lugar de moverse en sentido longitudinal como una masa coherente en suspensión, ejercerán presión sobre las paredes de la tubería. Cuando el contenido de agua está dentro de su valor correcto, o en el límite, la fricción se desarrolla sólo en la superficie de la tubería y en una delgada capa de mortero de lubricación. Así pues, todo el concreto se desplaza en forma de cuña con un flujo a la misma velocidad.

La magnitud de la fricción que se desarrolle dependerá de la consistencia de la mezcla, pero no debe haber exceso de agua, ya que éste causa segregación.

En un tubo por el que se bombea el material hay un gradiente de presión en la dirección del flujo, debido a los efectos de la carga del material y la fricción. Esta es otra manera de decir que el material debe ser capaz de transmitir suficiente presión para contrarrestar toda resistencia del tubo. De todos los elementos que componen el concreto, sólo el agua es bombeable y, por lo tanto, ella misma transmite la presión a los componentes de la mezcla.

Pueden presentarse dos tipos de bloqueo en el tubo. En uno de ellos, el agua escapa a través de la mezcla y la presión no se transmite a los sólidos. En este caso se requiere una cantidad adecuada de finos comprimidos para permitir que la fase de agua transmita la presión sin escaparse de la mezcla. Es preciso recordar que un mayor contenido de finos significará mayor área superficial de sólidos y por lo tanto, mayor resistencia a la fricción en el tubo.

El segundo tipo, cuando el contenido de finos es demasiado alto, la resistencia a la fricción de la mezcla puede ser tan grande que la presión ejercida por el pistón a través de la fase de agua no sea suficiente para mover la masa de concreto que se atasca, este tipo de fallas es más común en mezclas de alta y muy alta resistencia o en mezclas que contienen gran proporción de materiales muy finos, como humo de sílice o ceniza volante.

La situación óptima resulta entonces aquella donde se tenga una resistencia máxima a la fricción dentro de la mezcla, con un tamaño mínimo en las cavidades, una resistencia a la fricción mínima contra las paredes de los tubos y con poca área superficial de los agregados.

Para concreto con un tamaño máximo de agregado de 3/4", el contenido óptimo de agregados finos es de alrededor del 40 al 45 %.

1.4.3.3. Vibrado:

El proceso de compactación del concreto consiste ante todo en eliminar el aire atrapado en él. El medio más antiguo de lograrlo es apisonando o picando la superficie del concreto para desalojar el aire y forzar a las partículas a colocarse más cerca unas de otras. El sistema más moderno es el vibrado, por medio del cual se separan momentáneamente las partículas y se reúnen después para formar una masa compacta.

En lo referente a la calidad del concreto, tanto la compactación a mano como el vibrado pueden, con la mezcla adecuada y mano de obra capacitada, producir excelentes resultados. Así mismo, en condiciones deficientes, se obtendrá un concreto de mala calidad; cuando se aplica vibración, es posible que no llegue de manera uniforme a toda la masa de concreto, de tal manera que queden partes que no estén totalmente compactadas, mientras otras presentan segregación debido a un exceso de vibrado.

1.5. CONTROL DE CALIDAD.

El concreto es un material cuyas características lo hacen indispensable en la construcción; su calidad, íntimamente relacionada con la resistencia a la compresión, es verificada realmente hasta su endurecimiento en obra, por lo que, para reducir las posibilidades de posibles deficiencias, una aplicación de controles efectivos en la dosificación de los ingredientes del concreto y de su proceso de elaboración, se hacen muy necesarios.

Es común pensar que el parámetro de verificación de la calidad de un concreto es su resistencia a la compresión, lo cual no está del todo fuera de la realidad, pero, en el proceso de fabricación y verificación de las cualidades del concreto, desde la selección y dosificación de los materiales constitutivos, hasta los reconocimientos o ensayos del concreto ya endurecido, se dan instancias de control de la calidad que podríamos clasificar en dos partes:

- 1.- Aspectos que califican al concreto en su etapa de dosificación y estado fresco.
- 2.- Aspectos que califican al concreto fraguado y endurecido.

Del primero de ellos, y para adentrarnos en los aspectos de criterio para la verificación de calidad de toda mezcla de concreto, se mencionan las características principales del concreto fresco:

- UNIFORMIDAD

El resultado de una mezcla correctamente diseñada, es un material heterogéneo, uniforme, de buena cohesión y no segregable. Independientemente de la mezcladora que se emplea es importante que haya suficiente intercambio de materiales en la cámara de mezclado para que se cumpla con los requisitos antes mencionados.

- TRABAJABILIDAD

Es la facilidad que presenta el concreto para ser transportado, colocado y compactado.

- SEGREGACION

Es la separación de los elementos que forman la mezcla heterogénea, de modo que ésta deja de ser uniforme.

- SANGRADO

Forma de segregación en la que una parte del agua de la mezcla tiende a elevarse a la superficie del concreto recién colocado.

- FRAGUADO

Es el cambio que sufre un fluido cuando pasa al estado rígido. En concreto se usa este término para describir la rigidez de la mezcla. Es de uso común hablar de un fraguado inicial y de un fraguado final. El primero de ellos es cuando el concreto normal alcanza una resistencia a la penetración igual a 35 kg/cm^2 . El segundo, es cuando se tiene una resistencia a la penetración de 280 kg/cm^2 .

El proceso de control de este primer aspecto distingue, como se menciona, 2 etapas; la primera que consiste en los trabajos previos o durante la elaboración del concreto, y la segunda etapa, que consiste en los ensayos que se realizan al concreto fresco. A continuación presentamos algunos aspectos de lo anterior:

1.5.1. PRELIMINARES A LA ELABORACION DEL CONCRETO

Dichos trabajos consisten básicamente de los siguientes pasos:

- a) Verificación del funcionamiento y precisión de los equipos de dosificación y mezclado.

Dichos aspectos de medición tienen fundamento en la NOM-C-155 la cual dicta las siguientes especificaciones de equipo:

DEPOSITOS Y TOLVAS:

Las plantas de premezclado deben estar provistas de depósitos adecuados para los diferentes tipos de agregado, sea fino o grueso, los cuales deben de estar separados. Estos depósitos deben contar con la instrumentación adecuada para una descarga óptima en la tolva pesadora. Esto es de mucha importancia en el momento que se ha vaciado la cantidad necesaria de material, la tolva-báscula debe permitir la acumulación de materiales y residuos que puedan modificar la medición.

BASCULA:

Esta debe ser precisa, de tal manera que al calibrarse con carga estática la tolerancia sea de $\pm 0.4\%$ de su capacidad máxima. Los tipos de básculas más usados son las de balancín o de carátula; bien pueden utilizarse otros equipos ya sean eléctricos, hidráulicos, etc., pero debe tenerse el cuidado de que cumplan con las tolerancias especificadas.

MEDIDORES DE AGUA:

Estos aparatos deben tener la capacidad necesaria para repartir el agua en forma precisa. Deben estar calibrados de tal forma que no deben verse afectados por variaciones de presión de la tubería y los tanques de medición deben estar equipados con válvulas y vertedores para los ajustes necesarios.

MEDIDORES DE ADITIVOS:

Los equipos medidores de aditivos deben de contar con válvulas y vertedores para su calibración y deben de ser capaces de suministrar la cantidad correcta de aditivos.

REVOLVEDORAS Y MEZCLADORAS:

Las mezcladoras pueden ser estacionarias o camiones mezcladores y/o agitadores. Es pertinente en este momento, el explicar la diferencia que existe entre los procesos de agitación y de mezclado. La diferencia radica esencialmente en la velocidad de rotación de la mezcladora; la velocidad de agitación va de 2 a 6 revoluciones por minuto, mientras que la velocidad de mezclado es de 4 a 16 revoluciones por minuto.

La aprobación de la mezcladora, de acuerdo a los requisitos de uniformidad esperados de la mezcla, especificados en la Norma Oficial Mexicana, se da a aquellas que cumplen con cuatro de las siguientes cinco pruebas:

TABLA 1.5.1.a

	DIFERENCIA MAXIMA PERMISIBLE ENTE RESULTADOS DE PRUEBA CON MUESTRAS OBTENIDAS DE 2 PORCIONES DIFERENTES DE LA DESCARGA.(*)
PESO VOLUMETRICO (Determinado según la NOM C-162 kg/m3).	15 Kg / m3
CONTENIDO DE AIRE en % del volumen del concreto (Determinado según NOM C-157) para concretos con aire incluido.	1.0 %
REVENIMIENTO:	
-Revenimiento promedio < 5 cm.	1.5 cm
-Revenimiento promedio 5 cm < rev < 10 cm	2.5 cm
-Revenimiento promedio > 10 cm	10.0 cm
CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO Retenido en Criba M 1.7 expresado en % del peso de la muestra.	6.0 %
PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION A 7 días de edad de cada muestra en % (**)	7.5 %

(*) Las dos muestras para efectuar las determinaciones de esta Tabla deben obtenerse de dos porciones diferentes tomadas al principio y al final de la descarga. (Principio: Del 10 al 15 %, final: Del 85 al 90 % del volumen).

(**) La aprobación tentativa de la mezcladora puede ser otorgada en tanto se obtengan los resultados de la prueba de resistencia.

La Norma ASTM-C-94-78a (de aplicación formal sólo a mezclas de concreto premezclado) establece que las muestras de concreto se deben tomar aproximadamente entre los puntos 1/6 y 5/6 del lote, y que las diferencias entre las propiedades de las dos muestras no deben exceder los límites siguientes:

TABLA 1.5.1.b

Densidad del concreto	16 kg/m ³
Contenido de aire	1.0 %
Revanimiento:	
-Promedio < 10 cm	2.5 cm
-Promedio 10 cm < Rev < 15cm	4.0 cm
Porcentaje del agregado retenido en una malla de 4.75 mm	6.0 %
Densidad del mortero libre de aire	1.6 %
Resistencia a la compresión (promedio de resistencia de 3 cilindros a los 7 días)	7.5 %

Obsérvese de las Tablas anteriores (1.5.1.a y b), que la NOM y la Norma ASTM dan parámetros de aceptación de la mezcladora prácticamente iguales.

b) Tolerancias en la medición de los materiales.

Los parámetros de tolerancia aceptables para las diferentes partes constitutivas del concreto son las siguientes:

Cemento:

Este debe ser pesado en una tolva-báscula. Al momento en que la cantidad de cemento sea igual o mayor en un 30% de la capacidad de la tolva-báscula, la máxima tolerancia debe ser de alrededor +/- 1.00 % de la masa requerida.

Agregados:

Siempre que a los agregados se les determine individualmente su masa, la cantidad indicada por la tolva-báscula debe tener una tolerancia de +/- el 2.00 % de la masa requerida. Si a los agregados se les determina su masa en forma acumulativa y si su masa es igual o mayor del 30 %, la tolerancia máxima debe ser de +/- el 1.00 %. Si la masa es menor al 30 % de la capacidad de la tolva-báscula, la tolerancia máxima debe ser de +/-0.3 % de la capacidad total de la báscula o de +/-3.00 % de la masa requerida acumulada, tomándose como bueno el valor que sea menor.

Es también un factor de consideración las características de absorción y contenido de humedad de los agregados pétreos.

Agua:

Se considera agua de mezclado a toda aquella agua independientemente del estado en que se adicione (sólido o líquido) y a la que se acompaña en forma de humedad superficial a los agregados, así como la que va conjuntamente con los aditivos.

El agua debe ser medida ya sea en masa o por volumen, con una tolerancia de +/- el 1.00 %. En el caso de camiones mezcladores, cualquier agua de lavado retenida por la olla, debe, de ser posible, medirse con precisión al pretenderse realizar otra mezcla. Si no es posible, dicha agua debe ser eliminada antes de descargar la siguiente revoltura de concreto. Al agua de mezclado, cuando incluye el agua de lavado, se le determina su masa con una tolerancia del 3.00 % de la cantidad calculada.

Aditivos:

A las puzolanas, cenizas volantes y aditivos en polvo, se les dosifica por masa, y a los aditivos en pasta, puede ser por masa o volumen, según el tipo, teniendo una tolerancia de +/- el 3.00 % de la cantidad requerida.

1.5.2. ENSAYES AL CONCRETO YA ELABORADO

Surge la necesidad de evaluar las características del concreto elaborado en primera instancia en su estado fresco, para que de esta forma pueda producir de manera general las características finales del concreto ya endurecido. Varias son las propiedades características del concreto fresco, como ya se mencionó, una de las más importantes en su "Trabajabilidad". Varias son las pruebas que se realizan para medir esta característica, de las cuales la más generalizada es la prueba de REVENIMIENTO, La NOM-C-156 norma la determinación del revenimiento del concreto fresco. Su gran uso es debido principalmente a la facilidad de aplicación de la misma, así como también a que ofrece la ventaja de que los

resultados que expresa son inmediatos. Se puede considerar al valor del revenimiento como indicativo de la uniformidad en la relación agua/cemento, para una relación grava/arena determinada. Al observarse una variación en el revenimiento, esto puede originarse porque existe una alteración en la relación agua/cemento, por lo que esta prueba permite establecer criterios de aceptación o rechazo del concreto fresco, desde el punto de vista de las nefastas variaciones que esto podría ocasionar en la resistencia.

En relación a esto último las empresas que producen concreto premezclado tienen como criterio que, cuando la mezcla presenta un revenimiento menor que el de diseño, a esta mezcla puede agregársele agua, sin el inconveniente teórico de modificar la relación agua/cemento. Si la prueba indica que se tiene un revenimiento mayor que el de diseño de la mezcla, entonces, sin excepción, se rechaza dicho lote de concreto fresco. Los criterios antes mencionados son similares a los que se aplican al recibir el concreto premezclado en otra la norma oficial mexicana antes mencionada da la siguiente definición de revenimiento:

"Revenimiento es la medida de consistencia del concreto fresco en términos de la disminución de altura, en un tiempo determinado, de un cono truncado de concreto fresco de dimensiones específicas".

Se establecen las siguientes tolerancias para la medida del revenimiento (NOM-C-155 y ASTM-C-94).

Revenimiento Específico	Tolerancia	
	NOM	ASTM
hata 5 cm	+/- 1.5 cm	+/- 1.3 cm
más de 5 y hasta 10 cm	+/- 2.5 cm	+/- 2.5 cm
más de 10 cm	+/- 3.5 cm	+/- 3.8 cm

De las otras pruebas que existen para evaluar la trabajabilidad del concreto, que para el alcance de este trabajo sólo nos concretamos a mencionarlas, se tienen:

- Prueba del factor de compactación.
- Prueba de la esfera de Kelly.
- Prueba de remoldeo de Powers.
- Prueba de Vebo.

Entre otras.

En relación a las pruebas que se le realizan al concreto ya endurecido para determinar sus características finales, se tienen en forma muy amplia las siguientes:

- Resistencia a la compresión simple.
- Resistencia a la tensión.
- Resistencia al esfuerzo cortante.
- Resistencia a la compresión triaxial.
- Resistencia a la torsión.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al intemperismo.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al fuego.
- Adherencia.
- Permeabilidad.
- Durabilidad.
- Conductividad térmica y acústica.
- Flujo plástico.
- Contracción por hidratación del cemento.
- Contracción por secado.
- Expansión.
- Módulo de elasticidad.
- Relación de Poisson.

De las anteriores, se explicará exhaustivamente en el Capítulo II las que, por requerimiento de este trabajo, sea necesario profundizar en ellas.

1.6 CURADO

El curado consiste en mantener un contenido óptimo de humedad en función directa con la temperatura en el concreto recién colado, para poder obtener así las características deseadas.

Señalamos que al hablar de características deseadas estaremos hablando casi en todos los casos de la resistencia y la durabilidad.

1.6.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CURADO

La cantidad de agua de mezclado en el concreto en el momento de colar es, generalmente, más de la que debe retenerse para el curado. Pero, debido a la pérdida excesiva de agua por evaporación puede reducir la cantidad de agua necesaria para obtener las características óptimas esperadas.

El que no se tenga cuidado con esta evaporación excesiva puede ocasionar grietas por contracción plástica y además disminución en la resistencia del concreto más cercano a la superficie.

TEMPERATURA:

La velocidad de hidratación del concreto es función directa de la temperatura: siendo más lenta a bajas temperaturas, hasta de -10 grados centígrados y más rápida a temperaturas elevadas, hasta poco menos de 100 grados centígrados. Temperaturas menores a 10 grados centígrados son desfavorables para el desarrollo de resistencia temprana; en lo referente a resistencia final, se tiene la experiencia de que es más provechoso curar a temperaturas no muy elevadas durante cierto período de tiempo, que curar a temperaturas muy elevadas durante un período de tiempo corto.

Los factores más importantes que afectan la temperatura del concreto recién colado son:

- Temperatura ambiental.
- Absorción del calor del Sol.
- Temperatura inicial de los materiales.
- Liberación del calor de hidratación del cemento.

1.6.2. METODOS Y MATERIALES DE CURADO

Existen dos sistemas generales básicos:

- 1.- La continua o frecuente aplicación de agua; anegamiento, aspersión, vapor y materiales de cubrimiento saturados.
- 2.- Uso de materiales que eviten la pérdida superficial de agua del concreto, como son: hojas de plástico o de papel impermeable, aplicación de compuesto de curado formadores de membrana, etc.

1.6.2.1. CURADO CON AGUA:

Puede ser éste el método más económico, pero debe tenerse en cuenta que no siempre es así, por lo que al programar el tipo de curado a utilizar es conveniente analizar todos aquellos aspectos que influyen en el costo, como disponibilidad de agua, mano de obra, otros materiales, etc..

De los métodos de curado con agua el más efectivo bien puede ser el de inmersión, método poco usado por las limitantes que este trae en su aplicación. De este método podemos mencionar como temperatura óptima del agua de curado de 11 grados centígrados no menor a la temperatura del concreto para evitar esfuerzos superficiales del concreto.

Un método más común y bastante ventajoso es el de aspersión, el cual se realiza mediante boquillas o aspersores y mangueras.

Otro método bastante usual es el uso de costales, carpetas o alfombras, que al ser de material absorbente retienen el agua sobre la superficie del concreto, sea ésta horizontal o vertical.

1.6.2.2. MATERIALES SELLADORES:

Los materiales selladores son hojas o membranas que se colocan sobre el concreto para reducir la pérdida de agua por evaporación. Su empleo representa ventajas muy deseables en muchos casos.

Un material de uso muy común son los plásticos, disponibles en el mercado ya sea en color blanco, negro o transparente. Estos deben cumplir con la Norma ASTM C-171. Los de color blanco, por sus características reflejantes, son de uso óptimo en lugares cálidos y soleados, no siendo así para la película negra que por su capacidad de absorción de la luz solar es ventajosa en lugares fríos.

Los compuestos líquidos para formar membranas de curado son compuestos constituidos esencialmente por ceras, resinas naturales y sintéticas, así como solventes de volatilidad elevada a temperatura atmosférica. Para que su uso sea óptimo, éstos deben de ser aplicados después del acabado y tan pronto como desaparezca el agua libre de la superficie.

1.6.3. EFECTIVIDAD EN EL CURADO

Se puede mencionar, en general, que el curado estará cumpliendo con el fin encomendado cuando los contenidos de humedad y temperatura permitan el desarrollo de los niveles deseados de las características del concreto.

1.6.3.1. LA RESISTENCIA COMO BASE DE LA EFECTIVIDAD.

La resistencia es la característica más significativa de la calidad relativa de un concreto. Generalmente se juzga esta característica probando cilindros o vigas estándar, colocados en el sitio de la obra y curados bajo un estricto control, generalmente en un laboratorio de resistencia de materiales. Para establecer el tiempo en el cual serán retiradas las cimbras pueden bien emplearse especímenes de prueba hechos en el campo y curados con características similares de humedad y temperatura del concreto representado, siendo estas pruebas un reflejo real de la influencia de las condiciones ambientales sobre las propiedades del concreto.

La curva de resistencia-tiempo se establece practicando pruebas de resistencia a la compresión sobre cilindros curados a una temperatura estándar de 23 +/- 1.7 grados centígrados.

Es de importancia mencionar que el curado eficiente no solo influye en una mejor resistencia mecánica sino que también en el grado de permeabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a la congelación y deshielo y la resistencia al ataque de sulfatos.

1.6.4. TECNICAS DE CURADO PARA DIVERSAS OBRAS

Siendo que las necesidades de cada concreto según su uso son variables, la duración de curado recomendable estará basada en lo práctico y en lo necesario.

1.6.4.1. LOSAS SOBRE EL SUELO:

Estos tipos de losas tienen una relación elevada de área superficial expuesta vs. volumen de concreto, por lo que la pérdida de humedad por evaporación puede ser de dimensiones enormes y traer consigo problemas de agrietamientos por contracción, pérdidas de resistencia, etc.. Para evitar esta pérdida de humedad, el terreno de desplante debe humedecerse para proporcionar humedad de curado extra, y además, ya terminada de colar la losa debe iniciarse el curado lo antes posible.

Otro factor de consideración al cual no debe someterse la losa de concreto es a variaciones bruscas de temperatura que produzcan agrietamiento de la misma.

Para este tipo de obra el tiempo mínimo de curado para temperaturas promedio mayores a 5 grados centígrados será de 7 días, o el tiempo requerido para alcanzar el 70 % de la resistencia especificada.

1.6.4.2. ESTRUCTURAS:

Se incluyen a este respecto: muros, columnas, losas, vigas, cimentaciones, muros de retención, pisos para puentes, barandales, muros laterales, túneles y ductos.

En este aspecto, pueden usarse los métodos o combinación de métodos descritos anteriormente según las necesidades y aplicaciones.

Para temperaturas ambientales promedio y mayores a 5 grados centígrados se da como requisito de tiempo mínimo de curado 7 días, o el tiempo necesario para alcanzar el 70 % de la resistencia. Para elementos estructurales en los que se requiera resistencia elevada (mayor a 422 kg/cm^2) los períodos deben aumentarse a 28 días o más.

1.6.4.3. CONSTRUCCIONES ESPECIALES:

PREFABRICADOS:

Estas unidades reciben un curado acelerado, que busca la reutilización económica de los moldes y del espacio de colado. La mayoría de las unidades de este tipo se curan a temperaturas entre los 52 a 85 grados centígrados, en períodos de 12 a 72 horas.

CONCRETO LANZADO:

Este generalmente se cuele en capas de poco peralte y presenta superficies ásperas, éstas deben mantenerse humedecidas por lo menos 7 días. El curado con membrana es satisfactorio pero emplea el doble de materiales que si se empleara sobre una superficie lisa (de 0.2 a 0.4 lts/m²).

II

PRUEBAS DE LABORATORIO, COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES

CAPITULO II

PRUEBAS DE LABORATORIO, COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES

2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO.

El concreto, desde que se elabora hasta que alcanza su resistencia final, se ve influido por un gran número de variables y factores que inciden de manera importante en sus propiedades terminales o características. No existe una convención universal para la determinación de las mismas ya que cada región tiene sus principios y métodos específicos para la solución de problemáticas comunes.

En nuestro medio, la Dirección General de Normas, en sus Normas Oficiales Mexicanas (NOM) da la metodología y las reglas a seguir en la realización de las pruebas que califican o determinan las diferentes características del concreto ya sea en sus materiales constitutivos básicos, en aditivos o adicionantes que mejoren o determinen una característica, en aquellos estudios experimentales de sus diferentes propiedades, etc., desde las más simples y comunes hasta sus propiedades y características más complejas.

El presente capítulo pretende definir la metodología usada en las pruebas o ensayos de laboratorio más usuales e importantes en el análisis y diseño de estructuras de concreto simple y reforzado, como son:

- Resistencia a la compresión simple.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la tensión.

Así como también definir alguna de sus características mecánicas o propiedades físicas derivadas o no de los ensayos antes mencionados como:

- Módulo de elasticidad.
- Relación de Poisson.
- Fluencia y contracción.
- Permeabilidad.
- Resistencia química.
- Resistencia a la congelación y deshielo.
- Abrasión y descascamiento.
- Conductividad eléctrica.

En el caso específico de concretos de muy alta resistencia elaborados con aditivo Silica-fume y aditivo superfluidificante, elaborados por nosotros mismos o en colaboración con alguna planta de concreto premezclado, como la planta de Concretos de Alta Resistencia "CARSA", se explica exhaustivamente para cada una de las pruebas antes mencionadas, las características completas de los materiales constitutivos utilizados y la metodología correcta de acuerdo a la normas oficiales vigentes en la elaboración, curado y prueba de los diferentes especímenes de este tipo especial de concreto.

Además, se indica el desarrollo experimental de algunos laboratorios extranjeros relacionado con los concretos de muy alta resistencia, permitiendo así el análisis comparativo de los concretos de alta resistencia obtenidos en otros países con los concretos obtenidos de este tipo en el nuestro.

2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESION.

El Índice de resistencia más común en el caso del concreto es el obtenido de los ensayos de especímenes a la compresión simple. Esto es, debido a la simplicidad en la aplicación de dichas pruebas y, a que fundamentalmente, mide las características más aprovechables del concreto, además, sus otras características de resistencia mecánica se encuentran en función de la resistencia a la compresión del mismo.

La NOM C-155 designa como $f'c$, a la resistencia a la compresión obtenida de un cilindro estándar a los 28 días o a la edad en la que el concreto recibe su carga de servicio. La resistencia del concreto debida a una carga axial a compresión se determina con la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{P}{A} = f'c$$

En donde σ = Esfuerzo (kg/cm^2)
 P = Carga máxima (kg)
 A = Area promedio de la sección (cm^2)

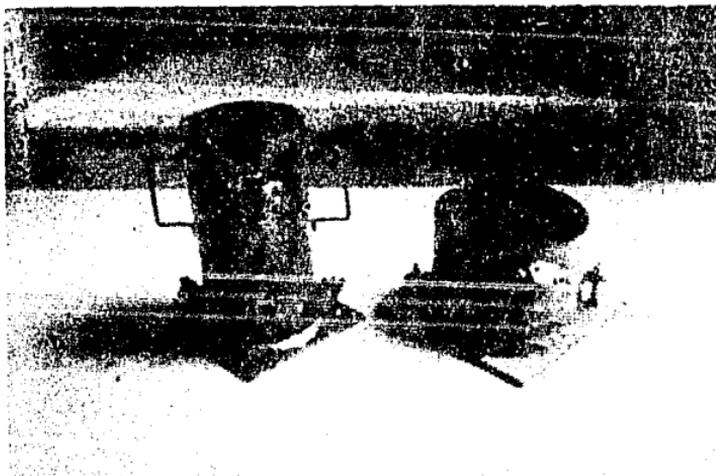
No existe una convención universal sobre el tipo de especímenes a ser ensayados para la prueba de compresión pero, el uso más común es utilizar cilindros con relación de esbeltez igual a 2. El espécimen más usual consta de una altura de 30 cm y un diámetro de 15 cm, esto es, para concretos en los cuales su aplicación final es en estructuras típicas o convencionales.

ELABORACION DE ESPECIMENES

La NOM DGN-C-159 determina la metodología a seguir en la elaboración de especímenes de prueba, descimbrado, y curado de los mismos. En esta norma se dan, más específicamente, las siguientes restricciones u observaciones en la elaboración de los especímenes:

HERRAMIENTA Y EQUIPO:

Los moldes cilíndricos deben estar contruidos de un material resistente, no deben de permitir la salida del mortero por algun orificio, es decir , deben de cerrar herméticamente, las superficies internas de los mismos deben de presentar superficies lisas para así evitar que el concreto no pueda descimbrarse y, finalmente, no deben tener variaciones significativas en sus tamaños. Ver Lámina 1.



MOLDES CILINDRICOS PARA ESPECIMENES DE CONCRETO

El molde de la izquierda es utilizado para la prueba de compresión y el de la derecha se utiliza para medir las diferentes etapas de fraguado de la mezcla.

LAMINA 1

La varilla de compactación de la mezcla debe ser de sección circular, de acero, recta, de 16 mm de diámetro y de 60 cm de longitud, con los extremos semiesféricos.

Se debe tener a la mano herramientas auxiliares como cucharas de albañil, palas, llanas, enrasador y reglas, entre otras.

DETERMINACION DEL REVENIMIENTO

Como se mencionó en el capítulo 1 (Subcapítulo 1.5, inciso 2) de éste trabajo, la prueba de revenimiento nos sirve para determinar la trabajabilidad de la mezcla de concreto y así poder evaluar en forma preliminar que no se ha modificado la relación a/c con la consecuencia a criterio de aceptar o no la mezcla.

Para la realización de esta prueba el material básico consiste en un cono truncado de dimensiones específicas, varilla para compactar la mezcla, y una llana metálica. El procedimiento básico consiste en, primeramente, colocar el cono de revenimiento en una superficie dura y limpia sosteniendo sus apoyos con los pies, después por la parte superior del cono, se coloca por medio de un cucharón el concreto en 4 capas de igual altura, varillando cada una 25 veces haciendo pasar la varilla hasta la capa inferior. Ya saturado de la mezcla, el cilindro se enrasa, primero con la varilla y después con la llana metálica, hasta dejar una superficie plana. Posteriormente se limpian los apoyos y la base alrededor del cono para levantar éste verticalmente y con cuidado. Finalmente se mide el revenimiento que es la distancia entre el punto más elevado del concreto y la parte baja de la varilla apoyada en la parte alta del cono de revenimiento. Ver Láminas 2, 3 y 10.

VACIADO Y COMPACTACION DEL CONCRETO

El concreto se debe vaciar con un cucharón en los moldes, esto se realiza en capas que se van compactando con la varilla destinada para tal fin a razón de 25 golpes por capa. Se tiene cuidado de que la última capa sobrepase el borde superior del molde para que después de la compactación éste quede lleno de la mezcla. El número de capas en cilindros de 30 x 15 será igual a 3. Ver Lámina 4.

ACABADO

Se efectúa el acabado con el mínimo de pasadas necesarias para producir una superficie plana y uniforme, que esté a nivel con las orillas del molde. En cilindros ésta se realiza con la varilla de compactación cuando la consistencia de la mezcla lo permita, o con un enrasador o cuchara. Ver Lámina 5.



*Revenimiento de un concreto que
contiene superfluidificante*

LAMINA 2



*Revenimiento de la misma mezcla sin la
adición de superfluidificante*

LAMINA 3



*Revenimiento de un concreto que
contiene superfluidificante*

LAMINA 2



*Revenimiento de la misma mezcla sin la
adición de superfluidificante*

LAMINA 3



Elaboración de especímenes (cilindros) de concreto simple conteniendo aditivo Silica-fuma

LAMINA 4

CURADO.

El curado consiste en mantener un contenido óptimo de humedad en función directa con la temperatura en la mezcla de concreto acabado de colar, para así poder obtener las características deseadas de resistencia y durabilidad (Véase Capítulo 1, Subcapítulo 1.6).

Inmediatamente después del acabado superficial de la cabeza del cilindro de concreto todavía fresco, debe evitarse la evaporación del agua de la mezcla. Esto se logra cubriendo los cilindros con una tela de plástico resistente e impermeable.

Durante las primeras 24 horas, los especímenes de prueba deben de ser almacenados a una temperatura en el rango de los 16 a los 27 grados centígrados previniendo a toda costa, pérdida de humedad en los especímenes.

Los especímenes deben ser retirados de los moldes a las 24 horas del colado, permitiéndose un margen de entre las 16 y las 48 horas, para después ser almacenados bajo condición húmeda a una temperatura de 23 +/- 2 grados centígrados hasta el momento de la prueba.

Las condiciones de humedad se pueden lograr de dos formas: ya sea por inmersión o por almacenamiento en un cuarto o gabinete húmedo.

La primera de ellas consiste en la inmersión de los cilindros de concreto en agua saturada de cal a una temperatura de 23 +/- 2 grados centígrados. En el caso de los cuartos húmedos debe de cumplirse con una humedad relativa que oscile entre un 95 y 100 %, con las mismas consideraciones de temperatura que para el anterior.

Las resistencias se determinan a los 7, 14, 28 y 56 días en ensayos a compresión en una máquina de prueba la cual aplica la carga a una velocidad moderada, que es la recomendada para este tipo de ensaye.

CABECEO DE ESPECIMENES DE CONCRETO

Para lograr eliminar incertidumbres y obtener resultados reales, es necesario que las cabezas de la máquina de compresión estén totalmente en contacto con las superficies extremas del espécimen. Esto se logra con la operación llamada "cabecceo", que consiste en aplicar un cierto material, generalmente azufre o mortero de azufre (este último consiste en una mezcla de azufre-arena en proporción 2:1; se utiliza arena cernida que pasa por la malla 40. Se espera que dicha mezcla alcance una resistencia mínima a la compresión, a la edad de 2 horas, de 350 kg/cm²), que por sus características de solidificación permite una rápida velocidad de prueba; dicha operación tiene por objeto producir una superficie lisa de apoyo que permita una distribución uniforme de carga.

La NOM-C-109 reglamenta el procedimiento correcto para cabecear especímenes de concreto, que en forma generalizada se explica a continuación:

APARATOS Y EQUIPO:

Para el cabeceo con mortero de azufre se emplean platos metálicos con un dispositivo de alineamiento (barras guía), cuyo diámetro debe ser por lo menos 2.5 mm mayor que el del espécimen de cabecear y su superficie de asiento no debe apartarse de un plano en más de 0.50 mm en 150 mm. La superficie de los platos debe ser lo más lisa posible. La barra guía debe asegurar que ni una sola capa se aparte de la perpendicular al eje del espécimen cilíndrico en más de 5 grados (3mm en 300 mm).

Las jarras para fundir el azufre deben ser empleadas bajo campana, para expulsar los gases al exterior.

PROCEDIMIENTO:

Es importante que la capa de mortero de azufre sea tan resistente como el concreto. Las superficies cabeceadas de los especímenes deben ser planas, dentro de una tolerancia de 0.50 mm, a través de cualquier diámetro.

Al cabecear con mortero de azufre, éste debe calentarse a una temperatura de 140 ± 10 grados centígrados de que esta mezcla se encuentre alejada de cualquier humedad.

Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido. Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben de estar secas al momento de cabecear. Es posible usar el mortero de azufre varias veces, pero esto está restringido a un máximo de 12 veces, ya que después de este límite se tiene pérdida de la resistencia y de la fluidez de la mezcla, debida a la contaminación del mortero con el aceite, etc. Ver Lámina G.

Antes de la prueba, es importante fijar las condiciones de ensayo. Entre estas condiciones, es de particular importancia fijar la velocidad de carga a la cual serán ensayados nuestros especímenes de concreto.



*Enrasa y acabado de especímenes
cilíndricos de concreto*

LAMINA 5



*Cabeceo con mortero de azufre
Obsérvese el detalle superior de la
campana extractora*

LAMINA 6

Pase al cuidado que se tenga en la realización de los procesos de investigación y experimentación, siempre existirá cierta dispersión de datos, por lo que se recurre como herramienta de trabajo en la evaluación de estos resultados a criterios estadísticos. Como ya de alguna forma se mencionó, de los factores que más afectan los resultados obtenidos tenemos:

- El efecto de :
- Condiciones de curado.
 - Esbeltez del espécimen.
 - Velocidad de carga.
 - Velocidad de deformación.
 - Condiciones de humedad y temperatura.
 - Tamaño del molde y de los agregados.
 - etc...

DETERMINACION DE LA RESISTENCIA

MAQUINA DE PRUEBA

Puede ser de cualquier tipo, con capacidad suficiente y que pueda funcionar a cierta velocidad de aplicación en forma uniforme y sin impacto. Los dispositivos de aplicación de la carga se encuentran constituidos en forma general por dos bloques de acero, uno en la parte superior el cual debe de tener asiento esférico y un diámetro no menor de 250 mm para cilindros de 150 mm de diámetro; el otro, en la parte inferior, debe ser un bloque rígido en el cual descansará el espécimen de prueba. Ver Lámina 7 y 8.

PRUEBA DE LOS ESPECIMENES

Las pruebas a la compresión de los especímenes curados en húmedo deben ser hechas tan pronto como sea posible después de retirados del cuarto húmedo. Es condición necesaria el probarlos en condición húmeda.

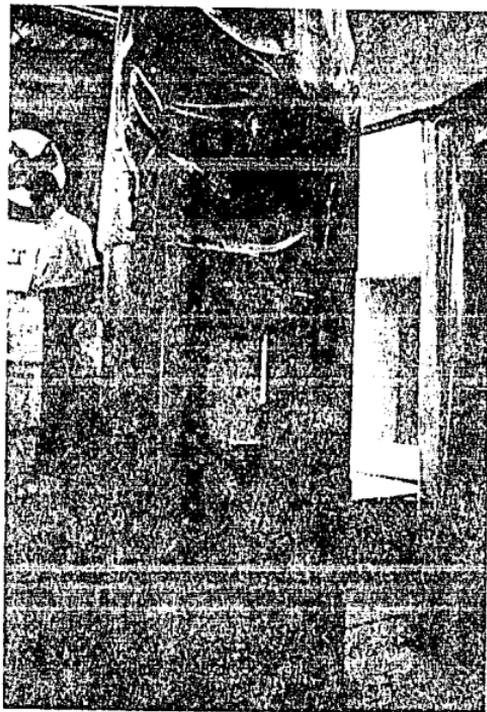
PROCEDIMIENTO

Las superficies de los bloques de carga, superior e inferior, así como el espécimen de prueba deben estar limpios a la hora de colocarse en conjunto. Se coloca el espécimen sobre el bloque inferior alineado cuidadosamente su eje con el centro del bloque de carga con asiento esférico; mientras el bloque superior se baja hacia él, se gira lentamente su parte móvil a mano, para, obtener un contacto uniforme



*Máquina de prueba
(Escala)*

LAMINA 7



*Máquina de prueba
(Marco de carga)*

LAMINA 8

La velocidad de carga debe ser en forma continua y sin impactos. Esta variará en el rango de 1.4 a 3.5 kg/cm² por minuto. Se puede permitir una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada, y no debiendo hacer ajustes a este respecto en la segunda mitad de la prueba.

Se aplica la carga hasta la falla del espécimen y se registra la carga máxima soportada.

CALCULOS

Se realizarán de acuerdo a la fórmula de esfuerzo antes descrita.

A continuación se describe el procedimiento y resultados del programa de pruebas llevado a cabo en los laboratorios de CARSA (Concretos de Alta Resistencia S.A.) para la obtención de concretos de muy alta resistencia utilizando aditivos Silica-fume y superfluidificantes.

2.2.1. DESCRIPCION DE PRUEBAS

Elaboración de los especímenes.

Materiales:

- Cemento: Cemento Portland Tipo I.
- Agregados: Grava; caliza triturada, tamaño máximo agregado 3/4" procedente de Toluca.
- Arena; Condiciones óptimas.
- Silica-fume: En diferentes porcentajes con respecto al peso del cemento.

Número de total de dosificaciones: 5 (cinco).

TABLA 2.1

DOSIFICACIÓN No.	SILICA-FUME (%)	PESO SILICA-FUME (kg)	AGUA (*) (lt)
1 (testigo)	0	0.000	13.69
2	5	1.782	13.69
3	10	3.565	13.69
4	15	5.437	13.69
5	20	7.130	13.69

(*) Se incrementó el contenido de agua para no modificar la relación agua/cementantes.

Proporcionamientos:

Cemento.....	42.45 kg
Arena.....	53.00 kg
Grava.....	64.90 kg
Superfluidificantes.....	89.00 cc
Revenimiento.....	2.50 cm inicial.

Dosificación No. 1

Mezcla Control o Testigo.

Procedimiento:

- 1) Los agregados limpios y el cemento, previamente pesados se colocan en la revolvedora de concreto y se hace un premezclado.
- 2) Se vierte el agua junto con el superfluidificante ya con la revolvedora en funcionamiento y se deja mezclar por aproximadamente 3 minutos.
- 3) Apagamos la revolvedora para dejar reposar la mezcla y se toma la temperatura del concreto que fue de 24 grados centígrados.
- 4) Se enciende la revolvedora y trabaja por dos minutos más.
- 5) Se toma una muestra de concreto de la olla y se mide el revenimiento el cual fue de 4.0 cms.
- 6) Se agrega por tanteo superfluidificante de tal manera que se busca obtener un revenimiento de ± 20 cms. En este caso, la cantidad utilizada de superfluidificante fue de 380 cc alcanzándose un revenimiento de 20 cms. Se observó segregación del agregado grueso.
- 7) Se procedió a la colocación del concreto en los moldes cilíndricos, para posteriormente ser descimbrados, curados y ensayados según lo marcan las especificaciones.

Dosificación No. 5

Silica-fume al 20 %

Procedimiento:

- 1) Se colocan los agregados, el cemento y el Silica-fume dentro de la revolvedora y se hace un premezclado.
- 2) Ya encendida la revolvedora se agrega el agua y el superfluidificante revolviendo por espacio de 3 minutos.
- 3) Se para la revolvedora y se toma la temperatura la cual fue de 25 grados centígrados, y se deja reposar 3 minutos.
- 4) Se enciende la revolvedora y se deja mezclar por 2 minutos más.
- 5) Se agregó superfluidificante al tanteo, alcanzando con un total de aditivo igual a 1,300 cc un revenimiento de 18 cms.
- 6) Se procedió al llenado de los moldes cilíndricos.

Dosificación No. 4

Silica-fume al 15 %

Procedimiento:

- 1) Se repiten todos los pasos, con la diferencia en el porcentaje de Silica-fume.
- 2) Se procede por tanteos a alcanzar el revenimiento tipo mediante la adición de aditivo superfluidificante. El total de aditivo superfluidificante utilizado = 1,000 cc. La temperatura fue de 26 grados centígrados.

- 3) Finalmente se llenan los moldes.

Dosificación No. 3

Silica-fume al 10 %

Procedimiento:

- 1) Se repiten todos los pasos, con la diferencia en el porcentaje de Silica-fume.
- 2) Se procede por tanteos a alcanzar el revenimiento tipo mediante la adición de aditivo superfluidificante. El total de aditivo superfluidificante utilizado fue = 750 cc, alcanzándose un revenimiento de 19.2 cm. La temperatura fue de 25 grados centígrados.
- 3) Finalmente se llenan los moldes respectivos.

Dosificación No. 2

Silica-fume al 5 %

Procedimiento:

- 1) Se repiten todos los pasos, con la diferencia en el porcentaje de Silica-fume.
- 2) Se procede por tanteos a alcanzar el revenimiento tipo mediante la adición de aditivo superfluidificante. Se alcanzó un revenimiento de 9.2 cm con la adición de aditivo superfluidificante = 550 cc. La temperatura fue de 26 grados centígrados.
- 3) Se llenan los moldes cilíndricos.

NOTA: EL ORDEN EN EL CUAL SE DESCRIBE EL PROCESO DE PRUEBA NO ESTA EN FUNCION DEL NUMERO ASIGNADO A LA DOSIFICACION TIPO, SINO EN FUNCION DEL PROGRAMA DE ELABORACION.

Comentarios de las pruebas:

- El concreto con el aditivo Silica-fume se comportó como una mezcla muy cohesiva, además de que modifica el color básico de la mezcla (color gris oscuro).
- Se observó que entre menor es la cantidad de Silica-fume, es menor la cantidad requerida de superfluidificante.
- El aditivo superfluidificante utilizando en todos los casos fue el Rheobuild 2000.
- No se observaron cambios significativos en la temperatura como consecuencia de la adición de aditivo Silica-fume a la mezcla.
- Los resultados de las pruebas a compresión a los 7, 14, 28 y 56 días fueron los siguientes.

TABLA 2.2

RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION (Kg/cm²).

Muestra	7 días	14 días	28 días	56 días
1) Testigo	426	489	540	577
2)Silica-fume 20 %	497	577	615	700
3)Silica-fume 15 %	508	594	658	715
4)Silica-fume 10 %	486	552	604	682
5)Silica-fume 5 %	485	557	609	680

Ver la Figura 2.1, en la que se observa el comportamiento de resistencia vs tiempo de los resultados antes descritos.

Ver la lámina 9, en la que se observa la falla típica de un cilindro de concreto ensayado a compresión.

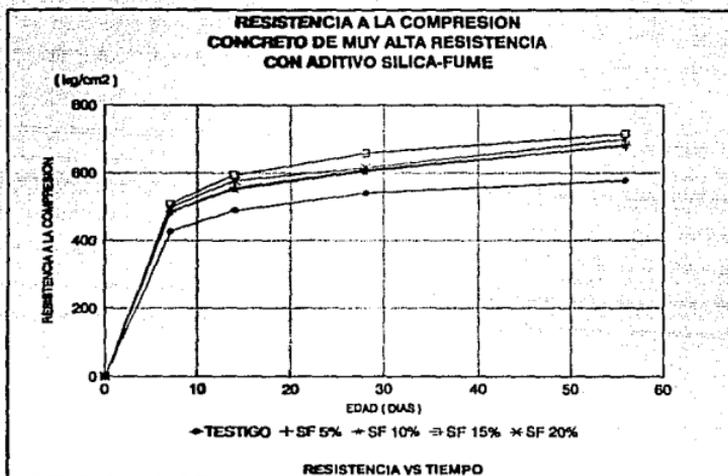
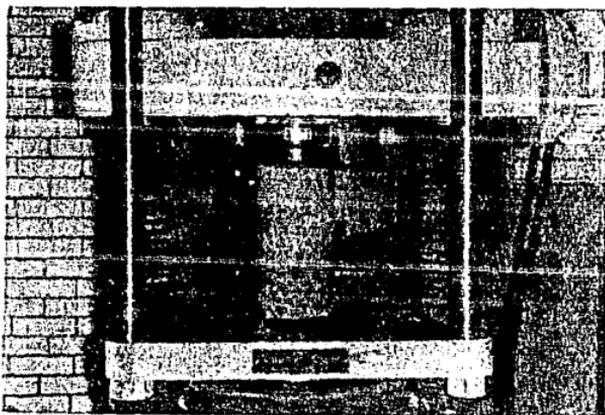


FIGURA 2.1



Resistencia a la compresión

LAMINA 9

CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS:

- 1) - Se observa que al incrementarse el porcentaje de Silica-fume, se obtiene una matriz de concreto más resistente al llegar al límite del 15 % de Silica-fume. Después de este límite la resistencia descendió en pequeña proporción.
- 2) - Concluimos que el porcentaje óptimo de Silica-fume utilizado en este caso fue del 15 %.
- 3) - La adición de aditivo silica-fume a la mezcla de concreto no modifica significativamente la cantidad de calor generado en el proceso de hidratación del cemento (No > a 2 grados centígrados).
- 4) - La falla de los cilindros fue en su mayoría en diagonal o cónica, y se presentó en forma muy frágil y repentina por la gran rigidez de este elemento.

2.2.2. OTRAS PRUEBAS

Varios son los programas de pruebas que sobre concreto de muy alta resistencia se han realizado de la década pasada a la fecha. Los grupos más interesados al respecto fueron la División Construction Technology Laboratories de la Portland Cement Association (PCA) y el de la empresa Norcem Concrete Products Inc. División de la A/S Scancem-The Norwegian and Swedish Cement Industry.

En lo que se refiere a los resultados obtenidos en pruebas experimentales de concreto ensayado a compresión por estos laboratorios reconocidos internacionalmente tenemos lo que a continuación se describe:

Las consideraciones básicas referentes a las características de los materiales que se utilizaron para la elaboración de los diferentes concretos de muy alta resistencia, en forma general se expresan en el Capítulo I de este trabajo, por lo que nos enfocaremos a aspectos más específicos del diseño de mezcla utilizado y de los resultados obtenidos.

Los especímenes de concreto de alta resistencia fueron preparados en moldes cilíndricos de acero, con una relación de esbeltez de 2 (Cilindros con 10 cm de diámetro por 20 cm de altura). El tamaño máximo de agregado para este tamaño de cilindro fue de 1/2 pulgada (12.7 mm). Se tienen estudios realizados por el departamento de transporte de Arizona y de la ciudad de Phoenix en el cual se demuestra que dicho tamaño de cilindros es confiable. Además, la principal razón de usar este tamaño de cilindros es el que de los laboratorios tienen equipo de prueba a la compresión con una capacidad máxima de prueba de 135 toneladas, que resulta bajo cuando se habla de altas resistencias.

La preparación final del cilindro de prueba fue muy crítico para el éxito de la prueba de compresión. El uso de mortero de azufre normal para cabeceo genera datos erróneos arriba del rango de los 555 kg/cm^2 , ocasionado por el límite de la resistencia a la compresión del material. Es por ello que, se utilizaron cabeceados epóxicos de una resistencia de $1,394 \text{ kg/cm}^3$ demostrando ser satisfactorios. Los Construction Technology Laboratories usaron otro método, que consistió en devastar los topos o caras de los cilindros hasta dejarlos muy lisos un día después del secado al aire, mismos que fueron curados a vapor hasta la edad de prueba.

Los resultados de la prueba a compresión se muestran en la Tabla 2.3 en la que se observa el desarrollo de resistencia a las 12 horas, 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 128 días, y un año. El contenido de cemento para esta mezcla fue de 594 kg/m^3 ; el contenido de Silica-fume fue de 98.7 kg/m^3 (16.6 % con respecto al peso del cemento). La relación a/c fue calculada considerando la adición del aditivo puzolánico. Los más significativos resultados de las pruebas a compresión fueron aquellos de 1 día con 655 kg/cm^2 y a los 128 días de $1,254 \text{ kg/cm}^2$. Datos más recientes, con relaciones a/c más bajas, muestran 737 kg/cm^2 para un día y $1,434 \text{ kg/cm}^2$ en 28 días.

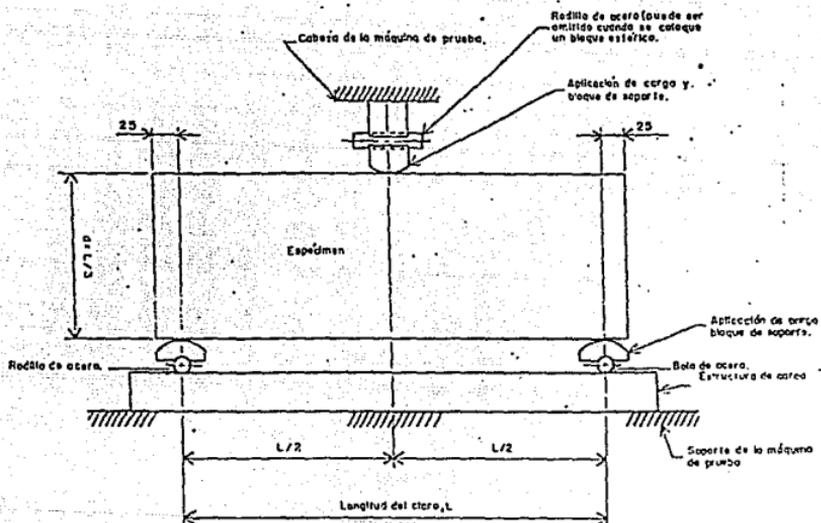
TABLA 2.3 (kg/cm^2)

<u>12 HR</u>	<u>1 DIA</u>	<u>3 DIAS</u>	<u>7 DIAS</u>	<u>14 DIAS</u>
435	655	787	955	1038
<u>28 DIAS</u>	<u>60 DIAS</u>	<u>90 DIAS</u>	<u>128 DIAS</u>	<u>1 AÑO</u>
1125	1131	1163	1254	1278

Comparando estos resultados con los obtenidos en los laboratorios de CARSA descritos anteriormente, se observa que la resistencia de diseño, es decir, a los 28 días, para la dosificación de aditivo Silica-fume del 15 %, son superiores en aproximadamente un 57 %, esto se debe en forma general a que las pruebas realizadas en CARSA, tuvieron el inconveniente de ser las primeras hechas en México, en consecuencia se tenía poca o ninguna experiencia de laboratorio con este producto. Además, los agregados utilizados en los laboratorios norteamericanos cumplen con características óptimas de calidad y resistencia para la obtención de concreto de alta resistencia. Cabe aclarar también, como se mencionó en el Capítulo I (Subcapítulo 1.4 inciso 1.1) que para la elaboración de un concreto de alta resistencia es necesaria una mezcladora de alta revolución ($> 20 \text{ rev/min}$) y que en las pruebas realizadas se carecía de ella.

2.3. RESISTENCIA A LA FLEXION

El valor de la resistencia del concreto simple o flexión se obtiene del ensayo de vigas de sección cuadrada. Dichas vigas son colocadas en forma simplemente apoyada y se les aplica una o dos cargas puntuales. (Ver Figura 2.2). Las Normas Oficiales Mexicanas NOM-C-161 y la NOM-C-160 reglamentan o especifican las condiciones de elaboración, curado y prueba de los especímenes de concreto para éste fin.



Aparato para prueba de resistencia a la flexión con carga en el centro del claro.

FIGURA 2.2

La resistencia a la flexión en especímenes de concreto sujetos a una sola carga puntual, es mayor que para aquéllos sometidos a dos cargas puntuales simétricas, ésto se debe a que en el segundo caso la zona de esfuerzos máximos se presenta en una porción mayor de la viga, lo que por consecuencia aumenta la posibilidad de que en esa porción exista una zona de menor resistencia que la promedio.

La resistencia a la flexión se usa como índice de la resistencia de estructuras tales como pavimentos rígidos, sin embargo, esta prueba también es utilizada para determinar la resistencia del concreto a la tensión originada por la flexión, siendo en este caso el índice de resistencia el patrón conocido como módulo de ruptura. Este módulo se expresa con la siguiente ecuación:

$$MR = Mc / I$$

En donde:

- MR = Módulo de ruptura del material.
- M = Momento flexionante máximo.
- c = Medio peralte.
- I = Momento de inercia de la sección.

O bien, con la siguiente fórmula:

$$MR = 3/2 PL/bd^2$$

En donde:

- P = Carga máxima.
- L = Longitud entre los apoyos.
- b = Ancho de la viga.
- d = Peralte de la viga.

La fórmula anterior supone que el concreto es elástico hasta la ruptura, hipótesis que no es correcta para toda la escala de cargas. Como ya se dijo, esta prueba proporciona una medida de la resistencia del concreto a la flexión, o más bien, a la tensión debida a la flexión. Generalmente el valor arrojado por este parámetro es mayor que la resistencia a la tensión obtenida del ensaye brasileño (NOM-C-163).

ELABORACION DE ESPECIMENES

Como ya se mencionó, la NOM-C-160 y la NOM-C-161 determinan la metodología para la elaboración, curado, y prueba de vigas elaboradas para este fin, de la cual se expresan sus conceptos fundamentales a continuación:

HERRAMIENTA Y EQUIPO:

Los moldes para vigas deben ser de forma rectangular con dimensiones tales que la longitud de las mismas debe ser por lo menos 5 cm mayor que tres veces el peralte que se usa para la prueba. No debe exceder de 1.5 la relación de ancho peralte del espécimen moldeado. La viga tipo debe ser de 15x15 cms de sección transversal.

La superficie interior de los moldes debe ser lisa. Los lados, la parte inferior y los extremos de la viga deben de formar ángulos rectos entre sí, que a su vez eviten la pérdida o el escape del mortero de la mezcla.

La varilla de compactación de la mezcla deberá cumplir con las mismas características que la varilla de compactación utilizada para cilindros de concreto.

Es importante al elaborar los especímenes, tener a la mano herramienta auxiliar que permita o facilite la elaboración de los mismos, tales como palas, cucharas de albañil, llanas, reglas, etc..

VACIADO Y COMPACTACION.

El concreto se debe vaciar en los moldes por medio de un cucharón, cuidando de que cada porción sea representativa del total de la mezcla. Al igual que para cilindros de concreto, la mezcla debe de distribuirse a lo largo del molde por medio de la varilla de compactación antes de iniciar la misma. El número de capas requeridas para vigas cuyo peralte se encuentre entre los 15 y 20 cms será igual a 2, cuidando de que la última de ellas, sobrepase el cupo del molde y lo llene totalmente después de la compactación. El número de varillados por capa, es uno por cada 10 cm² de superficie del espécimen. Ver Lámina 11.

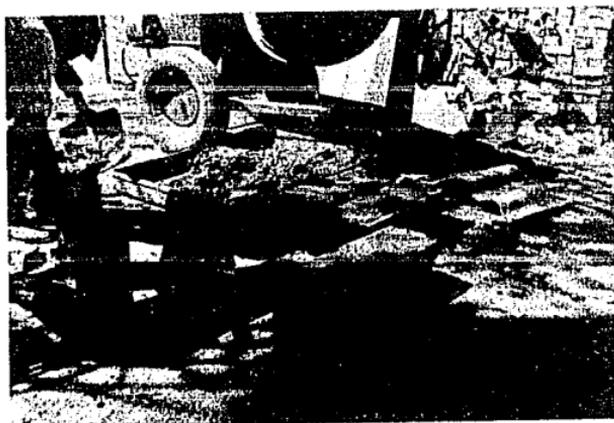
ACABADO.

Se efectúa el acabado con el mínimo de pasadas necesarias para producir una superficie plana y uniforme, que esté a nivel con las orillas del molde. Ver Lámina 12.



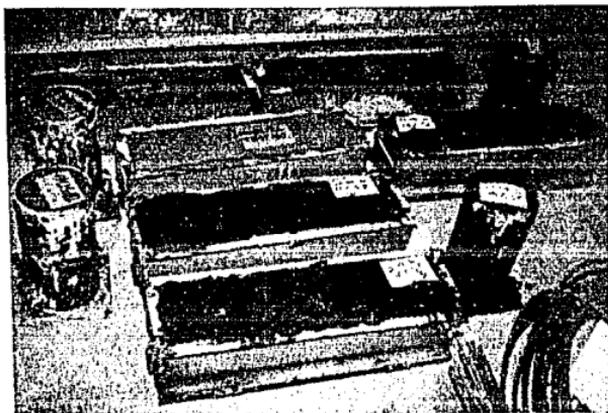
Determinación del revenimiento

LAMINA 10



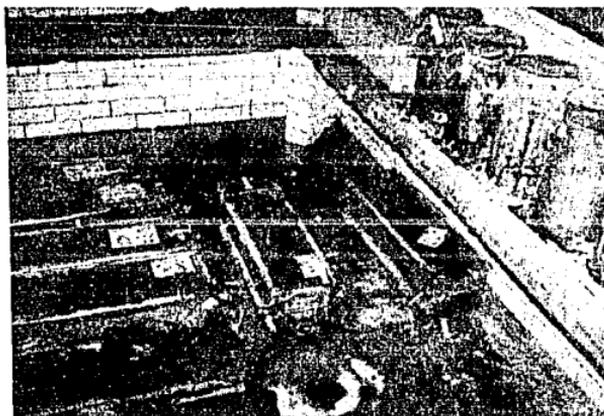
Elaboración de especímenes (vigas) de concreto simple conteniendo aditivo Silica-Fume

LAMINA 11



Vigas y cilindros ya terminados y clasificados de acuerdo a su dosificación y fecha de elaboración

LAMINA 12



Vigas y cilindros cubiertos con plástico para evitar la pérdida de agua por calor de hidratación

LAMINA 13

CURADO

Para evitar la evaporación del agua de los especímenes de concreto sin fraguar, se deben de cubrir después de terminados, con una tela de plástico resistente e impermeable. Después de moldeado y antes de cumplirse las 24 horas del mismo, debe de procurarse una temperatura en el rango de los 16 a los 27 grados centígrados, así como cualquier pérdida posible de humedad. Ver Lámina 13.

Los especímenes de prueba deben de retirarse de los moldes entre las 24 y las 48 horas después del moldeado y almacenarse bajo condición húmeda a la temperatura de 23 ± 2 grados centígrados, además, deben de almacenarse durante un período mínimo de 20 horas inmediatamente antes de las pruebas, en agua saturada de cal a 23 ± 2 grados centígrados.

DETERMINACION DE LA RESISTENCIA

MAQUINA DE PRUEBA

Debe de cumplir con los requisitos que la NOM-CH-27 marca en cuanto a velocidad de aplicación y capacidad de carga.

DISPOSITIVO DE APLICACION DE CARGA

Se debe de utilizar un dispositivo que sea capaz de aplicar carga en el centro del claro de prueba de tal modo que la fuerza sea perpendicular a las caras horizontales de la viga y se aplique uniformemente a todo lo ancho. La relación de la distancia del punto de aplicación de la carga a las reacciones, dividida entre la altura de la viga, no debe ser menor de 1.5. (Como se observó en la figura 2.2).

PREPARACION DEL ESPECIMEN

La longitud el espécimen debe permitir un claro entre apoyos de tres veces su peralte con una tolerancia de $\pm 2\%$. Cada muestra debe de consistir de cuando menos 3 especímenes de una misma rachada que se encayarán a la edad del proyecto.

PROCEDIMIENTO

Se debe voltear el espécimen sobre un lado con respecto a la posición de moldeado, se centra en los bloques de apoyo y a su vez, éstos deben de estar centrados con respecto a la fuerza a aplicar; el bloque de aplicación de carga se pone en contacto con la superficie del espécimen.

La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme y continua, tal que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de 10 kg/cm^2 por minuto, permitiéndose velocidades mayores antes del 50 % de la carga de ruptura.

CALCULOS

De acuerdo a las fórmulas antes descritas.

2.3.1. DESCRIPCION DE PRUEBAS.

Las pruebas de laboratorio efectuadas para obtener la resistencia a la flexión de especímenes de concreto de muy alta resistencia, fueron realizados en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la ENEP Acatlán. Dicho estudio experimental comprendió de las siguientes partes:

- Análisis granulométrico de los agregados.
- Determinación de la densidad y la absorción de los mismos.
- Diseño de la mezcla.
- Elaboración de los especímenes.
- Ensayos.

A continuación se describen los anteriores:

Análisis granulométrico. (NOM-C77)

Se tuvo el siguiente desarrollo en el cual se determinó los diferentes tamaños granulométricos de nuestros agregados.

- 1.- Cuarteo, Se toma una muestra de agregado, se coloca en una charola y se divide en cuatro partes, escogiendo solo una de ellas.

Esto último es con el objeto de que la muestra a analizar, sea representativa del conjunto de nuestro banco de materiales.

- 2.- Pesaje de la muestra de material. Se tara la báscula con la charola que contendrá los agregados antes de pesar.
- 3.- Cribado. Se arman las cribas que se van a emplear en el siguiente orden: Para agregados gruesos y agregados finos se utilizaron respectivamente las siguientes mallas, 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", malla 4, para la grava; y malla 4, 10, 20, 40, 60, 100, para la arena. Para ambos casos al final se coloca el receptáculo apropiado o charola y se tapa bien todo el conjunto.

Se coloca el conjunto de mallas o tamices en la máquina cribadora y se agita mecánicamente por un tiempo tal que, después de haberse completado, no más del 1 % en masa del residuo, en cualquier criba individual, pase esa criba durante un minuto de cribado manual continuo.

- 4.- Pesaje del material retenido en las diferentes cribas, anotando estos resultados en masa y porcentaje.

Los resultados de éstas pruebas se anotan en las Tablas 2.4 y 2.5.

GRAVAS

TABLA 2.4

Peso de la muestra = 2,763 g

MALLA No.	RETENIDO (g)	% RETENIDOS	% ACUMULADOS
1 1/2 "	----	0.000	0.000
1 "	161	6.028	6.028
3/4 "	1,186	44.403	50.431
1/2 "	984	36.840	87.271
3/8 "	249	9.322	96.593
4 "	78	2.920	99.513
CHAROLA	13	0.487	100.000
	2.671	100.000	

ARENAS

TABLA 2.5

Peso de la muestra = 2,065 g

MALLA No.	RETENIDO (g)	% RETENIDOS	% ACUMULADOS
4	43	2.100	2.100
10	519	25.200	27.300
20	644	31.200	58.500
40	559	27.100	85.600
60	182	8.800	94.400
100	94	4.600	99.000
CHAROLA	20	1.000	---
	2,061	100.000	366.900

$$\text{MÓDULO DE FINURA} = \% \text{ ACUMULADOS} / 100$$

$$\text{M.F.} = 366.9 / 100 = 3.67$$

Se tiene una grava bien graduada de roca caliza con buena resistencia mecánica y un alto módulo de finura en la arena, es decir, una arena gruesa que se establece como buena para obtener concreto de alta resistencia.

Determinación de la densidad.

El procedimiento para determinar la densidad de los agregados fue el siguiente:

- 1.- Se saturaron los agregados sumergiéndolos en agua un tiempo no menor de 24 horas.
- 2.- Se secaron las muestras con papel de estrasa y por medio de una estufa. La superficie de la grava está seca cuando desaparece el brillo superficial; la superficie de la arena está seca cuando esta fluye libremente mediante el "Método de la charola" (Ver determinación del contenido de humedad).
- 3.- Se pesan los agregados en estado de saturación.
- 4.- Se introducen por separado los agregados en un vaso de precipitado con agua y se determina por una sencilla diferencia de niveles el volumen desalojado por el agregado.

5.- Se obtiene la densidad de los distintos agregados mediante la siguiente fórmula:

$$\delta = \frac{\text{Peso del material saturado}}{\text{Peso del líquido desalojado}}$$

Obteniéndose así los siguientes resultados:

TABLA 2.6

PESO SATURADO (g)		VOLUMEN DESALOJADO	δ
GRAVA	ARENA	(cm ³)	
570.96		210	2.72
	376.47	165	2.28

NOTA: El agua tiene equivalencia en peso y volumen.
(1 g de agua = 1 ml del mismo material).

Determinación de la absorción.

El método utilizado para determinar la absorción o contenido de humedad del agregado es el conocido como "Método de a charola". Este método es lo bastante preciso para cumplir los requerimientos de obra, siempre y cuando la muestra analizada sea representativa del lote de material. A continuación se describe este método:

- 1.- Se saturan los agregados por inmersión en agua, por un tiempo no menor de 24 horas.
- 2.- Se pesan los agregados saturados.
- 3.- Se secan las muestras con papel de estrasa y mediante la utilización de una estufa. La superficie del agregado grueso está seco, como ya se mencionó, cuando desaparece el brillo de la misma. En el caso de la arena, su superficie estará seca cuando ésta fluya libremente o se desmorone, mediante la "Prueba de desmoronamiento" que consiste en lo siguiente:

- a) Se utiliza un cono truncado con medidas especiales el cual se coloca sobre una charola de tal forma que el diámetro mayor del mismo quede hacia abajo.
- b) Se retaca de arena dicho cono por su parte superior, y mediante el uso de un pisón se compacta el material.
- c) Se retira el cono en forma vertical ascendente con cuidado y se verifica el desmoronamiento.
- d) Se pesan las muestras de agregados ya perfectamente secas
- e) Se obtiene el porcentaje de absorción de los distintos agregados mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{\text{peso saturado} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100$$

Obteniéndose así los siguientes resultados.

TABLA 2.7

MATERIAL	PESO SATURADO (g)	PESO SECO (g)	% DE ABSORCION
GRAVA	570.96	568.57	0.42
ARENA	3376.47	343.24	9.68

Se observa que se tiene una grava con un bajísimo % de absorción que en consecuencia no absorberá el agua de la mezcla que es necesaria para la hidratación del cemento, independientemente de la corrección por absorción al diseñar la mezcla.

Los resultados hasta aquí obtenidos son necesarios en la elaboración del diseño de mezcla a utilizar, en éste caso, para la preparación de especímenes a ser ensayados a flexión y tensión indirecta (Ensayo Brasileño).

Diseño de la mezcla.

El procedimiento de diseño de la mezcla de concreto utilizado para estas pruebas se basó en el "Método de cálculo por volumen absoluto", el cual presupone que el volumen de concreto compactado es igual a la suma de los volúmenes absolutos de todos los componentes. Además, se toman en consideración ciertos criterios para el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia. A continuación se describe todo el proceso de diseño de mezcla utilizado.

Características de la mezcla:

- Resistencia esperada a los 28 días = 773 kg/cm^2
- Cemento utilizado = Cemento Portland Tipo I.
- Tamaño máximo de agregado = Grava de 3/4"

- 1.- Se escoge un número de referencia de la Figura 2.3. (Relación entre el $f'c$ y el número de referencia. Es importante aclarar que el número de referencia es un valor arbitrario que fue asignado por los investigadores ingleses Erntroy y Shacklock).

$$\text{Número de referencia} = 5$$

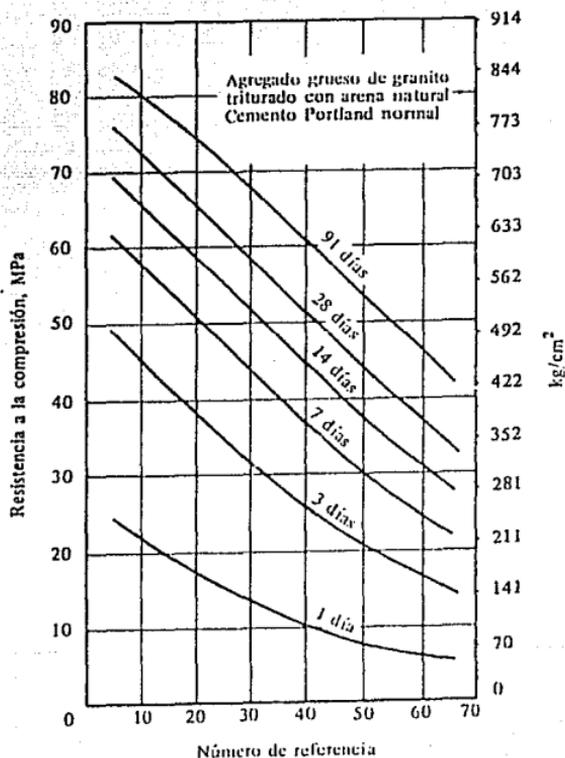
Se escogió el número 5 por ser el valor mínimo en el eje de las abscisas para el cual en la curva de resistencia a los 28 días de las curvas establecidas en la gráfica antes mencionada, se tiene en el eje de las ordenadas un valor alto de resistencia de aproximadamente 770 kg/cm^2 .

- 2.- Mediante el uso del número de referencia se utiliza la Figura 2.4 para obtener la relación a/c .

$$\text{Relación } a/c = 0.28$$

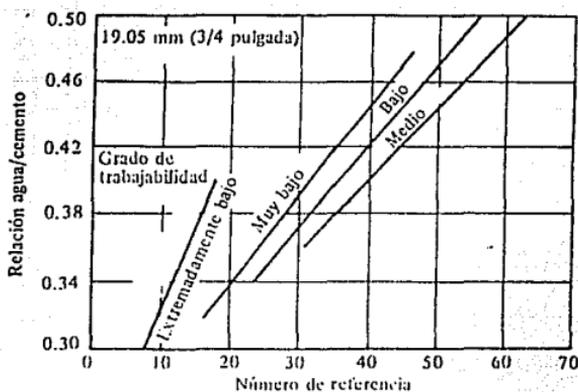
Se obtuvo el valor de $a/c = 0.28$ iterando graficamente en la Tabla mencionada.

- 3.- Se encuentra después la relación agregado/cemento utilizando la tabla 2.8.



Relación entre la resistencia a la compresión y el "número de referencia" para mezclas que contienen agregado grueso de granito triturado, arena natural y cemento Portland normal

FIGURA 2.3



Gráfica de la relación agua/cemento contra el "número de referencia" para tamaño máximo de agregado de 19mm. (3/4").

FIGURA 2.4

Tipo de agregado grueso*	Grava Irregular								Granito triturado								
	19.05 mm (¾")				9.52 mm (¾")				19.05 mm (¾")				9.52 mm (¾")				
Tamaño máximo del agregado	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	EB	MB	B	M	
Relación agua/cemento por peso	0.30	3.0	-	-	-	2.4	-	-	-	3.3	-	-	-	2.9	-	-	-
	0.32	3.8	2.5	-	-	3.2	-	-	-	4.0	2.6	-	-	3.6	2.3	-	-
	0.34	4.5	3.0	2.5	-	3.9	2.6	-	-	4.6	3.2	2.6	-	4.2	2.8	2.3	-
	0.36	5.2	3.5	3.0	2.5	4.6	3.1	2.6	-	5.2	3.6	3.1	2.6	4.7	3.2	2.7	2.3
	0.38	-	4.0	3.4	2.9	5.2	3.5	3.0	2.5	-	4.1	3.5	2.9	5.2	3.6	3.0	2.6
	0.40	-	4.4	3.8	3.2	-	3.9	3.3	2.7	-	4.5	3.8	3.2	-	4.0	3.3	2.9
	0.42	-	4.9	4.1	3.5	-	4.3	3.6	3.0	-	4.9	4.2	3.5	-	4.4	3.6	3.1
	0.44	-	5.3	4.5	3.8	-	4.7	3.9	3.3	-	5.3	4.5	3.7	-	4.8	3.9	3.3
	0.46	-	-	4.8	4.1	-	5.1	4.2	3.6	-	-	4.8	4.0	-	5.1	4.2	3.6
	0.48	-	-	5.2	4.4	-	5.4	4.5	3.8	-	-	5.1	4.2	-	5.5	4.5	3.8
0.50	-	-	5.5	4.7	-	-	4.8	4.1	-	-	5.4	4.5	-	-	4.7	4.0	

* Arena natural empleada en combinación con los dos tipos de agregado grueso.

† I.B = Extremadamente bajo

MB = Muy bajo

B = Bajo

M = Medio

Relación agregado/cemento (por peso) requerida para proporcionar cuatro grados de trabajabilidad con diferentes relaciones agua/cemento empleando cemento Portland normal

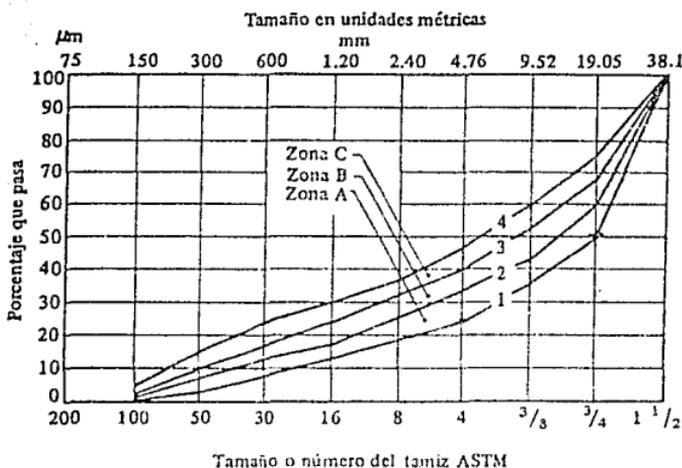
TABLA 2.8

Relación agregado/cemento = 3.0

Se toma el valor de agregado/cemento = 3.0 por ser el valor mínimo de la Tabla aproximado al valor de $a/c = 0.28$.

4.- Se calcula el contenido de cemento de la siguiente manera.

- Ya que no existen granulometrías ideales, es conveniente dosificar los materiales disponibles, de manera tal que la granulometría del agregado combinado sea similar a alguna de las curvas tipo que aparecen en la Figura 2.5.



Curvas granulométricas de la Road Note No. 4 para agregado de 38 mm. (1 1/2")

FIGURA 2.5

En nuestro caso, la curva No. 1 representa la granulometría más gruesa, la cual es la más recomendable siempre que se manejen mezclas con una baja relación a/c. En esta curva se considera que el 24 % del total de nuestra muestra de agregado pasa por la malla 4 (NOM G 4.75). En nuestro análisis granulométrico tenemos que, hablando de la arena, se tiene un 97.90 de material que pasa la malla 4, y para la grava, se tiene un 0.49 de material que pasa por la misma.

En base a lo anterior obtendremos nuestro proporcionamiento de agregados:

Sea x = Volumen de la arena

Sea y = Volumen de la grava.

Se tiene entonces:

$$0.979 x + .0049 y = .024 (x + y)$$

Si $x = 1$, tenemos entonces:

$$y = 3.143$$

Por lo que la arena y la grava estarán en una proporción de 1:3.143.

Haciendo la proporción para obtener el contenido de cemento tenemos:

$$\frac{\text{agregado}}{\text{cemento}} =$$

$$\text{cemento} = 4.143 / 3$$

Por lo que el contenido proporcional de cemento será = 1.381

Así mismo, respetando la proporción y haciendo que el cemento sea = 1, tenemos entonces:

$$1 \text{ parte de cemento:} = 1.000$$

$$1 / 1.381 \text{ partes de arena} = 0.724$$

$$3.143 / 1.381 \text{ partes de grava} = 2.276$$

El "Método de cálculo por volumen absoluto" da la siguiente relación para obtener las cantidades por peso para un metro cúbico de concreto:

$$\frac{\text{agua}}{1,000} + \frac{\text{cemento}}{1,000 \delta_c} + \frac{\text{arena}}{1,000 \delta_a} + \frac{\text{grava}}{1,000 \delta_g} = 1$$

En donde δ_c , δ_a , δ_g son las densidades del cemento, arena y grava respectivamente.

De la fórmula anterior deducimos el contenido de cemento (c = cemento):

$$\frac{0.28 c}{1,000} + \frac{1 c}{3.15 \times 1,000} + \frac{0.724 c}{2.28 \times 1,000} + \frac{2.276 c}{2.72 \times 1,000} = 1$$

$$c = 570.85 \text{ kg}$$

Entonces, respetando la proporción obtendremos:

cemento =	=	570.85 kg
agua = 570.85 x 0.28	=	159.84 kg
arena = 570.85 x 0.724	=	413.30 kg
grava = 570.85 x 2.276	=	<u>1,299.26 kg</u>
T O T A L	=	2,443.25 kg

Corrección por absorción de los agregados:

arena	413.30 x 0.0968	=	40.01 kg
grava	1,299.26 x 0.0042	=	5.46 kg

Se tiene entonces finalmente:

cemento =	=	570.85 kg
agua = 159.84 + 40.01 + 5.46	=	205.31 kg
arena = 413.30 - 40.01	=	373.29 kg
grava = 1,299.26 - 5.46	=	<u>1,293.80 kg</u>
T O T A L	=	2,443.25 kg

Que es la dosificación base para las pruebas de flexión en concreto simple:

Elaboración de los especímenes.

Materiales:

- Cemento: Cemento Portland Tipo I.
- Agregados: Grava; caliza triturada, tamaño máximo de agregados 3/4" procedente de Hidalgo.
Arena; Condiciones óptimas.
- Silica-fume: En diferentes porcentajes con respecto al peso del cemento.
- Tamaño de los moldes: 15 x 15 x 60 cm.

Número de total de dosificaciones: 4 (cuatro).

TABLA 2.9

PRUEBA No.	SILICA-FUME (%)	PESO SILICA-FUME (kg)	AGUA (*) (lit)
1 (testigo)	0	0.00	11.70
2	10	3.25	11.61
3	15	4.77	13.07
4	20	6.51	13.52

(*) Se incrementó el contenido de agua para no modificar la relación agua/cementantes.

Procedimientos:

Cemento.....	32.54 kg
Arena.....	21.28 kg
Grava.....	73.75 kg
Superfluidificantes...	100.00 cc
Revenimiento.....	2.00 cm inicial.

Prueba No. 1

Mezcla Control o Testigo.

Procedimiento:

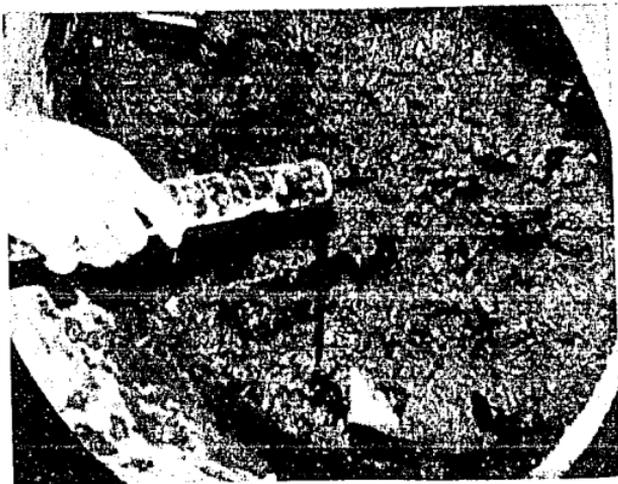
- 1) Los agregados limpios y el cemento, previamente pasados, se colocan en la revolvedora de concreto y se hace un premezclado.**
- 2) Se vierte el agua junto con el superfluidificante ya con la revolvedora en funcionamiento y se deja mezclar por aproximadamente 3 minutos.**
- 3) Se toma una muestra de concreto de la olla y se mide el revenimiento el cual fue de 1.5 cm.**
- 4) Se agrega por tanteo superfluidificante de tal manera que se busca obtener un revenimiento de ± 20 cm. En este caso, la cantidad utilizada de superfluidificante fue de 300 cc alcanzándose un revenimiento de 20 cm. Se observó segregación del agregado grueso. Ver Láminas 10 y 14.**
- 5) Se procedió a la colocación del concreto en los moldes correspondientes para vigas y cilindros, para posteriormente ser descimbrados, curados y ensayados según lo marcan las especificaciones.**

Prueba No. 2

Silica-fume al 10 %

Procedimiento:

- 1) Se colocan los agregados, el cemento y el silica-fume dentro de la revolvedora y se hace un premezclado.**
- 2) Ya encendida la revolvedora se agrega el agua y el superfluidificante revolviendo por espacio de 3 minutos.**



Aplicación del aditivo superfuidificante a la mezcla con aditivo Silica-Fume

LAMINA 14



Vaciado de la mezcla de la revoladora

LAMINA 15

- 3) Se toma una muestra de concreto de la olla y se mide el revenimiento, el cual fue de 3 cms.
- 4) Se agregó superfluidificante al tanteo, alcanzando con un total de aditivo igual a 200 cc un revenimiento de 18 cm.
- 5) Se procedió al llenado de los moldes.

Prueba No. 3

Silica-fume al 15 %

Procedimiento:

- 1) Se repiten los pasos 1 y 2.
- 2) Se toma una muestra de concreto de la olla y se mide el revenimiento el cual fue 0.5 cm.
- 3) Se procede por tanteos a alcanzar el revenimiento tipo mediante la adición de aditivo superfluidificante, con un tiempo de mezclado para cada una de 2 minutos, observándose el siguiente patrón de comportamiento:

+ 100 cc,	revenimiento =	2.5 cms
+ 200 cc,	revenimiento =	5.0 cms
+ 200 cc,	revenimiento =	15.0 cms
+ 50 cc,	revenimiento =	18.0 cms

total de aditivo superfluidificante utilizado:

$$100 \text{ cc (inicial) } + 500 \text{ cc (extra) } = 600 \text{ cc.}$$

- 4) Finalmente se llenan los moldes respectivos.

Prueba No. 4

Silica-fume al 20 %

Procedimiento:

- 1) Se repiten los pasos 1 y 2.
- 2) Se toma una muestra de concreto de la olla y se mide el revenimiento el cual fue 2.5 cms.
- 3) Se procede por tanteos a alcanzar el revenimiento tipo mediante la adición de aditivo superfluidificante, con un tiempo de mezclado para cada uno de 2 minutos, observándose el siguiente comportamiento:

300 cc,	revenimiento =	2.5 cms
200 cc,	revenimiento =	8.5 cms
150 cc,	revenimiento =	20.0 cms

total de aditivo superfluidificante utilizado:

$$100 \text{ cc (inicial) } + 650 \text{ cc (extra) } = 750 \text{ cc.}$$

- 4) Finalmente se llenan los moldes respectivos.

Comentarios de las pruebas:

- El concreto con el aditivo Silica-fume se comportó como una mezcla muy cohesiva, además de que modifica el color básico de la mezcla (color gris oscuro).
- Entre mayor es el contenido de aditivo Silica-fume, mayores son los requerimientos de la mezcla de aditivo superfluidificante.

- El aditivo superfluidificante utilizado fue el Rheobuild 2000.
- El aditivo Silica-fume fue proporcionado por la marca americana Master Builders.
- Algunos moldes utilizados presentaron cierta irregularidad geométrica, por lo que a la hora de probar los especímenes, se tuvieron algunos problemas de uniformidad de carga (Se indica con *** los especímenes que presentaron este problema).
- Los resultados de las pruebas a flexión a los 7, 14 y 28 días (Módulo de Ruptura) se muestran en la Tabla 2.10. Ver Lámina 16:

TABLA 2.10

RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXION (Kg/cm²).

Muestra	Peso (kg)	7 días	14 días	28 días
1) Testigo	32.300	52.00	55.3	53.0
2) Silica-fume 10%	31.500	*35.00	43.7	44.4
3) Silica-fume 15 %	33.300	51.00	*54.3	62.0
4) Silica-fume 20%	31.900	50.00	57.4	64.4

CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS:

- De la Tabla anterior se observa que la muestra testigo observó un comportamiento de resistencia superior a algunos especímenes con aplicaciones de aditivo Silica-fume dentro de los primeros días de prueba, pero para los 28 días este desarrollo de resistencia fue menos que en los especímenes con aplicaciones de aditivo Silica-fume al 15 y 20%. Véase la Figura 2.6.



Resistencia a la flexión del concreto

LAMINA 16

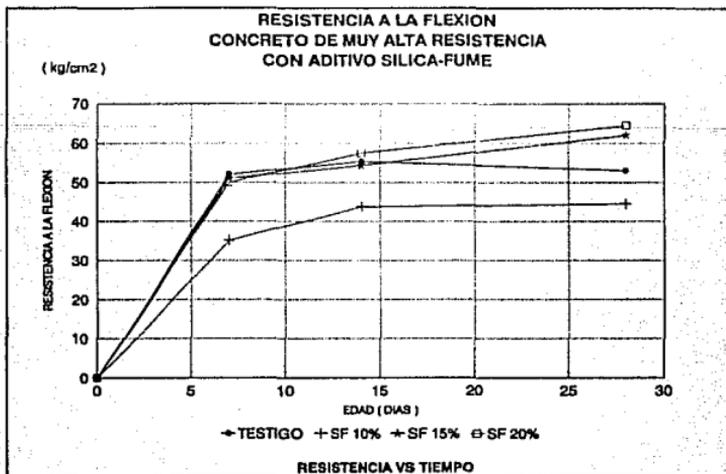


FIGURA 2.6

- El valor de resistencia obtenido para la mezcla de concreto con Silica-fume al 20 % a los 28 días puede considerarse como alto ($MR > a 60 \text{ kg/cm}^2$, vease 2.3.2).
- Se observó una falla frágil a la flexión.
- No se observó fracturado el agregado grueso en la zona o línea de fractura en los especímenes ensayados a los 7 y 14 días, comportamiento que no se repitió a los 28 días ya que esa misma zona el agregado grueso se observa claramente fracturado debido seguramente a la mayor resistencia del mortero y a una mayor adherencia entre agregado grueso y la anterior.
- Las mismas mezclas utilizadas en la elaboración de las vigas, resistieron una carga máxima a la compresión a los 40 días de: Muestra testigo = 353 kg/cm^2 , muestra con Silica-fume al 10 % = 302 kg/cm^2 con Silica-fume al 15 % = 515 kg/cm^2 y con Silica-fume al 20 % = 582 kg/cm^2 . Comparando los resultados anteriores con el módulo de ruptura obtenido, se observa que el segundo fue aproximadamente de un 11 % del $f'c$ registrado.

2.3.2. OTRAS PRUEBAS

Varios son los programas de pruebas que sobre concreto de muy alta resistencia se han realizado. Los grupos más interesantes al respecto fueron el de la Construcción Technology Laboratories, División de la Portland Cement Association (PCA) y el de la empresa Norcem Concrete Products Inc, División de la A/S Scancem-The Norwegian and Swedish Cement Industry.

En lo que se refiere a los resultados obtenidos en pruebas experimentales de concreto ensayado a flexión por estos laboratorios tenemos brevemente lo que a continuación se describe:

Los programas de prueba contemplan el ensaye de vigas de concreto elaboradas y probadas de acuerdo a la norma ASTM C 293-68 (Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada con carga en el centro del claro) y la ASTM C 78-64 (Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada con carga a los tercios del claro). Todas las pruebas fueron realizadas tomando como base el ensaye a tres vigas de características similares, de las cuales se estableció un promedio.

Las características de la mezcla utilizada, así como los resultados de la resistencia a la flexión se muestran en las tablas 2.11 y 2.12 respectivamente.

TABLA 2.11

	(kg/m ³)
Cemento tipo I	593.00
Aditivo Silica-fume	119.00
Arena	537.00
Grava	997.00
Agua	158.00
Relación a/c	0.22
Revenimiento promedio	119.00 mm
Contenido de aire promedio	1.50 %

TABLA 2.12

	(kg/cm ²)
3 días	112.00
7 días	124.00
28 días	144.00

Las tablas anteriores nos muestran que se obtuvo una significativa alta resistencia a los 28 días de 144 kg/cm², siendo que el resultado normal para concretos de alta resistencia esta en el rango de los 60 kg/cm². Se tiene el antecedente de especímenes probados a flexión los cuales han alcanzado resistencias altas en el rango de los 81 kg/cm² mediante la adición de fibra de vidrio y fibras de acero, pero comparado con los resultados obtenidos mediante la aplicación de aditivo Silica-fume, se observa la ventaja, clara de este.

2.4. RESISTENCIA A LA TENSION.

Debido a las dificultades propias de un ensaye a tensión axial, se realiza la prueba brasileña de tensión o como la NOM-C-163 (ASTM-C-496-71) la llama: determinación de la resistencia a la tensión diametral de cilindros de concreto.

Esta prueba es llamada así por haberse desarrollado en Brasil por un ingeniero de nombre Fernando Carneiro, aún cuando más o menos al mismo tiempo se desarrolló en Japón.

La prueba brasileña es fácil de realizar y proporciona resultados más uniformes que otras pruebas de tensión. Se considera que la resistencia determinada en la prueba brasileña es más aproximada a la resistencia real del concreto que la del módulo de ruptura; la resistencia es del 12 al 15 % más elevada que la resistencia a la tensión directa.

En forma general, la prueba consiste en someter a compresión diametral un cilindro de los empleados a compresión mediante las platinas de la maquinaria de prueba, llevando al espécimen a una falla a lo largo del diámetro vertical. En esta prueba, la hipótesis fundamental es que, si el material fuera perfectamente elástico, se originarían esfuerzos de tensión uniformemente distribuidos en la mayor parte del plano diametral de carga, como se muestran en la Figura 2.7.

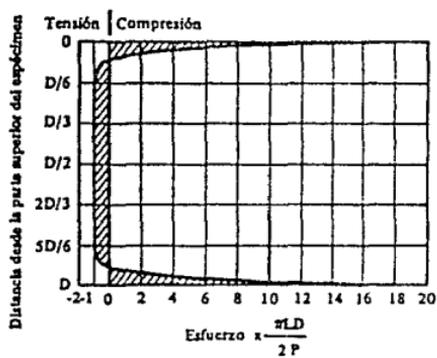
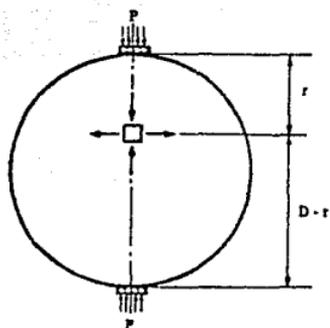
La NOM antes mencionada determina la metodología de prueba de los cilindros. El método de elaboración, descimbrado, curado, así como la herramienta y equipo a utilizar, deben cumplir las mismas especificaciones que la NOM DGN-C-159 contiene. Lo anterior se mencionó clara y ampliamente cuando hablamos de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto (CAP. 2.2).

La resistencia a la tensión por compresión diametral se determina con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2 P}{\pi L d}$$

En donde :

- P = Carga máxima aplicada (kg)
- T = Resistencia a la tensión (kg/cm²)
- L = Longitud (cm)
- d = Diámetro (cm)



Prueba Brasileña de Tensión y distribución de esfuerzo horizontal en un cilindro cargado sobre un ancho igual a 1/12 del diámetro.

FIGURA 2.7

2.4.1. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA

MAQUINARIA DE PRUEBA

La maquinaria de prueba debe de cumplir con los requisitos de la NOM-C-83 en cuanto a velocidad y capacidad de carga, es decir, debe tener capacidad suficiente y funcionar a cierta velocidad que sea uniforme, evitando así cargas por impacto.

BARRA O PLACA DE CARGA SUPLEMENTARIA

Se puede usar una barra o placa suplementaria si el diámetro o la dimensión mayor de los bloques de carga, superior o inferior, es menor que la longitud del cilindro por probarse. Las barras o placas deben ser de acero con caras planas, con un ancho mínimo de 50 mm.

TIRAS PARA DISTRIBUCION DE LA CARGA

Para cada prueba se debe de contar con dos tiras de madera de triplay, neopreno o similar, con un espesor de 3 mm, un ancho de 25 mm y una longitud igual o ligeramente mayor que el espécimen. Estas tiras se colocan entre el espécimen y ambas platinas de carga, superior e inferior. Estas se desechan después de cada prueba.

DISPOSITIVO DE TRAZO DE LINEAS DIAMETRALES

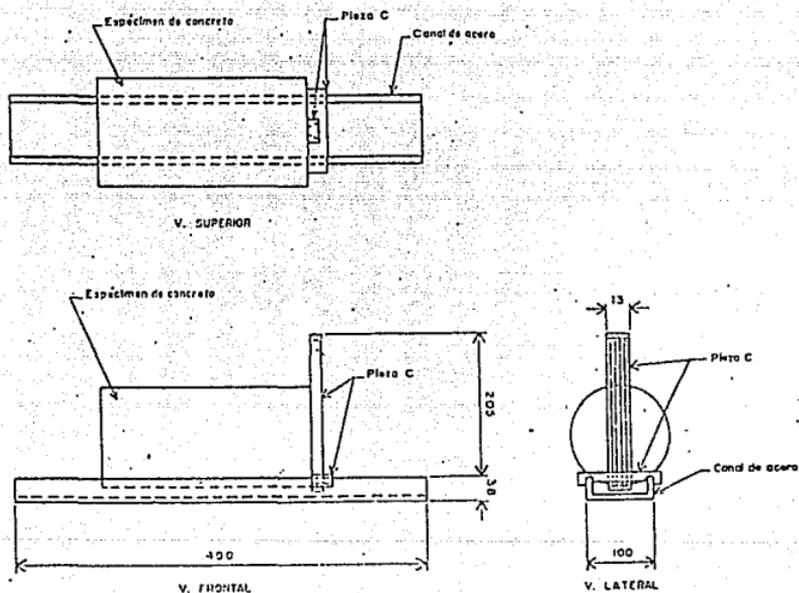
Este se utiliza para trazar líneas diametrales en cada extremo del espécimen. Consta de una canal de acero de 100 mm y una longitud de 400 mm, y una pieza vertical que tiene una ranura longitudinal, que sirve de guía al lápiz para marcar el espécimen. Ver Figura 2.8.

PREPARACION

Se marcan los especímenes de prueba en ambas caras del cilindro, cuidando que las líneas se encuentren en el mismo plano diametral.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se determina primeramente el diámetro promedio y la longitud del espécimen. Se centra una de las tiras de carga sobre la platina inferior, se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea, se coloca centrada la segunda tira sobre el cilindro y finalmente se acomoda el conjunto para que cumpla con las condiciones anteriores.



Dispositivo para marcar los diámetros de los especímenes

FIGURA 2.8

VELOCIDAD DE APLICACION DE LA CARGA

Se debe de aplicar la carga en forma continua sin impacto, a una velocidad tal, que se logren esfuerzos por compresión diametral de 5 a 15 kg/cm² por minuto, es decir, para cilindros de 15 a 30 cm, una carga de alrededor de 3467 y 10,065 kg por minuto, hasta la falla.

Los resultados obtenidos de resistencia a la tensión de especímenes de concreto a los 28 días fueron los siguientes:

Resultados de la resistencia a la tensión. Ensaye brasileño.

TABLA 2.13

MUESTRA	PESO (kg)	28 DIAS (kg/cm ²)
1) TESTIGO	13.100	39.89
2) SILICA FUME 10 %	13.000	31.12
3) SILICA FUME 15 %	13.100	37.35
4) SILICA FUME 20 %	13.000	38.84

CONCLUSIONES:

Los cilindros se comportaron como se esperaba, es decir, tuvieron una falla súbitamente frágil, además los resultados obtenidos concuerdan con cierto grado de aproximación con la siguiente ecuación recomendada por el RCDF:

$$T = 6 + 0.07 f'c \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

En donde:

T = Resistencia a la tensión por ensayo
brasileño

f'c = Resistencia a la compresión de
cilindros

Se cumple que los resultados obtenidos a tensión o flexión en la prueba para determinar el módulo de ruptura son mayores que los obtenidos en el ensayo brasileño en aproximadamente un 32 %.

2.5 MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON

2.5.1 MODULO DE ELASTICIDAD.

El concreto es un material elástico hasta cierto punto por lo que el concepto convencional de módulo elástico no tiene sentido en el concreto. Para definir un valor de módulo de elasticidad en este material. Se recurre a definiciones arbitrarias, basadas en consideraciones empíricas relacionadas con otras características del concreto tales como la fluencia y la contracción, características que en forma general, a continuación se describen:

FLUENCIA:

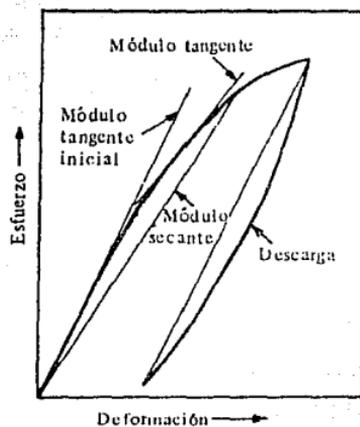
También conocida como flujo plástico, es un fenómeno relacionado con la aplicación de cargas con respecto al tiempo. El flujo plástico es debido al reajuste interno de las partículas que ocurre al mismo tiempo que la hidratación del cemento. Esta depende de algunas variables de, consideración tales como la cantidad de pasta de cemento por unidad de volumen, la duración de la carga aplicada, edad del concreto, el proporcionamiento de la mezcla y la humedad.

CONTRACCION:

Las deformaciones producidas por este fenómeno se deben principalmente a los cambios en el contenido de agua del concreto a lo largo del tiempo. Entre los factores que más importancia tienen al hablar de este fenómeno tenemos la cantidad inicial de agua en la mezcla y las condiciones ambientales a edad temprana de la misma. Resulta de singular importancia hacer la observación de que a los concretos de alta y muy alta resistencia al tener una baja relación a/c , este fenómeno los afectará en menor proporción que una mezcla de resistencia de normal a baja.

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto no es posible recurrir a la definición tradicional de módulo de elasticidad de Young, ya que resulta difícil distinguir entre la deformación originada al aplicar la carga, ya que parte de ella, es deformación elástica, y la otra parte es deformación debida a la fluencia del concreto. Para efectos prácticos, arbitrariamente se considerará como deformación elástica a aquella provocada durante la aplicación de la carga y como deformación por fluencia al aumento subsiguiente de deformación que se tenga. El módulo de elasticidad que satisfaga dichos requisitos es el módulo secante. (Ver Figura 2.9).

No existe una metodología estándar para determinarlo, pero algunos laboratorios lo consideran en el rango de esfuerzo de 28 a 141 kg/cm^2 y algunos otros como los esfuerzos que representan el 15, 25, 33 ó 50 % de la resistencia final. De acuerdo a lo anterior, se tiene que el concreto más resistente presentará un módulo secante de elasticidad mayor. En relación a esto último, obsérvese la Tabla 2.14:



Curva característica Esfuerzo-Deformación para el concreto

Figura 2.9

TABLA 2.14

Módulo de elasticidad de concretos de diferentes resistencias de acuerdo con la British Code of Practice CP 110:1972 para uso estructural del concreto.

RESISTENCIA A LA COMPRESION (kg/cm ²)	MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²)
211	250,000
246	270,000
316	290,000
422	320,000
527	340,000
598	370,000

En las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. (33), se dan los siguientes parámetros para la determinación del módulo de elasticidad en el concreto:

$$\text{Concreto clase I } E_c = 14,000 \sqrt{f'c}$$

$$\text{Concreto clase II } E_c = 8,000 \sqrt{f'c}$$

En donde:

$$E_c = \text{Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm}^2\text{)}$$

$$f'c = \text{Resistencia a la compresión (kg/cm}^2\text{)}$$

(Concreto clase I, peso volumétrico en estado fresco = 2.2 ton/m³, $f'c \geq 252$ kg/cm². Concreto clase II, peso volumétrico en estado fresco entre 1.9 y 2.2 ton/m³, $f'c < 250$ kg/cm²). Ecuaciones únicamente aplicables en concretos fabricados con agregados típicos de la Ciudad de México:

El Reglamento ACI-318-89 (32), da la siguiente ecuación:

$$E_c = \omega^{1.5} 15,000 \sqrt{f'c}$$

En donde:

$$\omega = \text{Peso volumétrico del concreto (ton/m}^3\text{)}$$

Estas ecuaciones dan únicamente valores aproximados, por que existe una cantidad considerable de variables a tomar. Las diferencias entre los valores reales y los calculados con estimaciones de cierta precisión, conviene determinar el módulo de elasticidad del concreto en particular.

Con respecto a concretos de muy alta resistencia, mediciones de las cuales se tiene antecedente, fueron realizadas de acuerdo a la norma ASTM-C-496 en especímenes curados a vapor, a la edad de 28 días. El valor del módulo de elasticidad encontrado es de 435,000 kg/cm², para una resistencia media a la compresión de 990 kg/cm².

De acuerdo a lo anterior, se observa que los concretos de muy alta resistencia, al aumentar su rigidez, presentan un módulo de elasticidad más alto, tendencia que se observa para concretos de resistencias menores.

2.5.2. RELACION DE POISSON

Se conoce como relación de Poisson a la relación existente entre la deformación lateral de un elemento y la deformación longitudinal del mismo. Este parámetro es de utilidad en el análisis y diseño de muchos tipos de estructuras. Para concretos normales el valor del módulo de Poisson varía en el rango de 0.11 a 0.21.

La norma ASTM-C-496 marca la metodología para la obtención de dicha relación. Para concretos de muy alta resistencia se han obtenido valores de la relación de Poisson para concretos curados a vapor, con una resistencia a la compresión de 990 kg/cm² a una edad de 28 días, en el rango de 0.21 a 0.22.

La relación existente entre el módulo de elasticidad y la relación de Poisson es que, a medida de que se incrementa la resistencia a la compresión, se incrementa el módulo de elasticidad, sin un cambio significativo en la relación de Poisson.

2.6 PROPIEDADES GENERALES.

2.6.1. PERMEABILIDAD

Una de las características más importantes del concreto es su permeabilidad (Propiedad de los materiales la cual permite el paso de algún fluido a través de él). Los concretos con baja relación a/c y altas resistencias presentan permeabilidades muy bajas en relación a los concretos de resistencias convencionales.

Se ha demostrado que a relaciones de a/c menores que 0.3 especialmente cuando se utiliza aditivos Silica-fume, los concretos son virtualmente impermeables al agua y a los iones de cloro, que en su caso particular es de uso muy recomendable en estructuras sujetas a medios ambientes degradantes.

Experimentos realizados en la Construcción Technology Laboratories, División de la PCA, de acuerdo con el procedimiento de la Federal Highway Administration (FHWA), en pruebas de permeabilidad al cloro, arrojaron los siguientes resultados y observaciones:

La prueba tuvo una duración de 90 días. El diseño de la mezcla de muy alta resistencia 371 kg/m³ de cemento, 76 kg/m³ de aditivo Silica-fume, una relación a/c igual a 0.27, un contenido de aire igual al 9 % y 102 mm de revenimiento. Esta prueba se midió la permeabilidad al cloro del concreto endurecido sumergido en una solución de cloruro de sodio al 3 %.

Se tomaron corazones del espécimen, después de los 90 días, de los cuales se comparó la absorción de iones de cloro (en % del peso de la muestra de concreto). Ya hechas las mediciones, el concreto de muy alta resistencia con aditivo Silica-fume, mostró un contenido promedio de absorción de iones de cloro de 0.003, el cual se comparó con el 0.028 para la mezcla de control de la FHWA, siendo los resultados para el concreto con Silica-fume excelentes en lo que se refiere a impermeabilidad. La muestra de la FHWA tenía un contenido de cemento de 385 kg/m³ un 8 % de contenido de aire, una relación a/c de 0.38 y un revenimiento de 97 mm.

Datos de pruebas realizadas por la Norwegian Cement and Concrete Research Institute, mostraron que el concreto con aditivo Silica-fume es impermeable al agua, para especímenes que estuvieron sujetos a presiones de agua de 40 atmósferas. La conductividad hidráulica de especímenes de control de concreto sujetos a las mismas presiones, fue de 0.11×10^{-12} m/seg.

2.6.2. RESISTENCIA QUÍMICA.

El concreto de muy alta resistencia es inherentemente más resistente al deterioramiento químico por que las mezclas de diseño contienen altos contenidos de cemento, bajas relaciones a/c y una permeabilidad aminorada. La alta resistencia a la compresión permite diseñar factores de carga de seguridad para incrementar los tiempos cuando se preparan proporciones de mezcla en condiciones ambientales potencialmente destructivas.

El concreto de muy alta resistencia con aditivo Silica-fume, presenta una mayor resistencia química del mortero a través de la reducción de la reacción química del hidróxido de calcio libre el cual se forma durante la hidratación del cemento. La combinación de hidróxido de calcio libre y sílice, da como resultado la formación de silicato cálcico hidratado, químicamente más resistente. La cantidad de hidróxido de calcio libre se remezcla y se combina con el Silica-fume, esto como función del contenido de sílice de la puzolana y de su área superficial. La reducción de la permeabilidad del concreto depende de producir un mortero más denso. La finura del Silica-fume es un factor determinante en la producción de

un mortero denso, el tamaño pequeño de las partículas disminuye la cantidad de huecos entre el cemento y las partículas de arena.

El uso de cemento tipo II, resistente a los sulfatos, también incrementa la resistencia química, la reducción de la cantidad de aluminato tricálcico reduce la formación de productos expansivos destructivos producidos por agentes químicos agresivos.

Compañías como NORCEM, NORSK HYDRO, PHILIPS PETROLEUM. La MISSISSIPPI CHEMICAL, entre otras, han dirigido extensos programas de prueba sobre concreto de muy alta resistencia.

Pruebas específicas de resistencia química, han medido el desempeño de los concretos de alta resistencia en contra del agresivo nitrato de amonio. En todos los casos, dos juegos de especímenes de prueba fueron preparados con el diseño de mezcla de concreto de 325 kg/m³ de cemento, con y sin 65 kg/m³ de aditivo Silica-fume, una relación a/c de 0.28 y un revenimiento de 102 mm. El desempeño a largo plazo fue medido arriba de un período de un año y cinco semanas, con ambos tipos de especímenes de concreto sumergidos a la mitad de su altura. La solución de nitrato de amonio fue mantenida al 100 % de saturación a temperatura ambiente de laboratorio. Los resultados de prueba fueron tales que las muestras de concreto ordinario, cuando se rompieron a la compresión (después de 1 año y cinco semanas) perdieron el 74 % de su resistencia. Esta pérdida de resistencia se determinó por compactación con muestras de concreto ordinario rotas al mismo tiempo, las cuales fueron sumergidas en agua.

Recíprocamente, las muestras de concreto con aditivo Silica-fume, las cuales fueron rotas a la compresión al mismo tiempo, no perdieron resistencia a la compresión, es más, los especímenes la incrementaron en alrededor de un 1 %, teniendo una resistencia final de 909 kg/cm².

Una prueba de deterioración acelerada del concreto fue también realizada por medio de la utilización de ciclos diarios de humedecer/secar en soluciones saturadas de nitrato de amonio a una temperatura de 63 grados centígrados. La prueba de agentes químicos agresivos fue llevada a cabo empapando las muestras de nitrato de amonio caliente toda la noche y secándose a temperatura ambiente durante el día. La prueba se llevó a cabo durante un período de 240 días, con 2 ciclos de humeado/secado de 30 y 60 días al horno a temperaturas de 63 grados centígrados. Los resultados son impresionantes a favor del concreto con Silica-fume; la pérdida promedio de 9 especímenes fue de 3.4 %, mientras que muestras de concreto ordinario sufrieron un 61.9 % de pérdida de su resistencia a la compresión.

2.6.3. RESISTENCIA A LA CONGELACION, DESHIELO, ABRASION Y DESCASCAMIENTO.

El problema de congelación y deshielo del agua absorbida por concretos comunes se soluciona con aditivos inclusores de aire, método que queda descartado al ser incompatible con el propósito de alcanzar altas resistencias. Por sus características de permeabilidad los

concretos de muy alta resistencia cada vez son más usados en elementos como estacionamientos, plataformas de puentes y traveses que están sujetas a severas condiciones ambientales.

Serie de mediciones de pruebas de congelación y deshielo, resistencia a la abrasión y descascamiento, fueron realizadas por la Construcción Technology Labs.. El diseño de la mezcla de alta resistencia para esta serie de pruebas, tuvo 6.7 % de contenido de aire, un factor bajo de cemento, y una resistencia a la compresión en el rango de 767.6 kg/cm². La prueba de congelación y deshielo fue conducida empleando la norma ASTM-C-666 (procedimiento A), el cual consiste en congelar rápidamente y descongelar los especímenes en agua a una temperatura entre los 4.4 y los -17.8 grados centígrados, en períodos de tres horas por ciclo. Los resultados de prueba se muestran en la Tabla 2.15, exhibiendo una baja expansión, bajos porcentajes de pérdida de peso y un alto factor de durabilidad.

La prueba de resistencia a la abrasión fue realizada siguiendo el procedimiento de la norma ASTM-C-779, el cual usa una maquinaria de abrasión por medio de un disco rotatorio. Los resultados de prueba se muestran en las Tablas 2.15 y 2.16 mostrando un promedio bajo de abrasión, para tres especímenes, con una profundidad igual a 1.448 mm después de 60 min, de rozamiento.

La prueba de descascamiento se realizó de acuerdo a la norma ATM-C-672. Los resultados de las pruebas muestran un no descascamiento después de 50 ciclos, pero la prueba fue llevada hasta los 500 ciclos, en donde un leve descascamiento fue registrado.

TABLA 2.15.

Pruebas de congelación y deshielo. (300 Ciclos).

MUESTRA	EXPANSION (%)	PERDIDA DE PESO (%)	FACTOR DE DURABILIDAD (%)
A	0.008	0.200	97.00
B	0.008	0.100	97.00
C	0.009	0.100	97.00
PROMEDIO	0.008	0.130	97.00

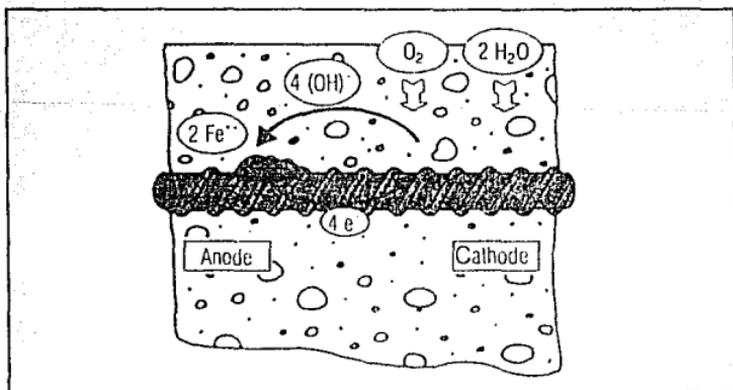
TABLA 2.16.

Resistencia a la abrasión.

MUESTRA	PROFUNDIDAD DE ABRASION (mm)			
	tiempo en minutos			
	15	30	45	60
A	0.813	0.991	1.245	1.448
B	0.610	0.991	1.245	1.448
C	0.635	0.914	1.690	1.422
PROMEDIO	0.627	0.940	1.390	1.439

2.6.4. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

La baja conductividad eléctrica en las mezclas de concreto aditivo Silica-fume, no permiten que se realicen reacciones electroquímicas dentro de la mezcla de concreto por lo que se inhibe la corrosión en el acero de refuerzo, ver Lámina 17.



Conductividad Eléctrica

Lámina 17



APLICACIONES EN EL MEDIO DE LA CONSTRUCCION

CAPITULO III

APLICACIONES EN EL MEDIO DE LA CONSTRUCCION

3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

No es propósito de este trabajo, es decir, no se encuentra dentro de sus alcances, el elaborar un manual o metodología de diseño para concretos de resistencia llámese superior, pero si es obligación del mismo el hacer notar algunas de las recomendaciones de diseño que algunas instituciones han propuesto o dado a conocer con el fundamento o respaldo de un trabajo serio elaborado por las mismas, en el entendido de que éstas son importantes y que dependerán del criterio del calculista o diseñador al aplicarlas en sus trabajos, siendo finalmente su obligación documentarse de la literatura existente al respecto.

Se hace también la aclaración de que las ecuaciones de diseño analizadas o propuestas en este trabajo se proporcionan tal como se mencionan en las fuentes consultadas, conservando la utilización del sistema de unidades con el cual fueron desarrolladas, que por motivos de severidad de las mismas, no se modifican al sistema de unidades prácticas utilizadas en nuestro medio.

Muchas son las universidades norteamericanas que han realizado programas de pruebas experimentales a concretos de alta y muy alta resistencia, y que, basadas en los resultados y experiencias obtenidas han propuesto algunas modificaciones pertinentes o necesarias a los diferentes códigos y reglamentos de diseño estructural actuales, de los cuales, de acuerdo al sitio donde se han desarrollado dichos programas, el reglamento básico observado es el del ACI, que para el caso de nuestro país, tiene un fuerte vínculo con respecto al Reglamento de Construcciones del D.D.F. y sus Normas Técnicas Complementarias.

En el caso específico de la Universidad de Cornell, en sus estudios sobre concretos de alta y muy alta resistencia ($f'c > 418 \text{ kg/cm}^2$), estableció que, mientras que muchas de las recomendaciones de diseño del ACI 318-83 (32), son aplicables, algunas otras deben ser reexaminadas o modificadas, para hacer cierta la seguridad estructural y de servicio. Resulta lógico que al verse incrementada en gran cantidad la principal característica aprovechable del concreto, es decir, su $f'c$, sus otras propiedades también, consideración que sólo es cierta en parte. Más allá de esto casi toda metodología de diseño se basa esencialmente en los resultados de pruebas realizadas a losas, vigas, columnas, etc..

Importantes ecuaciones de diseño se derivan de pruebas cuya resistencia a la compresión no es mayor a los 420 kg/cm^2 , fórmulas que han sido utilizadas por ingenieros sin antes existir una reglamentación de lo que se debe y no hacer. En base a lo anterior, algunas de las modificaciones propuestas por esta Universidad y algunas otras se ven plasmadas en la última modificación realizada a dicho reglamento en el año de 1989 (ACI 318-89, específicamente en su capítulo 11: " Cortante y Torsión ").

En este subcapítulo se pretende describir algunas de las consideraciones más importantes que para efecto de diseño estructural se han realizado, además, se describen algunos aspectos básicos para la fundamentación y descripción de dichas consideraciones.

3.1.1. RESISTENCIA A LA COMPRESION.

3.1.1.1. Curva Esfuerzo-Deformación unitaria (σ - ϵ)

Entre sus características principales tenemos:

- La pendiente inicial de dicha curva es muy inclinada.
- El límite de respuesta lineal es un alto porcentaje de su resistencia final.
- La deformación correspondiente al esfuerzo máximo es grande, pero el límite utilizable de deformación es mucho menor.
- La parte descendente de la curva es altamente dependiente del método de prueba.
- El comportamiento típico en concretos de alta y muy alta resistencia es el de un material linealmente elástico y quebradizo.
- La máxima deformación unitaria obtenida fue de 0.001 la cual resulta de difícil medición bajo condiciones estructurales normales.

Vease la Figura 3.1

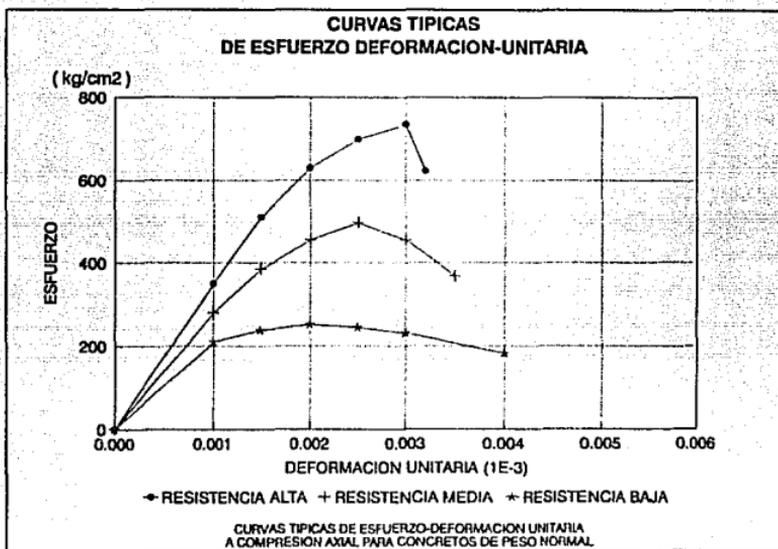


FIGURA 3.1

3.1.1.2. Módulo de Elasticidad.

Para valores de $f'c \leq 420 \text{ kg/cm}^2$ (6,000 psia) el ACI recomienda (Módulo secante) :

$$E_c = 33 W_c^{3/2} \sqrt{f'c} \quad (\text{psia}) \quad (3.1)$$

En donde:

W_c = Densidad del concreto en lb/ft^3
 $f'c$ = Resistencia a la compresion en psia

6

$$E_c = 57,000 \sqrt{f'c} (W_c/145)^{3/2} \quad (\text{psia}) \quad (3.2)$$

Ambas para concreto con peso normal:

$$90 < W_c < 155 \text{ lb/ft}^3 \quad (1430 < W_c < 2,400 \text{ kg/m}^3)$$

Para valores de $f'c > 420 \text{ kg/cm}^2$ (6,000 psia) se propone (Módulo secante) :

$$E_c = (40,000 \sqrt{f'c} + 1'000,000) (W_c/145) \quad (\text{psia}) \quad (3.3)$$

3.1.2. RESISTENCIA A LA TENSION.

La resistencia a la tensión medida mediante el módulo de ruptura es mayor que los valores recomendados por el ACI:

Para concreto de resistencia normal (curado a vapor) :

$$MR = 7.5 \sqrt{f'c} \quad (\text{psia}) \quad (3.4)$$

Para concretos de alta resistencia:

$$MR = 10.8 \sqrt{f'c} \quad (\text{psia}) \quad (3.5)$$

Debido a que las condiciones de curado en campo no son las mismas que las de laboratorio y por que la resistencia a la tensión se encuentra fuertemente influenciada por las condiciones de curado, no se recomienda cambio alguno a la fórmula propuesta por el reglamento ACI. Se puede decir lo mismo para el ensaye brasileño.

3.1.3. COEFICIENTE DE FLUENCIA.

La relación de la deformación por fluencia bajo carga axial a compresión para fluencia elástica inmediata es de aproximadamente la mitad del valor obtenido para concretos de baja resistencia. Véase la siguiente Tabla:

TABLA 3.1

Relación entre la resistencia a la compresión y su correspondiente coeficiente de fluencia.

MATERIAL	$f'c$ (kg/cm^2)	Ccu
Concreto baja resistencia	210	3.1
Concreto media resistencia	280	2.9
Concreto media resistencia	418	2.4
Concreto alta resistencia	560	2.0
Concreto alta resistencia	700	1.6

Se tiene para concretos de resistencia normal un promedio del coeficiente de fluencia de aproximadamente igual a 2.35.

Debido al mucho menor coeficiente de fluencia, las deflexiones debidas a cargas sostenidas en vigas de concreto de alta resistencia son menores que las pronosticadas por las ecuaciones de el reglamento del ACI (32).

El acero de compresión, utilizado comunmente para reducir las deflexiones por carga sostenida, se hace en muchos casos innecesario debido a la gran reducción de fluencia en el concreto de alta resistencia.

3.1.4. FLEXION EN VIGAS.

Considerando la diferencia en las curvas σ - ϵ a compresión y el comportamiento más quebradizo del material, surgen algunas dudas razonables acerca de las ecuaciones de diseño descritas en el reglamento ACI.

Algunos estudios han encontrado que el límite de deformación comunmente aceptado de 0.003, es aceptable para concretos de alta resistencia, aunque otros recomiendan utilizar un valor un poco menor igual a 0.0025 (9).

La relación balanceada de acero puede ser derivada de la suposición de que dicho límite de deformación se encuentra entre estos valores.

El uso del bloque rectangular equivalente de esfuerzo en los cálculos de resistencia a la flexión, ha dado buenos resultados para todas las posibles resistencias en el concreto, para vigas por encima y abajo de la condición balanceada. Aparentemente no se requiere de modificación alguna.

Con respecto a las deflexiones a corto plazo, el reglamento ACI propone utilizar un momento efectivo de inercia, el cual da buenos resultados siempre y cuando se utilice un módulo de elasticidad apropiado. La fórmula al respecto es la siguiente:

$$I_e = (M_{cr}/M_a)^3 I_g + [1 - (M_{cr}/M_a)^3] I_{cr} \quad (3.6)$$

En donde:

- M_{cr} = Momento de fluencia.
- M_a = Momento máximo resistente.
- I_g = Momento de inercia de la sección bruta.
- I_{cr} = Momento de inercia a la fluencia o al presentarse el agrietamiento.

La naturaleza quebradiza del concreto de alta resistencia crea algunas dudas acerca de su ductilidad en vigas. Se tiene que el límite de deformación unitaria es menor en vigas de concreto de alta resistencia con respecto a las de concreto normal. De acuerdo a las pruebas realizadas en la Universidad de Cornell, se observó que la ductilidad de la sección así como la deflexión del miembro tuvieron un valor significativo. La explicación de lo anterior es lo siguiente:

La ductilidad de la sección por ejemplo, esta definida por la relación de giro de la sección a la falla con el giro cuando la fluencia comienza. El giro al comenzar la fluencia es:

$$\phi_y = c_y / (d - k d) \quad (3.7)$$

$$c_s = c_y$$

En donde:

c_y = Deformación de fluencia del acero.

c_s = Deformación en el acero.

d = Peralte efectivo de la sección.

ϕ_y = Giro unitario.

k = Factor de distancia entre la fibra más alejada a compresión y el eje neutro al comenzar la fluencia.

Mientras que el giro al fallar el miembro es:

$$\phi = c_u / c \quad (3.8)$$

$$c_s > c_y$$

En donde:

c_u = Deformación en el concreto.

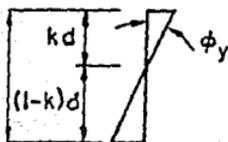
c = Profundidad de la fibra más alejada a compresión al eje neutro.

En relación a lo anterior, se tiene que a diferencia del concreto de resistencia normal, c_u será menor en concreto de alta resistencia, así como también la profundidad del eje neutro. Véase la Figura 3.2..

Comparando las Figuras 3.2 b y 3.2 c, y sabiendo que la profundidad del eje neutro estaba por:

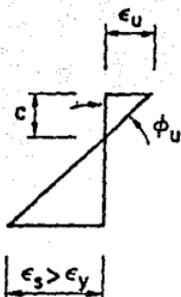
$$c = \frac{e f_y d}{0.85 \beta_1 f'_c} \quad (3.9)$$

DUCTILIDAD DE UNA SECCION

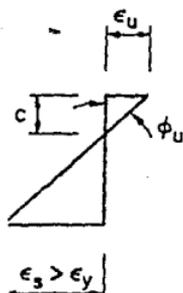


a) ROTACION UNITARIA AL COMENZAR LA FLUENCIA

$$\epsilon_s = \epsilon_y$$



b) ROTACION UNITARIA A LA FALLA PARA CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA



c) ROTACION UNITARIA A LA FALLA PARA CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Principio fundamental de la ductilidad de una sección para el refuerzo por tensión en vigas

FIGURA 3.2

En donde:

- e = $A_s / b d$, relación de refuerzo a la tensión.
- f_y = Fluencia del acero.
- d = Peralte efectivo.
- b1 = Factor que determina la profundidad del bloque de esfuerzo.
- f'_c = Resistencia a la compresión del concreto.

Se observa que "c" está en relación inversa al f'_c , siendo claro ésto, aún cuando el límite de deformación a la flexión es algo menor para las vigas de concreto de alta resistencia, de aquí que la ductilidad de la sección de la viga pueda ser la misma o mayor por la mayor profundidad del eje neutro.

Lo anterior prueba que la ductilidad de la sección y la deflexión en el rango práctico de la relación de refuerzo a la tensión son casi independientes del f'_c .

El reglamento ACI contiene la previsión de que el mínimo refuerzo a la tensión en miembros a la flexión es:

$$e_{\min} > 200 / f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.10)$$

El propósito de ésta es para asegurar que el refuerzo sea el mínimo tal que la viga no falle repentinamente al fracturarse bajo flexión, es decir, se busca la falla dúctil.

Se ha demostrado que la relación mínima de acero de refuerzo no depende únicamente del f_y , si no que también de la resistencia del concreto, se tiene:

$$e_{\min} = \frac{2.7 \sqrt{f'_c}}{f_y} \quad (3.11)$$

Comparando la previsión del ACI con esta última ecuación se tiene que la primera de ellas es situable hasta el rango de los 350 kg/cm². Arriba de esta resistencia esta misma sería poco conservadora, teniéndose que en el rango superior máximo de resistencia, que pueda ser de interés, dicha relación debe ser de un 50 % mayor.

Otra de las universidades que han estudiado el comportamiento a la flexión de vigas elaboradas con concretos de alta resistencia es la Universidad del Estado de Kansas, ésta utilizó materiales propios de la zona y métodos estándar de proporcionamiento, así como el uso de superfluidificantes.

Las resistencias utilizadas estuvieron en el rango de los 590 a los 840 kg/cm². Las vigas probadas fueron de sección rectangular y fueron reforzadas con acero longitudinal con una relación de refuerzo entre los 0.5 y 1.5 de la relación balanceada, haciéndose la suposición de un bloque triangular de esfuerzo a la compresión. El refuerzo al cortante varió de un 0 a un 100 %. Dichas vigas fueron probadas con cargas a los centros del claro aplicadas en forma creciente hasta la falla, la edad de prueba fue a los 60 días.

En dicho programa de pruebas se obtubieron las siguientes observaciones:

- En una prueba indirecta de flexión, se observó que el bloque de esfuerzos a compresión a la falla es de forma parabólica, siendo claro que este es posible aproximarlo a forma rectangular. Puede utilizarse para obtenerse el valor del bloque de esfuerzos:

$$0.85 f'c \beta_1 c b = C \quad (3.12)$$

En donde:

- β_1 = Parametro que multiplicado por c, define la altura del bloque rectangular de esfuerzos sin afectar el valor del esfuerzo del paraboloida real de esfuerzos. Véase la Figura 3.3.

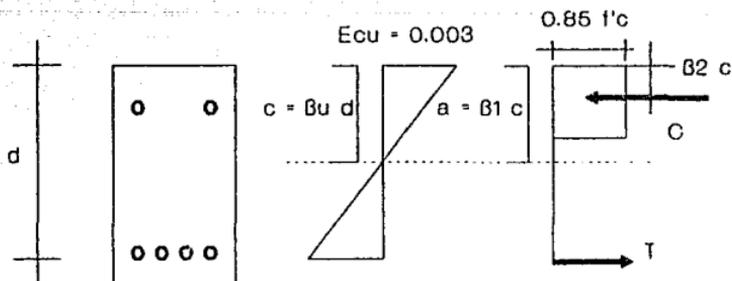
De los resultados obtenidos de dicha prueba indirecta se observa que β_1 tiene un valor promedio de 0.85, a diferencia del valor recomendado por el reglamento ACI de $\beta_1 = 0.65$ para concretos con una resistencia $f'c > 560$ kg/cm².

- La deformación unitaria a carga última en la fibra más esforzada de menor de 0.003. Un valor de 0.0025 se recomienda para diseño.
- Las curvas σ - ϵ para vigas y cilindros son similares para un mismo $f'c$. Esto es debido al control de carga de prueba de los cilindros.

En forma general, los concretos de alta y muy alta resistencia proporcionan las siguientes ventajas en miembros de concreto reforzado a flexión:

- Disminución de las deflexiones debido al mucho menor coeficiente de fluencia de estos materiales.

- Disminución y ahorro de acero de refuerzo a compresión, mismo que es utilizado para disminuir las deflexiones de la viga.



Hipótesis ACI 318-89 sobre la distribución, deformaciones y esfuerzos en la zona de compresión

FIGURA 3.3

3.1.4.1. FLEXION EN VIGAS DE CONCRETO PRESFORZADO.

Las primeras y clásicas aplicaciones del concreto de muy alta resistencia fueron en pilas, columnas, y otros miembros cargados axialmente pero, en la práctica actual, se ha dado gran atención a los miembros a flexión.

En los miembros a flexión de concreto presforzado los concretos de muy alta resistencia proveen de un gran control de las deflexiones, reducen las pérdidas de presfuerzo y/o permiten el uso de acero de gran fluencia a bajo contenido de carbono en el refuerzo de presfuerzo.

De las principales aplicaciones del concreto presforzado a flexión, tenemos las vigas doble "T" (vigas TT). Estas permiten grandes claros, por ejemplo en puentes, estructuras de estacionamientos, y otras construcciones que requieran grandes áreas libres de columnas.

Se presupone que los estándares de diseño en el ACI-318, son aplicables a miembros hechos con concretos de alta resistencia en el rango de hasta 570 kg/cm^2 . La aplicabilidad de estas técnicas de análisis y diseño se confirman por un gran número de pruebas experimentales, que utilizaron resistencias en el rango de 350 a $1,000 \text{ kg/cm}^2$, además su comportamiento estructural de servicio se ha monitoreado en detalle. Esto último se refiere a los requerimientos a corto y largo plazo de las resistencias, tipos de cables de presfuerzo y a la deflexión estimada.

El siguiente ejemplo ilustra los beneficios particulares cuando se utiliza concreto de muy alta resistencia.

Usando un diseño estándar con una resistencia temprana de 250 kg/cm^2 y de 350 kg/cm^2 a los 28 días, el esfuerzo de tensión máxima permisible en el elemento es de 60 kg/cm^2 y el refuerzo mínimo por cortante es de $0.9102 \text{ cm}^2/\text{m}$. Pero, si la resistencia temprana se incrementa a los 285 kg/cm^2 y a los 28 días se incrementa a los 425 kg/cm^2 permisible a la tensión es de 65 kg/cm^2 y el refuerzo mínimo por cortante es de $0.6349 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Resumiendo, el uso de concretos de muy alta resistencia puede permitir claros más grandes de vigas TT con menos refuerzo, menores niveles de tensión y mejor control bajo deformaciones a largo plazo.

3.1.5. CORTANTE EN VIGAS.

Una característica del concreto de alta resistencia cargado a compresión uniaxial y llevado hasta la falla es que su fractura es repentina, y además, la forma de la superficie de falla, es paralela a la dirección de falla presentando una cara plana o lisa. Esto contrasta con la superficie rugosa y el agrietamiento interno que va a lo largo de la interfase mortero-agregado grueso, ramificándose en todas direcciones de los concretos de baja resistencia.

Los planos lisos de fractura ocurren por la diferencia en la resistencia y rigidez del mortero que con respecto a la roca es mucho menor, además, la adherencia en la interfase es significativamente mejor.

En todo elemento que trabaja a flexión, se tienen diferentes estados de esfuerzos, a saber, arriba del eje neutro, se tienen esfuerzos a compresión y abajo de éste, esfuerzos a tensión que producen agrietamientos. En las secciones cercanas al apoyo, donde el cortante tiende a ser máximo, el esfuerzo principal de tensión actúa en un plano de aproximadamente 45 grados con la normal. En relación a la baja resistencia a la tensión del concreto, las grietas antes mencionadas son diagonales y van a lo largo de planos perpendiculares a los del esfuerzo principal de tensión. En esa zona de falla por tensión diagonal es predecible un comportamiento similar de falla en el que se presenten caras lisas como se obtuvo a compresión uniaxial.

La resistencia al cortante en vigas de concreto reforzado se basa en un promedio de esfuerzos por cortante sobre toda la sección transversal efectiva ($b_w d$), dicho método de diseño al cortante se basa en la analogía de armadura. En un elemento sin refuerzo por cortante, se supone que el cortante lo resiste el alma de concreto. En un elemento con refuerzo por cortante (estribos), se supone que una porción del cortante la proporciona el concreto y el resto el refuerzo por cortante ($V_c + V_s$). La resistencia por cortante proporcionada por el concreto (V_c) se supone que es la misma para vigas con y sin refuerzo por cortante y que se toma como el cortante que provoca un agrietamiento inclinado significativo.

Datos tomados de un amplio programa de pruebas y vigas de concreto reforzado, con y sin estribos elaborados con concretos de alta y muy alta resistencia, en el cual se observó la influencia de la relación claro/peralte, relación del acero a tensión (A_s/bd), en los resultados comparativos entre la resistencia al cortante experimental y el cortante calculado, resistencia diagonal, se tiene lo siguiente:

Todas las vigas elaboradas fallaron a cortante, ya sea por tensión diagonal o a compresión por cortantes. Generalmente cuando la cantidad de estribos aumenta, las vigas pasan a ser más dúctiles y sus fallas son menos repentinas. Se observó que todas las vigas sin estribos fallaron repentinamente.

La diferencia en el comportamiento, e implicaciones de diseño para vigas de concreto reforzado con y sin estribos elaboradas con concretos de alta y muy alta resistencia, se explica claramente a continuación:

3.1.5.1 CORTANTE EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO SIN ESTRIBOS

El valor del cortante para vigas de concreto reforzado sin estribos, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = 1.9 b_w d \sqrt{f'_c} + 2500 \frac{e_w V_u d}{M_u} b_w d \text{ (libras)} \quad (3.13)$$

En el cual $V_c \leq 3.5 \sqrt{f'_c} b_w d$

En donde:

- V_c = Cortante resistente nominal o real del concreto.
- e_w = Porcentaje de refuerzo ($e_w = A_s/bd$).
- V_u = Cortante externo vertical factorizado.
- M_u = Momento flexionante externo factorizado.
- d = Peralte efectivo.
- b_w = Ancho de la viga.

Esta ecuación, que en forma general se utiliza como bastante conservadora, para concretos de alta y muy alta resistencia en combinación de relaciones claro/peralte de valores bajos a altos y con relaciones de acero de tensión de típicos a valores bajos, se observó que no satisface las propiedades estructurales que proporciona este material.

3.1.5.2. CORTANTE EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO CON ESTRIBOS.

- Capacidad a la fractura inclinada.

Estudios (9) han demostrado que los estribos no tienen un efecto significativo en la capacidad a la fractura inclinada.

La fórmula:

$$v_c = 1.9 \sqrt{f'_c} + 2500 e (V d/M) \quad (\text{psia}) \quad (3.14)$$

En donde: Para esta fórmula y todas las demás correspondientes a este inciso, considérese la siguiente notación:

- A_v = Área del estribo.
- b = Ancho de la viga.
- C = Constante
- d = Peralte efectivo.
- f'_c = Resistencia a la compresión del concreto.
- f_y = Resistencia de fluencia del acero.

- k = Factor de efectividad del estribo.
- M = Momento flector.
- r = $A_v / b s$.
- s = Espaciamiento entre estribos.
- vc = Resistencia al cortante pronosticada sin estribos.
- vcr = Esfuerzo cortante pronosticado a la fractura inclinada.
- vn = Resistencia última al cortante pronosticada con estribos.
- vu = Resistencia al cortante externa factorizada.
- V = Fuerza cortante.
- e = Relación de refuerzo a tensión.

Esta ecuación es un pequeño límite de los resultados esperados y se encuentra basada en la capacidad al agrietamiento o fractura inclinada.

Las fórmulas siguientes dan una aproximación mayor de la capacidad inclinada a la fractura. Ambas se basan en criterios de análisis de curvas de regresión con una desviación estandar s de 27.5 y 19.9 psia:

$$vcr = 1.51 \sqrt{f'_c} + 90 \quad (3.15)$$

$$vcr = 1.52 \sqrt{f'_c} + 135 \quad (3.16)$$

- Capacidad última al cortante.

Los estribos tienen gran influencia en la capacidad de resistir cortante en vigas de concreto reforzado. La poca capacidad de carga por cortante que toma el concreto se compensa con una capacidad incrementada por los estribos.

Como ya se dijo, el reglamento ACI utiliza la analogía de armadura para predecir la resistencia de una viga con estribos, resultando la ecuación siguiente:

$$v_n = [1.9 \sqrt{f'_c} + 2500(e V d / M)] + r f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.17)$$

El término entre corchetes, como ya se mencionó, representa la contribución del concreto en la resistencia y el último término es la contribución por estribos.

De un análisis estadístico, se propone:

$$v_n = 60 (f'_c e d / a)^{1/3} + f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.18)$$

Ambas ecuaciones se basan en que las resistencias del concreto varían en su mayor parte de los 140 a los 420 kg/cm². Basados en las ecuaciones 3.14 y 3.15 se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$v_n = (1.51 \sqrt{f'_c} + 90) + r f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.19)$$

y

$$v_n = (1.52 \sqrt{f'_c} + 135) + r f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.20)$$

En estas últimas dos, los términos entre paréntesis representan la resistencia a la fractura inclinada, y el segundo término, la contribución por cortante.

La ecuación 3.17, del ACI, y la ecuación experimental 3.19, ambas conforme en la resistencia inclinada a la fractura, son conservadoras, basados en los datos de prueba. La ecuación 3.20, en la resistencia última, es mucho mejor en la estimación de resistencia al corte en vigas con estribos. La ecuación 3.18 es ligeramente más conservadora que la ecuación 3.20. Esta ecuación, varía su exactitud de acuerdo a la capacidad del estribo. Para un valor bajo de $r f_y$ es poco conservadora, volviéndose más a medida de que la capacidad del estribo se incrementa.

- Eficacia de los estribos

La forma general de la ecuación de resistencia al cortante en vigas es:

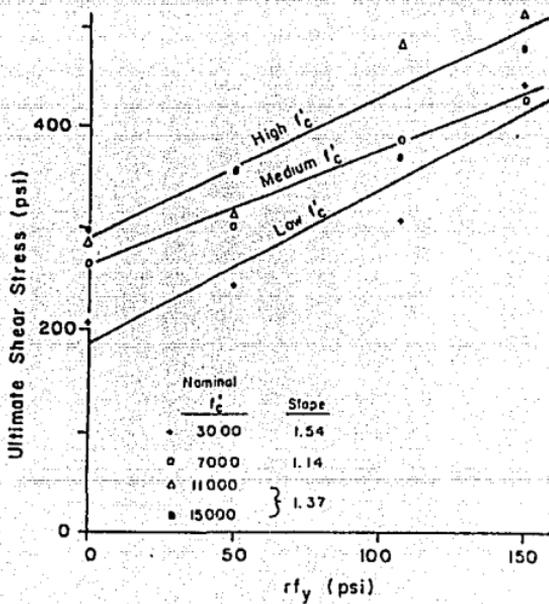
$$v_n = c + k (r f_y) \quad (3.21)$$

Donde c y k son constantes relativas a las contribuciones del concreto y de los estribos respectivamente. El ACI asume que c y k son iguales a 1.0. Los actuales valores de prueba para k varían de 1.5 a 1.8 de acuerdo con la cantidad de los estribos utilizados, disminuyendo hasta un valor de 0.5 aproximadamente para una gran cantidad de estribos.

Como puede entenderse, la capacidad al cortante de una viga está en función de la capacidad de los estribos como se observa en la Figura 3.4. De acuerdo a la filosofía del ACI, un promedio de la efectividad de los estribos puede verse desde el incremento del esfuerzo cortante, superior al esfuerzo inclinado de fractura. En la Figura 3.5, este incremento de esfuerzo ($v_u - v_{cr}$), utilizando la ecuación 3.15 de la resistencia inclinada a la fractura, es graficada vs la capacidad de los estribos.

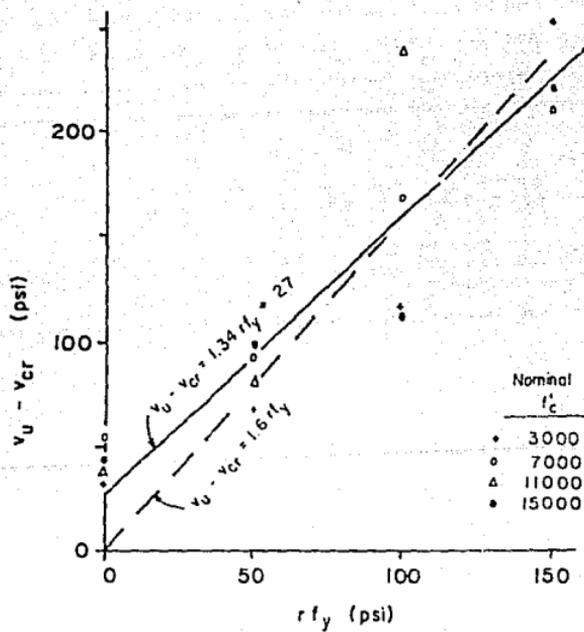
El análisis de regresión indica que:

$$v_u - v_{cr} = 1.34 r f_y + 27 \quad (\text{psia}) \quad (3.22)$$



Efecto de los estribos en la capacidad por cortante

FIGURA 3.4



Efectividad de los estribos

FIGURA 3.5

Para una línea que pasa a través del origen y que predice esencialmente los mismos valores que la ecuación 3.22 para valores de r y f_y diferentes de cero, tenemos:

$$v_u - v_{cr} @ 1.6 r f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.23)$$

Finalmente, de acuerdo a lo anterior tenemos:

$$v_n = (1.51 \sqrt{f'_c + 90}) + 1.6 r f_y \quad (\text{psia}) \quad (3.24)$$

Esta ecuación es igualmente exacta durante todo el rango de resistencias del concreto y capacidades de los estribos utilizados en este estudio, diferente a la ecuación 3.20 la cual muestra un sesgo de acuerdo a la capacidad de los estribos. Esta fórmula utiliza la capacidad inclinada a la fractura de vigas sin estribos. El valor de 1.6 como factor efectivo de los estribos está de acuerdo con algún otro valor reportado y significa que los estribos contribuyen con un 60 % más resistencia que la pronosticada por el reglamento ACI en su versión 318-83. Este valor no parece variar significativamente a lo largo del rango de resistencias de concreto posiblemente utilizables.

Se concluye al respecto, debido a que la contribución por cortante del concreto, en vigas con estribos, quizá sea mucho menor a un 30 % respecto a las predicciones del reglamento ACI 318-83 y basados en experimentación, dicha deficiencia es compensada por la efectividad incrementada de los estribos en el refuerzo del alma con concreto de alta y muy alta resistencia.

3.1.5.3. CORTANTE EN VIGAS DE CONCRETO PRESFORZADO

La aproximación usada en el reglamento ACI para determinar la resistencia al cortante del concreto, v_c , para vigas de concreto presforzado, es conceptualmente la misma que para vigas de concreto reforzado, en el que la contribución de resistencia del concreto, para vigas con estribos, es tomada igual al cortante que produce la fractura por tensión diagonal en una viga sin estribos.

De cualquier forma, las ecuaciones que limitan la carga por cortante se determinan de manera completamente distinta.

De acuerdo al reglamento ACI, v_c es tomado como el menor de dos valores. El primero de ellos, v_{cw} , es llamado a la formación de una fractura diagonal que inicia en el alma de la viga. Esta se calcula con la siguiente relación:

$$v_{cw} = (3.5 \sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc}) b w d + V_p \quad (\text{psia}) \quad (3.25)$$

En donde:

- fpc = Es la resistencia a la compresión en el centroide de la sección.
- Vp = Componente vertical de la fuerza efectiva de presfuerzo en la sección.
- bw = Ancho de la viga.
- d = Peralte de la viga.

El segundo valor, Vci, es el cortante al cual una fractura de tensión por flexión formada previamente se propaga diagonalmente hasta causar la falla por cortante.

$$v_{ci} = 0.6\sqrt{f'_c} bw d + V_d + V_i (M_{cr} / M_{max}) \quad (\text{psia}) \quad (3.26)$$

$$M_{cr} = I / Y_t (6 \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad (3.27)$$

En donde:

- Vd = Fuerza de cortante no factorizada ocasionada por su peso propio.
- Mmax = Momento externo factorizado.
- Vi = Fuerza externa factorizada.
- I = Momento de inercia de la sección.
- Yt = Distancia del centroide a la cara de tensión.
- fd = Esfuerzo no factorizado debido al peso propio.
- fpe = Esfuerzo de compresión en el concreto, debido al presfuerzo en la cara de tensión de la sección.

El programa de pruebas que arroja las siguientes observaciones en relación a elementos de concreto presforzado, relaciona la respuesta de éstos, ya sea diseñados por el primer o el segundo criterio, así como también la relación claro-peralte, resistencia a la compresión ($f'_c = 840 \text{ kg/mc}^2$), relación de acero de tensión, fuerza de presfuerzo, entre otros parámetros significativos.

3.1.5.3.1. CORTANTE EN VIGAS DE CONCRETO PRESFORZADO SIN ESTRIBOS.

Las pruebas realizadas a este tipo de elementos mostraron fracturas diagonales producidas por las cargas que fueron mayores que las pronosticadas por el reglamento ACI, encontrándose con un rango de seguridad de 9 a un 29 %.

Se encontró que la resistencia, v_c , pronosticada por el reglamento ACI, se encuentra gobernada por la ecuación :

$$v_c = 0.6 \sqrt{f'c} bw d + V_d + (V_i M_{cr} / M_{max}) \quad (\text{psia}) \quad (3.28)$$

para relaciones claro/peralte de 4 a 8.

Para las bajas relaciones claro/peralte gobierna la ecuación:

$$v_{cw} = (3.5 f'c + 0.3 f_{cp}) bw d + V_d \quad (\text{psia}) \quad (3.29)$$

Estas ecuaciones, para un valor dado de la relación claro/peralte, pronostican adecuadamente el valor del esfuerzo cortante; se tiene que para ambos criterios, la fractura por cortante disminuye al incrementarse la relación claro/peralte.

Se concluye en forma general que las ecuaciones propuestas por el reglamento ACI para determinar v_c y v_{cw} son adecuadas y racionales.

3.1.5.3.2. CORTANTE EN VIGAS DE CONCRETO PRESFORZADO CON ESTRIBOS.

De los estudios ya mencionados, se obtuvo que la carga de fractura al cortante, V_c , se encuentra determinada por la fractura del alma a cortante (v_{cw}), o por la fractura al cortante por flexión (v_{cl}). Las resistencias obtenidas fueron en su generalidad conservadoras y adecuadamente pronosticadas por las ecuaciones antes mencionadas.

Resulta evidente que la resistencia total al cortante $V_n = V_c + V_s$, estará bien calculada por los procedimientos estipulados en el reglamento del ACI. Se tuvo un promedio de reserva de resistencia del 21 %.

En relación al efecto de la resistencia del concreto con respecto a la resistencia total por cortante, se demostró que el margen de seguridad se incrementó directamente en relación al $f'c$ para ambos criterios, a un máximo de un 32 %.

De acuerdo a lo anterior es posible evadir la falla de compresión por cortante al aumentar la resistencia del concreto, así como incrementar la efectividad de los estribos al resistir las posibles fallas por tensión diagonal en vigas de alta resistencia.

3.1.6. REFUERZO LATERAL EN COLUMNAS.

Una de las funciones del refuerzo lateral es para prevenir el desprendimiento del recubrimiento del concreto o el pandeo local de las varillas longitudinales. Este puede ser:

- Estribos laterales.
- Refuerzo en espiral o zuncho.

La filosofía básica del reglamento ACI para diseño de columnas de concreto confinado en un terremoto, es el incrementar la resistencia del alma de la columna debido a que el confinamiento sufre una pérdida de resistencia debido a descascamiento del recubrimiento. Las ecuaciones dadas por el reglamento se basan en la hipótesis que cuando el refuerzo de una columna de concreto es sujeta a una carga uniaxial, la máxima capacidad del corazón confinado es alcanzada cuando el recubrimiento comienza a descascararse. Esto no resulta tan claro al aplicarse a concretos de resistencia superior. Las deformaciones a las cuales el concreto confinado y el recubrimiento alcanza capacidades máximas, dependerá de sus respectivas curvas $\sigma-\epsilon$. Severos estudios experimentales al respecto, proponen expresiones analíticas para las curvas $\sigma-\epsilon$ de concretos confinado y no confinado de alta resistencia.

Los resultados y conclusiones que arrojaron dichos estudios, se expresan a continuación:

3.1.6.1. Relaciones analíticas de $\sigma-\epsilon$.

Se tiene que las ecuaciones para refuerzo lateral en el ACI se derivan de la siguiente relación:

$$f'_{cc} - f'_c = 4 f_r \quad (3.30)$$

En donde:

- f'_{cc} = Resistencia mejorada del concreto.
- f'_c = Resistencia no confinada del concreto.
- f_r = Presión lateral de confinamiento.

Esta ecuación indica que ese mejoramiento debido al confinamiento se relaciona linealmente con la presión de confinamiento. De cualquier forma, se ha demostrado en un gran número de pruebas en especímenes de concreto con varios grados de confinamiento que esa relación no es lineal.

Las siguientes relaciones, basadas en los estudios antes mencionados, son propuestas del mejoramiento de la resistencia en columnas de acuerdo a un grado mayor de presión de confinamiento así como una mejoría substancial en la resistencia del concreto.

a) Concreto.

Las siguientes relaciones σ - ϵ se proponen para concreto:

$$f = f_o [1 - (\epsilon / \epsilon_o)^A] \text{ para } \epsilon \leq \epsilon_o \quad (3.31)$$

$$f = f_o \exp [-k (\epsilon - \epsilon_o)^{1.15}] \text{ para } \epsilon \geq \epsilon_o \quad (3.32)$$

En donde:

- A y k = Parámetros de control del ascenso y descenso de las ramas de la curva σ - ϵ respectivamente.
- f_c = Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria cualquiera.
- f_o = Esfuerzo máximo.
- ϵ = Deformación unitaria.
- ϵ_o = Deformación unitaria máxima.

Ambas ramas de la curva se encuentran en el máximo (ϵ_o, f_o) con una pendiente de cero, es por ello que la transición de una rama a otra es continua.

Los dos parámetros del modelo se dan en las siguientes ecuaciones:

$$A = E_c \epsilon_o / f_o \quad (3.33)$$

$$k = 0.17 f'c \exp (-0.01 fr L1) \quad (3.34)$$

En donde:

- E_c = Módulo de elasticidad inicial del concreto < al 40 % del f'c).
- L1 = Parametro que depende de la resistencia del concreto y del grado de confinamiento.

$$L1 = 1 + 25 fr / f'c [1 - \exp (-f'c/6500)^9] \quad (3.35)$$

Comparando 3.34 y 3.35 puede verse que el valor de k decrece con un incremento del valor de $f'c$ o un decremento del valor de fr . El valor de $k = 0$ corresponde a un comportamiento perfectamente quebradizo mientras que $k = \infty$ corresponde a un comportamiento plástico.

El esfuerzo máximo (f_o) y su correspondiente deformación (ϵ_o) están dadas por:

$$f_o = L2 [f'c + (1.15 + 3048/f'c) fr] \quad (3.36)$$

$$\epsilon_o = 1.027 \exp^{-7} \cdot f'c + 0.029 L2 fr/f'c + 0.00195 \quad (3.37)$$

En el cual $L2$ es un parámetro que depende del confinamiento relativo ($fr/f'c$) y está dado por:

$$L2 = 1 + 15 (fr/f'c)^3 \quad (3.38)$$

Cabe notar que $L2$ toma valores cerca de la unidad cuando el confinamiento relativo es pequeño; es por ello que en estos casos, (los cuales son comunes en la práctica), $L2$ puede eliminarse de las ecuaciones 3.36 y 3.37. $L1$ viene siendo casi igual a la unidad para valores moderados de resistencia a la compresión y de confinamiento relativo.

b) Cálculo de la presión de confinamiento.

Para columnas circulares con zuncho o estribos, la presión de confinamiento esta dada por:

$$fr = (2 As fy) / (s D) \quad (3.39)$$

En donde:

- As = Area de la sección transversal del zuncho o estribo.
- fy = Esfuerzo de fluencia del refuerzo lateral.
- s = Distancia o paso entre estribos o zuncho.
- D = Diámetro del alma de la columna.

En el cálculo de la presión de confinamiento por medio de la ecuación 3.39, se supone que el acero ha fluido. Dada la situación de que el acero no siempre fluye al esfuerzo máximo de la columna, la cantidad fr sólo es un índice del potencial de confinamiento provisto por el refuerzo lateral.

Para columnas de sección cuadrada, columnas con acero en las esquinas, así como también es sus puntos intermedios, y con ganchos acomodados al refuerzo lateral, el ACI propone un método simple de aproximación para calcular la presión lateral por medio de la suposición de una columna circular equivalente con un diámetro efectivo (D_e) igual al lado del núcleo confinado cuadrado. Los requerimientos para el concepto de diámetro equivalente se encuentran diseñados por el ACI o reglamentos similares. Por lo tanto, la presión confinante para este tipo de columnas puede calcularse como:

$$f_r = (A_s h f_y) / (s D_e) \quad (3.40)$$

En donde:

- A_sh = Área total de la sección transversal de los estribos y ganchos.
- f_y = Esfuerzo de fluencia.
- s = Paso o distancia entre estribos.
- D_e = Diámetro equivalente.

Si la columna cuadrada no tiene refuerzo longitudinal y el refuerzo lateral consiste en ganchos cuadrados, se encontró que el confinamiento efectivo es del 40 % del confinamiento encontrado con la ecuación 3.40.

c) Acero longitudinal.

La curva σ - ϵ para el acero está dada por las siguientes ecuaciones:

$$f_s = E_c \epsilon_s \quad \text{para } 0 < \epsilon_s < \epsilon_y \quad (3.41)$$

$$f_s = f_y \quad \text{para } \epsilon_y < \epsilon_s < \epsilon_{sh} \quad (3.42)$$

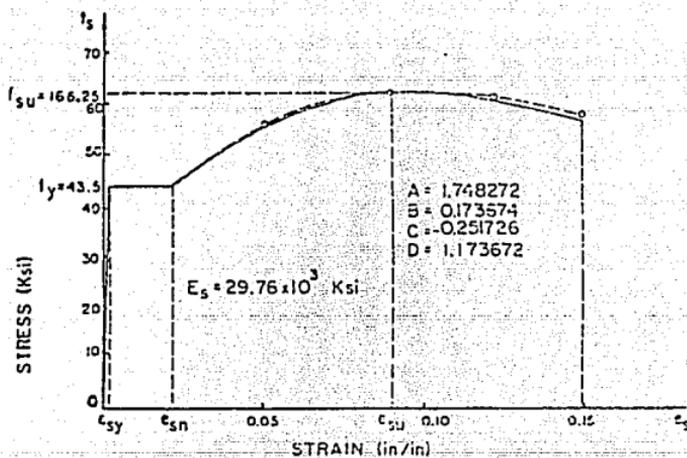
$$f_s = f_y + f_0 \frac{a x + b x^2}{1 + c x + d x^2} \quad \text{para } \epsilon_s > \epsilon_{sh} \quad (3.43)$$

$$x = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{\epsilon_0} \quad (3.44)$$

$$f_0 = f_{su} - f_y, \quad c_0 = \epsilon_{su} - \epsilon_s \quad (3.45)$$

En donde f_y , ϵ_{sh} , f_{su} , ϵ_{su} , se definen en la Figura 3.6 y a , b y c son constantes.

Se ha comprobado ampliamente que las ecuaciones propuestas anteriormente satisfacen las características y propiedades reales de los materiales constitutivos del concreto reforzado.



Curva Esfuerzo-Deformación unitaria para el acero longitudinal

FIGURA 3.6

3.1.6.2. Respuesta de columnas confinadas sujetas a cargas laterales.

Para obtener una mayor comprensión acerca de la influencia de la resistencia del concreto en el comportamiento de las columnas cuando se encuentran sujetas a grandes desplazamientos laterales, se utilizó un modelo desarrollado en los Estados Unidos por Wang, Shah y Naaman, en el cual se estudió el comportamiento de una columna de sección con un $f'c$ de 630 kg/cm^2 . El refuerzo lateral fue diseñado de acuerdo a los requerimientos del reglamento del ACI.

La capacidad de tomar momento de columnas hechas con concreto de alta resistencia a grandes valores de giro en relación a aquél que corresponde al valor del primer máximo de su gráfica momento vs deformación, es mayor que aquél para un concreto de baja resistencia. Esto va en contra del hecho de que el confinamiento es menos efectivo para concretos de alta resistencia.

La razón del relativo mejoramiento en el desempeño de columnas confinadas elaboradas de concreto de alta resistencia, es debido al hecho de que las columnas hechas de este material tienen una gran cantidad de refuerzo de confinamiento especificado por el ACI.

De esta manera, el método ACI ha de explicar que para una resistencia a la compresión incrementada por medio de un aumento en la cantidad de confinamiento, aparentemente compensa la pobre eficiencia de la unidad de confinamiento de los concretos de alta resistencia cuando la capacidad de momento es comparada para largos valores de deformación. Un comportamiento similar se obtuvo de el análisis de columnas circulares.

3.2 PRINCIPALES APLICACIONES.

La utilización actual de concretos de muy alta resistencia se debe a un proceso evolutivo en la tecnología de los materiales en función de nuevos requerimientos de diseño.

Desde finales de la década de los setentas hasta hoy en día, muchas han sido sus aplicaciones en las diferentes obras civiles construidas en los países donde se ha desarrollado esta tecnología, resolviendo sus diferentes problemas económicos, sociales, de clima, geográficos, etc..

En este capítulo se pretende ilustrar algunas de ellas, así como la aplicación que de concreto de muy alta resistencia se han realizado, mencionando de acuerdo a su importancia, el papel que ha jugado como material dicho concreto.

Como aplicaciones más importantes de los concretos de muy alta resistencia se menciona lo siguiente:

3.2.1 EDIFICIOS.

Los edificios probablemente han atraído la mayor atención de cualquier aplicación del concreto de muy alta resistencia, y mucho del trabajo sobre el desarrollo de concretos de este tipo ha sido dirigido hacia las necesidades de tales materiales en estructuras elevadas.

Inicialmente se hace la consideración de que el concreto de muy alta resistencia permite alcanzar mayor altura, reducir las secciones de las columnas y proporcionar mayor rigidez.

En relación a lo anterior, las tres más grandes ventajas del concreto de alta y muy alta resistencia que hacen su uso atractivo para su aplicación en edificios altos son que proveen de mayor:

Resistencia / Unidad de costo
Resistencia / Unidad de peso
Rigidez / Unidad de costo

A continuación se describen sólo algunos edificios en los cuales el concreto de alta resistencia tuvo aplicaciones importantes:

EDIFICIO DE LA TWO UNION SQUARE, SEATTLE:

El primer rascacielos que usó concretos mayores a $1,300 \text{ kg/cm}^2$, y un módulo de elasticidad extremadamente alto de $504,000 \text{ kg/cm}^2$, fue la Torre de la Two Union Square, un edificio en Seattle de 58 pisos de altura construido por la Turner Construction Co. en asociación con Bayley Construction Co., ambos de Seattle.

Entre otros edificios en los que se ha utilizado concretos de muy alta resistencia en la Ciudad de Seattle, cabe mencionar:

- El Century Square, de 30 pisos que incorporó concreto estructural de 700 kg/cm^2 .
- El First & Stewart Building, de 12 pisos, que utilizó concretos de 770 kg/cm^2 en sus columnas.

Al concreto premezclado utilizado para estos dos edificios, se incorporaron ceniza volante para aumentar la resistencia del mismo. El más reciente aditivo puzolánico para el concreto, el sílica-fume, fue el utilizado en la construcción del Two Union Square.

Lone Star Industries of Seattle fue el proveedor de concreto premezclado para el Two Union Square, el cual utilizó un producto mixto llamado Force 10,000, que es una mezcla de aditivo sílica-fuma y superfluidificante, y se utilizó un agregado máximo de 3/8".

Las columnas de concreto de este edificio fueron especificadas inicialmente a 980 kg/cm^2 , pero los ingenieros estructuristas, solicitaron a la Lone Star entregar una mezcla con una resistencia mínima de $1,330 \text{ kg/cm}^2$ a los 56 días para obtener un módulo de elasticidad mayor, y ayudar así al comportamiento de la estructura en contra de sollicitaciones accidentales como son el viento o los sismos.

EDIFICIO DE LA COLUMBIA CENTER, SEATTLE:

El Columbia Sea-First Center, con 76 pisos (Lámina 18), es el edificio más alto del oeste de los Estados Unidos y el octavo más alto a nivel mundial.

Este edificio consiste de tres esbeltas torres unidas a diferentes alturas. Básicamente es una estructura de acero a excepción de tres largas columnas mixtas que consisten en acero estructural y concreto de muy alta resistencia con un $f'c$ de 670 kg/cm^2 . La importancia de estas columnas radica en que soportan la mayor parte de las cargas por gravedad, además de las cargas por viento y cargas sísmicas. Estas miden $2.44 \times 3.66 \text{ m}$ en su base y $0.90 \times 0.90 \text{ m}$ en su parte más alta.

Un complejo análisis por computadora y las columnas antes mencionadas hicieron posible limitar el acero en la construcción a menos de 73 kg/cm^2 en el área de piso, comparado con los 98 kg/cm^2 para un diseño convencional.

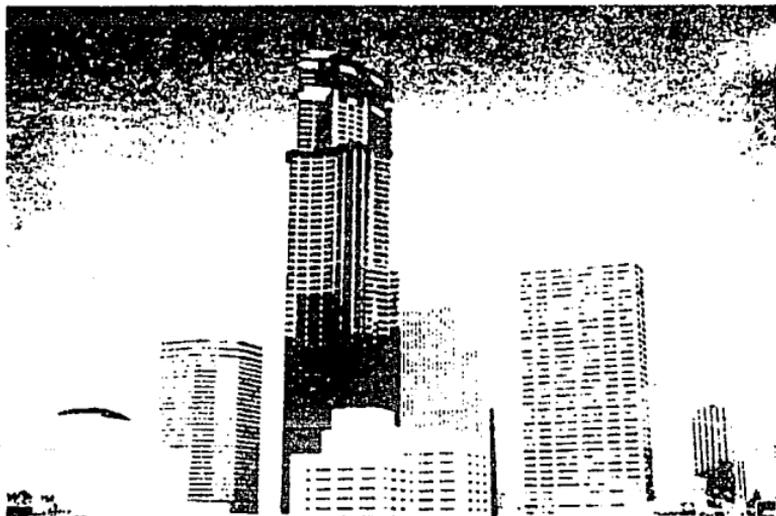
El uso de tal resistencia de concreto, fue principalmente para maximizar el módulo de elasticidad con el efecto de minimizar la inclinación de los pisos superiores del edificio.

Debido a que el concreto de muy alta resistencia se vació en columnas muy congestionadas de acero de refuerzo y estructural, se utilizó un alto revenimiento con el uso de superfluidificantes.

La mezcla de concreto consistió en:

- 384 kg de cemento tipos I y II.
- Aditivo cementante puzolánico con un alto contenido de sílice.
- Agregado grueso combinado con un 70 % de grava de $3/4"$ y un 30 % de grava de $3/8"$.
- Arena gruesa.

Se utilizó una relación a/c de 0.25 con la ayuda de un superfluidificante.



Edificio de la COLUMBIA CENTER

LAMINA 18

El módulo de elasticidad utilizado para los cálculos finales de diseño fue igual a 475,000 kg/cm².

Aproximadamente en este edificio se utilizaron 6,100 m³ de concreto con un f'c de 670 kg/cm² a los 56 días y de 840 kg/cm² a los 180 días, sólo en las columnas.

EDIFICIO DE LA 226 W. WACKER DRIVE, CHICAGO.

En la construcción de este edificio, las columnas de sus primeros pisos se diseñaron con una capacidad estructural para soportar cargas laterales, cargas vivas, muertas y superpuestas con un concreto de f'c = 980 kg/cm². Esta resistencia se utilizó para los primeros 5 pisos y los niveles inferiores del edificio.

La resistencia de 980 kg/cm² fue utilizada básicamente porque resultaba económico para satisfacer los requerimientos estructurales de la obra. Debido a esas razones económicas, las mezclas de concreto de muy alta resistencia para columnas y muros de cortante fueron diseñados para 56 y 90 días. Esta variación de la regla tradicional de 28 días se justifica en el hecho de que los miembros que soportan las cargas reciben éstas varios meses después de que se coloca el concreto en el proyecto.

Para la obtención de la alta resistencia se utilizó en este edificio aditivo silica-fume.

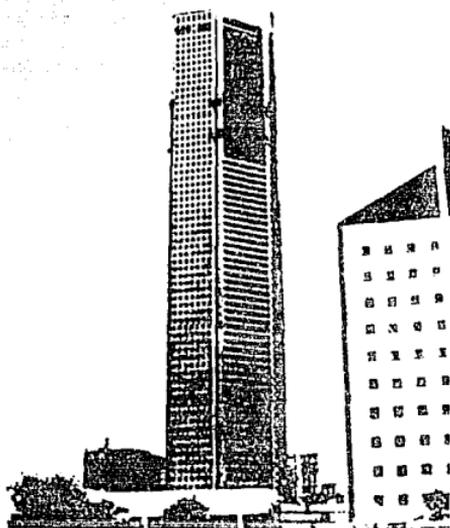
EDIFICIO DE LA TEXAS COMMERCE PLAZA, HOUSTON.

La torre de la Texas Commerce Plaza (Lámina 19), ubicada en la plaza de la United Energy, es un edificio de 75 pisos de oficinas en el centro de Houston.

Su diseño comenzó en el año de 1978 y la estructura se completó en 1981. Esta estructura es el edificio compuesto (Concreto reforzado-acero estructural) más alto en todo el mundo.

El sistema típico de este edificio se basa en una estructura compuesta en forma tubular, es decir, presenta un claro amplio de 26 m desde los pisos inferiores hasta los superiores.

Dadas las características arquitectónicas, el diseñador y la compañía constructora encargada de este proyecto, la Turner Construction Co., diseñaron con una resistencia del concreto de f'c = 525 kg/cm² a los 28 días teniendo columnas de un tamaño de 1.22 x 1.22 m en vez de las indeseables de 1.22 x 1.83 m, colocadas aproximadamente a 3 metros una de otra.



Edificio de la TEXAS COMMERCE PLAZA

LAMINA 19

El concreto utilizado fue una mezcla rica en cemento (374 kg/m^3) y aditivo puzolánico rico en sílice (93 kg/m^3), revenimiento de 12 cm y relación a/c de 0.33. Dicho revenimiento se obtuvo con el uso de superfluidificantes en una proporción de 3 oz. por cada 45 kg de material cementante.

Una de las consideraciones más importantes en edificios altos, como ya se mencionó, son las restricciones de sus entrepisos ante las diferentes sollicitaciones laterales. El uso de concretos de alta resistencia con un alto módulo de elasticidad da como resultado un bajo empuje en sus entrepisos para un mismo tamaño de miembros.

En el caso específico de este proyecto se utilizó un alto módulo de elasticidad igual a $397,600 \text{ kg/cm}^2$.

El resultado concreto de éste módulo de elasticidad, permite una deflexión máxima debida a un fuerte empuje lateral que no excede de 41 cm en cualquier dirección en la parte más alta del edificio.

El uso de concretos de alta resistencia con un alto módulo de elasticidad reduce el acortamiento axial en las columnas de concreto.

Como característica general para cualquier tipo de construcciones con concretos de muy alta resistencia en la que se requiera construir rápidamente, es que existe la ventaja de poder descimbrar a edades tempranas vigas y columnas, debido a los bajos niveles de esfuerzo y a la relativa alta resistencia del concreto.

3.2.1.1. APLICACION DE LOS CONCRETOS DE MUY ALTA RESISTENCIA EN ZONAS DE ALTA SISMICIDAD.

La aplicación de los concretos de alta resistencia en zonas de alto riesgo sísmico ha sido una de las aplicaciones tardías de este tipo de material.

Otra consideración de importancia es la relación entre la alta resistencia del concreto y su peso específico, ya que este último crece insignificativamente en relación al incremento de resistencia del concreto, teniéndose como consecuencia una mayor resistencia por peso unitario lo cual se traduce como una ventaja significativa en el diseño de estructuras ya que las fuerzas sísmicas son directamente proporcionales a la masa del edificio.

El módulo elástico del concreto permanece proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del mismo para concretos de muy alta resistencia, obteniéndose así una mayor rigidez por peso unitario.

Es importante mencionar que la "fluencia específica" (fluencia bajo unidad de esfuerzo), del concreto, disminuye significativamente cuando aumenta la resistencia del concreto. A causa de la fluencia específica menor de las columnas de alta resistencia, estas no sufren más contracción total que las columnas de concreto normal con sus bajos niveles de resistencia.

La deformación inelástica de los miembros estructurales de concretos de alta resistencia bajo cargas cíclicas opuestas, del tipo inducido por movimientos sísmicos, ha sido una preocupación que ha frenado la aplicación de concretos de alta resistencia en regiones de alta sismicidad.

La deformación inelástica de los miembros de concreto de muy alta resistencia bajo los efectos antes mencionados, han sido investigadas en varias series de pruebas. Los especímenes probados fueron columnas bajo carga axial cero. Las principales variables de las pruebas fueron el $f'c$, el porcentaje de refuerzo longitudinal y el espacio del refuerzo de confinamiento. La relación e/b , resulta ser el factor dominante que influye en la magnitud de la deformación inelástica, con la consecuente reducción para incrementar los valores de r/r_b (r = relación de refuerzo a la tensión igual a A_s/bd , en donde A_s = área de acero longitudinal, b = ancho de la columna y d = longitud lateral de la columna. Y r_b = porcentaje de acero de refuerzo que produce condiciones balanceadas de deformación). Sin embargo, igual que para las muy grandes relaciones de r/r_b , cantidades substanciales de deformación inelástica fueron encontradas disponibles. Semejante deformabilidad fue generalmente aumentada al incrementar la resistencia del concreto. Se concluye que en ausencia de cargas axiales actuando simultáneamente con flexión, miembros de concreto reforzado de alta resistencia sujetos a cargas cíclicas opuestas poseen tanta o más deformabilidad inelástica como es apropiado a ser requerido en situaciones prácticas.

En estudios recientes se investigó la posibilidad de mejorar la ductilidad de columnas de concretos de alta resistencia por medio del uso de refuerzo lateral. Los resultados de las pruebas indicaron las muy grandes ductilidades que podrían ser logradas utilizando un refuerzo lateral uniforme para tales columnas de alta resistencia.

Por citar algún ejemplo de aplicaciones de concreto de alta resistencia en zonas sísmicas tenemos que en la parte Sur de California, se han colocado concretos con un $f'c > 420 \text{ kg/cm}^2$ en el complejo de Oficinas-Hotel-Garage del Great American Plaza en la ciudad de San Diego, en un edificio residencial de 14 pisos ubicado en la esquina de 5th ave. y Ash, en San Diego; y en el Pacific Regent de 22 pisos en La Jolla.

3.2.2. PUENTES.

Mucho del trabajo sobre edificios de concreto de muy alta resistencia tiene su aplicación directa en puentes. Generalmente, los requisitos de diseño y economía aún no han conducido al uso de los mismos niveles de resistencia en puentes en relación a las resistencias utilizadas en edificios, sin embargo, ha habido un reconocimiento creciente de la disponibilidad de concretos de muy alta resistencia por parte de aquellas personas dedicadas al diseño de estas estructuras. Se han estado considerando los concretos de resistencia

superior para reducir los pesos muertos y tener así secciones de menor tamaño, para permitir tramos más largos, o menos traveses por carga equivalente (ejemplo: para el rango de resistencias de los 420 a los 700 kg/cm² el reglamento AASHTO, permite la reducción del número de vigas requeridas en un número de nueve a cuatro), entre otras aplicaciones de importancia.

3.2.2.1. ELEMENTOS PRESFORZADOS EN PUENTES.

En la industria del presfuerzo los concretos de muy alta resistencia han tomado gran importancia al utilizarse en miembros de flexión, como vigas T, vigas TT, etc..

El uso de concretos de muy alta resistencia permite la fabricación de modelos más largos, esbeltos y ligeramente más económicos de concreto presforzado. La producción en planta de estos no requiere de cuidados muy diferentes de los que se tendrían con un proceso de control de calidad normal.

Finalmente, donde se requieran altas resistencias tempranas con miembros precolados de elementos presforzados frecuentemente se tiene una substancial reserva de la capacidad a largo plazo y un control excelente de las deflexiones.

Las principales aplicaciones que ha tenido el concreto de muy alta resistencia en puentes es en:

- Vigas I
- Vigas TT
- Cajones,

principalmente.

Dentro de las principales necesidades que son cubiertas con el uso de concretos de muy alta resistencia en la industria del presfuerzo en general tenemos:

- Factibilidad de uso de secciones más esbeltas y ligeras.
- Claros más largos con mayor espaciamiento entre ellos.
- Mayor dureza y mejor control de las deformaciones.

- Reducción de las pérdidas de presfuerzo debido a un mejor control de la fluencia y la contracción.
- Reducción en la cantidad de refuerzo por cortante en miembros a flexión.

Impacto reducido de los altos esfuerzos tempranos debido al presfuerzo y a la aplicación temprana de cargas de servicio y a los efectos que posiblemente se tengan en miembros a edades tempranas.

El uso de concretos de muy alta resistencia permite claros más largos de miembros TT, con menos refuerzo, menores niveles de tensión y mejor control de deformaciones a largo plazo.

Para un puente dado, usando diferentes longitudes de claros y/o patrones de carga, el diseñador variará típicamente la cantidad de presfuerzo y resistencias del concreto usado, en vez de modificar los tamaños de las secciones en la necesidad de mantener una apariencia consistente y minimizar los costos de construcción.

Resumiendo, las vigas de puentes proporcionan un gran número de oportunidades de usar concretos de resistencia superior con las siguientes ventajas:

- 1.- Grandes claros obtenidos. Vigas TT se han construido con claros mayores a los 38 mts. para techos y de 22 mts. para puentes. Vigas I de 1.80 m de peralte con claros de 48 mts. pueden ser diseñadas a la fecha, en forma general, relaciones claro/peralte de presfuerzo, de 27 a 40 pueden ser obtenidos para vigas TT. Para puentes de vigas I, una relación de 22 a 27 para espaciamientos de vigas de 2.4 a 1.5 m respectivamente. Con estos valores se obtiene un comportamiento adecuado de servicio.
- 2.- Mejor control de las deformaciones. Con altas resistencias del concreto el módulo elástico de Young de como resultado pequeñas deflexiones y giros.
- 3.- Bajas pérdidas de presfuerzo debido a la fluencia. Esto es porque el alto módulo de Young hace que se tengan menos pérdidas de fluencia ahorrándose número de cables. El concreto de alta resistencia tiene típicamente menos contracción debido a su menor relación a/c.

- 4.- Efecto en el refuerzo por cortante. El reglamento ACI restringe el refuerzo por cortante en términos de la contribución del concreto. El valor de la contribución del concreto es grande en el concreto de alta resistencia, por lo que el valor de la contribución del refuerzo debe ser menor.

3.2.3 CONCRETO LANZADO

El concreto lanzado es una mezcla de concreto la cual se dispara a gran velocidad sobre una superficie mediante el uso de aire comprimido.

El uso del silico-fume en aplicaciones de concreto lanzado fue introducido a finales de los años setentas en Noruega, donde sus terrenos rocosos facilitaban el desarrollo de proyectos de construcción en los que se utilizaba el concreto lanzado.

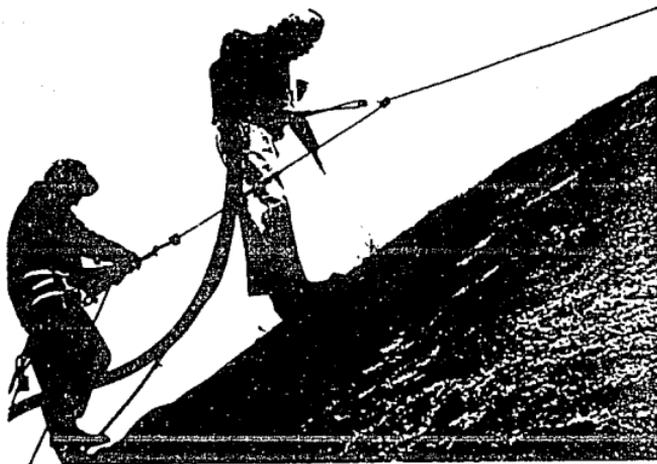
A principio de los años ochentas, el aditivo silico-fume se utilizó primeramente en la zona oeste de Canada y posteriormente en los Estados Unidos.

Entre sus principales aplicaciones tenemos:

- Estabilización de paredes de roca (Lámina 20).
- Revestimiento de túneles.
- Rehabilitación de columnas, vigas, pilas, etc. de concreto deterioradas en estructuras marítimas y puentes.

Existen dos metodologías básicas de aplicación para esta técnica y son:

- Vía húmeda.- Se incluye el agua al proceso de mezclado desde un principio, para el posterior transporte de la mezcla de concreto y finalmente se aplica con el equipo diseñado para tal fin.
- Vía seca.- Se agrega el agua en el momento en que se empieza con la aplicación del concreto lanzado.



Estabilización de taludes de roca

LAMINA 20

En el método por " vía seca ", el aditivo silica-fume puede incorporarse a la mezcla de las siguientes formas:

- a) Como un premezclado de cemento, agregados, silica-fume y fibras de acero, si estas últimas fueran necesarias.
- b) Mezclado en planta de agregados y cemento para la posterior incorporación a la mezcla de aditivos silica-fume y/o fibras de acero para su mezclado en tránsito.
- c) Aplicado el aditivo silica-fume por peso ya en el lugar de la obra.

En el método por " vía húmeda ", el aditivo silica-fume puede incorporarse a la mezcla de las siguientes formas:

- a) Ya elaborada la mezcla de concreto premezclado, puede incorporarse el aditivo silica-fume, antes de ser transportada a la obra.
- b) Revolviendo el aditivo silica-fume en la mezcla de concreto premezclado ya en la obra, momentos antes de ser aplicada como concreto lanzado.

Actualmente el método por vía húmeda es más utilizado en relación al método por vía seca por las siguientes ventajas:

- Mejor control sobre la relación agua/cemento, ya que la adición de ésta se controla en la planta de concreto premezclado y no en campo por medio de un operador que es más factible que cometa errores.
- Las pérdidas por rebote de la mezcla son menores en un 40-50 % en relación al método por vía seca, teniendo como resultado una gran cohesión.
- Mayor productividad y menor costo.

- Menos polvo.
- Mayor homogeneidad en el mezclado.

Específicamente, la adición de aditivo silica-fume a la mezcla provee de grandes mejoras en el desempeño del concreto lanzado y sus técnicas de producción, dichas ventajas se enlistan a continuación:

- Obtención de altas resistencias a la compresión y a la flexión con la eliminación de aditivos acelerantes para el desarrollo de altas resistencias tempranas.
- Reducción en las pérdidas por rebote en cantidades arriba del 50 %, generando así ahorros en la producción y en los costos de los materiales.
- Incremento del espesor a una pasada de hasta de 7 cms., sin utilizar acelerantes y mejorando considerablemente el tiempo de producción.
- La combinación de aditivo silica-fume y fibras metálicas genera mejoras en el control de fracturas, resistencia a cargas de impacto y rigidez.
- Se obtiene una gran fuerza de adherencia en proyectos de rehabilitación.
- La combinación de la gran fuerza de adherencia, mayor viscosidad y la adición de fibras de acero, elimina la necesidad de la malla de acero como soporte estructural durante la colocación del concreto.
- Incremento de la durabilidad por efectos de congelación y deshielo como producto de una baja permeabilidad e inclusión de aire.
- Resistencia química al ataque de: Cloruros, nitratos, sulfatos, ácidos y a las reacciones álcali-agregado.

- Gran resistividad eléctrica y bajísima permeabilidad que previene completamente la corrosión del acero de refuerzo, siendo en consecuencia un excelente material para la rehabilitación de estructuras deterioradas por el ataque de agentes químicos como los cloruros.
- Incremento en su resistencia mecánica.

Las observaciones anteriores, obtenidas por la empresa norteamericana NORCEM, ubicada en Long Island, Nueva York, demuestran que los concretos lanzados con la aplicación de aditivo sílica-fumo traen consigo beneficios de ahorro de tiempo, estructurales, económicos y de durabilidad.

3.3. APLICACIONES ESPECIALES.

Los concretos según su uso o comportamiento podríamos clasificarlos como concretos estructurales, concretos de construcción y concretos arquitectónicos. En relación a los concretos de muy alta resistencia, actualmente se ha desarrollado su uso en aplicaciones donde su durabilidad es de más importancia que su resistencia mecánica. Dicha durabilidad toma varios enfoques, de los cuales podemos mencionar, aunque algunas de estas características ya han sido analizadas a fondo en este trabajo, las siguientes:

Resistencia a la corrosión, congelación y deshielo, químicos descongelantes, reacción álcali agregados, ataque de sustancias químicas, ataque de sulfatos, abrasión y efectos combinados.

De las características antes mencionadas, se tiene que la aplicación más importante del concreto de alta resistencia con aditivo sílica-fumo, a excepción de sus características estructurales, es la resistencia a la corrosión.

Por muchos años, la resistencia a la corrosión en estructuras de concreto reforzado como pueden ser autopistas elevadas o estacionamientos, se pensaba que era la adecuada debido a las características inhibitorias de la corrosión del concreto con cemento Portland. Debido a esto y a una estimación baja del impacto de los iones de cloro de las sales en el agua en el concreto reforzado, los reglamentos norteamericanos del ACI o AASHTO sobre los requerimientos de recubrimientos mínimo, hablan permanecido sin cambio por muchos años.

La experiencia ha demostrado que numerosos puentes de concreto, estructuras marinas y estacionamientos, diseñados con los antiguos reglamentos AASHTO y ACI, con recubrimientos en el rango de 2.5 a 5.0 cms., han sido deteriorados cuando el agua y los iones de cloro eventualmente penetran en el concreto en cantidades considerables atacando el acero de refuerzo.

Actualmente, cambios significativos se han incluido en los reglamentos antes mencionados, en donde se especifica el requerimiento de un recubrimiento adicional, ya sea en el acero de refuerzo o en el concreto. Además, se considera proporcionar al concreto, permeabilidad, característica obtenible por el concreto elaborado con una baja relación a/c y una alta resistencia a la compresión a los 28 días, concreto que debe tener una gran calidad en su fabricación.

Las recomendaciones estructurales de la AASHTO y del ACI en relación al recubrimiento adicional necesario, se basan en la utilización de acero de refuerzo convencional. Actualmente existen diferentes sistemas de protección para evitar la corrosión y mantener la eficiencia de diseño estructural.

Un sistema novedoso y relativamente económico tanto en su fabricación y mantenimiento, es la utilización de aditivo sílica-fume, manejo de bajas relaciones a/c de 0.2 a 0.3 y manejando un alto revenimiento, factible este último con el uso de aditivos superfluidificantes.

Estudios han demostrado que el concreto de muy alta resistencia con aditivo sílica-fume, reduce el ingreso de los iones de cloro en un 97 a un 98 %, comparado con concretos con relaciones normales de a/c en recubrimientos de aproximadamente 2.5 cm.. Lo anterior indica que la extremadamente baja reacción a/c alcanzada en la mezcla de concreto producen una extremadamente baja permeabilidad.

Otra característica importante que inhibe la corrosión del refuerzo es la alta resistividad eléctrica.

Esta propiedad interna es atribuida a la extremadamente baja relación a/c, a la gran fineza del aditivo sílica-fume (el cual permite llenar los pequeños espacios vacíos que se forman en la mezcla de concreto, además de que por su gran área superficial se incrementa la reactividad del concreto), el bajísimo contenido de agua libre en la matriz debida a la hidratación cemento-sílica-fume y a la conversión del hidróxido de calcio, el cual produce, con los iones solubles de agua, silicato de calcio hidratado.

A continuación se describen brevemente algunas de las obras en que se aprovecha la característica antes mencionada, propia del concreto de muy alta resistencia con aditivo sílica-fume.

- Tubos de drenaje.

En el año de 1987, el Corps Seattle District, experimentó con el concreto de muy alta resistencia para revestimiento del desagüe de un túnel en Mud Mountain Dam cerca de Mount St. Helens. Se tenía la experiencia con el revestimiento de concreto normal antes utilizado que este había sido cambiado aproximadamente cada dos años. El concreto de muy alta resistencia con aditivo sílica-fume ha soportado satisfactoriamente a la fecha el sedimento abrasivo que escurre a través del desagüe del túnel.

- Ingeniería Marítima.

Otra curiosa aplicación de los concretos de muy alta resistencia, fue utilizada en un muro guía flotante en Bonneville Dam Lock, en el estado de Oregon, Estados Unidos. Ya que el muro guía es una estructura flotante, el uso de concreto de alta resistencia se comprende, ya que menos material puede ser usado, haciendo que el muro fuera más ligero, además, se requería de una fuerte estructura para absorber los golpes de las barcazas que a menudo golpean en dicho muro guía. Para la construcción de este muro se utilizó concreto de 980 kg/cm² a los 28 días.

El concreto tuvo un comportamiento adecuado, a excepción quizás de los efectos por congelación y deshielo, ya que las condiciones referentes a este efecto podría decirse que es el caso más crítico que pueda tenerse en relación a ello, puesto que los muros flotan presentando una diferencia de temperatura a lo largo de la línea de flotación.

Se reportó que el uso en cantidad apropiada de aire incluido reporta mejoras en su durabilidad ante efectos extremos de congelación y deshielo. Cabe hacer notar que el uso de aire incluido requiere de gran cuidado ya que estudios demuestran que un 5 % de contenido de aire al concreto de muy alta resistencia reduce la misma en aproximadamente 35 kg/cm².

Por otra parte, se ha utilizado concreto de muy alta resistencia con aditivo silica-fume en la construcción de plataformas de perforación de petróleo al Noroeste de Alaska, las cuales se han venido desempeñando adecuadamente desde su construcción en el año de 1987 a la fecha. El concreto con silica-fume se comportó como un material impermeable y más resistente que el concreto normal a los efectos de congelación y deshielo, así como el ataque del agua salada. El concreto de muy alta resistencia permitió además tener estructuras tan ligeras, que fueron remolcadas sin contratiempos alrededor de Alaska en el cuerno del mar de Beaufort.

IV

POSIBILIDADES DE MERCADO EN MEXICO

CAPITULO IV

POSIBILIDADES DE MERCADO EN MEXICO

4.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

En el caso de los concretos de Muy Alta Resistencia, resultaría algo difícil indicar el incremento de costo que los aditivos utilizados producen, es por ello que el costo en su uso es el factor que realmente cuenta.

El incremento de costo puede compensarse por:

- Aumento en la velocidad de construcción de los elementos.
- Menor tiempo requerido para el curado.
- Una resistencia mejorada.

De las características anteriores, debe analizarse cada situación concreta según las condiciones de colado en la obra, debiéndose juzgar éstas de acuerdo a sus méritos. Hay que hacer énfasis en que el uso de concretos de muy alta resistencia, ha de planearse con objeto de ahorrar tiempo, y que es en ese aspecto donde los beneficios económicos son más factibles.

Con respecto a lo anterior, podemos citar el siguiente ejemplo:

Es muy común en este país trabajar con tiempos de programas de obra reducidos. Cuando resulta necesario colocar grandes cantidades de concreto en horarios fuera de lo normal para ajustarse a los tiempos perdidos, suscitándose costos extras por mano de obra, el concreto de muy alta resistencia con características de fluidez, cuya colocación requiere de menos mano de obra e intensidad de trabajo, es una solución viable. Otro factor de gran importancia el cual repercute en la economía de la aplicación de los concretos de muy alta resistencia son los usuarios de la edificación.

Analicemos entonces la relación usuarios-concreto de muy alta resistencia:

" Los usuarios proveen de la renta, el concreto de muy alta resistencia provee de columnas de menor sección y en consecuencia, mayor espacio rentable. Por lo tanto, a mayor espacio rentable, mayor número de usuarios y mayor renta ".

El concreto premezclado de alta resistencia elaborado en Estados Unidos, en el área de Seattle, tiene un costo aproximado que fluctúa entre \$ 530,000 y \$ 620,000 pesos por m^3 . Esto es, tres veces más que los concretos de resistencia convencional, pero el material de alta resistencia reemplaza en gran medida el elevado costo del acero que generalmente es usado para alcanzar la rigidez en edificios elevados.

Ejemplificando, un típico edificio de 58 pisos con estructura de concreto reforzado debería tener de 100 a 130 kg de acero por m^2 ; usando concreto de muy alta resistencia tendrá solamente 60 kg de acero por m^2 .

Si analizamos lo anterior en relación a la capacidad para soportar cargas, se observa que aunque los concretos de resistencia normal tienen un precio de lista de una tercera parte con respecto a los concretos de muy alta resistencia, con estos últimos se incrementa la resistencia para soportar cargas en razón de 4.7 veces en relación a los concretos de resistencia normal.

Estas comparaciones demuestran la economía obtenida utilizando concretos de muy alta resistencia en las columnas de los edificios con un número de niveles considerable.

A continuación se mencionan los resultados derivados de someter dos edificios a un análisis sísmico dinámico, realizado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), proponiendo el uso de concreto de resistencia normal para uno de ellos y el otro con concreto de muy alta resistencia.

En este modelo experimental, se considera un edificio construido a base de trabes, columnas y losas de concreto reforzado sin muros de carga. Este tiene 20 niveles y una planta de 324 m^2 integrada por tres crujeas por lado, la altura de los entrepisos es de 3.0 m y de 3.5 m para la planta baja.

El $f'c$ del concreto normal es de 250 kg/cm^2 y su módulo de elasticidad es de 190,000 kg/cm^2 mientras que para el concreto de muy alta resistencia se consideró un $f'c$ de 700 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad de 330,000 kg/cm^2 .

El modelo analizado se basa en la experiencia de los sismos de 1985, donde los edificios más afectados tuvieron una altura mediana, y en que las edificaciones de la Ciudad de México tienden a una altura semejante, debido a que las áreas para construcción son cada vez más reducidas.

El análisis sísmico dinámico arrojó los resultados que se expresan en la Tabla 4.1:

TABLA 4.1

Dimensionamiento estructural como resultado de un análisis sísmico dinámico:

NIVELES	Concreto	Concreto
	$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$	$f'c = 700 \text{ kg/cm}^2$
	Sección transversal (m^2)	
1 y 2	1.95 x 1.95	1.35 x 1.35
3 y 4	1.80 x 1.80	1.25 x 1.25
5 y 6	1.65 x 1.65	1.15 x 1.15
7 y 8	1.50 x 1.50	1.05 x 1.05
9 y 10	1.35 x 1.35	0.95 x 0.95
11 y 12	1.20 x 1.20	0.85 x 0.85
13 y 14	1.05 x 1.05	0.75 x 0.75
15 y 16	0.90 x 0.90	0.65 x 0.65
17 y 18	0.75 x 0.75	0.55 x 0.55
19 y 20	0.60 x 0.60	0.45 x 0.45
Tribas	0.50 x 0.80	0.45 x 0.80

El impacto de las dimensiones obtenidas se muestra en la Figura 4.1, en ella se observan los volúmenes de concreto que se requieren por nivel. Para los edificios analizados, las reducciones en volumen de concreto al emplear concreto de muy alta resistencia va desde un máximo aproximado de 35 % para los niveles inferiores, hasta un valor mínimo del 25 % en los niveles superiores. Con respecto a la cimbra necesaria para la construcción de este edificio, se estimó que para la totalidad del mismo, se tendría un ahorro de aproximadamente $1,645 \text{ m}^3$.

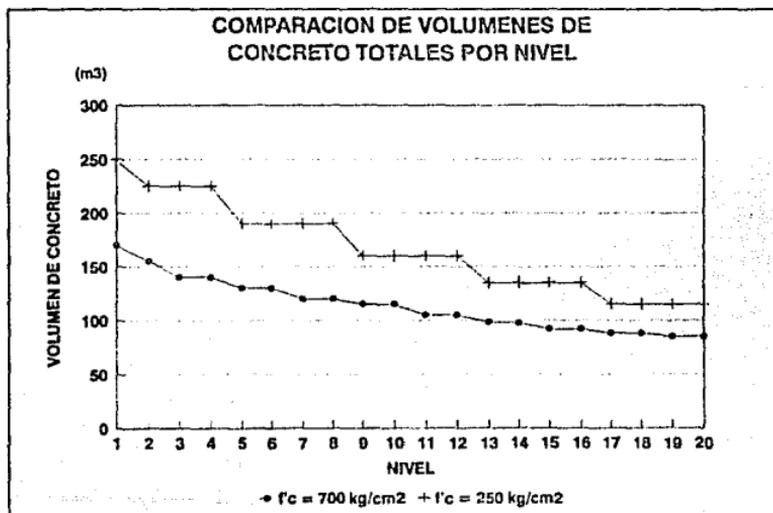


FIGURA 4.1

En este ejemplo se considera sólo el efecto del sismo en las dimensiones estructurales. Queda pendiente el diseño del acero de refuerzo para toda la estructura, pero como ya se mencionó, algunos autores coinciden en que definitivamente se tiene un ahorro de acero de refuerzo en las columnas al emplear concreto de muy alta resistencia.

Investigadores como G.J. Smith y F.N. Rad, en un documento titulado "Ventajas económicas de los concretos de alta resistencia en columnas" realizado por ellos en el año de 1989, concluyen que se obtienen reducciones en el costo de la construcción de columnas del orden del 26 % cuando se emplea concreto de 560 kg/cm² y 42 % al emplear concreto de 840 kg/cm² comparado con la utilización de un concreto normal de 280 kg/cm².

La desventaja principal para producir concretos de muy alta resistencia en nuestro país radica en la obtención de los aditivos necesarios para su fabricación. En el caso del aditivo sílica-fume, actualmente no es un aditivo de uso comercial en México, por lo que es necesario importarlo de los Estados Unidos, teniendo en consecuencia un incremento substancial del costo terminal del producto.

Para los aditivos superfluidificantes no se tiene esta desventaja, a excepción del costo de los mismos. De cualquier forma, este tipo de aditivos es actualmente de uso muy generalizado en las plantas de concreto premezclado.

Con respecto a los agregados, como se mencionó en el primer capítulo de este trabajo, existen bancos de materiales lo suficientemente resistentes cerca del valle de México para producir concretos de muy alta resistencia dentro del área metropolitana de la Ciudad.

4.1.1. ANALISIS DE COSTOS.

A continuación se presenta un ejemplo del costo de importación de aditivos superfluidificante y sílica-fume, ambos de la firma norteamericana NORCEM Concrete Products Inc., tomando como volumen la importación, 10 toneladas de sílica-fume y 2,640 galones de aditivo superfluidificante. Se toman estas cantidades por efecto de que se hace la suposición de que los aditivos serán transportados en un camión de 20 ton., y que con esta cantidad se satura la capacidad de carga del camión.

Costo de los aditivos puestas en Laredo-México:

Sílica-Fume = \$ 400.00 U.S. Dlls./Ton
Superfluidificante = \$ 8.95 U.S. Dlls./Galón

Tipo de cambio de U.S Dlls. controlado:

U.S. Dlls. = 3,086.00 Pesos

Importe total:

silica-fume	= 10 Ton x 400.00	= 4,000.00
superfluidificante	= 2,640 galones x 8.95	= 23,628.00

		27,628.00
		x 3,086.00

		\$ 85'260,008.00 MN

Impuestos: 38.6 %	x 0.386	

		\$ 32'910,363.00 MN

Gastos lado americano: \$ 855.00 U.S. Dlls = 2'638,530.00 MN

Fletes: = 2'400,000.00 MN

Honorarios de aduanas: = 487,000.00 MN

Gastos adicionales: = 500,000.00 MN

Total: \$ 124'195,901.00 MN

Factor de costo	124'195,901.00	
de importación:	-----	= 1.457
	85'260,008.00	

Precio del silica-fume.

0.40 Dlls/kg x 3,086 \$/Dlls x 1.457 = \$ 1,798.00 MN/kg

Precio del superfluidificante:

8.95 Dlls/galón x 0.2642 galón/lt x 3,086.00 \$/dlls x 1.457 = \$ 10,632.00 MN/lt

Los precios aquí establecidos son considerados ya puestos en la Cd. de México; faltaría anexar los casos de indirectos relativos a las diferentes empresas comercializadoras de aditivos para concreto los cuales son variables.

A continuación se presenta análisis de costos de mezclas tipo, considerando únicamente el costo de los materiales. Se utilizan como costos de los insumos aquéllos facilitados por algunas empresas de concreto premezclado ubicadas en el Valle de México. En estos

ejemplos de mezclas se considera el uso y no, de aditivos silica-fume y superfluidificantes, pero con aproximadamente el mismo contenido base de cemento. Lo anterior obedece a que dependiendo de la aplicación, el costo de la mezcla de concreto resulta variable.

Diseño de mezcla N° 1

$f'c = 560 \text{ kg/cm}^2$, agregado máximo 3/8", revestimiento de 18 cm, dosificación del aditivo silica-fume = 11 % (con respecto al peso del cemento), relación agua/cementantes = 0.34

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P U (\$)	IMPORTE (\$)
Cemento	ton	0.296	384,674.00	113,864.00
Silica-fume	ton	0.032	2'630,000.00	84,160.00
Arena	m^3	0.433	29,500.00	12,774.00
Grava	m^3	0.537	54,308.00	29,163.00
Agua	m^3	0.113	5,000.00	565.00
Superfluidificante	lt	2.389	11,612.00	27,741.00
Total				\$ 268,267.00/m ³

Diseño de mezcla N° 2

$f'c = 670 \text{ kg/cm}^2$, agregado máximo 3/8", revestimiento de 18 cm, dosificación del aditivo silica-fume = 15 % (con respecto al peso del cemento), relación agua/cementantes = 0.33

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P U (\$)	IMPORTE (\$)
Cemento	ton	0.296	384,674.00	113,864.00
Silica-fume	ton	0.045	2'630,000.00	118,350.00
Arena	m^3	0.433	29,500.00	12,774.00
Grava	m^3	0.537	54,308.00	29,163.00
Agua	m^3	0.113	5,000.00	565.00
Superfluidificante	lt	3.785	11,612.00	43,951.00
Total				\$ 318,667.00/m ³

Diseño de mezcla N° 3

$f'c = 1,100 \text{ kg/cm}^2$, agregado máximo 1/2", revestimiento 12 cm, dosificación del aditivo silica-fume = 20 % (con respecto al peso del cemento), relación agua/cementantes = 0.22

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P U (\$)	IMPORTE (\$)
Cemento	ton	0.593	384,674.00	228,112.00
Silica-fume	ton	0.119	2'630,000.00	312,970.00
Arena	m^3	0.537	29,500.00	15,842.00
Grava	m^3	0.997	54,308.00	54,145.00
Agua	m^3	0.158	5,000.00	790.00
Superfluidificante	lt	3.000	11,612.00	34,836.00
Total				\$ 646,695.00/m ³

Diseño de mezcla N° 4

$f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, agregado máximo 3/4", revenimiento 8-10 cm, sin sílica-fumo, relación agua/cemento = 0.85

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P U (\$)	IMPORTE (\$)
Cemento	ton	0.323	384,674.00	124,250.00
arena	m ³	0.480	29,500.00	14,160.00
Grava	m ³	0.670	20,831.00	13,957.00
Agua	m ³	0.210	5,000.00	1,050.00
Total			\$	<u>153,416.00/m³</u>

Diseño de mezcla N° 5

$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, agregado máximo 3/4", revenimiento 11-15 cm, sin aditivo sílica-fumo, relación agua/cemento = 0.45

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P U (\$)	IMPORTE (\$)
Cemento	ton	0.467	384,674.00	179,643.00
Arena	m ³	0.465	29,500.00	13,718.00
Grava	m ³	0.640	20,831.00	13,332.00
Agua	m ³	0.210	5,000.00	1,050.00
Total			\$	<u>207,742.00/m³</u>

Analizando lo anterior, se hacen las siguientes observaciones: Comparando el diseño de mezcla 1 y 2 con respecto al diseño 4, con contenidos de cemento de 0.296 y 0.323 ton respectivamente para un m³ de concreto, se observa que las primeras presentan un incremento de costo en relación a la segunda de un 1.7 de 2.1 veces la primera, pero la resistencia se ve incrementada en 3.7 y 4.4 veces respectivamente.

Comparando los diseños de mezcla 3 y 5, se observa un incremento de costo de la primera en relación a la segunda de 3.1 veces, para un incremento de resistencia 4.5 veces.

El incremento de resistencia es mayor que el incremento de costo por lo que puede ponderarse a favor de la resistencia.

4.1.2. ANALISIS COMPARATIVO CON OTROS CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA.

A continuación se mencionan los precios unitarios comerciales actualizados (A1 08/Jun /1992) de los insumos básicos empleados en la elaboración de concretos por la compañía Latinoamericana de Concreto S. A. (LACOSA), mismos que utiliza la misma empresa para elaborar todos sus concretos, ya sea en resistencia convencionales o altas resistencias:

TABLA 4.2.

Precios unitarios de los insumos para la elaboración de concreto premezclado, LACOSA Junio 1992.

CONCEPTO	UNIDAD	COSTO PROVEEDOR (\$)	COSTO FLETE (\$)	P.U (\$)
Cemento	TON	255,674	29,000	384,674
Arena	m ³	29,500	0	29,500
Grava andesítica	m ³	22,400	4,680	27,080
Grava caliza	m ³	24,750	29,558	54,308
Agua	lt	5	0	5
Dispersante (Plastocrete 0.25)	lt	1,250	0	1,250
Superfluidificante (Rheobuild)	lt	10,557	0	10,557
Acelerante (Pozolith 100-HE)	lt	2,370	0	2,370
Retardante (Fester 1500-R)	lt	1,450	0	1,450
Silica-fumo	kg	2,630	0	2,630

Dependiente del diseño de mezcla, la dosificación de aditivos acelerantes, superfluidificantes, retardantes y silica-fumo es en promedio la siguiente:

TABLA 4.3
Dosificación tipo para diferentes clases de aditivos ()*

ADITIVO		DOSIFICACION
Acelerante Pozolith 100-HE	13.0	cc por kg de cemento
Superfluidificante	8.0	cc por kg de cemento
Retardante Fester 1500-R	0.5	cc por kg de cemento
Silica-fumo		Variable según requerimientos de resistencia (%).

(*) Variable según recomendaciones del fabricante.

Se entiende por concreto clase I, a aquel concreto de alta calidad, elaborado con grava de alta densidad, es decir agregado grueso de roca caliza triturada y arena de características mayormente controlables, cuya resistencia y concreto de alta resistencia, concreto destinado generalmente a estructuras importantes por lo que se espera un comportamiento adecuado en condiciones de servicio.

Debe entenderse que, cuando hablenos de concretos de resistencia normal (R.N.), es aquél que obtiene su resistencia de diseño a los 28 días; de resistencia rápida (R.R.), a aquél que obtiene su resistencia de diseño a los 14 días y de alta resistencia temprana (A. R. T.), a aquél que obtiene su resistencia de diseño a los 7 días.

Los precios de lista para concreto clase I, con un revenimiento de 12 ± 2.5 cm., agregado máximo 3/4" y bajo condiciones normales de producción en planta se enlistan a continuación:

TABLA 4.4.

Precios de lista para concretos clase I, LACOSA, Junio 1992.

f'c (kg/cm²)	R.N. (\$/m³)	R.R. (\$/m³)	A.R.T. (\$/m³)
250	362,000	387,000	443,000
300	387,000	423,000	475,000
350	423,000	455,000	515,000
400	455,000	493,000	553,000

El costo de colocación por bombeo bajo condiciones normales de trabajo, es decir, que no se presentan contratiempos en el bombeo del concreto, trabajando en días hábiles, entre otras: se enlistan a continuación:

TABLA 4.5

Precios de bombeo, LACOSA, Junio 1992.

B O M B A		N I V E L		PRECIO (\$/m ³)
De pluma	Estacionaria			
	X	Hasta el 5° nivel	(15 mts)	27,000
X		Hasta el 5° nivel	(15 mts)	45,000
Solo con un revenimiento de 18 cms.				
	X	Del 6° al 10°	(30 mts)	31,500
X		Del 6° al 10°	(30 mts)	51,500
	X	Del 11° al 14°	(42 mts)	34,000
X		Del 11° al 14°	(42 mts)	58,500
	X	Del 14° al 18°	(54 mts)	41,500
	X	Del 19° al 21°	(63 mts)	48,500
	X	Del 22° al 25°	(75 mts)	55,000
		Del 26° en adelante		precios convencionales

Nota:

Los precios anteriores incluyen los costos por materias primas, costos de operación y costos indirectos. A éstos debe de agregarse el IVA y/o cualquier otro impuesto que lo sustituya, afecte o complemente al anterior.

A continuación se mencionan los precios unitarios comerciales (A1 08 / Jun / 1992) de los insumos básicos empleados en la elaboración de concretos por la compañía Concretos de Alta Resistencia S. A. de C. V. (CARSA) :

TABLA 4.6.

Precios unitarios de los insumos para la elaboración de concreto premezclado, CARSA, Junio 1992.

CONCEPTO	UNIDAD	COSTO PROVEEDOR (\$)	COSTO FLETE (\$)	P.U (\$)
Cemento	TON	315,000	25,000	340,000
Arena	m ³	30,000	0	30,000
Grava andesítica	m ³	22,400	5,000	27,400
Grava caliza	m ³	37,500	30,000	67,500
Agua	lt	5	0	5
Dispersante (Plastocrete 0.25)	lt	1,250	0	1,250
Superfluidificante (Rheobuild)	lt	10,557	0	10,557
Acelerante (Pozolith 100-HE)	lt	2,370	0	2,370
Retardante (Fester 1500-R)	lt	1,450	0	1,450
Silica-fume	kg	2,630	0	2,630

Los precios de lista para concreto clase I, con un revenimiento de 12 ± 2.5 cms., agregado máximo 3/4", peso volumetrico en estado fresco de 2,200 kg/cm³ y bajo condiciones normales de producción en planta se enlistan en la Tabla 4.7:

TABLA 4.7

Precios de lista para concretos clase I, CARSA, Junio 1992.

f'c (kg/cm ²)	R.N. (\$/m ³)	R.R. (\$/m ³)	A.R.T. (\$/m ³)
250	362,000	387,000	443,000
300	387,000	423,000	475,000
350	423,000	455,000	515,000
400	455,000	493,000	553,000

Los costos de colocación por bombeo bajo condiciones normales de trabajo considerados por esta empresa, son los mismos que aparecen en la Tabla 4.5.

Se observa de las listas de precios anteriores que el precio de venta es básicamente el mismo para concretos estructurales clase I. Esto se debe seguramente a cuestiones de competitividad en el mercado del concreto premezclado; además, el costo de sus insumos, debido a la cercanía de las plantas de concreto premezclado antes mencionadas, es muy parecido, así como también que la compañía que se encarga de surtirlos los diferentes aditivos, superfluidificantes, retardantes, acelerantes, etc. es la misma.

Como se observa, las altas resistencias en concretos producidos en plantas de concreto premezclado en México de acuerdo a la NOM C-155 no manejan en su catálogo de precios el concepto de resistencias arriba de los 400 kg/cm^2 , pero es importante hacer mención que todas ellas manejan la posibilidad según requerimientos del cliente, de producir cualquier diseño de mezcla, incluyendo concretos de muy alta resistencia.

De cualquier manera, resulta complicado establecer el precio de venta de un concreto de muy alta resistencia con aditivo silica-fume y superfluidificantes, ya que éste depende básicamente de la demanda en volumen del mismo, así como del proceso de producción en planta, que como nos explicaban los gerentes técnicos de las compañías de concreto premezclado antes mencionadas, por las características especiales del producto final, se requeriría de modificaciones especiales en el proceso de producción, mismas que causarían un incremento en el precio del concreto. De lo anterior, podemos decir que para un volumen pequeño de producción se tendría un costo alto, mismo que descendería al aumentar la cantidad demandada del producto, la que dependerá en un futuro de los requerimientos de la industria de la construcción.

Ambas compañías coinciden en que resistencias abajo de los 500 kg/cm^2 pueden obtenerse manejando mezclas con altos contenidos de cemento, uso de aditivos superfluidificantes y bajas relaciones a/c. Arriba de los 500 kg/cm^2 es donde el aditivo silica-fume resulta necesario y es altamente ventajoso.

En conclusión a lo antes expuesto, se observa que actualmente en México no se elaboran comercialmente concretos de alta resistencia diferentes al concreto estructural de alta calidad o "Clase I", que puedan compararse con el concreto de muy alta resistencia utilizando aditivo silica-fume y superfluidificantes. Lo anterior no resulta ser una limitante en el cual los productores de concreto premezclado queden rezagados en relación a esta nueva tecnología, pero resulta claro que el mercado requiere de más investigación para que a corto o largo plazo sea aprovechable y comercializable técnica tan ventajosa.

CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo mencionaremos en forma general las ventajas y desventajas materiales y económicas que el aditivo puzolanico silica-fume, en conjunto de los componentes básicos constitutivos de toda mezcla de concreto, como lo son el cemento, la grava, la arena y el agua, proporciona al concreto fresco o endurecido en el marco amplio de lo que es su función en el proceso de producción de la mezcla, comportamiento estructural, desarrollo y posibilidades de mercado.

En forma general se mencionan las siguientes características:

MATERIALES:

- El contenido de cemento es un factor importante dentro del diseño de la mezcla de concreto, teniéndose que a mayor contenido de este se tendrán mayores resistencias mecánicas. Es clara también la relación de este con el contenido de agua efectiva de la mezcla.
- Por su pequñísimo tamaño, el aditivo silica-fume, se sitúa entre las partículas de cemento más gruesas, formando una pasta más densa, cohesiva, compacta de color gris oscuro con la consecuente disminución de vacíos en la masa de concreto.
- El aditivo silica-fume disminuye la expansión del mortero ocasionada por la reacción álcali-agregado.
- Se incrementa la plasticidad reduciéndose así el sangrado.
- Previene la corrosión debida a una bajísima permeabilidad y conductividad eléctrica.
- Incrementa la resistencia y durabilidad ante agentes químicos agresivos.

- Provee a la mezcla de concreto endurecido, de una gran capacidad de resistencia a la abrasión.
- En zonas donde las heladas deterioran los materiales de construcción por efecto de ciclos de congelación y deshielo, por su baja permeabilidad, evita esta problemática.
- Es de fácil manejo, ya que puede manejarse en sacos o costales de poco peso, siendo además fácilmente dosificable.
- En combinación de aditivos reductores de agua de alto rango o superfluidificantes y una muy baja relación agua/cemento, aprovechado las características cementantes del aditivo sílica-fumo, pueden obtenerse resistencias mecánicas muy altas.
- Por su gran área específica tiene grandes requerimientos de agua, deficiencia que se compensa en gran medida con el uso de aditivos superfluidificantes.
- Sus características puzolánicas son factiblemente aprovechables en nuestro medio, debido a que, en el caso más específico de la Ciudad de México, que se cuenta con agregados de calidad si no excelentes, adecuada para la obtención de concreto de muy alta resistencia.
- Estudios demuestran que dependiente de las características de los materiales, la dosificación óptima aproximada de aditivo sílica-fumo varía de un 15 a un 22 % con respecto al contenido de peso del cemento.

ESTRUCTURALES:

- El concreto de muy alta resistencia se comporta como un material linealmente elástico y quebradizo.
- El concreto de muy alta resistencia presenta un módulo de elasticidad elevado, mismo que esta en

función de la calidad de los agregados utilizados, lo cual se refleja en una gran rigidez.

- **A medida que se incrementa la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad no se tienen cambios significativos en la relación de Poisson.**
- **Debido al muy bajo coeficiente de fluencia de los concretos de muy alta resistencia las deflexiones de los elementos estructurales se ven disminuidas.**
- **El concreto de este tipo, facilita la disminución del acero a compresión muy utilizado para disminuir las deflexiones.**
- **En miembros a flexión de concreto presforzado, los concretos de muy alta resistencia, proveen de un gran control de las deflexiones, claros más largos, reducción de las pérdidas de presfuerzo y permiten el uso de acero de alto grado de fluencia en el cable de presfuerzo.**
- **La poca eficiencia para tomar cortante del concreto se ve compensada por la efectividad incrementada de los estribos en el refuerzo del alma utilizando concreto de muy alta resistencia.**
- **Utilizando concreto de muy alta resistencia es posible evitar fallas en vigas del tipo de compresión por cortante y por tensión diagonal debido a la capacidad incrementada de los estribos.**
- **La capacidad de tomar momento de columnas hechas con concreto de muy alta resistencia a grandes valores de giro en relación a aquel que corresponde al valor del primer máximo de su gráfica momento contra deformación, es mayor que aquél para un concreto de resistencia convencional.**

APLICACIONES:

- El concreto de muy alta resistencia en edificios permite alcanzar mayor altura, reducir las secciones de las columnas y su acortamiento axial por flujo plástico además de proporcionar mayor rigidez.
- Como característica general para cualquier estructura de concreto de muy alta resistencia, es que permite construir rápidamente debido a los bajos niveles de esfuerzo y a una relativa alta resistencia del concreto a edades tempranas.
- En aplicaciones de concreto lanzado, el concreto de muy alta resistencia de aditivo sílica-fumo provee de las siguientes ventajas: Reducción de las pérdidas por roboto, incremento del espesor a una pasada, gran adherencia, gran durabilidad y resistencia ante efectos de congelación, deshielo, ataque químico severo y una bajísima permeabilidad y conductividad eléctrica que inhiben la corrosión del acero de refuerzo.
- Queda como incompatible el uso de inclusores de aire en el objetivo de alcanzar altas resistencias ya que estos reducen la misma.

ECONOMICAS:

El alto costo del concreto de muy alta resistencia puede compensarse por las siguientes ventajas:

- Velocidad de construcción.
- Resistencia muy mejorada.
- Mayor espacio rentable debido a la reducción de columnas y en consecuencia mayores ingresos por rentas.

- Ahorro de una cantidad considerable de acero de refuerzo del utilizado para alcanzar rigidez.
- Reducciones en volumen de concreto que pueden variar aproximadamente de un 25 a un 35 %.
- Ahorro de cimbra.
- En el caso del aditivo sílica-fumo, actualmente en México no es un aditivo comercial por lo que su uso estará determinado en función de la demanda futura de concretos de muy alta resistencia, así como de sus aplicaciones especiales como lo es la durabilidad.
- Los aditivos reductores de agua normales y de alto rango, pese a su alto costo, son actualmente de uso muy generalizado en nuestro país en las plantas de concreto premezclado.
- Se observa que el incremento de resistencia en relación al incremento de costo es mayor, por lo que puede ponderarse a favor de la resistencia.

Para finalizar y en base a lo anterior, podemos asegurar que los concretos de muy alta resistencia con aditivo sílica-fumo son de producción factible en nuestro país, en lo que se refiere a la posible obtención de sus características mecánicas y otras propiedades aprovechables. En relación a su posibilidad de mercado, debemos de considerar lo siguiente, primeramente, los analistas, diseñadores y constructores de estructuras deben de conocer y considerar en su trabajo la posible obtención de tales materiales y su factible aplicación en proyectos que cumplan con las características básicas de seguridad, funcionalidad y economía, haciendo a un lado caracteres reacios y sin voluntad de cambio. En consecuencia lógica, los productores de concreto y comerciantes de aditivos, al existir demanda del producto realizarían las acciones necesarias de producción y comercialización de los anteriores de tal forma que al ir aumentando el uso de este concreto, el costo disminuiría y la calidad de producción aumentaría.

Queda camino por recorrer para que lo anterior sea posible. Es claro que la tecnología existe y es obligación del profesionista Ingeniero, Arquitecto, etc., el documentarse y actualizarse sobre los avances y beneficios que estudios sobre tecnología de materiales pretenden mejorar o superar competitivamente lo que hasta hoy tenemos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Varios. ADITIVOS SUPERFLUIDIFICANTES PARA CONCRETO
México, D.F. Limusa-IMCYC, 1990.
- 2.- A.M.Neville. TECNOLOGIA DEL CONCRETO Tomos I, II y III
México, D.F. Limusa-IMCYC, 1989.
- 3.- Varios. AGREGADOS PARA CONCRETO
México, D.F. Limusa-IMCYC, 1990.
- 4.- Ortíz Fernández, Alvaro. CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO
México, D.F. FUNDEC, A.C. 1988.
- 5.- H. Kosmatka, Steven, C. Panarese William. DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO México, D.F. IMCYC, 1992.
- 6.- G. Nawy, Edward. CONCRETO REFORZADO, Un enfoque básico.
México, D.F. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 1989.
- 7.- M. González Cuevas, Robles F - V Francisco. Aspectos Fundamentales del CONCRETO REFORZADO. 2a. edición,
México, D.F., Limusa, 1989.
- 8.- Somohano Mendez, Arturo. EL CONCRETO PREMEZCLADO Y SU CONTROL DE CALIDAD. Tesis profesional, ENEP-ACATLAN, 1983.
- 9.- G. Russel, Henry. HIGH STRENGTH CONCRETE. Detroit, Michigan., SP-87 American Concrete Institute, 1985.
- 10.- Moreno, Jaime. ANALYSIS AND DESIGN OF HIGH-RISE CONCRETE BUILDINGS. Detroit, Michigan., SP-97 American Concrete Institute., 1989.
- 11.- B. Zoob, Alexander, J. LeClaire, Philip, W Pfeifer, Donald. CORROSION PROTECTION TESTS ON REINFORCED CONCRETE CONTAINING CORROCEM SILICA-FUME ADMIXTURE. Northbrook, Illinois, Norcem Concrete Products, Inc. 1985.

- 12.- Florato E, Anthony. CONCRETOS DE MUY ALTA RESISTENCIA, México, D.F., Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, Junio, 1989.
- 13.- Canfield, Doug. MICROSILICA IN CONCRETE, Pacific Bulder & Engineer Magazine, Julio 1987.
- 14.- Wolsiefer, John. ULTRA HIGH-STRENGTH FIELD PLACEABLE CONCRETE WITH SILICA-FUME ADMIXTURE, Concrete International Magazine, USA. Vol. 6, no. 4, Abril, 1984.
- 15.- Brooks, J. J., Wainwright, P. J. PROPERTIES OF ULTRA HIGH STRENGTH CONCRETE CONTAINING A SUPERPLASTICIZER, Magazine of concrete research. Inglaterra. Vol. 35., N° 125. Diciembre, 1983.
- 16.- T. Winters, Arthur, EL USO EXITOSO DE ADITIVOS, México, D. F., Revista Construcción y Tecnología, IMCYC. Noviembre, 1989.
- 17.- Pérez Uceda, E. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA, Venezuela, Revista Cemento-Hormigon, N° 587, Octubre, 1992.
- 18.- Varios. TECNICA Y PRACTICA DEL HORMIGON ARMADO Tomo I y II, 12ª edición. Barcelona, España., CEAC, 1978.
- 19.- Varios. PRACTICA RECOMENDABLE PARA LA MEDICION, MEZCLADO TRASPORTE Y COLOCACION DEL CONCRETO, (Comité ACI 304) México, D. F., IMCYC, 1986
- 20.- Varios. CARTILLA DEL CONCRETO, (ACI SP-1), México, D. F., IMCYC, 1986.
- 21.- Varios. ADITIVOS PARA CONCRETO, (Comite ACI 212) México, D. F., IMCYC, 1986.
- 22.- Varios. EL CONCRETO EN OBRA, Tomos I, II, III., México, D. F., IMCYC, 1983.
- 23.- Dreux, Georges. GUIA PRACTICA DEL HORMIGON, Barcelona, España., Editores Técnicos Asociados .S.A, 1981.

- 24.- S.K. Ghosh. APPLICATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE IN REGIONS OF HIGH SEISMICITY. Skokie, Illinois. PCA. Seminario Internacional de Estructuras de Concreto. IMCYC-ACI-UNAM, México, D.F., 1991.
- 25.- Varios. CURADO DEL CONCRETO, México, D.F., IMCYC, 1984.
- 26.- E Bethardt. ESTRUCTURAS DE CONCRETO DE MUY ALTA RESISTENCIA, ESTADO DEL ARTE Y SUS PERSPECTIVAS EN MEXICO, VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. III, Acapulco, 1989.
- 27.- Gómez, J. POSIBILIDADES DEL CONCRETO CON RESISTENCIA SUPERIOR, Segundo Simposio Nacional sobre Materiales de Construcción, Mérida, 1991.
- 28.- Mendoza, C. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA PARA EL DISTRITO FEDERAL, Segundo Simposio Nacional sobre Materiales de Construcción, Mérida, 1991.
- 29.- Wolsiefer, John. SILICA-FUME, AS AN ADMIXTURE FOR SHOTCRETING, NORCEM, Internal report, Junio, 1989.
- 30.- Varios. SIKA'S MICROSILICA TECHNOLOGY, SIKA Information Magazine, Zurich, Suiza. Edición en Inglés, Octubre, 1989.
- 31.- Smit, G.J. & Rad, F.N., ECONOMIC ADVANTAGES OF HIGH STRENGTH CONCRETE IN COLUMNS, Concrete International, Abril, 1989.
- 32.- REGLAMENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO (ACI-318-89) Y COMENTARIOS, Traducción autorizada del American Concrete Institute, México, D.F., IMCYC, 1990.
- 33.- NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO, México, D. F., Gaceta Oficial del Departamento del D. F., RCDF, Julio, 1991.
- 34.- Latinoamericana de Concretos, S.A. de C.V., LISTA DE PRECIOS COMERCIALES, Ciudad de México y Zona Metropolitana, Junio, 1992.

**35.- Concretos de Alta Resistencia S.A. de C.V. LISTA DE PRECIOS
COMERCIALES, Ciudad de México y Zona Metropolitana,
Junio, 1992.**

36.- NORMA OFICIAL MEXICANA:

NOM-C-77 Método de prueba para análisis granulométricos de agregados finos y gruesos.

NOM-C-83 Determinación de la resistencia a la compresión de espécimenes de concreto.

NOM-C-111 Agregados para concreto.

NOM-C-156 Determinación del revenimiento del concreto fresco

NOM-C-163 Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.

NOM-C-191 Determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro.

NOM-C-305 Agregados para concreto, descripción de sus componentes minerales naturales.