

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

**MEZCLAS ÓPTIMAS DE HORMIGÓN CURADAS A VAPOR
PARA LA PREFABRICACIÓN DE DIFERENTES ELEMENTOS
ESTRUCTURALES**

por

Silvia Beatriz Palazzi de Villagra Delgado
Ing. Civil

***Tesis presentada como requerimiento para acceder al grado académico de
Magíster en Ingeniería Estructural.***

Dirigida por:

Ing. Nélida del Valle Castría

San Miguel de Tucumán
- 1999 -

*A mi madre y a la memoria de
mi abuelo Alejandro,
que me inculcaron con el ejemplo
la vocación de servicio y
el amor por esta noble profesión.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias al Sr. Luis Assaf de la empresa Tensolite S.A.. que me apoyó incondicionalmente y puso a mi entera disposición todo lo necesario para llevar a cabo la parte experimental de esta tesis, como así también al personal de la fábrica y muy especialmente a los Sres. Ramón Juárez y Atilio Gutiérrez que trabajaron junto a mi elaborando todos los hormigones y conduciendo los ensayos.

Así mismo quiero agradecer a mis compañeros de magister, Marcela Nieto, Oscar Dip y Marta Amaní en quienes encontré a amigos excepcionales, y muy especialmente a Marta con quien preparé todos los exámenes, dándonos aliento y fuerzas para no decaer.

Agradezco a mis compañeros del Laboratorio de Ensayo de Materiales, Domingo Amín y Daniel Anaya que me apoyaron de muchísimas formas para continuar con la tarea.

Mil gracias a mi amiga María Eugenia Pons, por su permanente ayuda y estímulo y a Amelia Campos por su colaboración incondicional en las traducciones.

Al Ing. Arturo Bignoli por su ayuda espiritual y a mis amigos el Ing Dominguez y su esposa Noreen, que estuvieron presente siempre.

Debo también mi gratitud al Dr. Ing. Rodolfo Danesi por el impulso moral que me infundió en todo momento.

Muy especialmente quiero agradecer a los Ingenieros Alberto Givambattista y Raúl Benito, por sus valiosos comentarios y sugerencias

No podían faltar en este agradecimiento mis padres políticos, pero verdaderos en el afecto, que estuvieron siempre alentándome y ayudándome a solucionar tantas preocupaciones.

Por último, quiero dar gracias a Rafael, mi esposo, por su incondicional amor, amistad y compañerismo y a mis adorados hijos, Silvita y Rafaelito que supieron estimularme y disimular tantas faltas y dificultades que les causé durante estos años, siendo ellos lo máspreciado de mi vida.

Quiero manifestar mi orgullo y gratitud por haber sido dirigida por la Ing. Nélide del V. Castría, quien además ha sido mi maestra desde que me inicié en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, y por el permanente apoyo, dedicación, sugerencias valiosas consejos útiles y sobre todo por la ilusión y el empeño puesto en esta tesis.

Y sobre todo quiero dar gracias a Dios, por haberme cargado en sus brazos durante mi enfermedad, por hacerse presente en tantos amigos buenos y por haberme dado la oportunidad de llegar a la meta.

ÍNDICE	Págs.
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	
1.- Planteamiento y situación actual del problema.....	2
2.- Breve reseña histórica.....	3
3.- Propósitos y alcances de la investigación.....	5
4.- Metodología utilizada y plan de trabajo.....	6
CAPÍTULO 2: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	
1.- Introducción.....	8
2.- Curado con vapor a presión atmosférica.....	9
3.- Procesos involucrados en el endurecimiento rápido.....	13
4.- Fases de consolidación del proceso de fraguado.....	17
5.- Madurez del hormigón.....	18
CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	
1.- Introducción.....	23
2.- Estudio de agregados.....	23
2.1.- Agregado fino	
2.2.- Agregado grueso	
2.2.1.- Agregado grueso fracción binder	
2.2.2.- Agregado grueso fracción 10 – 30	
3.- Estudio del cemento.....	27
CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES DE HORMIGONES ULTRASECOS.	
1.- Dosificación de las mezclas.....	30
H-17.....	32
H-21/25.....	34
H-30.....	34
2.- Programa Experimental	
a)- Estudio en laboratorio.....	35
b)- Estudio a escala natural.....	36
CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES DE HORMIGONES PLÁSTICOS.	
1.- Dosificaciones estudiadas	
1.1.- Hormigones tamaño máximo 3/8"	42
1.2.- Hormigones tamaño máximo 1"	46
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	
1.- Influencia del tamaño máximo	52
2.- Influencia de la consistencia	54
3.- Influencia del tipo de curado	56
4.- Influencia de la riqueza de la mezcla	61
CAPÍTULO 7: EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA EDAD	
1.- Introducción	63

	Págs.
2.- Ecuaciones que vinculan la resistencia con la edad	63
3.- Variación relativa de la resistencia a compresión	68
 CAPÍTULO 8: ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA POTENCIAL USANDO LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ESTUDIADAS EN LABORATORIO.	
1.- Introducción	74
2.- Correlación para cada grupo de hormigones	74
3.- Correlación general	80
4.- Correlación de la resistencia curado a vapor y 28 días normalizado	81
 CAPÍTULO 9: RESISTENCIA Y MADUREZ	
1.- Introducción	84
2.- Madurez Ambiental	84
3.- Cálculo de la resistencia a partir del logaritmo de la madurez	85
4.- Variación de la resistencia con la madurez	89
 CAPÍTULO 10: UN CRITERIO PARA DOSIFICAR MEZCLAS ÓPTIMAS CURADAS A VAPOR Y LUEGO AL AIRE	
1.- Introducción	98
2.- Resultados obtenidos	99
 CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
1.- Conclusiones.....	105
2.- Sugerencias para futuros trabajos.....	107
 BIBLIOGRAFÍA.....	 108
 APÉNDICE A	

Lista de Tablas	Págs.
Tabla 2.1: Recomendaciones del ACI y del RILEM – 1964 -.....	13
Tabla 2.2: Coeficientes de la expresión de madurez de Plowman.....	19
Tabla 3.1: Durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Agreg. fino (IRAM 1525)..	24
Tabla 3.2: Análisis granulométrico de agreg. fino s/ Norma IRAM 1505.....	24
Tabla 3.3: Análisis granulométrico. Fracción binder s/norma IRAM 1505.....	25
Tabla 3.4: Durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Agreg. grueso	26
Tabla 3.5: Análisis granulométrico. Agreg. grueso s/Norma IRAM 1503.....	27
Tabla 4.A: Dosificación hormigón H-17.....	32
Tabla 4.B: Dosificación hormigón H-21/25.....	34
Tabla 4.C: Dosificación hormigón H-30.....	34
Tabla 4.1.: Resistencia a compresión de probetas elaboradas en laboratorio H-17, 21/25 y 30.....	35
Tabla 4.2: Resistencias a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural. H-17.....	37
Tabla 4.3: Resistencias a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural. H-21/25.....	38
Tabla 4.4.: Resistencias a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural. H-30.....	39
Tabla 5.1. :Dosificación del hormigón H-17 (3/8")	42
Tabla 5.2. :Resistencias a compresión. H-17 (3/8").....	43
Tabla 5.3. :Dosificación del hormigón. H-21 (3/8").....	43
Tabla 5.4.: Resistencias a compresión. H-21 (3/8")	44
Tabla 5.5. :Dosificación del hormigón H-25 (3/8")	44
Tabla 5.6. :Resistencias a compresión H-25 (3/8").....	45
Tabla 5.7. :Dosificación del hormigón H-30 (3/8")	45
Tabla 5.8. :Resistencias a compresión .H-30 (3/8").....	46
Tabla 5.9.: Dosificación del hormigón H-17 (1").....	46
Tabla 5.10: Resistencias a compresión .H-17 (1").....	47
Tabla 5.11: Dosificación del hormigón H-21 (1").....	48
Tabla 5.12: Resistencias a compresión. H-21 (1").....	48
Tabla 5.13: Dosificación del hormigón H-25 (1").....	49
Tabla 5.14: Resistencias a compresión. H-25 (1").....	49
Tabla 5.15: Dosificación del hormigón H-30 (1").....	50
Tabla 5.16: Resistencias a compresión. H-30 (1").....	50
Tabla 6.1: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados a vapor y luego al aire Influencia del tamaño máximo.....	52
Tabla 6.2: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados normalizados. Influencia del tamaño máximo.....	53
Tabla 6.3: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados a vapor y luego al aire. Influencia de la consistencia.	54

	Págs.
Tabla 6.4: Resistencia a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados normalizados. Influencia de la consistencia.....	55
Tabla 6.5. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado. Tmax. 3/8". Ultraseco.....	57
Tabla 6.6. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado. Tmax. 3/8". Plástico.....	58
Tabla 6.7. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado. Tmax. 1". Plástico.....	59
Tabla 6.8. Contenidos unitarios de cemento.....	61
Tabla 7.1: Valores de los coeficientes k_1 y k_2 de las ecuaciones de resistencia en función de la edad.....	66
Tabla 7.2.: Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo I.....	68
Tabla 7.3.: Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo II.....	69
Tabla 7.4.: Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo III.....	70
Tabla 7.5: Recomendaciones del RILEM. Distintos métodos de curado.	71
Tabla 8.1. Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Hormigones del Grupo I.....	74
Tabla 8.2 Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Hormigones del Grupo II.....	76
Tabla 8.3. Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Hormigones del Grupo III.....	78
Tabla 9.1: Valores de log k.....	95
Tabla 10.1: Resistencias medias acelerada y normalizada 28 días para cada grupo de hormigones.....	100
Tabla 10.2: Resistencias medias requeridas para cada grupo de hormigones.....	101
Tabla 10.3: Edad a la que se alcanza la resistencia 28 días normalizada. Todos los hormigones.....	102

Listado de figuras	Págs.
<i>Figura 2.1: Tratamientos continuos.....</i>	10
<i>Figura 2.2.: Tratamiento discontinuo.....</i>	12
<i>Figura 2.3: Variación cualitativa de las variables involucradas en el tratamiento.....</i>	16.
<i>Figura 3.1: Curvas límites y curva granulométrica de fino.....</i>	24
<i>Figura 3.2: Curvas límites y curva granulométrica de binder.....</i>	26
<i>Figura 3.3: Curvas límites y curva granulométrica fracción 1-3.....</i>	27
<i>Figura 4.1: Composiciones granulométricas.....</i>	33
<i>Figura 6.1: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17. Influencia del tamaño máximo. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	52
<i>Figura 6.2: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21. Influencia del tamaño máximo. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	52
<i>Figura 6.3: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25. Influencia del tamaño máximo. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	52
<i>Figura 6.4: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30. Influencia del tamaño máximo. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	52
<i>Figura 6.5: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17. Influencia del tamaño máximo. Curado normalizado.....</i>	53
<i>Figura 6.6: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21. Influencia del tamaño máximo. Curado normalizado.....</i>	53
<i>Figura 6.7: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25. Influencia del tamaño máximo. Curado normalizado.....</i>	53
<i>Figura 6.8: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30. Influencia del tamaño máximo. Curado normalizado.....</i>	53
<i>Figura 6.9: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17.(3/8") Influencia de la consistencia. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	54
<i>Figura 6.10: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21.(3/8") Influencia de la consistencia. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	54
<i>Figura 6.11: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25.(3/8").Influencia de la consistencia. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	55
<i>Figura 6.12: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30.(3/8").Influencia de la consistencia. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	55.
<i>Figura 6.13: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17.(3/8") Influencia de la consistencia. Curado normalizado.....</i>	55
<i>Figura 6.14: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21.(3/8") Influencia de la consistencia. Curado normalizado.....</i>	55
<i>Figura 6.15: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25.(3/8").Influencia de la consistencia. Curado normalizado.....</i>	56
<i>Figura 6.16: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30.(3/8").Influencia de la consistencia. Curado normalizado.....</i>	56
<i>Figura 6.17: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17.(3/8"-ultraseco) Influencia del tipo de curado.....</i>	57
<i>Figura 6.18: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21/25.(3/8"- ultraseco). Influencia del tipo de curado.....</i>	57
<i>Figura 6.19: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30.(3/8"- ultraseco). Influencia del tipo de curado.....</i>	58
<i>Figura 6.20: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17.(3/8"-plástico) Influencia del tipo de curado.....</i>	58

	Págs.
Figura 6.21: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21.(3/8"- plástico). Influencia del tipo de curado.....	58
Figura 6.22: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25.(3/8"- plástico). Influencia del tipo de curado.....	59
Figura 6.23: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30.(3/8"-plástico) Influencia del tipo de curado.....	59
Figura 6.24: Resistencia vs. edad. Hormigones H-17.(1"-plástico) Influencia del tipo de curado.....	59
Figura 6.25: Resistencia vs. edad. Hormigones H-21.(1"- plástico). Influencia del tipo de curado.....	59
Figura 6.26: Resistencia vs. edad. Hormigones H-25.(1"- plástico). Influencia del tipo de curado.....	60
Figura 6.27: Resistencia vs. edad. Hormigones H-30.(1"-plástico) Influencia del tipo de curado.....	60
Figura 7.1: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo I. Curado normalizado.....	63
Figura 7.2: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo I. Curado a vapor y luego al aire.....	64
Figura 7.3: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo II. Curado normalizado.....	64
Figura 7.4: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo II. Curado a vapor y luego al aire.....	65
Figura 7.5: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo III. Curado a vapor y luego al aire.....	65
Figura 7.6: Curvas y expresiones de resistencia vs. edad. Hormigones del grupo III. Curado normalizado.....	66
Figura 7.7. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo I.....	68
Figura 7.8. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo II..	69
Figura 7.9. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo III.....	70
Figura 8.1: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado H-17. (3/8"- ultraseco).....	75
Figura 8.2: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-21/25. (3/8"- ultraseco).....	75
Figura 8.3: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-30. (3/8"- ultraseco).....	76
Figura 8.4: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-17. (3/8"- plástico).....	77
Figura 8.5: Curva y expresión de correlación las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-21. (3/8"- plástico).....	77
Figura 8.6: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-25. (3/8"- plástico).....	77
Figura 8.7: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-30. (3/8"- plástico).....	78
Figura 8.8: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-17. (1"- plástico).....	78
Figura 8.9: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-21. (1"- plástico).....	79

	Págs.
<i>Figura 8.10: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-25 (1"- plástico).....</i>	79
<i>Figura 8.11: Curva y expresión de correlación de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado. H-30 (1"- plástico).....</i>	79
<i>Figura 8.12: Curva y expresión de correlación general de las resistencias curado a vapor y al aire y curado normalizado.....</i>	80
<i>Figura 8.13: Curva y expresión de correlación general de las resistencias curado a vapor y 28 días curado normalizado para cada grupo de hormigones.....</i>	81
<i>Figura 8.14: Correlación entre la resistencia curado a vapor y 28 días curado Normalizado.....</i>	82
<i>Figura 9.1: Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo I. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	86
<i>Figura 9.2: Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo I. Curado normalizado.....</i>	86
<i>Figura 9.3: Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo II. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	87
<i>Figura 9.4: Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo II. Curado normalizado....</i>	87
<i>Figura 9.5: Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo III. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	88
<i>Figura 9.6 Resistencia vs logaritmo de la madurez. Grupo III. Curado normalizado....</i>	88
<i>Figura 9.7: Resistencia vs madurez. Grupo I. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	90
<i>Figura 9.8: Resistencia vs madurez. Grupo I. Curado normalizado.....</i>	90
<i>Figura 9.9: Resistencia vs madurez. Grupo II. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	91
<i>Figura 9.10: Resistencia vs madurez. Grupo II. Curado normalizado.....</i>	91
<i>Figura 9.11: Resistencia vs madurez. Grupo III. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	92
<i>Figura 9.12 Resistencia vs madurez. Grupo III. Curado normalizado.....</i>	92
<i>Figura 9.13: Resistencia vs madurez. Todos los hormigones. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	93
<i>Figura 9.14 Resistencia vs madurez. Todos los hormigones. Curado normalizado.....</i>	93
<i>Figura 9.15: Log. resistencia vs log. madurez. Todos los hormigones. Curado a vapor y luego al aire.....</i>	94
<i>Figura 9.16: Log. resistencia vs log. madurez. Todos los hormigones. Curado normalizado.....</i>	94
<i>Figura 10.1: Resistencia media en función de la relación a/c.....</i>	103
<i>Figura 10.2: Variación de la resistencia media 28 días en función de c/a.....</i>	103

Listado de símbolos

t : Tiempo

T_r : Temperatura de reacción en el elemento de volumen considerado.

ρ : densidad del hormigón

c : calor específico del hormigón.

H : entalpía en reacción.

λ : conductividad térmica del hormigón.

n : índice del grado de reacción

x, y, z := coordenadas espaciales.

τ : tensión de empuje

α : coeficiente de dilatación térmica

G : módulo de compresión

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura

P : peso

PU_s : peso unitario suelto

PU_c : peso unitario compactado

M_f : módulo de fineza

T_{max} : tamaño máximo del agregado

s : porcentaje de agregado fino

g : porcentaje de agregado grueso

$\#$: abertura del tamiz utilizado en granulometría

$H-17$: hormigón de resistencia característica a compresión de 17 MPa.

$H-21$: hormigón de resistencia característica a compresión de 21 MPa.

$H-25$: hormigón de resistencia característica a compresión de 25 MPa.

$H-30$: hormigón de resistencia característica a compresión de 30 MPa.

cn : curado normalizado

cv : curado a vapor

cn y a : curado a vapor y luego al aire.

M_{am} : madurez ambiental, es el producto de tiempo y temperatura media ambiente.

M_a : madurez acelerada, es el producto de tiempo y temperatura durante el tratamiento acelerado.

M_t : madurez total, es la suma de la madurez acelerada y la madurez ambiental.

M_n : madurez normalizada, es el producto de tiempo y temperatura durante el curado normalizado (21^o C).

f_c : resistencia a compresión (MPa)

f_{cm} : resistencia a compresión media (MPa).

f_{ck} : resistencia característica (MPa)

f_{cu} : resistencia media obtenida con el curado a vapor

f_{28cn} : resistencia media obtenida a los 28 días curado normalizado.

a/c : relación agua-cemento en peso.

c/a : relación cemento-agua en peso.

MEZCLAS ÓPTIMAS DE HORMIGÓN CURADAS A VAPOR A PRESIÓN ATMOSFÉRICA PARA PREFABRICACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

por

Silvia Beatriz Palazzi de Villagra Delgado
Ing. Civil

RESUMEN

En este trabajo se estudia una amplia gama de hormigones ultra secos y plásticos destinados a la prefabricación de diferentes elementos estructurales curados a vapor y luego acopiados a la intemperie. Se analiza la influencia de diferentes factores en la evolución de la resistencia a compresión y se establecen correlaciones con el curado normalizado, que permiten estimar la resistencia potencial a partir de mezclas elaboradas en laboratorio.

Se utiliza el concepto de madurez y se introduce el de madurez ambiental para predecir la resistencia potencial de los hormigones utilizados en la prefabricación de dichos elementos estructurales.

En base al conocimiento de la evolución de la resistencia a compresión de hormigones curados a vapor y luego al aire, se propone un criterio que permite seleccionar las mezclas óptimas, que cumpliendo los requisitos en estado fresco y endurecido y las exigencias impuestas por los códigos, resulten económicas contemplando los costos involucrados de los componentes, del tratamiento y del acopio.

THE BEST MIXTURES OF CONCRETE STEAM CURED, TO BE USED IN THE PREMANUFACTURE OF DIFFERENT STRUCTURAL ELEMENTS

by

Silvia Beatriz Palazzi de Villagra Delgado
Ing. Civil

ABSTRACT

In this work a wide range of extremely dry concretes and plastic, to be used in the pre-manufacturing of different structural elements, is studied. They are steam cured and then gathered to the bleakness. The influence of different factors is analyzed in the evolution from the resistance to compression and correlations down with the curing one normalized.

The concept of maturity is used and that of environmental maturity is introduced to predict the potential resistance of the concretes used in the pre-manufacturing of those structural elements.

Based on the knowledges of the evolution of the resistance to compression of steam cured concretes and then to the air, a new criteria is proposed. This criteria allows the selection of the best mixtures that fulfill the requirements in fresh and hardened states and are also economical contemplating the involved costs of the components, of the treatment and of the storing.

CAPÍTULO 1

JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

1.- PLANTEAMIENTO Y SITUACIÓN ACTUAL DEL PROBLEMA

Los requerimientos de progreso por parte de los países desarrollados y en vías de desarrollo han impulsado estudios en el campo del hormigón a límites insospechados, y esto sin lugar a dudas se debe a las múltiples bondades de este material que bien proyectado y ejecutado puede dar lugar a estructuras resistentes y durables, pero su “maduración” es lenta y por lo tanto demora la ejecución y terminación de las obras.

Con miras a solucionar este inconveniente, hace varias décadas se encararon diversos estudios buscando acelerar la maduración del hormigón cuya principal aplicación la encontró la industria de la construcción y la de prefabricación de elementos constructivos a base de hormigones y morteros. El objetivo fundamental es lograr a través de métodos físicos o químicos o ambos la aceleración del proceso de fraguado y endurecimiento. Según sean las circunstancias, esto puede conseguirse de diversas formas: a) por empleo de conglomerantes especiales: cementos de alta resistencia inicial o de endurecimiento rápido, cemento aluminoso, etc.; b) empleo de aceleradores de fraguado y endurecimiento, como el cloruro de calcio; c) por curado o tratamiento térmico usando por ejemplo, vapor a presión atmosférica o a altas presiones (autoclave).

Todos los métodos tienen ventajas e inconvenientes de orden técnicos y económicos y es importante conocer a fondo cada uno de ellos para elegir el más adecuado, teniendo presente que a veces se pueden superponer mas de un método para obtener mayores beneficios y en otros casos no. Por ejemplo:

a)- el empleo de aditivos químicos a base de cloruro de calcio que aceleran la resistencia del hormigón logrando a los siete días la de los veintiocho, puede usarse con cemento de alta resistencia inicial o con curado térmico, aunque puede favorecer la corrosión de la armadura siendo tanto más comprometido el caso de hormigón pretensado.

b)- El empleo de cementos de alta resistencia inicial es incompatible con los tratamientos térmicos, pues puede en algunos casos comprometer la resistencia final del hormigón, bajo ciertas condiciones, ya que contiene mayor cantidad de C_3S y por consiguiente de yeso, y éste durante el proceso de fraguado del cemento pierde solubilidad por efecto de las mayores temperaturas del tratamiento térmico, impidiendo la formación posterior de los productos de hidratación que intervienen en la obtención de las resistencias últimas.

Los métodos de naturaleza físico – térmicos, combinados o no con el empleo de aceleradores se han impuesto por sobre los demás, en la prefabricación de elementos de hormigón en serie, a pesar de requerir instalaciones especiales a veces costosas, que se amortizan con las ventajas técnicas y económicas que estos tratamientos aportan como ser: aumento de la producción con ahorro de moldes y mayor rendimiento de éstos al permitir desmoldar las piezas en menor tiempo, ahorro de espacio de curado y almacenamiento, ahorro de mano de obra, etc. lo que mejora considerablemente la productividad.

En general en nuestro medio, y tal vez en el país, la industria de la prefabricación que con preferencia emplea el método de curado a vapor a presión atmosférica, surgió para fabricar viguetas, bloques, postes, todos ellos de empleo masivo y luego fue incorporando otros tipos de elementos estructurales aprovechando las instalaciones para satisfacer un mercado muy variable, que responde a la realidad económica del país y a las inversiones que se realicen para desarrollar la obra pública especialmente, cada vez más empobrecida.

Sin embargo, la apertura al mercado internacional está llevando a que la calidad de los productos deba ser competitiva, por lo que se debe buscar la mejor calidad al menor costo. Esto trae como consecuencia que las plantas de prefabricación traten de optimizar todos los procesos involucrados en la fabricación de los productos.

El primer paso radica en lograr mezclas óptimas y conocer a fondo el comportamiento de las mismas frente al tratamiento térmico de endurecimiento empleado.

La calificación de óptima a una mezcla, está íntimamente relacionada a una serie de pautas como ser: las características de los materiales componentes del hormigón, el tratamiento térmico empleado incluyendo duración de los distintos períodos involucrados, velocidad de calentamiento, temperatura máxima, etc. , la forma y dimensiones de la pieza prefabricada, pudiendo resultar óptima para un conjunto de ellas y no para una variación en alguna de las mismas.

El estudio del endurecimiento acelerado por efecto de la temperatura es posiblemente uno de los más complejos de estudiar en su totalidad, ya que involucra muchas disciplinas científicas: de la química del cemento, de la tecnología del hormigón, de la termodinámica, de los problemas de la tecnología del calor, con todas las posibles fuentes de éste: energía eléctrica, vapor, infrarrojo, aire caliente, y agua caliente. Por lo tanto sin un cabal conocimiento de ellas es imposible arribar a resultados satisfactorios, o peor aún juzgar las propiedades de un hormigón sometido a algún tratamiento específico.

2.- BREVE RESEÑA HISTÓRICA

En la obra, “Endurecimiento rápido del hormigón” del Ing. Zorislav Frajezić, traducido al español por el Dr. José Callejas Carrete del Instituto Eduardo Torrojas de España, se reúne toda la información escrita aisladamente sobre el tema, tratado en profundidad pero accesible, que ha permitido comprender la problemática y encontrar la respuesta a un gran número de interrogantes involucrados en el estudio de tan complejo tema como es el endurecimiento rápido.

En este punto se resume la información sobre el desarrollo histórico y los conocimientos actuales sobre los tratamientos térmicos especialmente los métodos de curado a vapor a presión atmosférica y a altas presiones o de autoclave para lo cual hubo que recorrer un largo camino con muchos retrocesos.

Así Monier y Lambot no sospecharon a dónde conducirían sus experimentaciones de aficionados, ni Michaelis con sus estudios sobre acelerar con calor la producción de elementos silicocalcáreos. De allí que debemos agradecer a la producción de estos elementos y a los ensayos de cemento el surgimiento de métodos para acelerar el endurecimiento del hormigón.

Michaelis en 1882 registró una patente por la que indicaba que por acción del vapor durante 24 horas a temperaturas de 140 a 180⁰C se podía acelerar mucho el endurecimiento del cemento. Así mismo Biehl publicó las siguientes recomendaciones para lograr en 2 días la resistencia a los 28 días del cemento :

- Que la resistencia alcanzada dependía de la duración del tratamiento a vapor y de la temperatura, con lo cual las condiciones óptimas varían para los distintos cementos,
- Que existe un máximo óptimo para la duración del tratamiento.
- Que por medio de curado combinado puede alcanzarse a corto plazo la resistencia a los 28 días.

Con los trabajos de R. J. Wig y R. F. Havlik , publicados en 1907 y 1911, sobre hormigones endurecidos con vapor a presión se conocen las ventajas de este método. Estudiaron distintos tiempos de tratamientos , desde 3 a 48 horas, desde 1 a 6.6 atm. de presión. Constataron que se podían obtener mejores resistencias con relaciones a/c algo mayores .T. Thorvalson demostró que la durabilidad frente al ataque de agresivos minerales mejoraba mucho, y particularmente al ataque de disoluciones de sulfato magnésico.

Por la misma época el Bureau of Standards de E.E.U.U. publicó trabajos de investigación acerca de la acción del vapor de alta presión sobre distintos cementos. El informe mencionaba que un grupo de cementos no resistían el vapor a 100⁰C durante 5 horas, mientras que otros resistían esta prueba pero no presiones de 20 atm. durante 2 horas. Finalmente, que otro grupo de cementos resistía el vapor y las altas presiones.

Los trabajos de Karl Menzel y Morbelli aportaron nuevos conocimientos sobre la adición de cuarzo finamente molido, y en especial su efecto beneficioso en el tratamiento con vapor a altas temperaturas. Esto condujo a determinar que, junto al fraguado y endurecimiento normal se produce una reacción secundaria entre el hidróxido cálcico liberado durante el fraguado del cemento y los componentes silícicos activados durante el tratamiento, conocido como efecto silícico.

A partir de 1930, con el desarrollo de una potente industria, surgieron numerosos trabajos, Ippach explicó las altas resistencias logradas en mezclas de cal y polvo de cuarzo. Le siguen Brocard, Woodworth, Mansfield. Hansen, que estudiaron la influencia sobre la resistencia del tiempo que transcurre entre la fabricación y el tratamiento térmico.

Los estudios de Pearson sobre la influencia del tipo y contenido de cemento, de los áridos, de la duración del período preliminar, condujeron a que para distintas

combinaciones de presión y temperatura se podían obtener mayores resistencias que las logradas con curado normal.

Con el desarrollo del hormigón pretensado y la necesidad de obtener resistencias altas tempranas para poder tesar los cables, Freyssinet ideó un método que consistía en someter al hormigón fresco a una compresión, al mismo tiempo que se lo vibraba, con el fin de expulsar el agua excedente, reduciendo la relación a/c. Esto se realizaba en moldes cerrados los que se sometían a calentamiento. De acuerdo con esta idea el método se llamó “endurecimiento en molde cerrado”. Los estudios de Riha permitieron que tenga gran difusión en Checoslovaquia.

Debido al frío clima nórdico, los suecos Brund y Bochlin desarrollaron la utilización del calentamiento del hormigón, haciendo pasar corriente alterna de bajo voltaje a través de él. A. Réthy desarrollo en Rusia una adaptación de este método, reemplazando los electrodos planos por hierros redondos de deshecho.

Con el desarrollo de la industria del hormigón los rusos realizaron numerosas investigaciones a partir de 1932. En el largo listado figuran Satalkin, Porozki, Voljenski, Mironov, y Mchedlov - Petrossian, llegando a importantes conclusiones respecto al apisonado del hormigón después de fraguado, por las altas presiones que conduce al deterioro por la formación de fisuras, como así también del aumento de la resistencia por la inclusión de escorias siderúrgicas, cuando se conserva al hormigón antes del fraguado a temperatura de 0°C.

Los trabajos realizados en Europa Occidental por Czernin, Graf, Saul, Meyer, Nese, Reinsdorf, condujeron a aclarar muchos problemas relacionados con los tratamientos de endurecimiento rápido.

No pueden quedar sin mencionarse los trabajos mas recientes de Price, Malhotra, Newman., Callejas, Polowman, que realizaron valiosísimos aportes a los conocimientos actuales.

3. PROPÓSITOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo tuvo su origen, en la necesidad de una industria local, que debía optimizar las mezclas de hormigón curadas a vapor a presión atmosférica utilizadas en la prefabricación de elementos de *hormigón simple* como caños de gran diámetro, de *hormigón armado*, como vigas y columnas, y de *hormigón pretensado*, como viguetas y elementos para superestructuras.

Actualmente gracias al esfuerzo de diversas instituciones extranjeras se cuenta con recomendaciones que permiten orientar respecto a los múltiples factores que intervienen en el problema de los métodos de curado acelerados, tal es el caso del Comité 517 del ACI cuyo contenido resumido figura en el Apéndice A, mientras que nuestro Reglamento CIRSOC fija pautas muy generales, dejando librada al Director de Obra la aprobación, metodología, procedimientos, equipos, elementos, e instalaciones a emplear para el curado a vapor de elementos estructurales de hormigón. (Reg. 201 – Cap. 7, inc. 7.12.3, a)) y el Capítulo 8 sobre prefabricación aún está sin ser publicado.

En el estudio de las mezclas óptimas de hormigones que satisfagan los requerimientos en estado fresco y endurecido de ciertos elementos prefabricados nos encontramos frente a diversos problemas, todos ellos especiales dentro de la Tecnología del hormigón.

En primer lugar, los métodos tradicionales de dosificación, como son los propuestos por el ACI (American Concrete Institute), y el C.I.R.S.O.C. (Centro de Investigaciones y Reglamentos de Seguridad para Obras Civiles), no siempre conducen a pastones de pruebas que respondan a los requerimientos planteados. Resulta particularmente interesante que para la amplia gama de mezclas que se requieren en la fabricación de distintos elementos prefabricados de hormigón, un gran número de ellas corresponden a micro hormigones de consistencia muy seca, y en este sentido la bibliografía y la experiencia es mas limitada. Si bien es cierto no es indispensable contar con un método para dosificar hormigones, cuando se carece de experiencia la aplicación de uno puede ahorrar tiempo, esfuerzo y materiales hasta encontrar las cantidades de los componentes de la mezcla más adecuada.

Siendo la dosificación de los hormigones a utilizar el primer paso obligado, se hará algún comentario sobre la aplicabilidad a las características de los materiales empleados en este trabajo, de los métodos de dosificación antes mencionados.

Cuando se habla de mezclas óptimas desde el punto de vista ingenieril, nos estamos refiriendo a aquella que de todas las otras posibles que también responden a los requisitos preestablecidos, sea la más económica, traducida esta economía, no sólo en el menor contenido de cemento, sino en la elección del ciclo de curado a vapor a presión atmosférica más adecuado, el costo adicional de curado húmedo hasta alcanzar el 80% de f_{ck} más el coeficiente k_1 (según lo establece el reglamento C.I.R.S.O.C. 201 apart. 7.12.3. inciso g)), que repercute en mayor tiempo de acopio y su correspondiente costo adicional, sobre todo en el caso de viguetas por el espacio que requieren y por la gran demanda que habitualmente existe de las mismas.

Se hace necesario estudiar para un ciclo de curado a vapor predeterminado la influencia o no del tamaño máximo del agregado, de la consistencia de la mezcla, factores estos que hacen variar la porosidad de las mismas y por lo tanto la efectividad del tratamiento térmico.

Habitualmente se controla la resistencia del hormigón tratado con curado acelerado, en probetas normalizadas y ensayadas a compresión una vez terminado el tratamiento y enfriadas hasta temperatura ambiente evaluando el porcentaje de la resistencia potencial a 28 días lograda con el tratamiento.

Otro grupo de probetas luego del tratamiento se las sumerge en agua hasta la edad de ensayo para controlar las resistencias finales y la buena elección del tratamiento. De esta forma la condición de saturación es permanente y no cambia respecto a la del curado normalizado por lo que es de esperar solo una aceleración de la resistencia en el tiempo.

Sin embargo, para abaratar costos de producción, se busca obtener al finalizar el curado acelerado el 80% de la resistencia f_{ck} más el coeficiente k_1 , evitando así el

curado húmedo adicional, y las piezas prefabricadas son acopiadas a la intemperie. Resulta necesario pues conocer el grado de endurecimiento del hormigón del elemento estructural para lo que se moldean probetas normalizadas que se curan junto al correspondiente elemento estructural y se las mantiene junto a ellos en la etapa de exposición al aire.

Por ello se buscan establecer correlaciones entre:

1. *La resistencia potencial del hormigón y la resistencia acelerada, medida sobre probetas normalizadas una vez concluido el curado a vapor a presión atmosférica.*
2. *La resistencia potencial del hormigón y el grado de endurecimiento del hormigón del correspondiente elemento estructural juzgado a través del ensayo a compresión de probetas normalizadas y depositadas junto al mismo tanto durante el tratamiento térmico como durante su acopio a la intemperie, hasta la edad de ensayo. En la situación de acopio a la intemperie hay una suspensión del curado y las condiciones de exposición dependen del medio ambiente.(época del año, temperaturas medias y humedades relativas diarias, etc).*
3. *La resistencia potencial del hormigón y el grado de madurez.* Cuando se evalúa la evolución de la resistencia en condiciones de curado normalizado en el que la humedad relativa mayor del 95%, el concepto de madurez resulta absolutamente válido. En algunos casos puede aplicarse el concepto de madurez para ajustar el ciclo de curado a vapor y para estimar la resistencia acelerada.
4. *El grado de endurecimiento y el grado de madurez ambiental.* En este caso al cambiar la condición de humedad relativa próxima a la de saturación, se estudiará la posible aplicación del concepto de madurez, para evaluar la evolución del grado de endurecimiento, que llamaremos madurez ambiental, (pues es en las condiciones de humedad relativa del ambiente de exposición).

Todas las expresiones de correlación se obtendrán con el programa Microsoft Excel.

En base al conocimiento de la evolución de la resistencia a compresión de hormigones curados a vapor, y de correlaciones encontradas entre resistencia acelerada y resistencia potencial, se procurará proponer un criterio que permite seleccionar las mezclas óptimas que cumpliendo los requisitos en estado fresco y endurecido resulten económicas contemplando los costos involucrados de los componentes, del tratamiento y del acopio.

4. METODOLOGÍA UTILIZADA Y PLAN DE TRABAJO

Con los antecedentes reunidos sobre el tema: métodos de curados acelerados del hormigón y curado a vapor a presión atmosférica, se hizo una evaluación del estado actual del conocimiento que orientaron a planificar el trabajo de la forma:

- a)- Estudio de las propiedades físicas de los materiales a emplear.

b)- Revisión de los métodos de dosificación mas usados.

c)- Elaboración de los hormigones en laboratorio con las características requeridas en la planta para distintos elementos estructurales. Control de las propiedades en estado fresco y moldeado de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura y curado según lo establece la Norma IRAM 1524, para condiciones de temperatura y humedad constantes, y ensayadas s/ IRAM 1546 para control de la resistencia a compresión.

d)- Reproducción de los hormigones a escala natural, moldeo de elementos estructurales y de las correspondientes probetas cilíndricas para control de la resistencia s/ IRAM 1546.

e)- Análisis de los factores que influyen en la resistencia a compresión

- El tamaño máximo del agregado, manteniendo la consistencia
- La consistencia de la mezcla manteniendo el tamaño máximo.
- El tipo de curado.
- Riqueza de la mezcla

f)- Estudio de la evolución de la resistencia a compresión con la edad medida sobre probetas normalizadas que recibieron: curado normalizado permanente (resistencia potencial del hormigón), curado a vapor a presión atmosférica (resistencia acelerada) y curadas a vapor y luego acopiadas al aire.(grado de endurecimiento del hormigón del correspondiente elemento estructural)

g)- La efectividad del tratamiento acelerado se evaluó a través de la observación del aspecto del hormigón para verificar la ausencia de fisuras y por el control de la resistencia siempre creciente con el tiempo.

h)- Correlación de la resistencia potencial (curado normalizado) y el grado de endurecimiento (curado a vapor y luego al aire), buscando ecuaciones que permitan predecir el grado de endurecimiento del hormigón estructural a partir de la resistencia potencial.

i)- Estudio de la evolución de la resistencia potencial y acelerada con la madurez.

j)- Estudio de la validez del concepto de madurez ambiental para predecir el grado de endurecimiento.

k)- Se propone un criterio para evaluar la optimización de las mezclas.

j)- Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones analizadas en detalle en los correspondientes capítulos, y se proponen líneas para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

1. – INTRODUCCIÓN

La necesidad del endurecimiento rápido, está ligada al máximo con la industrialización de la fabricación de hormigón y con la prefabricación. Como el tema de estudio es precisamente evaluar el comportamiento de distintas mezclas de hormigón elaboradas para la prefabricación de distintos elementos estructurales utilizados en obras civiles, que reciben curado a vapor a presión atmosférica, parece pues correcto proceder a una revisión bibliográfica sobre los temas que están involucrados en este estudio particular como ser: a) *análisis de los fundamentos de la tecnología de los conglomerantes hidráulicos, especialmente el cemento, métodos de curado acelerado y en especial curado a vapor a presión atmosférica, b)* los procesos físicos, químicos y termodinámicos involucrados en los tratamientos de curados térmicos, c)* métodos de curado acelerado y en especial curado a vapor a presión atmosférica y d) el método de la madurez para estimar la resistencia del hormigón del elemento estructural prefabricado y curado a vapor a presión atmosférica.

* (Extraído del libro "Endurecimiento Rápido del Hormigón" del Ing. Dipl. Zorislav Franjetić, traducido al español por el Dr. José Calleja Carrete del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento – Madrid 1971.

2.-FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS.

2.1.- Cemento Pórtland

Bajo esta denominación está comprendido un grupo de conglomerantes cuyas propiedades varían considerablemente de unos a otros en función de la composición del clinker. Los cementos con elevado contenido de alúmina endurecen de forma relativamente rápida, con gran desprendimiento de calor. Por el contrario, los cementos belíticos endurecen más lentamente y ceden escaso calor. Puesto que las materias primas para la fabricación del cemento presentan ciertas diferencias, se obtienen un gran número de variedades de este conglomerante. Estas diferencias son importantes en un tratamiento térmico, pues según sea el cemento alcanzan la resistencia a los 28 días, más rápida o más lentamente. Entre los óxidos más importantes presentes están:

- el óxido cálcico: C_aO .
- La sílice (anhídrido silícico) SiO_2
- La alúmina Al_2O_3
- El óxido férrico Fe_2O_3

así como pequeñas cantidades de óxidos magnésicos, sódico y potásico, de yeso, pérdida por calcinación y residuo insoluble.

Durante la cocción de la materia prima, los óxidos forman silicatos, aluminatos y ferritos. Los silicatos constituyen el material base del clinker, siguiéndoles los aluminatos. Los componentes potenciales son el silicato tricálcico o alfa (C_3S), silicato dicálcico o belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF). También puede contener ferrito monocálcico(CF)y ferrito bicálcico (C_2F). El 70 % al 80 % de la composición lo constituyen los silicatos y el resto lo constituyen los demás componentes , llamados fase fundente. El clinker consta además de un componente amorfo, cuya cantidad depende de la velocidad del proceso de enfriamiento.

La cal libre contenida en el cemento se encuentra empotrada en una estructura cementada por la fase líquida solidificada y ni siquiera por una molturación fina se hace

accesible al agua de amasado (apagado). El aumento de volumen debido a la cal libre aparece después, cuando ya ha tenido lugar el proceso de endurecimiento del cemento. Este proceso es muy acelerado por el tratamiento hidrotérmico y su velocidad crece con la temperatura. Incluso los crudos perfectamente calculados desde el punto de vista químico pueden dar lugar a expansión por cal libre, si los componentes no se muelen a finuras suficientes. A pesar de la presencia de la fase líquida, la reacción puede no ser completa, y entonces queda cal sin combinar. Así mismo una combinación completa, solo tiene lugar si la temperatura de cocción es suficientemente elevada.

Dado que no es fácil distinguir entre si pequeñas cantidades de cal libre (CaO) e hidróxido cálcico (Ca(OH)_2), las normas para cementos prescriben el ensayo de estabilidad de volumen para evitar con seguridad la expansión por la cal libre.

La pérdida por calcinación, es la pérdida porcentual de peso que experimenta una muestra de cemento cuando se calienta a 1000°C . Se produce entonces la evaporación del agua tomada en el proceso de fabricación y el desprendimiento del dióxido de carbono. Esta pérdida influye en el comportamiento durante el endurecimiento y sobre todo en la velocidad con que transcurre el proceso.

El residuo insoluble es la parte que no se disuelve del cemento al tratarlo con ácido clorhídrico. Su valor da idea del grado de plenitud del curso de las reacciones en el horno.

La composición química del cemento portland tiene gran importancia en el curso del endurecimiento con el tiempo. Algunos investigadores sostienen que los cementos ricos en C_3S son más apropiados para los tratamientos térmicos.

2.2.- Naturaleza de los productos de hidratación.

Se llama hidratación del cemento al conjunto de reacciones que se verifican con fijación de agua y sin descomposición de la materia base reaccionante. Cuando la fijación de agua va acompañada a una descomposición del material de partida, recibe el nombre de hidrólisis. En el endurecimiento del cemento se dan ambos procesos aunque se acostumbra a designarlos como hidratación. Su velocidad depende de varios factores como ser la composición química y mineralógica, la finura, la temperatura de endurecimiento, la relación agua/cemento, etc.

De todos los minerales del clinker es el aluminato tricálcico el que más de prisa se hidrata, le siguen el ferrito-aluminato tetracálcico, el silicato tricálcico y finalmente el silicato bicálcico. Los minerales que más rápidamente se hidratan fijan el agua en la primera fase del endurecimiento más intensamente que los de hidratación mas lenta, aunque con el tiempo se compensan esas diferencias. Una elevación de la temperatura eleva por regla general la fijación de agua, y por el contrario una disminución la retrasa.

Es sabido que durante el endurecimiento una parte de la cal no se integra sino que se separa en forma de Ca(OH)_2 , esto debido a la hidratación del silicato tricálcico, y bicálcico, ya que los demás compuestos no desdoblán cal libre Ca(OH)_2 , sino que por el contrario la fijan.

El agua químicamente combinada es aquella que no puede ser expulsada por secado de la pasta de cemento a 105°C . En una pasta endurecida la cantidad de esta agua obtenida por vía experimental es aproximadamente del 25 %. La superficie específica de la pasta guarda siempre proporción con la cantidad de agua combinada, la que permanece constante durante el avance de la hidratación.

El gel de cemento contiene el agua combinada químicamente por los compuestos del cemento, la cual alcanza el 25 % del peso de este. Pero además el gel presenta un importante volumen de poros, cuyo orden de magnitud es del 25 % del volumen total, y que se fija en la superficie y en los minúsculos huecos de un entramado de cristales de tamaño coloidal. El agua de gel puede desprenderse por desecación, dejando el correspondiente espacios de poros, pero a pesar de esta unión relativamente débil, no puede reaccionar con el cemento no hidrolizado.

La hidrólisis puede definirse como una reacción en la que el agua reacciona con una combinación y la descompone en partes más sencillas; por ejemplo cuando el silicato tricálcico reacciona con el agua, una parte del calcio se separa como hidróxido cálcico o cal, quedando un silicato cálcico más sencillo, que contribuye por regla general a la resistencia final del hormigón. Entonces es preciso que se hidrolicen los silicatos cálcicos complejos para que se formen los sencillos que son necesarios.

La hidratación en cambio significa la inmediata agregación de una o más moléculas de agua a un compuesto. No es ni una absorción de agua ni una condensación superficial, sino una incorporación del agua a la estructura cristalina del compuesto. Esta agua es imprescindible para la formación cristalina sólida, sin ella la combinación solo existe como masa granular amorfa. Esto es válido para los silicatos y aluminatos cálcicos.

Cuando el cemento se pone en contacto con un exceso de agua, ambos tipos de reacción se producen simultáneamente. Para algunos componentes como es el aluminato tricálcico la hidratación es una reacción que transcurre muy rápidamente. Los cristales de aluminato tricálcico hidratado son la causa del principio de fraguado del cemento. En el silicato bicálcico la hidratación a temperatura próxima a los 20°C , transcurre mucho más lentamente y puede consumirse ampliamente la hidrólisis. Los silicatos cálcicos más sencillos, formados como consecuencias de ella, se hidratan y producen el fraguado final y definitivo del cemento. En un tratamiento hidrotérmico tanto la hidrólisis como la hidratación se aceleran considerablemente.

2.3.- La reacción de endurecimiento

Se ha dicho que cuando el cemento entra en contacto con el agua, unos minutos después del amasado, el agua está saturada de hidróxido cálcico. El silicato tricálcico pasa a la disolución y en seguida se desdobra separándose tobermorita en forma de gel, mientras que la parte de hidróxido cálcico cristaliza paulatinamente de la disolución. Al mismo tiempo el agua toma considerables cantidades de álcalis del cemento, mientras que los aluminatos que se disuelven, precipitan con el yeso que también pasa a la disolución para formar sulfoaluminato cálcico insoluble (ettringita). Estos procesos junto a la formación de gel conducen muy pronto a la consolidación de la masa fresca.

Las prescripciones sobre cementos exigen que durante el período de fraguado este permanezca en reposo, lo que no significa que no se lo compacte, ya que un vibrado, revibrado e incluso presión adecuados durante este período son ventajosos.

Aun cuando el proceso de fraguado y endurecimiento se solapan y no son distinguibles con exactitud, fraguado rápido no significa endurecimiento rápido. El espacio de tiempo para acercarse a la resistencia final de un hormigón depende en parte de la composición química y de la finura del cemento, y en parte, de la humedad y de la temperatura durante el proceso de endurecimiento.

La resistencia final de la pasta de cemento depende casi exclusivamente de la cantidad de agua de amasado. Cuando se cumplen todas las prescripciones de carácter tecnológico del hormigón, la resistencia de una masa conglomerada con cemento queda determinada por la naturaleza de la pasta de cemento y precisamente por la porosidad (agua + aire). La temperatura inicial de la masa de cemento tiene influencia decisiva en la velocidad del endurecimiento. La cantidad de los poros y el aumento de su tamaño debido a un aumento de temperatura, tiene influencia primordial en todo tratamiento térmico.

2.4.- La porosidad.

La regla de la relación agua-cemento, se basa en el hecho de que la porosidad de la pasta de cemento depende de la cantidad de agua de amasado utilizada, y es el fundamento de la tecnología del hormigón.

La compactación del hormigón fresco es una condición indispensable para lograr buenas resistencias. Los poros eventuales hay que incluirlos en la cantidad de agua y repercute en la relación agua-cemento como un aumento de dicha agua, ya que para la porosidad de la pasta endurecida de cemento es indiferente que se trate de poros llenos de agua o de aire. Esta regla es también válida en un tratamiento hidrotérmico.

La porosidad queda definida de la siguiente manera:

1. Inmediatamente después del amasado se forma una pasta de cemento y agua, es decir un amasijo de gránulos, cuyos espacios huecos se comunican entre si y están llenos de agua. En este estado de división tan grosero el agua se llama capilar.
2. El cemento es capaz de combinar químicamente un 25 % de su peso en agua hasta su hidratación completa. Esta agua es no evaporable.
3. Por su combinación química el agua pierde aproximadamente un cuarto de su volumen.
4. Además del agua combinada químicamente, hay otra agua unida en forma débil, como agua de gel. Esta agua es evaporable.
5. Los productos de reacción del cemento y el agua constituyen una masa sólida, coherente y homogénea llamada gel de cemento.
6. La porosidad total de esa masa, poros capilares mas poros de gel, determinan su resistencia.

En base a lo enunciado se ve que el cemento a convertirse en gel duplica con exceso su volumen, y que al mismo tiempo el volumen inicial del agua se reduce en una cuarta parte. Un resultado de la compresión del agua químicamente combinada es

la llamada “retracción”. Con relaciones agua-cemento menores a 0,4 una parte del cemento queda sin hidratar.

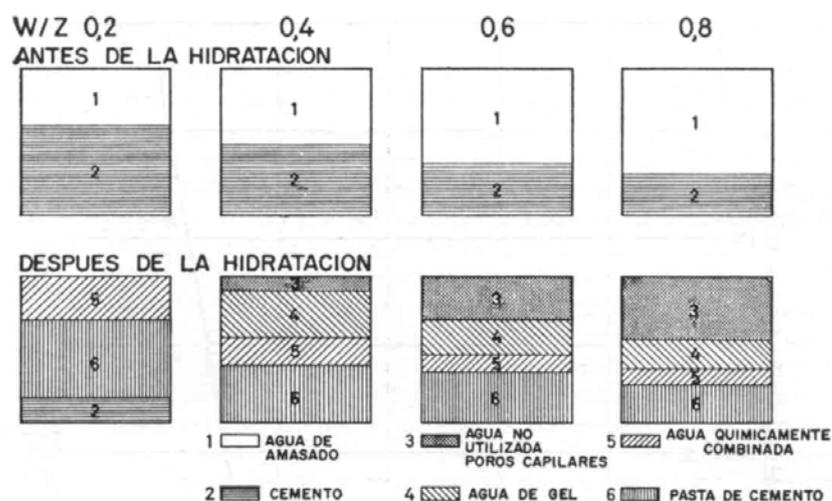


Fig. Nro. 2.1: Proporciones volumétricas en la pasta de cemento antes y después de la hidratación para distintas relaciones agua/cemento. Del libro *Endurecimiento Rápido del Hormigón* del Ing. Franjetç.

Las características del gel de cemento y del contenido de poros capilares desempeñan un papel muy importante en la resistencia, densidad y estabilidad del hormigón. Así para $a/c=0,5$ un octavo del volumen de la pasta está integrado teóricamente por poros capilares; para $a/c=0,7$ ya un tercio está integrada por poros. La parte de agua absorbida en los poros del gel ejerce influencia en la permeabilidad del hormigón a los gases, por lo que en el margen de temperaturas normales ésta depende del contenido de humedad y de la temperatura.

En los tratamientos térmicos del hormigón, aplicados cuando aun su masa esta fresca, la influencia de los poros de aire, es mucho mayor que la de los poros de agua, pues el coeficiente de dilatación térmica del aire es mas de cien veces mayor que la del agua.

2. 5- La finura del molido

Incide en la velocidad de endurecimiento. Cuanto mayor es la superficie que se ofrece al ataque del agua, tanto mayor cantidad de gel de cemento se forma y por tanto mayores resistencias iniciales se desarrollan. Sin embargo a medida que mas gel se forma mas pronto se manifiesta su acción frenante. De allí que el efecto de la mayor finura del cemento sea mas sensible a edades tempranas. Hay que tener presente que además acelera el desprendimiento de calor y aumenta la retracción.

2.6.- La humedad

Por tratamiento posterior o curado del hormigón fresco, se entiende sobre todo al mantenimiento de la humedad sobre todo en el primer tiempo de endurecimiento. Si no

se mantiene la humedad del hormigón puede ocurrir la desecación y con ella el fin del endurecimiento hidráulico. El gel de cemento solo puede formarse en los capilares llenos de agua, si estos se llenan de aire la formación se detiene y puede comenzar de nuevo únicamente si vuelven a llenarse de agua.

La magnitud de los daños de la desecación depende de las dimensiones del elemento estructural. El efecto principal se manifiesta a una profundidad 1cm, puesto que su efecto es mucho mas lento en el interior de una masa de hormigón denso. El riesgo de evaporación se da cuando la masa de hormigón esta mas caliente que el aire que lo rodea, caso de irradiación directa en el hormigonado en invierno o de un hormigón calentado artificialmente. De allí la importancia de un enfriamiento gradual, y de un tratamiento posterior para devolverle la humedad perdida. Si estas prescripciones no se cumplen, se puede esperar una disminución de las resistencias finales de compresión y de tracción como de otras propiedades tales como el módulo de elasticidad.

2. 7.- La temperatura

El proceso de endurecimiento se acelera con las altas temperaturas y se retarda con las bajas. La relación entre el curso del endurecimiento y la temperatura puede expresarse aproximadamente mediante la regla de Saul que dice que la madurez o grado de hidratación de la pasta de cemento puede expresarse como el producto de tiempo y temperatura

$$M = a (T + 10),$$

Siendo:

a: la edad de endurecimiento en días u horas

T: Temperatura dada

10: constante que tiene en cuenta que el fraguado tiene lugar hasta a los -10°C .

Esta regla constituye un punto de partida útil para el caso de cemento portland normal curado a vapor a presión atmosférica y temperaturas próximas a los 60°C .

La influencia de la temperatura es diferente según sea el tratamiento térmico, de allí que no existan fórmulas únicas. Por ejemplo a temperaturas superiores a 100°C , aparecen transformaciones físicas y químicas en la pasta de cemento. Si las pastas de cemento endurecidas en condiciones normales tienen superficies específicas 2 millones de cm^2/g este valor se hace de diez a veinte veces menor cuando las pastas se someten a 180°C durante diez horas, o sea que tiene lugar un crecimiento cristalino que ocasiona un considerable engrosamiento de la estructura. La resistencia de la pasta de cemento en un tratamiento hidrotérmico depende del tratamiento empleado y de su correcta realización. Una realización incompleta puede significar una reducción de la resistencia de hasta un 70 % de la de los 28 días con endurecimiento normal. Las altas resistencias que se logran con los curados en autoclave se deben a la inclusión de polvo fino de cuarzo que a altas temperaturas da origen al llamado efecto silíceo.

2. 8.- La retracción

La retracción química de la pasta de cemento es una disminución del volumen atribuible a la contracción por la combinación química del agua durante el endurecimiento, sin pérdida de peso. El volumen inicial del cemento y del agua es mayor que el de los productos de su reacción. Esta contracción es aproximadamente del 25 %, referida al agua químicamente combinada. La que transcurre con cesión de agua hacia el exterior es la retracción física.

Las condiciones de desecación, que dependen de la humedad relativa del aire y de la velocidad con que este pasa sobre el cuerpo que se seca, juegan un papel importante en la retracción. De igual modo interesa la naturaleza y el tipo de cemento, relación agua-cemento y grado de hidratación. También tiene influencia el dióxido de carbono del aire y el comportamiento de la pasta frente a la fisuración.

El tiempo de secado hace variar la retracción. Cuando transcurre mas lentamente la retracción disminuye. Un tratamiento térmico es uno de los procedimientos de curado posterior mas eficaces para disminuir la retracción. Cuando el cemento endurece a temperatura más altas que las normales, se fuerza un engrosamiento del gel, por el aumento del crecimiento cristalino y con ello una disminución radical de la retracción.

En general con un tratamiento hidrotérmico el hormigón alcanza mucho antes suficiente resistencia como para absorber las tensiones de retracción, lo cual es garantía de grandes ventajas, especialmente en el hormigón pretensado.

3.- CURADO DEL HORMIGÓN

Un hormigón de buena calidad, solo puede lograrse si se cumplen adecuadamente todas las etapas involucradas a saber: correcta dosificación, mezclado, transporte, colocación, compactación y curado.

El curado del hormigón, es la creación de un ambiente adecuado para favorecer la hidratación del cemento y consiste en controlar el movimiento de la temperatura y humedad hacia adentro y hacia fuera del hormigón.

Durante el período de curado es importante mantener al hormigón saturado o lo más próximo posible al estado de saturación, pues la hidratación del cemento solo se logra cuando los capilares están llenos de agua, o la presión de vapor no es inferior a 0.8 de la de saturación, por lo que se debe evitar la pérdida del agua de los capilares por evaporación.(et. al Neville)

La evaporación del agua del hormigón en el momento de su colocación depende de la temperatura, de la humedad relativa del aire del medio ,de la velocidad del viento, de la diferencia entre la temperatura del hormigón y la del medio y de la relación superficie / volumen de la pieza curada.

La hidratación a máxima velocidad solo se presenta en condiciones de saturación, por lo que durante el curado se debe asegurar dicha condición.

En un hormigón colado en obra, el curado activo se interrumpe mucho antes de que sea posible alcanzar la máxima hidratación. En la Fig. Nro. 2.2 Se muestra la influencia del curado húmedo en la resistencia, para un hormigón de relación agua-cemento 0.5.

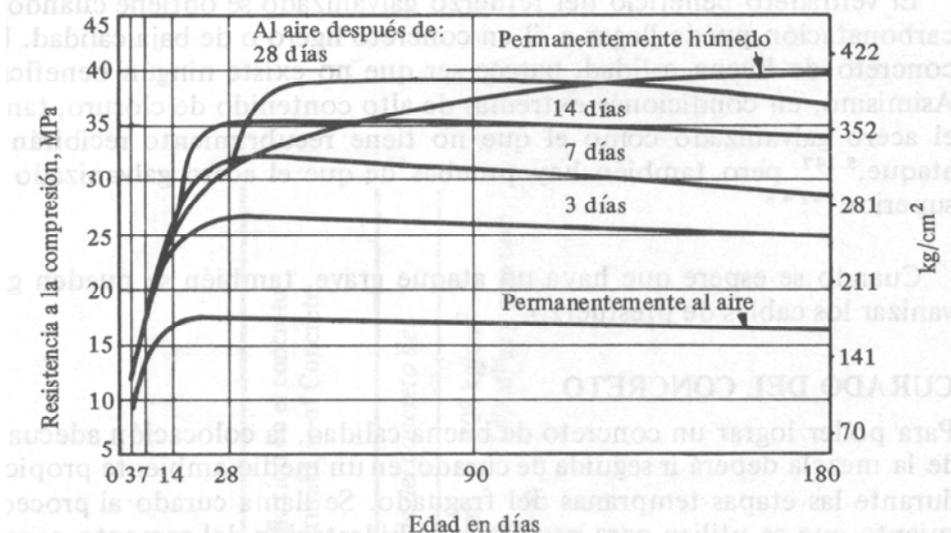


Fig Nro. 2.2: Influencia del curado con humedad en la resistencia del hormigón con relación agua/cemento de 0.5. Extraído del libro Tecnología del Concreto – Tomo2 del Prof. Neville.

Existen numerosos métodos de curado que varían con las condiciones que prevalezcan en la obra, como así también de las dimensiones, forma y posición del elemento estructural.

Los métodos de curado pueden agruparse en curados normales y curados acelerados o de endurecimiento rápido.

Los curados normales se realizan a temperatura ambiente (aprox. 20°C) y a presión normal, colocando los especímenes bajo agua o en atmósfera con humedad relativa mayor que el 95%.

Los curados acelerados se logran sometiendo los especímenes a calor para activar las reacciones químicas involucradas durante el fraguado y endurecimiento del hormigón y evitando la pérdida de humedad. Los métodos más conocidos son:

- **Por aprovechamiento del calor de hidratación del cemento:** Es útil y económico en construcciones locales especialmente masivas y ricas en cemento (puente, cubiertas pesadas). Consiste en impedir las pérdidas de calor y al mismo tiempo la evaporación del agua de amasado. En ciertos casos se deben aislar también los costados de las piezas para evitar pérdidas de agua a causa del aire ambiente más frío.

- **Por calentamiento de los componentes del hormigón: áridos y agua.** Este método se suele aplicar con temperatura máxima de 40°C. El calentamiento del agua surte menos efecto que el de los áridos, dada la relación de masas entre uno y otros.

Para evitar efectos perjudiciales es de vital importancia un calentamiento y mezclado uniforme de los áridos, puesto que los granos mas gruesos de estos acumulan mas calor y por lo tanto pueden dar lugar a tensiones térmicas y a fisuras. Es sumamente importante mantener una humedad relativa de 100% en el aire ambiente.

- **Por aportación de calor hasta 100°C, a la presión atmosférica:**

- ambiente de aire caliente,
- agua caliente,
- con corriente eléctrica,
- con radiación infrarroja,
- con vapor húmedo saturado

El método con calor húmedo o con vapor saturado y sin presión es el tratamiento mas usado en la práctica. Las piezas de hormigón se colocan en recintos que se calientan, para cuyo objeto se utilizan cámaras o túneles transitables, que por un extremo se llenan y por el otro se vacían, y grandes pilas con cubiertas desmontables, cúpulas de vapor e incluso lonas para cubrirlos. Los cierres son sencillos en la mayoría de los casos y por ello con frecuencia no estancos. Son comunes las temperaturas entre 50^o y 80^oC en el recinto de la cámara, ya que los tratamientos a temperaturas inferiores a 50^oC son antieconómicos, puesto que alargan demasiado el tiempo necesario para el tratamiento. Se requiere de una humedad relativa del 100%(mezcla de aire y vapor saturado). Mediante este tratamiento térmico se busca alcanzar la resistencia necesaria para el manipuleo y transporte de los productos de hormigón.

- **Por vapor a presión hasta 20 atm. y temperaturas superiores a 100 °C** (tratamiento en autoclave): Este método fue adoptado por la industria del ladrillo silicocalcáreo. Se lleva a cabo exclusivamente con vapor saturado. Se realiza en una cámara de acero e incluso de hormigón (autoclave), de sección rectangular o circular, las que se pueden cerrar por uno o por los dos extremos mediante cierres rápidos, que deben estar aislados para evitar las pérdidas de calor. Los tiempos de tratamiento son notablemente mas cortos que en el curado a vapor a presión atmosférica y se logran ventajas sobre éste como disminuir la retracción, mejorar la capacidad de resistencia mecánica y química. Para activar la formación de silicatos cálcicos hidratados geliformes, más estables, que mejoran la resistencia de los hormigones, se añade cuarzo finamente molido al conglomerante.

- **Por calentamiento en moldes cerrados:** Este es un método intermedio entre los dos anteriores. Por fuerza, rigidez y compacidad del molde, generalmente de acero, ofrece en el calentamiento una resistencia mayor o menor a los aumentos de volumen. Por medio de esta ayuda es posible acortar el tiempo de curado preliminar. Se utiliza calor o vapor secos, ya que la masa de hormigón fresco no esta en contacto directo con ellos, pues el calor debe transmitirse a través del molde.

- **A cualquier temperatura y presión mayor que la presión de vapor correspondiente:** En este método el fin primordial es reducir las dilataciones térmicas del hormigón y evitar cualquier evaporación o pérdida de calor. El hormigón se fabrica en la forma usual, sin ninguna adición, y se coloca en los moldes. Para transmitir la presión y el calor se pueden usar tanto gases como vapores e incluso líquidos. La presión y la temperatura se mueven en los márgenes deseados entre 1 a 20 atm. y 30 a 200^oC, respectivamente. Los morteros y hormigones fabricados con este método

pueden alcanzar después de 3,5 horas de tratamiento la resistencia de los 28 días normalizada. Se puede aplicar a hormigones de cualquier composición, cualquier cantidad de cemento y cualquier relación agua-cemento.

Cada método tiene ventajas y desventajas que deben ser analizadas a la hora de optar por el más conveniente, sin embargo enumeraremos las principales ventajas técnicas y económicas del curado acelerado que justifican su elección frente al curado normal en prefabricación industrial.

Ventajas técnicas:

- Obtención de mayor resistencia en menor tiempo
- Disminución de la retracción y la fisuración: la magnitud de la disminución está en relación directa con el valor de la temperatura utilizada.
- Resistencias y cualidades uniformes del hormigón
- Aumento asintótico de la resistencia una vez finalizado el tratamiento.
- Ausencia de eflorescencias.
- Posibilidad de disminuir la cantidad de cemento para lograr las mismas resistencias que las logradas con curado normal.
- Mejora la estabilidad del hormigón.
- Aumento de la resistencia química: especialmente a los sulfatos cuando la temperatura del tratamiento supera los 100°C.
- Eliminación de la posibilidad de evaporación del agua en las primeras horas de fabricación.
- Independencia del tiempo atmosférico y de la época del año.
- Garantía de la producción proyectada, por eliminación de influencias externas.

Ventajas económicas

- Acortamiento del proceso de fabricación
- Posibilidad de aumentar el volumen de producción diaria, sin mas inversiones de capital.
- Ninguna interrupción de la producción en los meses de invierno.
- Programa anual proyectado de antemano.
- Independencia de las influencias atmosféricas
- Reducción de la mano de obra.
- Acortamiento de los plazos de entrega.
- Ahorro por disminución de los trabajos posteriores al tratamiento.
- Ahorro por el trabajo de limpieza de encofrados y moldes.
- Disminución del tiempo de almacenamiento y con él del capital puesto en circulación
- Disminución de las cuotas de amortización y de los gastos generales por incremento de la producción diaria.
- Capacidad de adaptación a las oscilaciones del mercado.

4.PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL ENDURECIMIENTO RÁPIDO

Se entiende por endurecimiento rápido de un conglomerante hidráulico, al tratamiento térmico que tiene por objeto acelerar el fraguado o hidratación del mismo de modo que se puedan alcanzar en pocas horas la resistencia que el conglomerante alcanzaría a la edad de 28 días a temperatura normal.

Según el valor de la temperatura empleada se pueden producir dos tipos de reacciones. Hasta 100⁰C solo se manifiesta una aceleración del proceso de hidratación y los productos que se forman son idénticos a los de curado normal. Si la temperatura varía entre 100 y 200⁰C, tienen lugar reacciones adicionales conocidas como efecto silícico, que consiste en la formación nueva de ácido silícico con la cal liberada en la hidratación.

El calor aportado puede producir efectos positivos o negativos. Los primeros se refieren a la aceleración de la hidratación y a la formación de los silicatos hidratados, y los segundos a la mayor variación volumétrica, a la desecación, la disminución de la resistencia o la fisuración.

Numerosos factores influyen en los resultados finales de todo tratamiento térmico tales como: la calidad del cemento, la relación agua/cemento, los aditivos, el tratamiento superficial, el tamaño de las piezas, la forma de las cámaras, las características del vapor, etc., por lo que se deben realizar ensayos previos para verificar si el tratamiento permite alcanzar las resistencias y calidades deseadas.

Una masa de hormigón fresco formada por pasta de cemento y agua, agregados y poros de aire repartidos se somete a calentamiento. Debido al calor aportado y al propio desarrollado durante la hidratación, los componentes activos cambian su estado de manera continua y cada vez con mayor velocidad. Junto a transformaciones físicas de origen térmico tienen lugar la hidratación, la retracción y la consolidación cuyo resultado final es la ganancia de resistencia del hormigón. Los procesos involucrados son de naturaleza física, química y termodinámica.

- Proceso físico:

Con el aumento de la temperatura la masa de hormigón fresco de volumen V aumenta en ΔV , como consecuencia de la dilatación térmica. Este incremento total resulta ser la suma de los incrementos parciales de cada uno de los componentes del hormigón.

Las dilataciones de los áridos no son iguales a las de la pasta de cemento pero ambas son insignificantes respecto a la del agua y especialmente a la del aire siendo su dilatación cúbica 10 veces mayor que la de la pasta de cemento. Por eso las mezclas ricas en agua tienen mayor variación longitudinal que las mezclas más consistentes, y deberían aparecer tensiones al calentarlas que podrían producir microfisuras o macro fisuras. Sin embargo esto no sucede debido a que la retracción produce una compresión interna que contrarresta tal dilatación, siempre y cuando el calentamiento se produzca despacio.

Sabemos que como es imposible lograr una compactación completa, siempre hay aire disperso y saturado en la pasta de cemento. Este aire húmedo aumenta más de cien veces su volumen respecto a la pasta de cemento con el calentamiento. Este volumen de aire calentado tiene gran influencia cuando la resistencia de la pasta no es suficiente para soportarla produciendo una masa porosa.

Una vez concluido el tratamiento hay que enfriarlo. En este proceso debido a la diferencia de presión de vapor entre el medio ambiente y el hormigón, se expulsa de este toda el agua, por lo que se debe proceder al mojado posterior. El enfriamiento debe ser lento para evitar daños a causa de las dilataciones térmicas.

- Proceso químico:

Las reacciones químicas se aceleran debido a las mayores temperaturas aumentando la segregación del hidróxido de calcio y el tamaño de sus cristales, y la superficie específica disminuye a la décima o veinteava parte de la que tiene la pasta de cemento endurecida en condiciones normales (aprox. 2 millones de cm^2/g). La cantidad de hidróxido de calcio varía con los diferentes cementos y las temperaturas empleadas.

Una vez amasado el cemento con el agua, reacciona el silicato tricálcico y por desdoblamiento hidrolítico se forma una solución sobre saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con silicato de calcio hidratado (csh) cuya composición química depende de los factores hidráulicos del cemento original. La cantidad de agua contenida en el silicato hidratado depende de la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A altas temperaturas el C_3S se hidrata para formar silicato tricálcico con agua de cristalización el cual se transforma de nuevo en hidrato alfa.

Dado que el cemento portland tiene alrededor de un 60% de C_3S , estas reacciones tienen gran importancia pues queda gran cantidad de cal liberada en forma de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, las que se intensifican con la temperatura pudiendo manifestar expansiones, por el engrosamiento de sus cristales. (este es el principio del ensayo de expansión en autoclave)

Este hecho junto con la dilatación térmica de los poros de aire húmedo constituyen una causa destructiva de la pasta de cemento. En los tratamientos con vapor a temperaturas inferiores a 100°C estos fenómenos se manifiestan con menor intensidad. Para temperaturas mayores, el desdoblamiento de la cal y su combinación con la sílice son más intensos lo cual hace desaparecer la expansión anterior. Por ello se suele agregar polvo de cuarzo para fijar la cal liberada, formando nuevos silicatos hidratados y logrando con ello un hormigón más sólido y más resistente a disoluciones agresivas.(curados en autoclave)

Resumiendo, se puede decir, que en los tratamientos con temperaturas inferiores a 100°C (como en el curado a vapor a presión atmosférica) los silicatos cálcicos hidratados no difieren en esencia de los del curado normal y que cuando la temperatura es mayor (curado en autoclave) se produce a diferencia que en el curso normal una fuerte cantidad de agua residual con formación de hidratos ricos en cal, que se descomponen en un tratamiento hidrotérmico más prolongado desprendiendo cal,

con lo cual se forman a partir de los silicatos y aluminatos nuevas formas que tienen un escaso contenido de cal. (Franjetić et al. 1972)

- Proceso termodinámico:

En el endurecimiento normal del hormigón no se presentan en general problemas de transmisión de calor. Las reacciones químicas transcurren a temperatura ambiente, la velocidad y la producción exotérmica de calor son pequeñas y no producen grandes gradientes térmicos. Son una excepción las piezas de hormigón de paredes gruesas (mayor que 1m), paramentos de presas o mezclas ricas en cemento. En cambio en los tratamientos térmicos la transmisión del calor es de importancia decisiva, tanto por la duración del tratamiento como para la calidad del hormigón.

Los tratamientos de endurecimiento rápido se basan en que todas las reacciones se aceleran al crecer la temperatura y para llevar a la pieza de hormigón tratada a la temperatura deseada se debe aportar calor. Existen dos formas de aportar calor:

- a) aporte de calor desde el exterior, y
- b) producción de calor por las reacciones químicas en el interior del hormigón (calor de hidratación).

El calor a) se transmite en la mayoría de los casos desde la superficie externa de la pieza de hormigón hacia el interior por conducción. La intensidad de calor es función de la conductividad térmica del hormigón, λ y por la distribución de temperaturas existentes en la pieza.

El calor b) producido por la hidratación tiene lugar en el interior de las piezas y no está ligada a conducción alguna. La intensidad del flujo es función de la velocidad de reacción v , de la temperatura reinante T_r , y de del grado de transformación, n . En el tratamiento hidrotérmico no puede tomarse a este respecto ninguna temperatura del hormigón y por lo tanto ninguna temperatura de reacción T_r . Se obtiene más bien un campo de temperaturas distintas $T_r = f(x, y, z, t)$ según la geometría de la pieza y de las condiciones térmicas en los límites, cuya ecuación diferencial parcial es del tipo:

$$\rho \cdot c_p \frac{\Delta T_r}{\Delta t} = \lambda \cdot v^2 T_r + \Delta H \frac{dn}{dt}$$

T_r = Temperatura de reacción en el elemento de volumen considerado.

ρ = densidad del hormigón

c_p = calor específico del hormigón.

H = entalpía en reacción.

λ = conductividad térmica del hormigón.

n = índice del grado de reacción

x, y, z = coordenadas espaciales.

Los gradientes de temperatura en la pieza de hormigón son mayores cuando mayores son las temperaturas del tratamiento y más cortos los períodos de calentamiento y enfriamiento. Los gradientes demasiado grandes pueden causar

expansiones locales. Si se impide la deformación la tensión del empuje resultante de la dilatación térmica en una dimensión viene dada por:

$$\tau. = \alpha.G \frac{dT}{dx}$$

donde:

$\tau.$ = tensión de empuje

$\alpha.$ = coeficiente de dilatación térmica

G = módulo de compresión

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura

Generalmente la tensión admisible $\tau.$, y los coeficientes α y G son conocidos, entonces se puede determinar, al menos en primera aproximación, el gradiente de temperatura permisible, aunque varían mucho con la resistencia del hormigón.

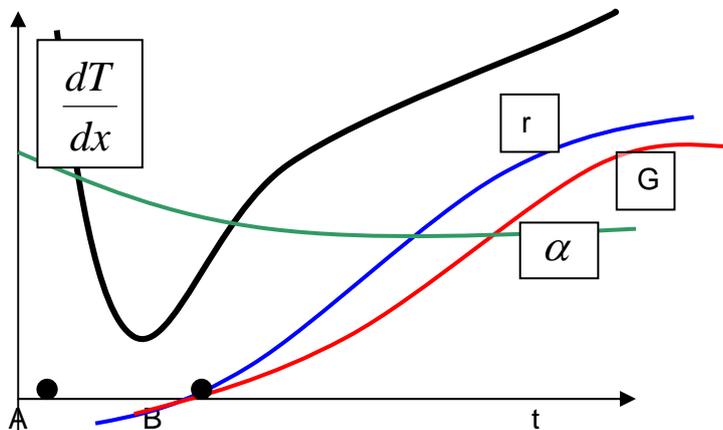


Fig.Nro.2.3: Variación cualitativa de las variables involucradas en el tratamiento.

En la figura 2.3. se representa la variación cualitativa de estas variaciones, y se puede observar que el mínimo gradiente corresponde al inicio de ganancia de resistencia. Cuando el tratamiento térmico comienza en el punto B, o sea después de un tiempo de tratamiento preliminar, se debe elegir la velocidad de calentamiento de modo que los gradientes de temperatura no rebasen los admisibles en cada momento si no se quiere tener pérdidas en la resistencia a los 28 días. Si en cambio el tratamiento comienza en el punto A o sea sin período preliminar, el período de calentamiento puede ser mas corto, pero se debe tener presente que las temperaturas mas altas de reacción se adquieren en cuestión de minutos respecto al inicio de ganancia de la resistencia.

En la práctica solo se tiene en cuenta el calentamiento de la superficie de las piezas de hormigón, con lo que dependiendo de la geometría de la pieza sólo la temperatura de la pared es la que determina la velocidad de calefacción. En este sentido se pueden distinguir dos casos límite:

a). - Cuando la temperatura de la pared es constante: Se lleva por medios externos la temperatura de la pared a una máxima y se mantiene durante todo el tratamiento, trayendo como consecuencia temperaturas variables en la pieza de hormigón. Esto permite emplear períodos mas cortos de calefacción aunque solo

puede emplearse mientras el hormigón está en estado plástico o el espesor de la pared es de hasta 1cm.

b).- Cuando la temperatura de la pared es variable: Se aumenta la temperatura según una función cualquiera del tiempo con velocidad de calentamiento constante y los gradientes de temperatura se distribuyen constante en la pieza de hormigón. En la práctica se debe evitar que dichos gradientes superen los admisibles en cada instante. Para ello se elige el tiempo de calentamiento lo más corto posible y se emplea sólo después del fraguado.

5 .FASES DE CONSOLIDACION DEL PROCESO DE FRAGUADO

El fraguado es un proceso continuamente variable desde el estado plástico al sólido. Durante el mismo se pueden distinguir cuatro fases o etapas que se suceden una a otra sin un perfecto límite.

En términos generales en condiciones normales (20°C), el proceso de fraguado y endurecimiento, para un cemento Pórtland normal y a los fines prácticos, tarda 672 horas (o sea 28 días). Cualquier tratamiento térmico produce un acortamiento de dicho tiempo lo que involucra los correspondientes acortamientos de las fases involucradas. La duración de cada una de ellas depende del tipo de tratamiento, clase y calidad de cemento, densidad del hormigón y dimensiones de las piezas tratadas.

Fase I: tiempo de disolución y de estado plástico. Es de vital importancia y define el tiempo del tratamiento, como la resistencia acelerada y a largo plazo. Se pueden evitar las tensiones de origen térmico y utilizar mayores gradientes de temperatura esto en el caso de que no haya curado preliminar, ya que las piezas se encuentran aun en su fase húmeda y plástica al comienzo del calentamiento. Si existe curado preliminar no es posible usar tales gradientes, pues la pieza está ya fraguada al cabo de unas cuantas horas y por lo tanto se halla sujeta a las limitaciones físicas de la velocidad de calentamiento..

Fase II: tiempo de fraguado y de calentamiento. En esta fase el hormigón esta fraguado y rígido. En los tratamientos con curado preliminar comienza al finalizar éste con el calentamiento de la cámara y termina cuando se alcanza la temperatura máxima. Hay gran condensación de vapor sobre la superficie, como también en los poros de la pieza. La elevación de la temperatura debe ser más lenta a medida que las dimensiones son mayores y más compacta la estructura del hormigón. Una vez alcanzada la temperatura máxima se puede suspender el aporte de calor con lo que termina esta fase. Sin embargo la temperatura en el hormigón asciende 10 a 20°C, y como es mal conductor de calor dicha temperatura se mantiene por algunas horas. Puede durar de 1 a 3 horas.

Fase III: tiempo de consolidación y de calentamiento isotérmico. Es la fase isotérmica y tienen lugar los procesos físico - químicos de la consolidación sin peligro alguno porque los efectos perjudiciales se manifiestan con anterioridad. La duración de la misma depende de la temperatura la que a su vez depende del tratamiento y la resistencia esperada después del mismo. Generalmente dura de 1 a 8 horas.

Fase IV: tiempo de enfriamiento hasta la temperatura normal. En esta fase se renuevan las tensiones de origen térmico las que se deben controlar evitando que se rebasen las velocidades críticas de enfriamiento.

6. CURADO CON VAPOR A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

El curado higrotérmico requiere de calor y humedad simultáneamente, y sin duda, es el vapor de agua el mejor aportador de ellos.

Resulta este método el más fácil de ser llevado a la práctica en forma industrial. Se suele llevar a cabo en cámaras o recintos aislados en los que se produce el vapor o se hace llegar a ellos por medio de conducciones apropiadas. Un buen diseño debe evitar la caída de gotas líquidas que se forman por condensación del vapor en las caras de los elementos tratados. Estas gotas pueden producir expansiones, ablandamientos, y también descascaramientos superficiales.

Se aconseja su empleo en mezclas a base de cemento portland y no de cementos aluminosos ni sobre sulfatados.

Para evaluar la calidad de los elementos tratados se suele tomar la resistencia mecánica a compresión de probetas normalizadas elaboradas con el mismo hormigón y curadas junto a la pieza y se compara con la resistencia de probetas análogas no sometidas al tratamiento, sino curadas en condiciones normales.

Esto permite no sólo controlar la resistencia a edad temprana, sino a edades prolongadas, pues a veces los tratamientos que elevan mucho las resistencias a corto plazo, producen la disminución de las de largo plazo.

Esta posible disminución junto con el costo y la producción se deben tener en cuenta para evaluar la calidad del tratamiento.

Se acepta que la resistencia debe ser siempre creciente con la edad aunque pueda variar el ritmo de dicho crecimiento.

Los tratamientos con vapor a presión atmosférica pueden ser continuos o discontinuos.

Los tratamientos continuos se caracterizan porque no hay interrupción de los períodos de calentamiento y enfriamiento y en general responden al esquema de la Fig. Nro.2.4. Se pueden apreciar cuatro períodos, cuya combinación de tiempos de duración y temperaturas harán variar los resultados de la evolución de la resistencia.

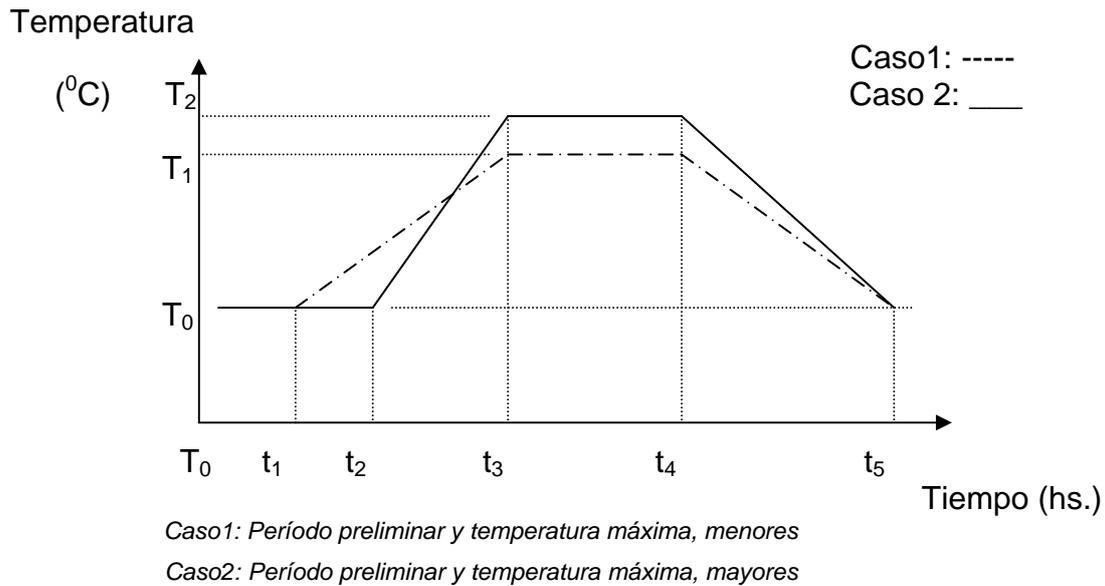


Fig. Nro. 2.4: Tratamientos continuos

a). - Período inicial o preliminar: es el período de tiempo que existe desde el amasado y colocación del hormigón en los moldes y el comienzo de la aplicación del tratamiento propiamente dicho. (de t_0 a t_1 para el Caso 1, y de t_0 a t_2 para el Caso 2)

En general, cuanto mayor es el período, admite mayores velocidades de calefacción y mayores temperaturas máximas de vaporización. (Caso 2).

Suele ser frecuente demorar una a tres horas el comienzo del tratamiento, para lograr buenas resistencias a plazos moderados y largos.

b)- Período de elevación de temperatura o de velocidad de calefacción ($^{\circ}\text{C} / \text{hora}$): Se extiende desde la finalización del período inicial hasta alcanzar la temperatura máxima. (de t_1 a t_3 Caso 1, y de t_2 a t_3 Caso 2)

Cuanto mayor es la velocidad de calefacción, tanto mayores son las resistencias a corto plazo y por lo tanto, más pronto pueden desmoldarse los elementos tratados. Sin embargo esto puede provocar la disminución de la resistencia a largo plazo, la que puede llegar a ser entre un 30 a un 50% menor que la de curado normal. (et.al Callejas Carrete)

Un calentamiento inicial lento, es garantía de un buen endurecimiento, sin pérdidas de resistencia. Los fuertes gradientes de temperatura en el interior del hormigón dan lugar a una hidratación irregular y producen tensiones térmicas y de agrietamiento. Por lo tanto en el calentamiento se debe tener en cuenta la masa del hormigón, cuanto menores son las dimensiones tanto más sensible es la pieza a la velocidad de calentamiento.

Este efecto se puede controlar con períodos de curado más largos y en general parece que existe un límite de la velocidad que depende del tipo y calidad del cemento.

Las velocidades de calefacción más frecuentes varían entre 10 y 20⁰C/hora, siendo las más normales 15 a 20⁰C/hora.

En el caso de piezas armadas o pretensadas no es conveniente una calefacción muy rápida, pues puede perjudicar la adherencia entre hormigón y armadura.

c)- Período de vaporización o de temperatura máxima: Es el tiempo a que está sometido el hormigón a la máxima temperatura.(Casos 1 y 2 de t_3 a t_4)

La temperatura máxima puede alcanzar como máximo los 90⁰C y como mínimo entre 50 y 60⁰C.

Los valores máximos más frecuentes son los comprendidos entre 70 y 90⁰C. Temperaturas menores retrasan el proceso y mayores pueden producir hinchazones por desgasificación del agua de amasado. La temperatura máxima está condicionada tanto por la velocidad de calefacción como por la extensión del período inicial.

La temperatura de la pieza de hormigón no debe en ningún caso llegar al punto de ebullición del agua, a fin de evitar una evaporación de la misma, necesaria para la hidratación del cemento en el hormigón.

Se ha comprobado que en la práctica no es necesario mantener el aporte de calor durante el tratamiento isotérmico. Esto se debe al hecho de que el calor interno de hidratación desprendido por el cemento, no se puede eliminar, y la temperatura del hormigón, aún cortando el suministro de calor, permanece superior a la ambiente. Dado que el hormigón, como mal conductor que es, mantiene la temperatura alcanzada o la pierde en muy escasa medida, la caída de temperatura es muy pequeña.

Por lo tanto esta temperatura de la reacción de hidratación, que depende del tipo y cantidad de cemento empleado, debe tenerse como aditiva a la temperatura máxima del tratamiento, la que como se dijo no debe llegar a los 100⁰C para evitar la ebullición del agua de amasado del hormigón, especialmente en mezclas plásticas.

La permanencia de la temperatura máxima se prolonga a veces hasta dieciséis horas, siendo frecuente ocho, diez, y doce horas.

d)- Período de enfriamiento o velocidad de enfriamiento: (⁰C/hora) es tiempo que transcurre desde el final del período de vaporización, hasta que se alcanza de nuevo la temperatura ambiente o hasta que las piezas salen de la cámara o recinto de curado.(Casos 1 y 2 de t_4 a t_5)

Es aconsejable que el enfriamiento se realice en forma gradual para evitar los choques térmicos y las variaciones de humedad bruscas. Cuanto más lento es este período mejores son los resultados obtenidos, pero lógicamente el límite lo pone el factor económico.

Las velocidades de enfriamiento suelen variar entre 5 y 20⁰C/hora, siendo las más comunes entre 10 y 12⁰C/hora.

Si la temperatura máxima del tratamiento ha sido suficientemente elevada y el período de permanencia largo, se puede alcanzar entre un 50% y un 80% de la resistencia total, que para el caso de hormigón armado y pretensado respectivamente resultan suficientes para proceder al desmolde. Un secado al enfriarse no perjudica entonces al hormigón, y en tales casos se suele proceder a secar con aire caliente o vapor recalentado, de modo que contraigan antes de completar el tesado o proceder al montaje en la estructura.

Sin embargo para aprovechar totalmente el cemento en un hormigón, se debe procurar al hormigón suficiente humedad durante un tiempo determinado, después del tratamiento térmico. Esto si se pretende alcanzar la resistencia a 28 días normalizada en un tiempo razonable y asegurar todas las características de calidad.

d)- Duración del tratamiento: Por supuesto que la duración total dependerá de las duraciones parciales de cada uno de los períodos, y en general pueden variar entre ocho y veinticuatro horas, siendo comunes duraciones entre quince y veinte horas.

El tratamiento es discontinuo, cuando se alternan calefacciones y enfriamientos dentro del mismo tratamiento (caso I), o se dan diferentes ritmos de calefacción (caso II). Un esquema de este tratamiento se puede observar en la siguiente Fig. Nro:2.5.

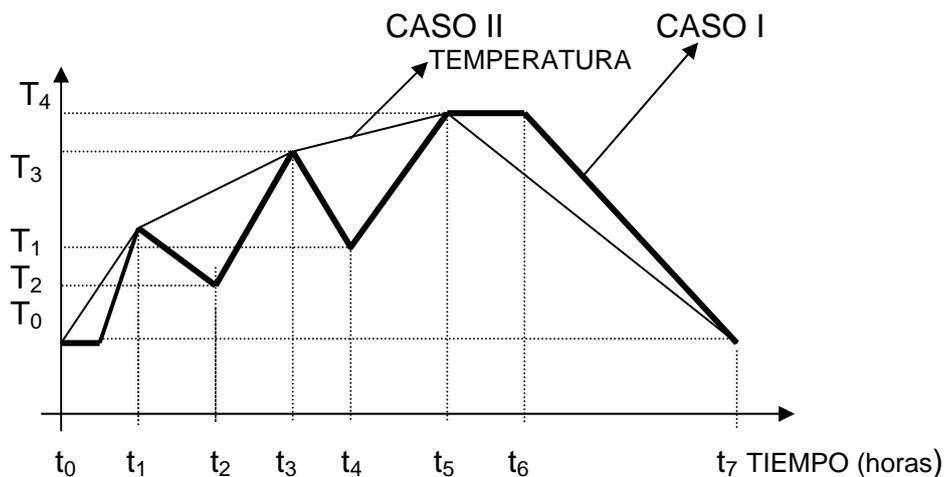


Figura Nro.2.5.: Tratamiento discontinuo

Esto responde a conceptos generales, pero se sabe que no existen combinaciones únicas de tiempo y temperaturas que lleven a resultados óptimos, dependiendo de las dimensiones y superficie de elemento estructural, como así también de los materiales componentes.

Por ejemplo las piezas para mampostería tienen un volumen pequeño y una relación área/volumen relativamente grande por lo que tanto la transferencia de calor como la evaporación es rápida. En las tuberías y elementos prefabricados el curado puede realizarse en moldes y entonces lograr una evaporación mínima, o bien que el volumen sea tan grande que la transferencia de calor sea lenta y que el gradiente de temperatura y esfuerzos entre el centro y la superficie exterior sea elevado, esto conduce a que cada tipo de elemento de hormigón debe analizarse por separado.

A modo de dar una visión mas clara de los resultados esperados se presenta la siguiente tabla tomada de las recomendaciones del ACI y de las recomendaciones del RILEM en Moscú de 1964.y en el Apéndice A, un resumen del ACI 517, sobre Curado Acelerado del Concreto a Presión Atmosférica.

Método	Período Preliminar (hs)	Tiempo de endurecimiento (hs)	Tiempo de enfriamiento (hs)	Tiempo total (hs)	Resistencia a compresión en % de B ₂₈			Adherencia %	Retracción
					B _{v_n}	B ₂₈	B ₉₀		
Endurecimiento Normal		672				100	120	100	1
Calor hasta 100°C presión atmosférica	1	4	3	8	25	60	55	40	0.9
	3	5	3	12	30	70	70	40	
	5	6	2	13	50	80	85	50	
	6	8	2	16	60	90	95	60	
	8	12	2	22	75	95	100	70	
	24	24	1	49	100	110	125	80	

- Cemento NZ 275, 1:3 GT, W/Z=04
- B₂₈ : resistencia a compresión a 28 días, curado normalizado
- B_{v_n} : resistencia a compresión después de n horas de tratamiento
- B₂₈ : Resistencia a compresión a 28 días del hormigón tratado térmicamente.
- B₉₀ : resistencia a compresión a 90 días del hormigón tratado térmicamente

Tabla 2.1: Recomendaciones del ACI y del RILEM – 1964 -

7. MADUREZ DEL HORMIGÓN

7.1.- Concepto

La resistencia del hormigón depende del tiempo o edad de curado y de la temperatura de curado. Cuanto mayor es la temperatura de curado, mayor es la resistencia desarrollada para un tiempo o edad particular.

De la misma forma, para una dada temperatura a mayor edad de curado la resistencia también es mayor.

El concepto de madurez ha sido desarrollado para tener en cuenta cualitativamente en forma conjunta, edad y temperatura de curado y ha dado origen al llamado método de la madurez, que sirve para estimar la resistencia del hormigón de obra a partir de la curva resistencia potencial - madurez obtenida para curado normalizado.

7.2. Método de la madurez propuesto por el A.C.I. 228- 1R-7. Su aplicación y limitaciones.

Se ha explicado ya como el hormigón fresco gana resistencia como resultado de las reacciones exotérmicas que tienen lugar entre el cemento y el agua. En presencia de humedad suficiente la velocidad de las reacciones de hidratación, se ven influenciadas por la temperatura del hormigón, y así un aumento de la temperatura causa un aumento en la velocidad de la reacción. La extensión de la hidratación y por

lo tanto de la ganancia de resistencia a cualquier edad, es una función de la historia térmica del hormigón.

El método de la madurez es una técnica que tiene en cuenta los efectos combinados de temperatura y tiempo en el desarrollo de la resistencia.

La historia térmica del hormigón y su llamada “ función de maduración” se usa para computar un valor de “ madurez” que cuantifica los efectos combinados de temperatura y tiempo. La resistencia de un hormigón en particular se expresa como una función de su madurez, conocida como relación resistencia – madurez (R-M).

Si muestras del mismo hormigón que el de obra se someten a diferentes condiciones de curado, la relación resistencia - madurez para aquel hormigón y la historia térmica de las muestras puede usarse para predecir su resistencia.

La función de maduración es una expresión matemática que convierte la historia térmica del hormigón en un valor de madurez. Muchas de estas funciones han sido propuestas y revisadas por Malhotra (1971) y el RILEM (1981).

La clave de una función de maduración es la expresión usada para representar la influencia de la temperatura en la velocidad del desarrollo de la resistencia. Dos son las expresiones que mas se usan.

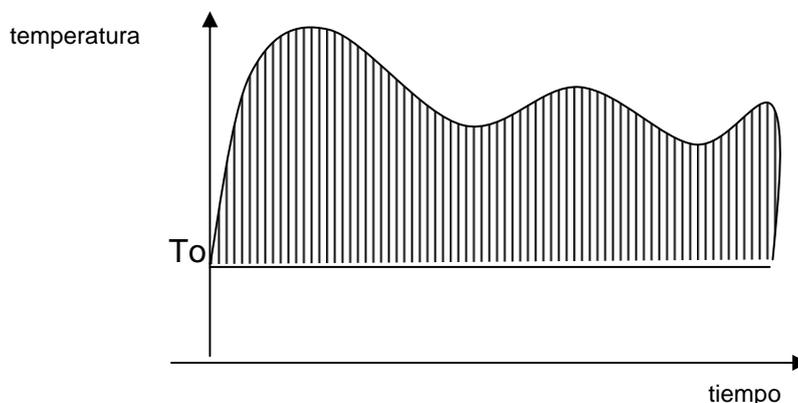


Fig. Nro. 2.6: Función de madurez, basada en asumir que la velocidad de ganancia de resistencia es lineal con la temperatura.

En un caso se asume que la velocidad de desarrollo de la resistencia es una función lineal de la temperatura y esto conduce a una función de madurez mostrada en la Fig. 2. 5. y cuya expresión es:

$$M = \int (T - T_0) dt$$

En este caso la madurez a cualquier edad se cuantifica por el área entre un dato de temperatura T_0 y la curva de temperatura del hormigón. El término “factor temperatura - tiempo se asume como esta área y se calcula como:

$$M(t) = \sum (T_a - T_o)\Delta t$$

donde: M(t): factor tiempo - temperatura a la edad "t", en grados – días o grados – horas.

t: intervalo de tiempo en días u horas.

T_a: temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo t.

T_o: temperatura dato.

Tradicionalmente, la temperatura dato, ha sido la temperatura a partir de la cual el hormigón gana resistencia y se toma como 14F (-10°C). Sin embargo se ha establecido que este valor puede variar, dependiendo de la calidad de los materiales. (Carino 1984).

La norma ASTM 1074 recomienda la temperatura dato de 32F(0°C), para hormigones hechos con cementos tipo I si la temperatura del hormigón está entre 32F y 104F(0 y 40°C). También ilustra el modo de determinar experimentalmente esta temperatura dato, para otros tipos de cementos y diferentes rangos de temperatura de curado.

La otra expresión utilizada en una función de madurez, asume que la ganancia de resistencia varía exponencialmente con la temperatura del hormigón. Esta función exponencial se usa para computar una "edad equivalente" del hormigón a una temperatura específica, y es como sigue:

$$te = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)\Delta t}$$

donde: te: edad equivalente a una temperatura especificada T_s, en días u horas

Q: energía de activación dividida por la constante del gas en °

T_a: temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo t en °K .

T_s: temperatura específica en °K.

ΔT: intervalo de tiempo en días u horas

Para usar la función exponencial se necesita el valor de una característica conocida como energía de activación, la que depende de la naturaleza de los materiales cementicios.

Las relaciones entre la temperatura de activación y la temperatura dato han sido descriptas por Carino en 1984. La norma ASTM 1074 recomienda un valor de Q de 5000 K para hormigones hechos con cementos tipo I, como así también el procedimiento para usar el método de la madurez y como computar el factor tiempo - temperatura o edad equivalente para una historia de temperaturas del hormigón y el

ACI 306 – R ilustra con un ejemplo el uso del factor tiempo – temperatura o factor de madurez.

Resumiendo se puede decir que para utilizar el método de la madurez se requiere establecer la relación resistencia – madurez para el hormigón que será utilizado en la obra. La historia térmica se monitorea continuamente en el hormigón in - situ y con estos datos se calcula la madurez in-situ.(factor tiempo - temperatura o edad equivalente). Conocida la madurez in - situ y la relación resistencia – madurez para las condiciones de curado normalizado, se puede estimar la resistencia in - situ.

Para aplicar el método de la madurez y estimar la resistencia, es necesario cumplir dos requisitos:

- a)- Debe haber siempre suficiente agua para continuar la hidratación.
- b)- El hormigón de la estructura es el mismo con el que se determinan las relaciones resistencia - madurez.

El empleo de métodos adecuados de curado, garantizan el cumplimiento del pto. a) y para satisfacer el punto b) se requiere una confirmación adicional de que la resistencia potencial corresponde al hormigón de la estructura.

Este método tiene mucha aplicación cuando se necesita estimar la resistencia de la estructura para proceder a remover los encofrados o proceder a las tareas de postesado.

7.3. Cálculo de la madurez. Distintas fórmulas propuestas.

La determinación de la resistencia del hormigón in-situ mediante métodos sencillos ha dado impulso a un gran número de estudios que sugieren la aplicación del concepto de madurez. El Ing, V. M. Malhotra ha publicado un valioso trabajo que resume la literatura existente sobre el tema madurez desde 1904 en adelante.

Los primeros estudios corresponden al período 1904 – 1940. Mc.Daniel, Wiley, Timms and Withey, de Estados Unidos, publicaron sus investigaciones referidas al efecto de la temperatura de curado en la resistencia del hormigón, estudiando el tema hormigonado en invierno, y aunque no hacen referencia al concepto de madurez en realidad contemplan el efecto conjunto de tiempo y temperatura.

Durante los años 1940 – 1960 se publicaron un importante número de trabajos sobre el tema en Inglaterra y Europa. En este período Nurse and Saul introducen el concepto de madurez para relacionarlo con la resistencia del hormigón, Bergström introduce algunas modificaciones para describir mejor tal relación, McIntosh, puntualiza las limitaciones y Nykänen, and Bernhardt, sugieren nuevas modificaciones. (Malhotra et. al. 1974).

La regla de madurez propuesta por Saul and Nurse es de la forma:

$$\text{Madurez (} ^\circ\text{C x días)} = a_t (t + 10)$$

donde:

a_t = duración del curado en días
 t = Temperatura de curado en °C

Existen controversias respecto a la temperatura a partir de la cual el hormigón comienza a ganar resistencia. Según Powers ésta corresponde a - 4°C, para Plowman la misma corresponde a - 12.2 °C, y los resultados de Benhardt muestran que a temperaturas tan bajas como - 20°C la ganancia de resistencia persiste aunque se vuelve muy lenta. A pesar de que al respecto se requieren mas investigaciones, se acuerda en que esta temperatura varía entre -12.2 °C y -10 °C.(Neville et. al. 1989).

Rastrup define una función tiempo – temperatura que describe la evolución del calor de hidratación y que correlacionada con la resistencia subestima a ésta respecto a la función de Saul – Nurse. La función de Rastrup es de la forma:

$$a_1 = 2^{(t_2 - t_1 / 10)} \times a_2$$

donde: a_1 : el tiempo de curado a la temperatura t_1
 a_2 : el tiempo de curado a la temperatura t_2

Plowman, expresa la resistencia a cualquier madurez como porcentaje de la resistencia a cualquier otra madurez. Es frecuente tomar la madurez de referencia como 19800 °Ch, siendo esta la madurez del hormigón curado a 18 °C durante 28 días.

Entonces la relación de madurez dada como porcentaje se suele expresar de la forma:

$$A + B \log (\text{madurez} \times 10^{-3})$$

Donde A y B dependen del nivel de resistencia. Plowman propone los siguientes valores para A y B:

Resist. Después de 28 días a 18°C(madurez 19800 °C)		Coeficientes	
Kg / cm ²	Mpa	A	B
Menor 176	Menor 17	10	68
176 – 352	17 – 35	21	61
352 – 527	35 – 52	32	54
527 – 703	52 – 69	42	46.5

Tabla 2.2: Coeficientes de la expresión de madurez de Plowman. (et. al. Neville 1989)

Sin embargo Klieger y otros puntualizan limitaciones para la validez de la aplicación de estos coeficientes solo sí:

- la relación entre logaritmo de la madurez y la resistencia es lineal, para rangos de madurez que corresponden a temperaturas normales y a edades de 3 a 28 días.
- La temperatura inicial del hormigón está comprendida entre 15.5 y 26.6°C, lo que implica un rango muy limitado de variación.

- No debe existir pérdida de humedad durante el período de curado lo que resulta muy difícil de cumplir en obra.

En los años 1940 – 1960 las contribuciones más importantes se deben a Klieger, Ordman and Bondre, Narayanan, RILEM - Symposium on Winter Concreting en el que se presentan valiosas contribuciones de Hakanson, Danielson, Akroyd, Brand, and Wästlund.

Durante el período 1960 – 1970 se realizaron diversos trabajos tendientes a estudiar la validez de la regla de la madurez. Los principales trabajos se deben a Alexander and Taplin, Ramakrishnan and Chielokitchley, Swenson, y Malhotra quien realiza un análisis excelente de todos estos trabajos. Las principales conclusiones de esta etapa son:

- Que se puede asociar la madurez con la resistencia, en diferentes ensayos de curado acelerado y que esta relación es lineal con el logaritmo de la madurez.
- Que esta asociación es válida para un amplio rango de relaciones agua-cemento, aunque para cada relación hay una correlación diferente.
- Que existen pocos informes donde la función tiempo- temperatura haya sido utilizada para resolver problemas de obras.
- Que el problema de no poder graficar resistencia vs. edad para un dado tratamiento acelerado, se resuelve introduciendo el concepto de madurez.
- Que en general la función de madurez ha tenido poca aceptación entre los tecnólogos por las limitaciones de tiempo, temperatura y condiciones de curado de la que esta función depende.

7.4. Aplicación del concepto de madurez en el curado a vapor a presión atmosférica.

Un aspecto importante a tener en cuenta y especialmente cuando se trata de curado a vapor, es si la temperatura se aplica inmediatamente después de colado el hormigón o si se hace más tarde. Pues la alta temperatura temprana proporciona menos resistencia para una madurez total determinada, en comparación con los casos en los que el calor se retrasa por lo menos una semana o no llega nunca.

Verbeck y Helmuth, han proporcionado una respuesta al por qué hay efectos adversos en la resistencia posterior a altas temperaturas tempranas.

Estas aceleran la hidratación inicial pero retardan las subsecuentes y producen una distribución no uniforme de los productos de hidratación que contiene la pasta. La razón para ello es que al ser rápida la velocidad inicial de hidratación, no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación, ni para que ocurra una precipitación uniforme dentro de los espacios intersticiales. Como consecuencia de esto se concentran productos de hidratación en la cercanía de los granos de cemento, lo que retrasa la hidratación subsecuente con disminución de la resistencia a largo plazo.

Saul muestra algunos indicios de la influencia del retraso del calor en la resistencia e indica que, a unas cuantas horas de colado el hormigón, la velocidad de

incremento de la resistencia es mayor que la que podría esperarse de los cálculos de madurez. Esto confirma que la edad a la que se aplica la mayor temperatura es un factor de la regla de madurez que a veces se debe tener en cuenta. (et. al Neville).

Los trabajos realizados por Saul confirman que la regla de madurez es muy valiosa para el tratamiento con vapor a presión atmosférica, pudiendo calcular la temperatura máxima del tratamiento bajo la hipótesis de que a igual grado de maduración de un hormigón corresponde a éste una misma resistencia, independiente de cómo se haya logrado dicha maduración.

Así, la madurez será el producto de la temperatura de curado (T en °C) por la duración del curado (t en horas), en el caso de curado normalizado:

$$M = (T + 10) \times t \quad (^\circ\text{C}/\text{horas})$$

Si la temperatura no es constante, como en el curado a vapor a presión atmosférica, se entiende por madurez, la integral o área bajo la curva (T – t). Para mayor sencillez se considera que la variación de la temperatura es perfectamente lineal en los períodos de calefacción y enfriamiento pudiéndose estimar una temperatura media calculada como (inicial + final) / 2.

Y planteando la igualdad de las madureces se despeja la temperatura máxima de vaporización, o se diseña un ciclo de curado apropiado.

8.-COMENTARIOS

La revisión bibliográfica sugiere la necesidad de:

- 1.- Analizar la influencia o no en el valor de la resistencia acelerada (obtenida una vez que concluye el curado a vapor) de los factores que hacen variar la porosidad de las mezclas.
- 2.- La necesidad de contar con expresiones que permitan estimar la resistencia potencial a los 28 días a partir de la resistencia acelerada, y de estimar el grado de endurecimiento del hormigón del elemento estructural en las condiciones de exposición al aire en clima cálido y húmedo como es el de San Miguel de Tucumán.
- 3.- Comprobar la aplicación del método de la madurez para estimar la resistencia acelerada y diseñar o ajustar el ciclo de curado a vapor a presión atmosférica mas conveniente ya que es este un método sencillo y práctico de ser llevado a cabo.
- 4.- Una vez que finaliza el curado a vapor, las piezas se las acopia a la intemperie, cambian las condiciones de humedad relativa y temperatura, que llevan a que la velocidad de ganancia de la resistencia sea menor que en las condiciones de saturación. Sin embargo existe un factor tiempo – temperatura a una humedad relativa ambiente, que podría llamarse madurez ambiental, y que puede resultar interesante para estimar el grado de endurecimiento del hormigón in – situ a cualquier edad,

durante el período de exposición al aire, teniendo en cuenta los valores de temperaturas y humedades relativas medias diarias.

5.- En base a los resultados experimentales y a las correlaciones encontradas se buscará un criterio que permita seleccionar las mezclas óptimas que cumpliendo los requisitos en estado fresco y endurecido resulten económicas contemplando los costos involucrados de los componentes, del tratamiento y del acopio.

CAPÍTULO 3

**CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES
EMPLEADOS**

1.- INTRODUCCIÓN

Dada la variedad de productos que se fabrican en la planta de prefabricación de hormigones, existe una amplia gama de mezclas cada una con sus requerimientos en estado fresco y endurecido.

Podríamos agruparlas de la siguiente manera, teniendo en cuenta el tamaño máximo del agregado y la consistencia:

- **Grupo I** : $T_{\max} = 3/8''$ – Consistencia ultraseca.
Rango de resistencias características: H -17, H -21, H -25, y H - 30
- **Grupo II** : $T_{\max} = 3/8''$ – Consistencia plástica (asentamiento de 6 a 8 cm)
Rango de resistencias características: H -17, H -21, H - 25, y H - 30
- **Grupo III**: $T_{\max} = 1''$ – Consistencia plástica (asentamiento de 6 a 8 cm)
Rango de resistencias características : H -17, H -21, H – 25, y H - 30

Los materiales empleados en la elaboración de los hormigones fueron arena y canto rodado proveniente del Río Salí, provincia de Tucumán y cemento Portland Normal a granel CP 40, procedente de la fábrica Loma Negra – Catamarca.

.2. ESTUDIO DE AGREGADOS

2.1 Agregado fino

- Análisis petrográfico

El material estudiado presenta la siguiente composición:

55 % de cuarzo de vena

25 % de fragmentos metamórficos constituidos por cuarzo, plagioclasa y biotita

15 % de feldespatos

5 % de minerales accesorios (muscovita, turmalina y magnetita)

- Materia orgánica: No presenta

- Material más fino que 74 μ : $P_{\text{inicial}} = 300 \text{ g.}$ $P_{\text{final}} = 295 \text{ g.}$

$$\% \text{ finos} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 = 1,67 \%$$

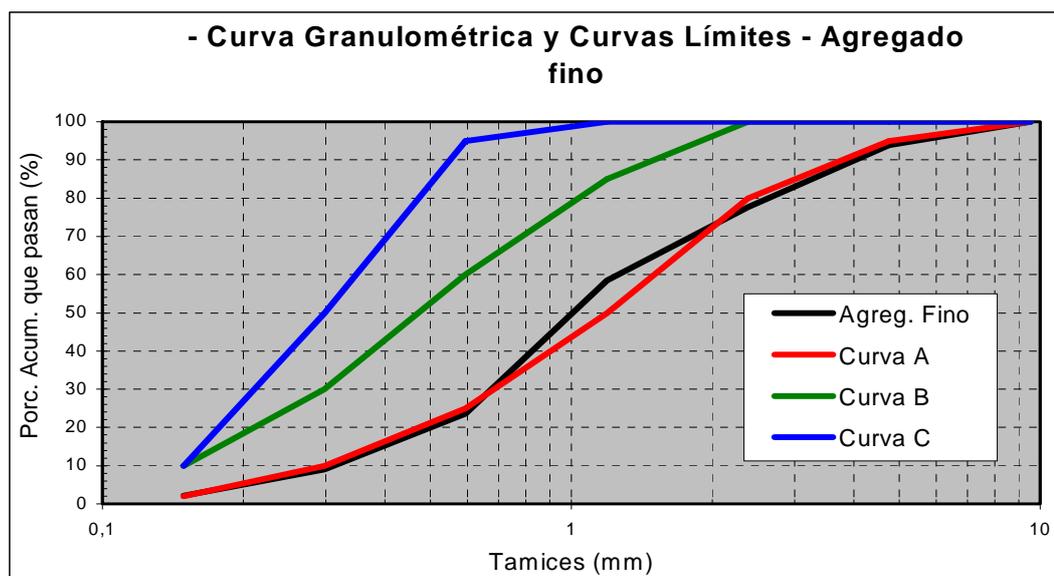
Tabla 3.1: Durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Agreg. fino (IRAM 1525)

Material retenido en tamiz	Graduación de la muestra original	Peso fracciones, antes del ensayo	Pérdida real	Perdida corregida por graduación	Número de partículas afectadas
Nro. (mm)	%	g	%	%	
50 (0,297)	24,50	100	6,00	1,47	---
30 (0,590)	21,60	100	4,55	0,698	---
16 (1,2)	23,14	100	3,10	0,72	---
8 (2,4)	15,94	100	2,20	0,35	---
4 (4,8)	0,28	100	2,00	0,01	---
			Totales	3,53	

Tabla 3.2:- Análisis granulométrico de agreg. fino s/ Norma IRAM 1505.

Tamiz	% ret. Acum.
#	%
4	6.05
8	22.38
16	41.53
30	66.44
50	91.03
100	97.89
F	100.00

$M_f = 3.25$

**Figura 3.1: Curvas límites y curva granulométrica de agregado fino.**

2. 2.- Agregado grueso

- Análisis petrográfico

El material de mayor tamaño está constituido por metamórfitas de bajo grado, grano muy fino, cuya composición mineralógica es biotita, clorita, cuarzo y feldespatos, de tonalidades grisáceas y moradas. Algunos de los clastos presentan delgadas venillas de cuarzo-feldespato de vena de 1 ó 2 mm de espesor.

El material intermedio tiene la siguiente composición litológica:

73,45 % de metamorfitas homogéneas, de grano muy fino y tonalidades grises, moradas y verdes, similares mineralógicamente a las descritas antes.

13,22 % de clastos de origen también metamórfico, de similar mineralogía, pero atravesadas por numerosas venillas de cuarzo de 0,5 a 1,0 mm de espesor.

11,77 % de fragmentos cuarzo-feldespáticos de venas.

1,56 % de rodados de origen granítico-tonalítico, masivos de color claro y grano fino, en donde se reconoce principalmente cuarzo, plagioclasa y biotita.

El material más fino está constituido por:

76,36 % de fragmentos metamórficos homogéneos, similares a los ya descritos.

23,30 % de clastos cuarzo-feldespático de venas

2,17 % de concreciones carbonáticas

1,17 % de material granítico.

2.2.1.- Agregado grueso fracción: Binder

- Determinación de peso unitario compactado s/Norma IRAM 1533

- Peso Unitario Compactado $PU_C = 1706 \text{ kg/m}^3$

Tabla3.3:- Análisis granulométrico. Fracción binder s/norma IRAM 1505

Tamiz	% ret. Acum.
#	%
1/2"	-
3/8"	3.86
4	88.79
8	98.80
Fondo	100

$M_F = 5.91$
 $T_{max} = 3/8"$

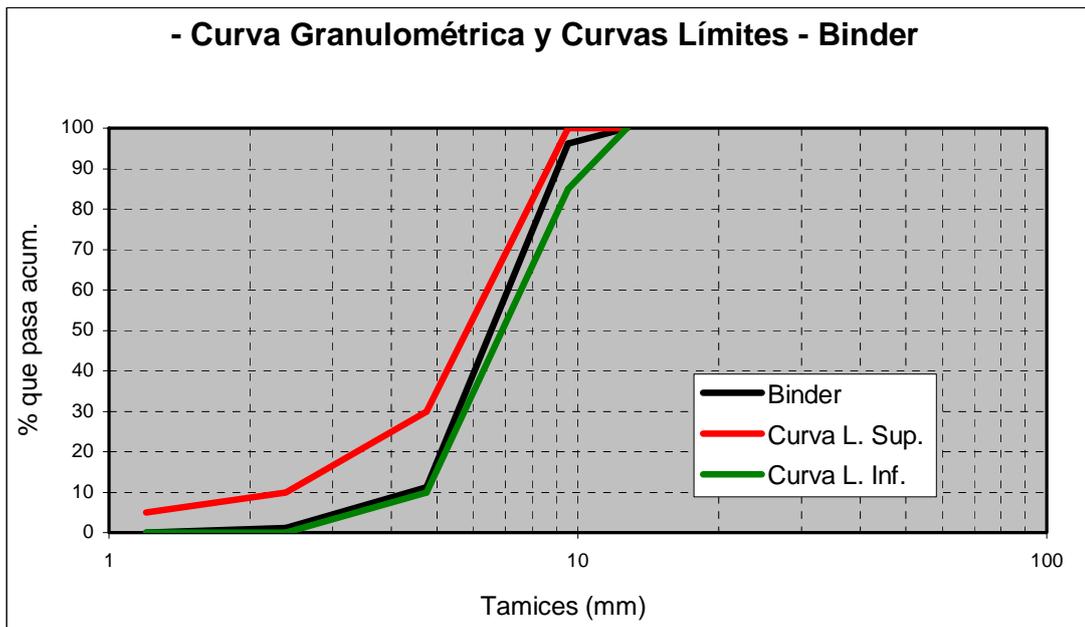


Figura 3.2: Curvas límites y curva granulométrica. Fracción binder

2.2.2.- Agregado grueso fracción: 10-30

- Peso Unitario:

1) Suelto: $P_{M+ag.} = 27,8 \text{ kg}$

$$\boxed{P.U._s = 1656 \text{ kg/m}^3}$$

2) Compactado: $P_{M+ag.} = 28,0 \text{ kg}$

$$\boxed{P.U._c = 1682 \text{ kg/m}^3}$$

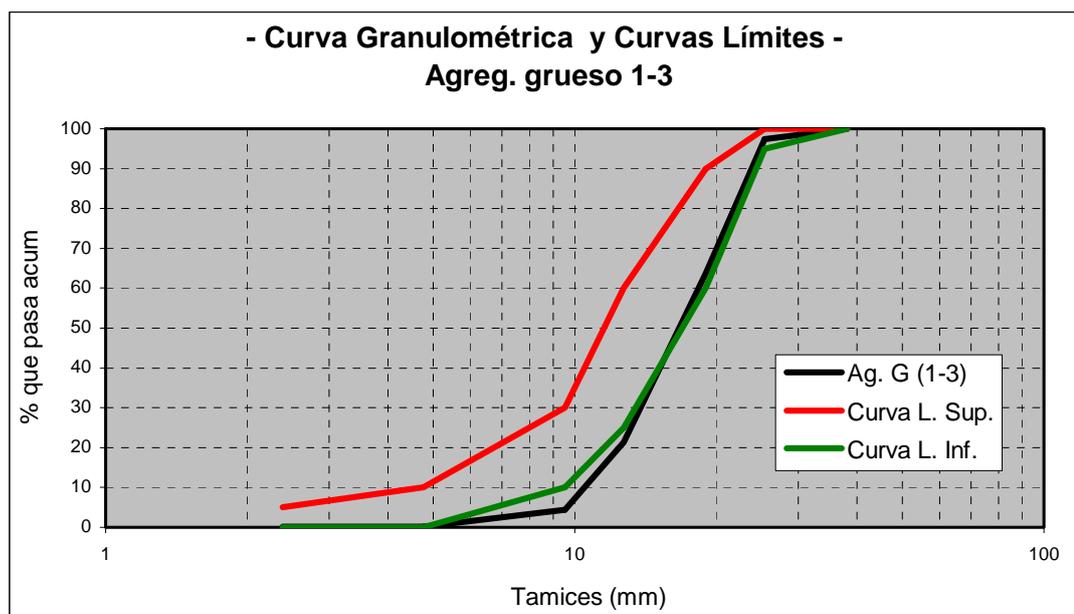
Tabla 3.4: - Durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Agreg. grueso (IRAM 1525)

Material retenido en tamiz	Graduación de la muestra original	Peso fracciones, antes del ensayo	Pérdida real	Perdida corregida por graduación	Número de partículas afectadas
Pulg. (mm)	%	g	%	%	
3/4 (19,0)	28,95	500	0,47	0,12	---
3/8 (9,5)	50,37	1000	0,16	0,08	---
# 4 (4,8)	10,68	300	1,67	0,18	---
Totales				0,38	

Tabla 3.5:- Análisis granulométrico. Agreg grueso s/Norma IRAM 1503.

Tamiz	% ret. Acum.
#	%
1 1/2"	0
1"	3.37
3/4"	32.46
1/2"	74.00
3/8"	93.96
4	99.36
8	99.37
Fondo	100

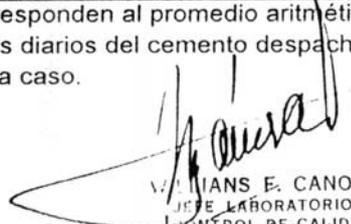
T_{máx} = 1 "
M_F = 7.25

**Figura 3.3: Curvas límites y curva granulométrica. Fracción 1-3**

3. ESTUDIO DEL CEMENTO

El cemento utilizado en el trabajo es el que emplea la fábrica y corresponde a un Cemento Pórtland Normal identificado como CP40.

Se adjuntan los ensayos remitidos por la fábrica proveedora, y se presenta sólo un protocolo porque se observó muy poca variación respecto a los demás, que se entregan cada vez que llega una carga nueva de cemento a la planta.

LOMA NEGRA C.I.A.S.A. Fábrica : CATAMARCA	Protocolo de ensayos			LABORATORIO 25/06/1999
CEMENTO PORTLAND NORMAL CP40				
SEMANA: 07AL12/06/99				
ANALISIS QUIMICO		UM	RESULTADO	Requisito IRAM
Pérdida por calcinación (PPC)		%	2,89	< 4
Trióxido de azufre (SO ₃)		%	2,10	< 3.5
Oxido de magnesio (MgO)		%	1,43	< 5
Dióxido de silicio (SiO ₂)		%	21,32	no hay
Oxido de calcio (CaO)		%	62,26	no hay
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)		%	4,32	no hay
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)		%	4,32	no hay
Oxido de sodio (Na ₂ O)		%	0,41	no hay
Oxido de Potasio (K ₂ O)		%	0,86	no hay
Oxido de Sodio equivalente (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)		%	0,97	no hay
Residuo insoluble		%	1,05	< 2
ENSAYOS FÍSICOS		UM	RESULTADO	Requisito IRAM
Retenido tamiz 74 μ m		%	2,00	< 15
Superficie específica (Blaine)		m ² /kg	339,1	> 250
Expansión en autoclave		%	0,03	< 1
Tiempo de fraguado inicial		h:min	3:10	> 0:45
Tiempo de fraguado final		h:min	4:10	< 10:00
CEMENTO PORTLAND NORMAL CP40				
RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN				
SEMANA	DÍAS	UM	RESULTADO	Requisito IRAM
07AL12/06/99	2	MPa	18,5	> 10
07AL12/06/99	7	MPa	32,4	no hay
	28	MPa		> 40 y < 60
<p>Los resultados de los ensayos mostrados en esta planilla corresponden al promedio aritmético de los resultados parciales obtenidos sobre muestras de conjuntos diarios del cemento despachado la semana que se indica en cada caso.</p>				
 WILFRANS E. CANOVAS JEFE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD Aprobó (Laboratorio)				

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES DE HORMIGONES ULTRA SECOS

1.- DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

Hormigones del grupo I: Tmax. 3/8”- Consistencia ultraseca.

Para dosificar los hormigones sin asentamiento, el Comité del ACI 211.3-75 “Selecting Proportions for No-Slump Concrete “ propone un método que es el que se aplicó para prepara el primer pastón de pruebas. En el mismo se siguen los pasos conocidos para la dosificación de mezclas plásticas, solo que el volumen seco y compactado de agregado grueso se debe afectar de un coeficiente de mayoración que depende del tamaño máximo del agregado y de la consistencia de la mezcla medida con alguno de los cuatro métodos siguientes: Cono de Abrams, Vebe, Mesa de caída y factor de compactación.(Tabla A2.3.5.1 (b) del ACI referido). Se respetaron rigurosamente los pasos propuestos obteniéndose la siguiente dosificación:

MATERIALES	DOSAJE (Kg)
Agua	180
Agreg. Fino	424
Agreg. Grueso	1426

Se preparó un pastón de prueba de 10 litros para observar su aspecto y medir la consistencia.

Se pudo apreciar excesiva segregación del agregado grueso, falta de cohesión, e inadecuada compactación a pesar de la enérgica vibración suministrada en mesa vibradora. Ante este resultado se procedió de la siguiente manera:

Primero se estudió la mejor composición granulométrica usando distintos métodos, se prepararon los correspondientes pastones de prueba sobre la base de un hormigón H-17 y se hicieron las siguientes determinaciones:

- Asentamiento con Cono de Abrams
 - Tiempo de vibrado introduciendo el vibrador de aguja
 - Tiempo Vebe
 - Peso Unitario
 - Observaciones del aspecto buscando las cualidades óptimas para el hormigón de viguetas.
 - Se llenaron tres probetas normalizadas las que se ensayaron:
 - 1 curada a vapor y ensayada a 24 hs.
 - 1 curado normalizado y ensayada a 7 días
 - 1 curado normalizado y ensayada a 28 días
- **Hormigón H 17 – Composición granulométrica: Ley de Mezclas s/ CIRSOC, s = 0.32 – g = 0.68**

Destino : Viguetas
 Consistencia : muy seco
 T máx : 3/8 “

Material	Dosaje en peso (kg)
Cemento	317
Agua	190
Agreg. Fino	594
Agreg. Grueso	1206

Se preparó un pastón de 20 litros y se determinaron:

a) Estado fresco

- Asentamiento : 2 cm.
- Aspecto: : Algo plástico, falta de cohesión.
- Tiempo de vibrado: 2 seg

b) Estado endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob. Nro.	Diam cm.	Rotura Mpa	Edad Días
1	15.0	15.8	1- cv
2	15.0	21.0	7- cn
3	15.0	30.0	28- cn

cv: curado a vapor -cn: curado normalizado

- Hormigón H 17 – Composición granulométrica: S/Fuller, s = 0.67 , g = 0.33

Destino : Viguetas
 Consistencia: muy seco
 T máx : 3/8 “

Material	Dosaje en peso (kg)
Cemento	317
Agua	190
Agreg. Fino	1118
Agreg. Grueso	682

Se preparó un pastón de 20 litros y se determinaron:

c) Propiedades en estado fresco

- Asentamiento = 1 cm.
- Aspecto: Homogéneo, cohesivo, se observa exceso de arena
- Tiempo de vibrado: 1 seg

d) Estado Endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob. Nro.	Diam cm.	Rotura Mpa	Edad Días
1	15.0	19.3	1- cv
2	15.0	25.5	7- cn
3	15.0	34.0	28- cn

cv: curado a vapor ;cn: curado normalizado

- Hormigón H 17 – Composición granulométrica: S/A.C.I para un volumen aparente de agregado grueso seco y compactado $V=0.50$, resultando:
 $s = 0.53$, $g = 0.47$

Destino : Viguetas
 Consistencia: muy seco
 T máx : 3/8 “

Material	Dosaje en peso Kg
Cemento	316
Agua	190
Agreg. Fino	948
Agreg. Grueso	853

Se preparó un pastón de 20 litros y se determinaron:

e) Estado fresco

- Asentamiento = 2.5 cm
- Aspecto: Muy buena cohesión, homogéneo, adecuados porcentajes de agregados.
- Tiempo de vibrado: 1 seg

f) Estado endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob.	Diam	Rotura	Edad
Nro.	cm.	Mpa	Días
1	15.0	17.0	1- cv
2	15.0	24.4	7- cn
3	15.0	33.4	28- cn

cv: curado a vapor - cn: curado normalizado

Como el aspecto es muy bueno, pero se necesita consistencia mas seca se realizan correcciones obteniéndose la siguiente dosificación:

Material	Dosaje en peso (Kg)
Cemento	290
Agua	174
Agreg. Fino	1012
Agreg. Grueso	853

Tabla 4.A: Dosificación del hormigón H-17

Se preparó un pastón de 20 litros y se determinaron:

g) Estado fresco

- Asentamiento = 0 cm.
- Aspecto: Muy bueno, cohesivo, con consistencia adecuada.
- Tiempo de vibrado: 35 seg

h) Estado endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob. Nro.	Diam cm.	Rotura Mpa	Edad Días
1	15.0	17.0	1- cv
2	15.0	25.5	7- cn
3	15.0	32.9	28- cn

cv: curado a vapor - cn: curado normalizado

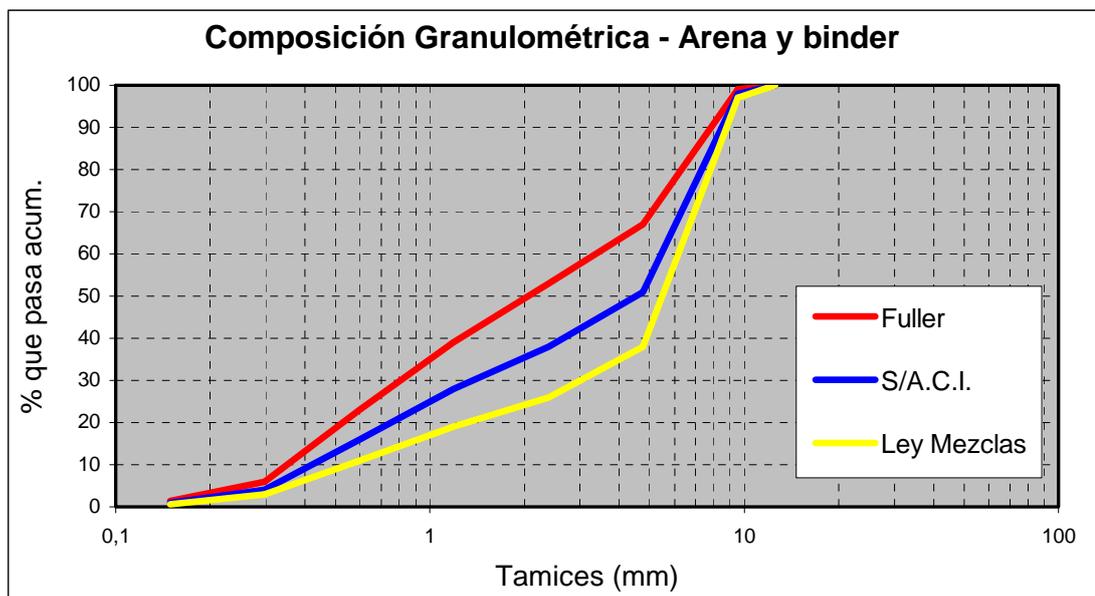


Figura 4.1: Composiciones granulométricas.

- Conclusiones:

Se recomienda esta última dosificación para el hormigón H-17, y para componer el esqueleto granular usar la propuesta del A.C.I. tomando un volumen aparente seco y compactado $V = 0.50$, para toda la gama de hormigones que se realicen con arena y binder. (corresponde a $s = 0.53$; $g = 0.47$)

- Hormigón H 21 y H 25

Destino : Viguetas
 Consistencia: muy seca
 T máx : 3/8 "

Material	Dosaje en peso
	Kg
Cemento	316
Agua	155
Agreg. Fino	1043
Agreg. Grueso	853

Tabla 4.B: Dosificación del hormigón H-21/25

a) Estado fresco:

- Asentamiento = 0 cm.
- Tiempo Vebe modificado: 27,84 seg.
- Aspecto: Homogéneo, cohesivo, muy seco
- Peso unitario real: 2432 Kg/m³

b) Estado endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob.	Diam	Rotura	Edad
Nro.	Cm.	Mpa	Días
1	15.0	22.1	1- cv
2	15.0	31.7	7- cn
3	15.0	35.9	28- cn

- Hormigón H 30

Destino : Viguetas
 Consistencia : muy seca
 T máx : 3/8 "

Material	Dosaje en peso
	Kg
Cemento	352
Agua	155
Agreg. Fino	1010
Agreg. Grueso	853

Tabla 4.C: Dosificación del hormigón H-30

a) - Estado fresco

- Asentamiento = 0 cm.
- Tiempo Vebe modificado: 25,21 seg.
- Aspecto: Homogéneo, cohesivo, muy seco
- Peso unitario : 2426 Kg/m³

b) - Estado endurecido – Resistencia mecánica a compresión

Prob.	Diam	Rotura	Edad
Nro.	cm.	Mpa	Días
1	15.0	29.5	1- cv
2	15.0	30.0	7- cn
3	15.0	36.3	28- cn

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental contempla la elaboración de pastones en laboratorio y también a escala natural usando la planta dosificadora computarizada de la fábrica.

a)- Estudio en laboratorio

Con las dosificaciones propuestas en el punto anteriores se realizaron pastones para llenar 12 probetas normalizadas y ensayar: a compresión, 4 probetas a 1 día - curado a vapor, 4 probetas a 7 días - curado normalizado, 4 probetas a 28 días - curado normalizado.

A continuación se transcriben los resultados de ensayos a compresión.

Tabla Nro.4.1.: Resistencia a compresión de probetas elaboradas de pastones en laboratorio.

Prob. Nro .	Diam. (cm)	Rotura (Mpa.)	Edad (días)	Resist. Característica (Mpa.)
37	15.0	19.3	1 día curado a vapor	H – 17
38	15.0	19.8		
39	15.0	19.8		
40	15.0	21.0		
Prom		19.9		
41	15.0	31.2	7 días curado normalizado	
42	15.0	30.0		
43	15.0	29.5		
44	15.0	30.0		
Prom.		30.2		
45	15.0	36.3	28 días curado normalizado	
46	15.0	35.7		
47	15.0	35.7		
48	15.0	36.3		
Prom.		36.0		
49	15.0	19.8	1 día curado a vapor	H – 21 y 25
50	15.0	19.3		
51	15.0	21.0		
52	15.0	21.0		
Prom.		20.3		
53	15.0	30.6	7 días curado normalizado	
54	15.0	30.0		
55	15.0	28.9		
56	15.0	29.5		
Prom.		29.8		
57	15.0	34.6	28 días curado normalizado	
58	15.0	34.6		
59	15.0	35.1		
60	15.0	35.7		
Prom.		35.0		
61	15.0	24.4	1 día curado a vapor	
62	15.0	22.7		
63	15.0	23.2		
64	15.0	22.7		
Prom.		23.8		

Prob. Nro .	Diam. cm	Rotura Mpa.	Edad días	Resist. Característica Mpa.
65	15.0	28.9	7 días curado normalizado	H – 30
66	15.0	28.3		
67	15.0	27.8		
68	15.0	27.8		
Prom.		28.2		
69	15.0	38.5	28 días curado normalizado	
70	15.0	38.0		
71	15.0	37.4		
72	15.0	38.5		
Prom.		38.1		

b)- Estudio a escala natural:

Se determinó la resistencia a compresión en probetas moldeadas de pastones elaborados en planta dosificadora de la fábrica. Se prepararon dos pastones de 500 dm³ cada uno, y se llenaron dos tramos perfectamente identificados de viguetas y las correspondientes probetas para ser ensayadas a distintas edades y tipo de curado según se detalla a continuación:

3 probetas a 24 hs. curadas a vapor									
3 probetas a 7 días curadas a vapor y luego al aire junto a las viguetas									
3 “ a 28 días	“	“	“	“	“	“	“	“	“
3 “ a 60 días	“	“	“	“	“	“	“	“	“
3 “ a 90 días	“	“	“	“	“	“	“	“	“
3 “ a 150 días	“	“	“	“	“	“	“	“	“
3 probetas a 7 días curado normalizado									
3 “ a 28 días	“	“							
3 “ a 60 días	“	“							
3 “ a 90 días	“	“							
3 “ a 150 días	“	“							

HORMIGÓN : H- 17

MATERIALES	DOSIF. EN PESO	CORREC. POR HUM.
Cemento	290	290
Agua	155	94
Agregado Fino	1062	1179
Binder	853	853

Tiempo Vebe modificado: 26,62 seg

Tabla No.4.2. :Resistencias a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (Mpa)
82	Curado a vapor – 24 hs	22.1
83		21.0
84		21.0
Promedio		21.0
85	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	24.9
86		25.5
87		24.9
Promedio		25.1
88	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	27.8
89		28.3
90		28.3
Promedio		28.1
91	Curado a vapor y luego intemperie 60 días	30.6
92		30.6
93		31.2
Promedio		30.8
94	Curado a vapor y luego intemperie 90 días	34.6
95		34.0
96		34.6
Promedio		34.4
97	Curado a vapor y luego intemperie 150 días	35.1
98		36.3
99		36.3
Promedio		35.9
100	Curado normalizado 7 días	30.6
101		30.6
102		30.6
Promedio		30.6
103	Curado normalizado 28 días	34.6
104		34.0
105		35.1
Promedio		34.6
106	Curado normalizado 60 días	38.5
107		40.2
108		40.2
Promedio		39.6
109	Curado normalizado 90 días	42.5
110		43.1
111		42.0
Promedio		42.5
112	Curado normalizado 150 días	48.2
113		45.3
114		46.5
Promedio		46.6

HORMIGONES: H-21 / 2465

MATERIALES	DOSIF. EN PESO	CORREC. POR HUM.
Cemento	316	316
Agua	155	80
Agregado Fino	1043	1106
Binder	853	853

Tiempo VeBe modificado: 27,84 seg

Tabla Nro.4.3.:Resistencia a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural.

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (Mpa)
115	Curado a vapor – 24 hs	23.2
116		24.9
117		24.9
Promedio		24.3
118	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	30.0
119		30.0
120		30.0
Promedio		30.0
121	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	31.7
122		31.7
123		32.3
Promedio		31.9
124	Curado a vapor y luego intemperie 60 días	35.7
125		35.1
126		35.1
Promedio		35.3
127	Curado a vapor y luego intemperie 90 días	39.1
128		38.5
129		39.1
Promedio		38.9
130	Curado a vapor y luego intemperie 150 días	40.2
131		42.0
132		42.0
Promedio		41.4
133	Curado normalizado 7 días	36.3
134		37.4
135		36.3
Promedio		36.6
136	Curado normalizado 28 días	38.0
137		36.3
138		38.0
Promedio		37.4
139	Curado normalizado 60 días	41.4
140		42.5
141		43.6
Promedio		42.5
142	Curado normalizado 90 días	45.3
143		45.3
144		44.8
Promedio		45.1

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (Mpa)
145	Curado normalizado 150 días	48.2
146		45.3
147		46.5
Promedio		46.6

HORMMIGÓN : H- 30

MATERIALES	DOSIF. EN PESO	CORREC. POR HUM.
Cemento	352	352
Agua	155	74
Agregado Fino	1010	1091
Binder	853	853

Tiempo VeBe modificado: 25,21 seg

Tabla Nro.4.4.:Resistencias a compresión de probetas cilíndricas elaboradas de pastones a escala natural

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (Mpa)
154	Curado a vapor – 24 hs	24.4
155		23.2
156		24.4
Promedio		24.4
157	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	30.6
158		31.2
159		30.6
Promedio		30.8
160	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	31.7
161		33.4
162		33.4
Promedio		32.8
163	Curado a vapor y luego intemperie 60 días	39.1
164		38.5
165		38.5
Promedio		38.7
166	Curado a vapor y luego intemperie 90 días	40.2
167		39.7
168		39.7
Promedio		39.9
169	Curado a vapor y luego intemperie 150 días	40.8
170		42.0
171		41.8
Promedio		41.9
172	Curado normalizado 7 días	34.6
173		33.4
174		34.0
Promedio		34.0

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (Mpa)
175	Curado normalizado 28 días	39.7
176		36.3
177		39.1
Promedio		39.3
178	Curado normalizado 60 días	43.1
179		43.6
180		43.6
Promedio		43.4
181	Curado normalizado 90 días	44.8
182		44.2
183		44.8
Promedio		44.6
184	Curado normalizado 150 días	47.0
185		45.9
186		47.0
Promedio		47.0

En la Tabla 4.5 se muestran las dosificaciones estudiadas según el criterio enunciado, y los resultados promedios de los ensayos de compresión de probetas cilíndricas de 15 x 30(cm) para curado normalizado (resistencias potenciales), curado a vapor a presión atmosférica (resistencia acelerada) y exposición al aire después del curado a vapor (grado de endurecimiento).

MEZCLA	H – 17	H – 21/25	H – 30
a/c	0.53	0.49	0.44
Cemento	290	316	352
Agua	155	155	155
Arena	1062	1043	1010
Binder	853	853	853
Vebe (seg)	26,62	27.84	25.21
Resistencias medias luego de			
24 hs. Vapor	21.0	24.3	24.4
Vapor + 6 días intemperie	25.1	30.0	30.8
Vapor + 27 días intemperie	28.1	31.9	32.8
Vapor + 59 días intemperie	30.8	35.3	38.7
Vapor + 89 días intemperie	34.4	38.9	39.9
Vapor + 149 días intemperie	35.9	41.4	41.9
7 días curado normalizado	30.6	36.6	34.0
28 días curado normalizado	34.6	37.4	39.3
60 días curado normalizado	39.6	42.5	43.4
90 días curado normalizado	42.5	45.1	44.6
150 días curado normalizado	46.6	46.6	47.0

Tabla Nro.4.5: Resumen de las mezclas ultra secas. Grupo I

CAPÍTULO 5

**ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES DE
HORMIGONES PLÁSTICOS**

1.- DOSIFICACIONES ESTUDIADAS

Se estudiaron dos grupos de hormigones de consistencia plástica, correspondiente a un asentamiento de 6 a 8 cm medido con el Cono de Abrams. Corresponde a los denominados Grupo II con tamaño máximo 3/8", Grupo III con tamaño máximo 1", y las siguientes resistencias características: H -17, H - 21, H - 25 y H - 30, para ambos grupos.

Con las dosificaciones propuestas se prepararon pastones de prueba de 20 litros, se midieron: asentamiento con el Cono de Abrams, Peso Unitario, y se llenaron 3 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para ser ensayadas: 1 a 24 hs. después de ser curada a vapor, 1 a 7 días, y otra a 28 días, ambas recibieron curado normalizado hasta la edad de ensayo.

1.1. - Hormigones del grupo II - Tamaño máximo 3/8"

- H-17, asentamiento 6 a 8 cm

Tabla 5.1. :Dosificación del hormigón H-17 (3/8")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	322
Agua	193
Agregado Fino	1104
Binder	682

Asentamiento: 6.5 cm

Peso Unitario: 2318 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSION ROT. (MPa)
79	Curado vapor 24 hs	15.8
80	Curado Normal 7 días	28.9
81	Curado Normal 28 días	31.7

Con la misma dosificación se prepararon 2 pastones de 60 litros cada uno y se llenaron 18 probetas para ser ensayadas a compresión:

4 probetas curado a vapor a 24 hs.

3 " " " y luego a la intemperie a 7 días

3 " " " " " " a 28 días

4 " " normalizado a 7 días

4 " " " a 28 días.

Nota: El mismo procedimiento se siguió para los hormigones H-21, H25, y H30

A continuación se transcriben los resultados de ensayo

Tabla 5.2. :Resistencias a compresión . H-17 (3/8")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
193	Curado a vapor – 24 hs	15.8
194		16.3
195		16.3
196		14.6
Promedio		15.8
197	Curado normalizado 7 días	22.7
198		24.9
199		22.1
200		22.7
Promedio		23.1
201	Curado normalizado 28 días	26.1
202		26.6
203		27.8
204		26.6
Promedio		26.8
289	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	21.0
290		19.8
291		21.0
Promedio		20.6
292	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	21.5
293		22.0
294		21.5
Promedio		22.0

- **HORMIGÓN: H- 21, asentamiento 6 a 8 cm**

Tabla 5.3. :Dosificación del hormigón H-21 (3/8")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	351
Agua	193
Agregado Fino	1080
Binder	682

Asentamiento: 7.5 cm

Peso Unitario: 2284 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSION ROT. (MPa)
148	Curado vapor 24 hs	17.0
149	Curado Normal 7 días	30.0
150	Curado Normal 28 días	34.6

Con la misma dosificación se prepararon 2 pastones de 60 litros cada uno, y se llenaron 18 probetas de 15 x 30 (cm) para ser ensayadas a compresión de acuerdo al detalle del hormigón H-17.

A continuación se transcriben los resultados de ensayo

Tabla 5.4.: Resistencias a compresión. H-21 (3/8")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
205	Curado a vapor – 24 hs	19.0
206		19.8
207		17.0
208		19.8
Promedio		19.0
209	Curado normalizado 7 días	28.3
210		26.6
211		26.6
212		27.8
Promedio		27.3
213	Curado normalizado 28 días	28.3
214		31.7
215		31.2
216		30.6
Promedio		30.5
295	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	21.0
296		19.8
297		19.8
Promedio		20.2
298	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	22.1
299		21.5
300		28.3
Promedio		24.0

- **HORMIGÓN: H- 25, asentamiento 6 a 8 cm**

Tabla 5.5. :Dosificación del hormigón H-25 (3/8")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	378
Agua	193
Agregado Fino	1057
Binder	682

Asentamiento: 5.5 cm

Peso Unitario: 2345 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSION ROT. (MPa)
151	Curado vapor 24 hs	21.5
152	Curado Normal 7 días	31.7
153	Curado Normal 28 días	35.7

Con la misma dosificación se prepararon 2 pastones de 60 litros cada uno y se llenaron 18 probetas de 15 x 30 (cm) para ser ensayadas a compresión de acuerdo al detalle del hormigón H-17.

A continuación se transcriben los resultados de ensayo

Tabla 5.6. :Resistencias a compresión . H-25 (3/8")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
217	Curado a vapor – 24 hs	22.1
218		22.1
219		22.7
220		22.7
Promedio		22.4
221	Curado normalizado 7 días	28.3
222		27.8
223		27.8
224		26.6
Promedio	27.6	
225	Curado normalizado 28 días	31.2
226		32.9
227		31.7
228		31.7
Promedio	31.9	
301	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	24.9
302		25.5
303		26.1
Promedio		25.5
304	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	32.9
305		30.0
306		28.3
Promedio		30.4

- HORMIGÓN: H- 30, asentamiento 6 a 8 cm

Tabla 5.7. :Dosificación del hormigón H-30 (3/8")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	439
Agua	193
Agregado Fino	1014
Binder	682

Asentamiento: 5 cm

Peso Unitario: 2361 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSION ROT. (MPa)
187	Curado vapor 24 hs	27.8
188	Curado Normal 7 días	31.2
189	Curado Normal 28 días	33.4

Con la misma dosificación se prepararon 2 pastones de 60 litros cada uno y se llenaron 18 probetas de 15 x 30 (cm) para ser ensayadas a compresión de acuerdo al detalle del hormigón H-17.

A continuación se transcriben los resultados de ensayo

Tabla 5.8. :Resistencias a compresión. H-30 (3/8”)

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
229	Curado a vapor – 24 hs	28.9
230		28.9
231		27.8
232		28.3
Promedio		28.3
233	Curado normalizado 7 días	32.9
234		32.3
235		32.9
236		32.9
Promedio		32.8
237	Curado normalizado 28 días	36.3
238		36.3
239		37.4
240		36.3
Promedio		36.6
307	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	28.3
308		28.9
309		28.9
Promedio		28.7
310		Curado a vapor y luego intemperie 28 días
311	31.7	
312	38.5	
Promedio	33.6	

1.2. -Hormigones del Grupo III - Tamaño máximo 1”

- H-17, asentamiento 6 a 8 cm

Tabla Nro.5.9.: Dosificación del hormigón H-17 (1”)

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	292
Agua	175
Agregado Fino	855
Agregado Grueso	1045

Asentamiento: 7 cm

Peso Unitario: 2392 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSIÓN ROT. (MPa)
256	Curado vapor 24 hs	14.1
257	Curado Normal 7 días	24.4
258	Curado Normal 28 días	30.0

Con la misma dosificación se prepararon 2 pastones de 60 litros cada uno, se homogeneizaron y se llenaron 21 probetas de 15 x 30 (cm) para ser ensayadas a compresión:

3 probetas curado a vapor a 24 hs.
 3 “ “ “ y luego a la intemperie a 7 días
 3 “ “ “ “ “ “ a 28 días
 3 “ “ “ “ “ “ a 60 días
 3 “ “ normalizado a 7 días
 3 “ “ “ a 28 días.
 3 “ “ “ a 60 días

Nota: El mismo procedimiento se siguió para los hormigones H-21, H25, H30 y H-38. A continuación se transcriben los resultados de ensayo

Tabla 5.10: Resistencias a compresión . H-17 (1”)

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
331	Curado a vapor – 24 hs	19.3
332		18.7
333		18.7
Promedio		18.7
334	Curado normalizado 7 días	24.9
335		24.9
336		25.5
Promedio		24.9
337	Curado normalizado 28 días	31.7
338		30.0
339		30.6
Promedio		30.6
340	Curado normalizado 60 días	33.4
341		32.9
342		32.3
Promedio		32.9
343	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	21.5
344		21.0
345		21.0
Promedio		21.0
346	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	27.8
347		26.6
348		27.8
Promedio		27.8
349		31.2

350	Curado a vapor y Luego al aire 60 días	30.0
351		30.6
Promedio		30.6

- H- 21, asentamiento 6 a 8 cm

Tabla 5.11: Dosificación del hormigón H-21 (1")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	324
Agua	175
Agregado Fino	843
Agregado Grueso	1030

Asentamiento: 7 cm

Peso Unitario: 2426 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

Se preparó un pastón de prueba y se moldearon tres probetas

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSIÓN ROT. (MPa)
319	Curado vapor 24 hs	12.4
320	Curado Normal 7 días	26.1
321	Curado Normal 28 días	29.5

Tabla 5.12: Resistencias a compresión. H-21 (1")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
352	Curado a vapor – 24 hs	19.8
353		19.8
354		21.0
Promedio		20.2
355	Curado normalizado 7 días	26.6
356		27.8
357		26.6
Promedio		26.6
358	Curado normalizado 28 días	32.3
359		31.7
360		32.9
Promedio		32.3
361	Curado normalizado 60 días	33.4
362		34.0
363		34.0
Promedio		33.8
364	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	22.1
365		21.5
366		22.1
Promedio		22.1
367		27.8

368	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	28.3
369		28.3
Promedio		28.3
370	Curado a vapor y Luego al aire 60 días	30.0
371		30.6
372		30.6
Promedio		30.4

- H- 25, asentamiento 6 a 8 cm

Tabla 5.13: Dosificación del hormigón H-25 (1")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	350
Agua	175
Agregado Fino	833
Agregado Grueso	1019

Asentamiento: 4.5 cm

Peso Unitario: 2419 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

Se preparó un pastón de prueba y se moldearon tres probetas

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSIÓN ROT. (MPa)
322	Curado vapor 24 hs	16.3
323	Curado Normal 7 días	26.1
324	Curado Normal 28 días	31.7

Tabla 5.14: Resistencias a compresión. H-25 (1")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
373	Curado a vapor – 24 hs	19.3
374		18.7
375		18.7
Promedio		19.3
376	Curado normalizado 7 días	27.8
377		28.3
378		30.0
Promedio		28.7
379	Curado normalizado 28 días	32.9
380		33.4
381		32.9
Promedio		33.1
382	Curado normalizado	37.4
383		38.0

384	60 días	37.4
Promedio		37.6
385	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	25.5
386		26.6
387		24.9
Promedio		25.7
388	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	31.2
389		30.0
390		30.6
Promedio		30.6
391	Curado a vapor y Luego al aire 60 días	32.3
392		32.3
393		31.7
Promedio		32.1

- H- 30, asentamiento 6 a 8 cm

-
Tabla 5.15: Dosificación del hormigón H-30 (1")

MATERIALES	DOSIF. EN PESO
Cemento	409
Agua	180
Agregado Fino	805
Agregado Grueso	934

Asentamiento: 8 cm

Peso Unitario: 2426 Kg/m³

Aspecto: Plástico, cohesivo, sin segregación

Se preparó un pastón de prueba y se moldearon tres probetas

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENSIÓN ROT. (MPa)
325	Curado vapor 24 hs	18.7
326	Curado Normal 7 días	22.7
327	Curado Normal 28 días	33.0

Tabla 5.16: Resistencias a compresión. H-30 (1")

PROBETA Nro.	TIPO DE CURADO EDAD	TENS. ROT. (MPa)
394	Curado a vapor – 24 hs	24.4
395		23.2
396		24.4
Promedio		24.0
397	Curado normalizado 7 días	31.7
398		32.3
399		32.3
Promedio		32.1
400		35.1

401	Curado normalizado 28 días	34.6
402		34.6
Promedio		34.8
403	Curado normalizado 60 días	38.0
404		38.0
405		38.5
Promedio		38.2
406	Curado a vapor y luego intemperie 7 días	30.0
407		30.6
408		30.0
Promedio		30.2
409	Curado a vapor y luego intemperie 28 días	34.6
410		34.0
411		33.4
Promedio		34.0
412	Curado a vapor y Luego al aire 60 días	35.1
413		34.6
414		34.6
Promedio		34.6

En las Tablas 5.17 y 5.18 se muestran las dosificaciones estudiadas según el criterio enunciado, y los resultados promedios de los ensayos de compresión de probetas cilíndricas de 15 x 30(cm) para curado normalizado (resistencias potenciales), curado a vapor a presión atmosférica (resistencia acelerada) y exposición al aire después del curado a vapor (grado de endurecimiento).

Tabla Nro. 5.17: Resumen de resultados experimentales. Grupo II.(plástico, 3/8")

MEZCLA	H - 17	H - 21	H - 25	H - 30
a/c	0.60	0.55	0.51	0.44
Cemento	322	351	378	439
Agua	193	193	193	193
Arena	1104	1080	1057	1014
Binder	686	682	682	682
Asentamiento (cm)	6.5	7.5	5.5	5.0
Resistencias medias luego de				
24 hs. Vapor	15.8	19.0	22.4	28.3
Vapor + 6 días intemperie	20.6	20.2	25.2	28.7
Vapor + 27 días intemperie	22.0	24.0	30.4	33.6
7 días curado normalizado	23.1	27.3	27.6	32.8
28 días curado normalizado	26.8	30.5	31.9	36.6

Tabla Nro. 5.18: Resumen de resultados experimentales. Grupo III. (plástico, 1”)

MEZCLA	H - 17	H - 21	H -25	H - 30
a/c	0.60	0.54	0.50	0.44
Cemento	292	324	350	409
Agua	175	175	175	180
Arena	855	843	833	805
Agregado Grueso	1045	1030	1019	934
Asentamiento (cm)	7	7	4.5	8
Resistencias medias luego de				
24 hs. Vapor	18.7	20.2	19.3	24.0
Vapor + 6 días intemperie	24.9	22.1	25.7	30.2
Vapor + 27 días intemperie	21.0	28.3	30.6	34.0
Vapor + 59 días intemperie	27.8	30.4	32.1	34.6
7 días curado normalizado	24.9	26.6	28.7	32.1
28 días curado normalizado	30.6	32.3	33.1	34.8
60 días curado normalizado	32.9	33.8	37.6	38.2

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN RESISTENCIA A COMPRESIÓN

1. – INFLUENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO

Se presentan los gráficos de la evolución de la resistencia con la edad para los hormigones de tamaño máximo 3/8” y 1”, ambos de igual consistencia plástica con el objeto de analizar la influencia del tamaño máximo en el :

- a).- Curado a vapor y luego al aire
- b).- Curado normalizado

a).- Hormigones curados a vapor y luego al aire. Influencia del tamaño máximo.

EDAD (días)	H – 17		H - 21		H - 25		H – 30	
	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “
1	15.8	18.7	19.0	19.8	23.1	19.3	28.5	24.4
7	20.6	21.0	20.2	22.1	25.5	25.7	28.7	30.0
28	21.7	27.8	23.9	28.3	28.7	30.6	35.1	34.0

Tabla Nro. 6. 1: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados a vapor y luego al aire.

Los valores de la Tabla Nro. 6.1. se representan en los siguientes gráficos:

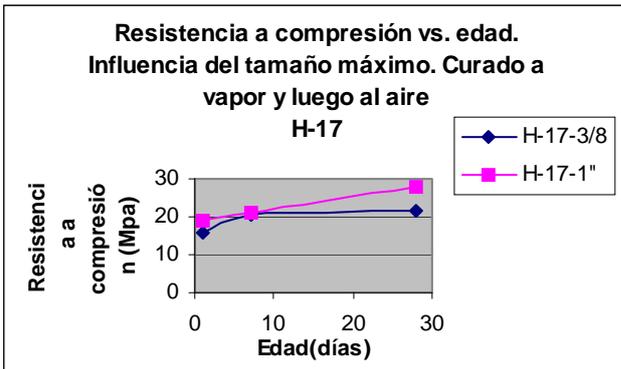


Figura 6.1. Hormigones H- 17. Tamaños máximos 3/8”y 1”.

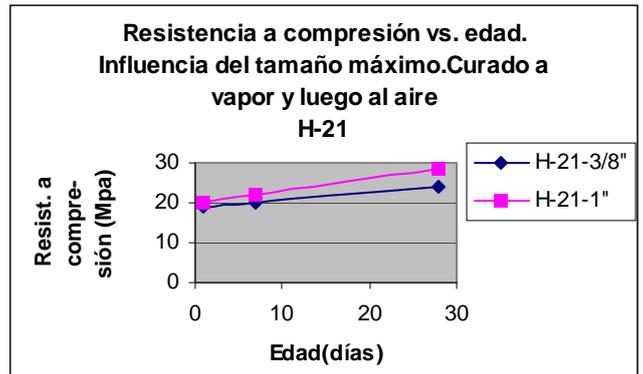


Figura 6.2. Hormigones H- 21. Tamaños Máximos 3/8” y 1”.

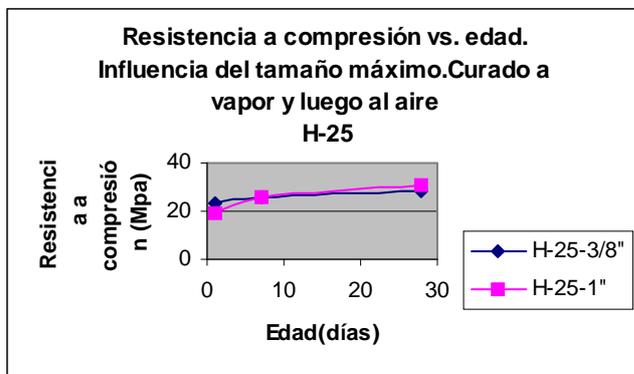


Figura 6.3: Hormigones H-25. Tamaños máximos 3/8”y 1”.

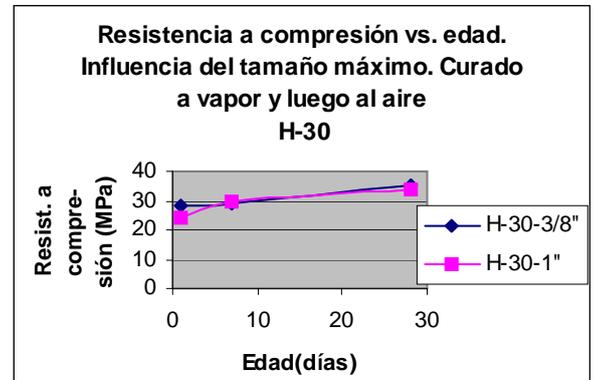


Figura 6.4: Hormigones H-30. Tamaños máximos 3/8”y 1”.

b).- Hormigones curados normalizados. Influencia del tamaño máximo.

EDAD (días)	H – 17		H - 21		H - 25		H – 30	
	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “	3/8 “	1 “
1	-	-	-	-	-	-	-	-
7	23.1	24.9	27.3	26.6	27.6	28.3	32.8	32.3
28	26.8	30.6	31.2	32.3	31.7	32.9	36.3	34.6

Tabla Nro. 6. 2: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados normalizados.

Los valores de la Tabla 6.2. se representan en los siguientes gráficos:

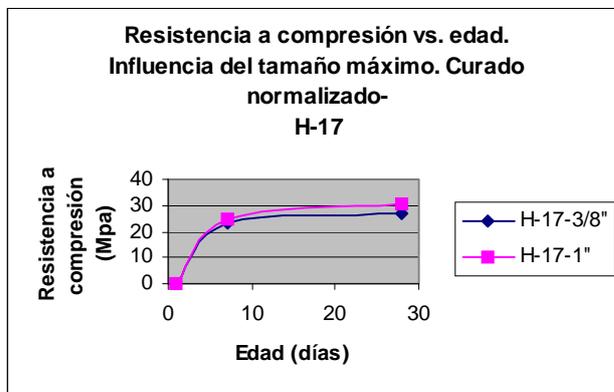


Figura 6.5. Hormigones H- 17. Tamaños máximos 3/8”y 1”.

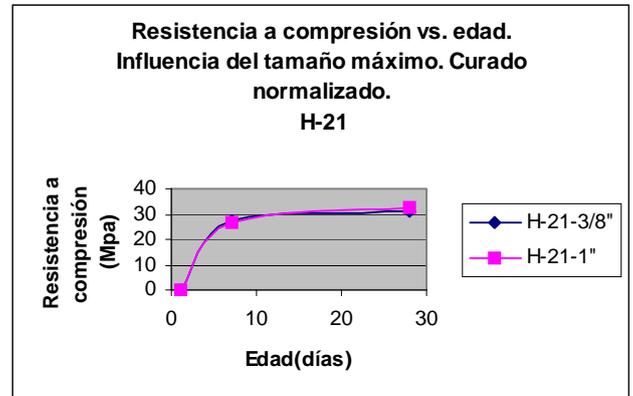


Figura 6.6. Hormigones H- 21. Tamaños Máximos 3/8” y 1”.

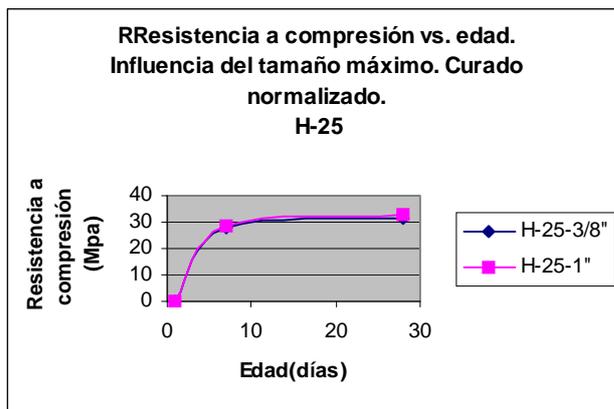


Figura 6.7. Hormigones H- 25. Tamaños máximos 3/8”y 1”.

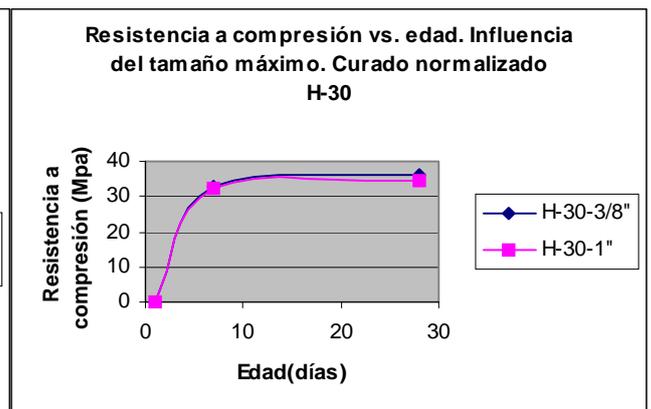


Figura 6.8. Hormigones H- 30. Tamaños Máximos 3/8” y 1”.

Dados que los coeficientes de dilatación térmica de las rocas son muy pequeños, el tamaño máximo prácticamente no tiene influencia en el tratamiento

acelerado, especialmente hasta 70 mm. Puede haber dificultades con tamaños máximos de piedras entre 100 y 150 mm. pero no se usan en prefabricación.

En las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4, que corresponden a los hormigones que fueron curados a vapor y luego al aire, se observa una tendencia de la resistencia a favor de las mezclas más pobres de tamaño máximo 1”, la que va disminuyendo a medida que aumenta el contenido de cemento. Sin embargo estas diferencias no son significativas.

En las figuras 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8, que corresponden a los hormigones que recibieron curado normalizado, se no se observa influencia del tamaño máximo en la resistencia.

2.- INFLUENCIA DE LA CONSISTENCIA.

En este punto se comparan dos grupos de hormigones de tamaño máximo 3/8”, uno de consistencia ultraseca (tiempo Vebe aprox. 35seg.) que fue compactado enérgicamente y otro de consistencia plástica (6 a 8 cm de asentamiento del Cono de Abrams) que fue compactado con varillado y vibración leve, y para ambos tipos de curado: vapor y luego al aire y normalizado.

a).- Hormigones curados a vapor y luego al aire : influencia de la consistencia.

EDAD (días)	H – 17		H – 21		H - 25		H – 30	
	3/8" ultraseco	3/8" plástico	3/8 " ultraseco	3/8 " plástico	3/8 " ultraseco	3/8 " plástico	3/8 " ultraseco	3/8" plástico
1	21.0	15.8	24.3	19.0	24.3	23.1	24.4	28.5
7	25.1	20.6	30.0	20.2	30.0	25.5	30.8	32.0
28	28.1	21.7	31.9	23.9	31.9	28.7	33.4	35.1

Tabla Nro. 6. 3: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados a vapor y luego al aire.

Los valores de la tabla 6.3. se representan en los siguientes gráficos:

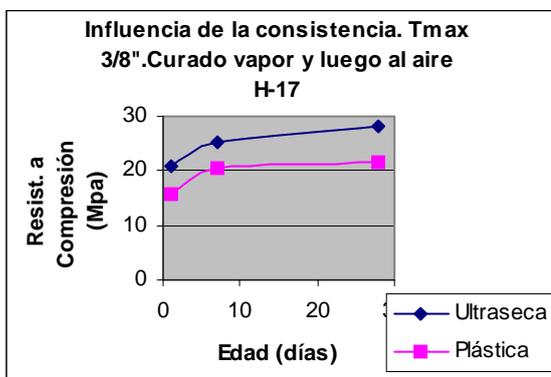


Figura 6.9. Hormigones H- 17. Consistencias ultraseca y plástica.

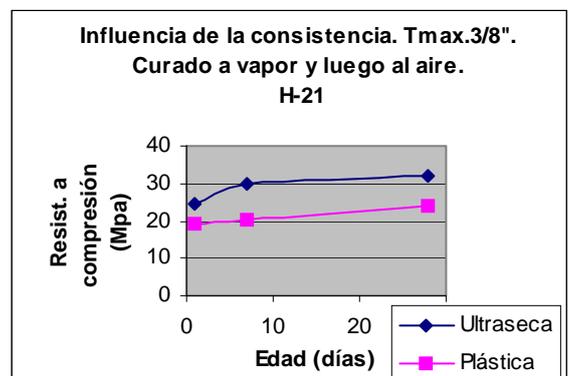


Figura 6.10. Hormigones H- 21. Consistencias ultraseca y plástica.

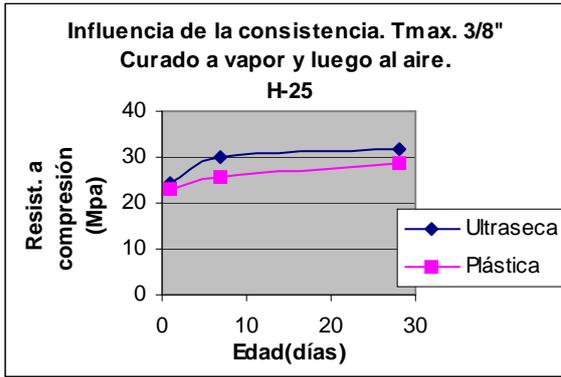


Figura 6.11. Hormigones H- 25. Consistencias ultraseca y plástica.

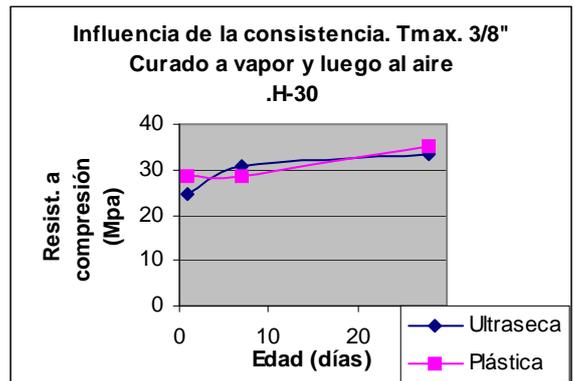


Figura 6.12. Hormigones H- 30. Consistencias ultraseca y plástica.

b).- Hormigones curados normalizados : influencia de la consistencia.

EDAD (días)	H - 17		H - 21		H - 25		H - 30	
	3/8" ultraseco	3/8" plástico	3/8 " ultraseco	3/8 " plástico	3/8 " ultraseco	3/8 " plástico	3/8 " ultraseco	3/8" plástico
1	-	-	-	-	-	-	-	-
7	30.6	23.1	36.6	27.3	36.6	27.6	34.0	32.8
28	34.6	26.8	37.4	31.2	37.4	31.7	39.3	36.3

Tabla Nro. 6. 4: Resistencias a compresión (MPa) en función de la edad para distintos hormigones curados normalizados.

Los valores de la tabla 6.4. se representan en los siguientes gráficos:

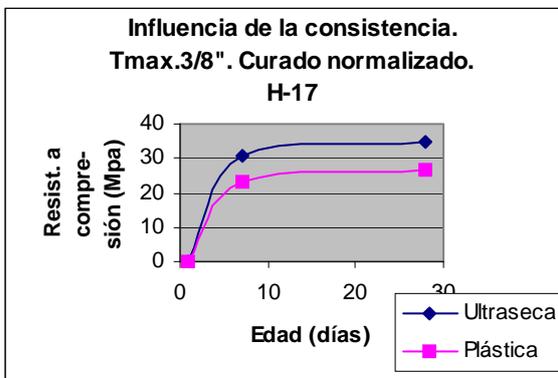


Figura 6.13. Hormigones H- 17. Consistencias ultraseca y plástica.

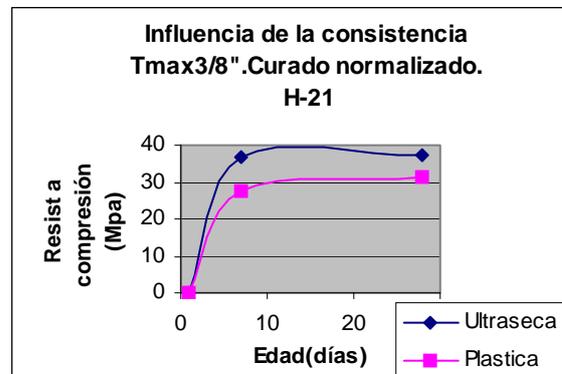


Figura 6.14. Hormigones H- 21. Consistencias ultraseca y plástica.

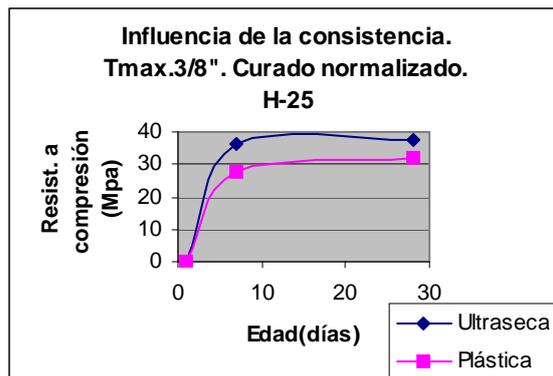


Figura 6.15. Hormigones H- 25. Consistencias ultraseca y plástica.

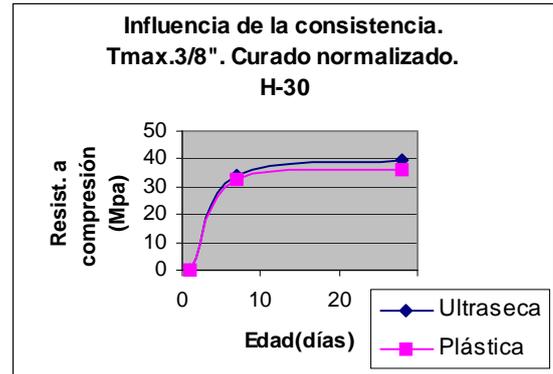


Figura 6.16. Hormigones H- 30. Consistencias ultraseca y plástica.

Independientemente del tipo de curado empleado, la compactación y la consistencia del hormigón desempeñan un papel decisivo en las resistencias a corto y largo plazo.

De la observación de los gráficos, se desprende que las mezclas ultrasecas que fueron enérgicamente compactadas, se comportan mejor que las plásticas, a igual relación agua – cemento y tamaño máximo de agregado

Como los hormigones bien compactados resisten mejor las tensiones térmicas durante el tratamiento con calor, sus resistencias son en consecuencia mayores ya que tienen menos poros y menos agua. Estos dos factores, agua y poros, en todo tratamiento térmico ejercen un efecto destructor porque se dilatan el doble de su volumen original

3.INFLUENCIA DEL TIPO DE CURADO

En este punto se analiza la influencia que tiene el método de curado empleado en la evolución de la resistencia a compresión, de cilindros de prueba, con la edad. Se estudian por separado cada uno de los tres grupos de hormigones:

- **Grupo I : Tamaño máximo 3/8". Consistencia ultraseca.**
- **Grupo II : Tamaño máximo 3/8". Consistencia plástica.**
- **Grupo III: Tamaño máximo 1". Consistencia plástica.**

Los métodos de curado estudiados fueron:

a).- Curado a vapor y luego al aire: las probetas una vez moldeadas reciben curado a vapor a presión atmosférica junto a los elementos estructurales que se fabrican. El método utilizado contempla :

1. Período inicial: 6 horas
2. Período de calentamiento: 2 horas
3. Período de vaporización: 8 horas
4. Período de enfriamiento: 2 horas

A las 24 horas se las deposita a la intemperie hasta la edad de ensayo.

b).- Curado normalizado: las probetas son sumergidas en agua a una temperatura de aproximadamente 21 °C hasta la edad de ensayo.

En las Tablas 6.5., 6.6.,y 6.7. se presentan los resultados de los ensayos a compresión.

3.1. Hormigones del grupo I: Tmax. 3/8"- Consistencia ultraseca

Edad días	H - 17		H- 21 - 25		H - 30	
	C. V. Y A.*	C.N.**	C. V. Y A.	C.N.	C. V. Y A.	C. N.
1	21.0	-	24.3	-	24.4	-
7	25.1	30.6	30.0	36.6	30.8	34.0
28	28.1	34.6	31.9	37.4	33.4	39.3
60	30.8	39.6	35.3	42.5	38.7	43.4
90	34.4	42.5	38.9	45.1	39.9	44.6
150	35.9	46.6	41.4	46.6	41.9	47.0

*Curado a vapor y luego al aire - ** Curado normalizado

Tabla Nro. 6.5. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado.

En las figuras 17, 18 y 19 se grafican los resultados de los ensayos.

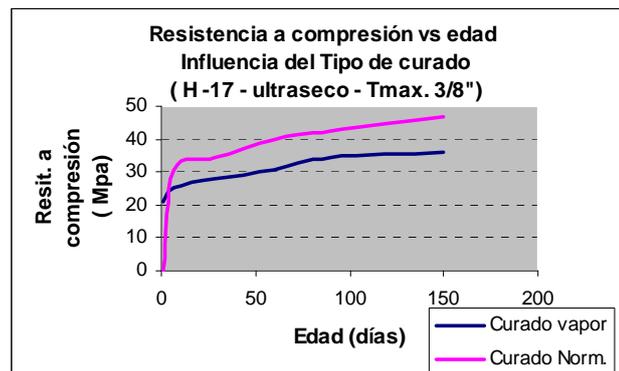


Figura 6.17: Hormigón H 17. Resistencias a compresión (MPa Influencia del tipo de curado.

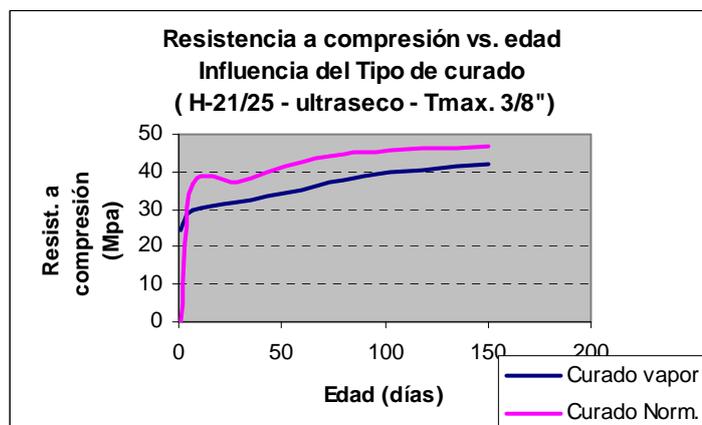


Figura 6.18.: Hormigón H - 21/25. Resistencia a compresión (MPa Influencia del tipo de curado.

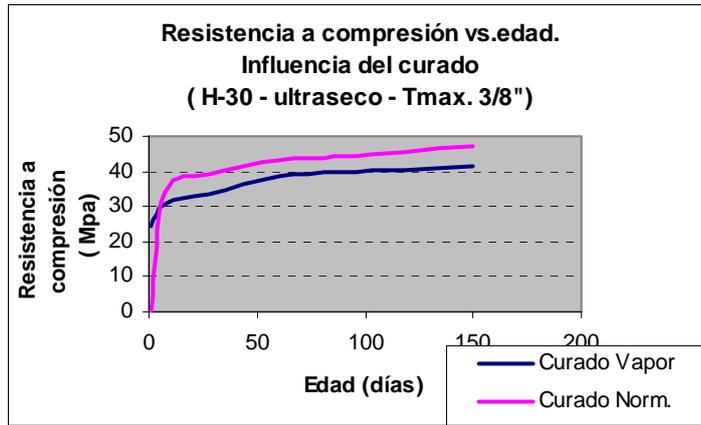


Figura 6.19.: Hormigón H- 30. Resistencia a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado.

3.2. Hormigones del grupo II: Tmax. 3/8” – Consistencia plástica.

Edad días	H -17		H - 21		H- 25		H - 30	
	C.V.Y A.*	C.N.**	C. V. Y A.	C.N.	C. V. Y A.	C.N.	C. V. Y A.	C. N.
1	15.8	-	19.0	-	23.1	-	28.5	-
7	20.6	23.1	20.2	27.3	25.5	27.6	28.7	32.8
28	21.7	26.8	23.9	31.2	28.7	31.7	35.1	36.3

*Curado a vapor y luego al aire - ** Curado normalizado

Tabla Nro. 6.6. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado.

En las figuras Nro. 20, 21, 22 y 23 se grafican los resultados de los ensayos.

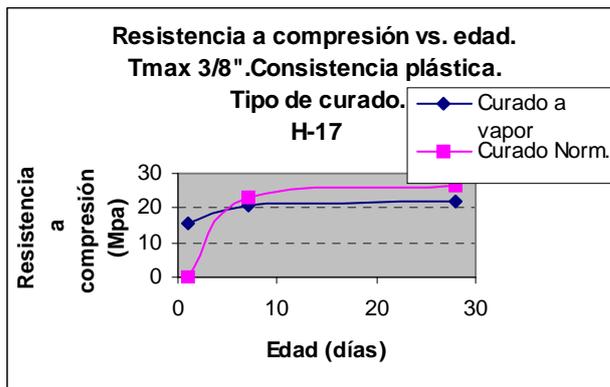


Figura Nro. 20: Hormigón H – 17. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

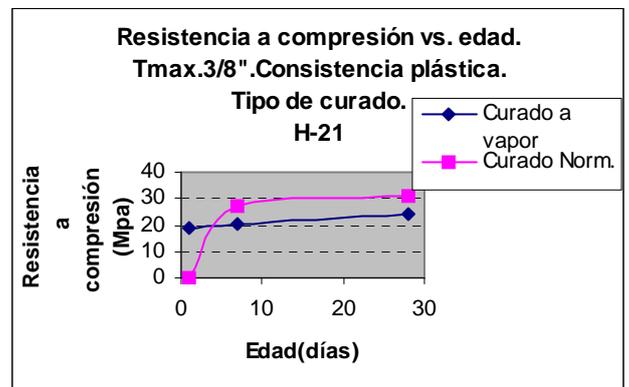


Figura Nro. 21: Hormigón H-21. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

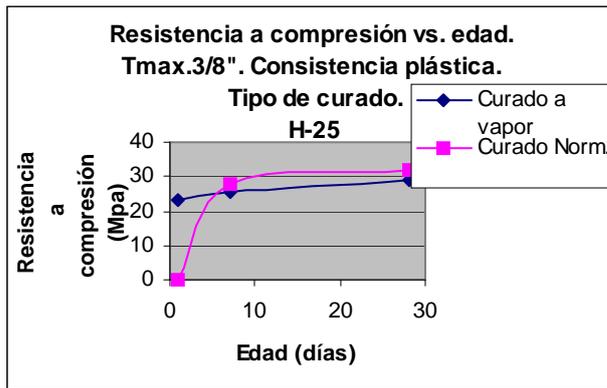


Figura Nro. 22: Hormigón H –25. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

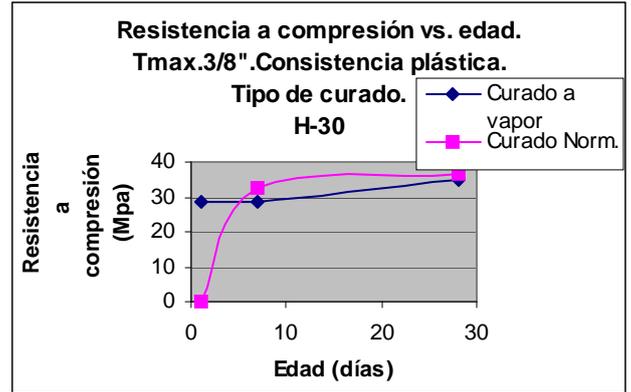


Figura Nro. 23: Hormigón H-30. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

3.3. Hormigones del grupo III: Tmax. 1". Consistencia plástica.

Edad Días	H -17		H - 21		H- 25		H - 30	
	C.V.Y A.*	C.N.**	C. V. Y A.	C.N.	C. V. Y A.	C.N.	C. V. Y A.	C. N.
1	18.7	-	19.8	-	19.3	-	24.4	-
7	21.0	24.9	22.1	26.6	25.7	28.3	30.0	32.3
28	27.8	30.6	28.3	32.3	30.6	32.9	34.0	34.6
60	30.6	32.9	30.4	33.8	32.1	37.6	34.6	38.2

*Curado a vapor y luego al aire - ** Curado normaliza

Tabla Nro. 6.7. : Resistencias a compresión (MPa). Influencia del tipo de curado.

En las figuras Nro. 24, 25, 26 y 27 se grafican los resultados de los ensayos.

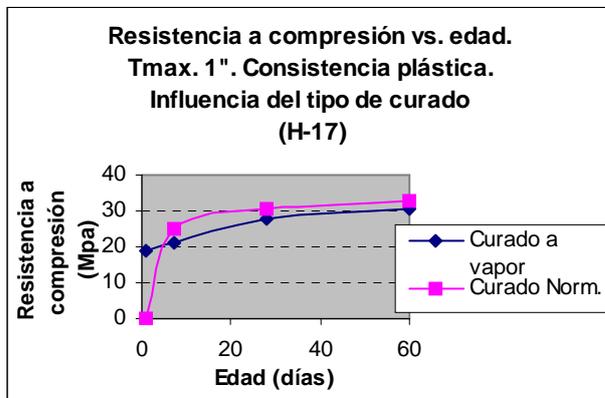


Figura Nro. 24: Hormigón H-17. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

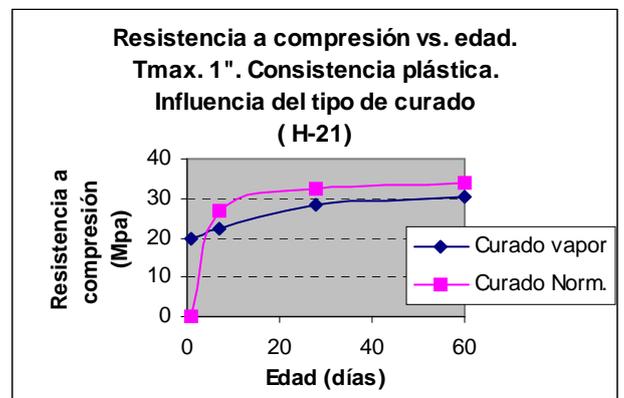


Figura Nro. 25: Hormigón H-21. Resistencia vs. edad. Influencia del tipo de curado.

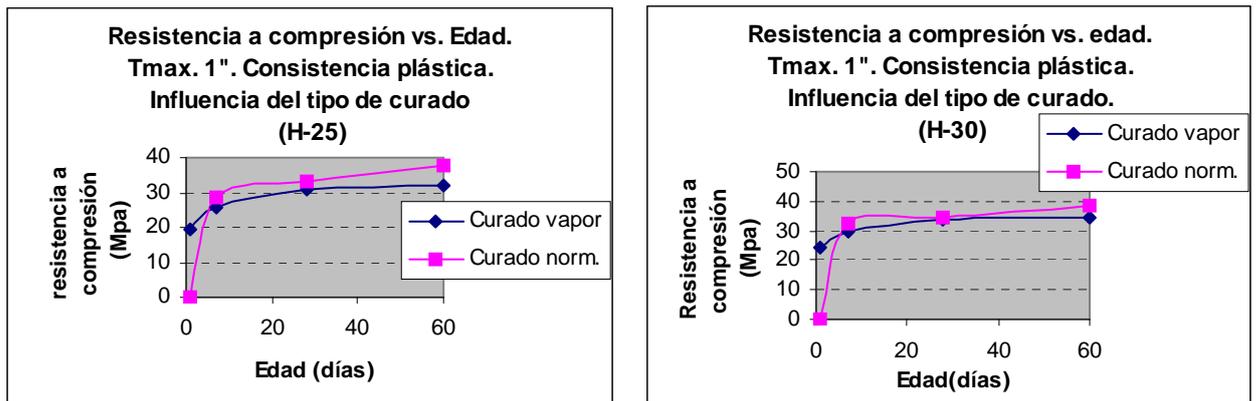


Figura Nro. 26: Hormigón H-25. Resistencia a compresión vs. edad. Influencia del tipo de curado. **Figura Nro. 27: Hormigón H-30. Resistencia a compresión vs. edad. Influencia del tipo de curado.**

La necesidad de curar el hormigón, radica en el hecho de que la hidratación del cemento sólo se logra cuando los capilares están llenos de agua, o cuando la presión de vapor de los capilares es del orden de 0.8 de la presión de saturación. La velocidad máxima de hidratación se produce solo en condiciones de saturación. Esta es la razón por la que se debe evitar la pérdida de humedad por evaporación. (et al Neville)

La observación de las figuras 17 a 27 permite confirmar lo antes dicho. Además se ponen de manifiesto tres situaciones bien claras:

La primera es la que corresponde al curado acelerado en las primeras 24 horas, que muestra una curva de evolución de la resistencia por arriba de la del curado normalizado, ya que si bien es cierto, las condiciones de saturación se mantienen en los dos métodos, la mayor velocidad de hidratación se debe a las mas altas temperaturas, razón del curado acelerado.

La segunda que corresponde a un período intermedio hasta que las resistencias de los hormigones curado a vapor y luego al aire igualan la de curado normalizado, hecho que ocurre a los 5 días aproximadamente.

La tercera situación es la que corresponde a los hormigones que recibieron el curado acelerado pero se los conserva a la intemperie. Manifiestan una disminución de su velocidad de hidratación y por lo tanto las resistencias de los hormigones curados normalizados que ya tienen ritmo constante (esto se puede ver como la tangente a las curvas) son siempre mayores.

Este hecho importante debe ser tenido en cuenta en el análisis que se haga de mezclas óptimas sobre la conveniencia de:

- Optar por mezclas más resistentes después del tratamiento de curado acelerado, evitando el posterior curado húmedo, o que este período sea muy breve.
- Optar por mezclas menos resistentes después del tratamiento acelerado y continuar con un período de curado húmedo o de lo contrario prever un acopio al aire más prolongado.

Recordemos que mezcla óptima será aquella que cumpliendo los requisitos de resistencia y durabilidad, tenga el menor costo de producción. En el costo de producción influyen: contenido de cemento, duración y temperaturas del tratamiento

empleado, y período de acopio de los elementos fabricados antes de que puedan ser entregados. Esto se analiza en el Capítulo 10.

4.- INFLUENCIA DE LA RIQUEZA DE LA MEZCLA.

Se presentan en la Tabla Nro. 6.8. las resistencias a 24 hs. después del tratamiento y a 28 días curado acelerado y luego al aire expresadas como porcentaje de la resistencia a 28 días de los correspondientes hormigones curado normalizado, como los correspondientes contenidos de cemento, para todos los hormigones estudiados.

<i>Clase hormigón</i>	<i>Contenido de cemento (Kg/m³)</i>	<i>Resit. A 24 hs(%)</i>	<i>Resit. 28 días(%)</i>	<i>Características</i>
<i>H - 17</i>	290	60	80	<i>Grupo I Tmax. 3/8" - Ultrasecos</i>
<i>H - 21/25</i>	316	63	84	
<i>H - 30</i>	352	64	87	
<i>H - 17</i>	322	60	81	<i>Grupo II Tmax. 3/8" Plásticos</i>
<i>H - 21</i>	351	61	77	
<i>H - 25</i>	378	72	91	
<i>H - 30</i>	439	81	97	
<i>H - 17</i>	292	61	90	<i>Grupo III Tmax. 1" Plásticos</i>
<i>H - 21</i>	324	63	88	
<i>H - 25</i>	350	65	94	
<i>H - 30</i>	409	71	97	

Tabla Nro. 6.8. Contenidos unitarios de cemento.

Como es sabido, grandes cantidades de cemento aceleran de por sí el endurecimiento del hormigón. Por consiguiente para un dado tratamiento térmico se pueden alcanzar mayores resistencias a cualquier edad con contenidos crecientes de cemento.

Sin embargo en la práctica no siempre es así, ya que se pueden alcanzar mayores resistencias a cualquier edad con relaciones agua/cemento más bajas. En general no es conveniente obtener buenas resistencias a base de altos contenidos de cemento.

Del análisis de los resultados de las resistencias a compresión a 24 horas después del curado a vapor y a 28 días después del curado a vapor y luego al aire referidas a la resistencia a los 28 días curado normalizado de los tres grupos de hormigones surge:

- Que a medida que aumenta el contenido de cemento aumenta la resistencia.
- Que este aumento depende de la relación a/c, puesto que a igual contenido de cemento los hormigones con menor relación a/c dan mayores resistencias.
- Que para igual relación a/c, los hormigones ultra secos dan mayores resistencias que los plásticos pero no hay influencia en las resistencias relativas expresadas como porcentajes de las resistencias a 28 días curado normalizado..

CAPITULO 7

EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA EDAD

1.INTRODUCCIÓN

La evolución de la resistencia con la edad depende en gran medida de las características del cemento empleado, pero como se ha visto también de otros factores como la relación agua cemento, porosidad, petrografía, forma y textura del agregado, tipo de curado. Este hecho hace imposible encontrar ecuaciones únicas de aplicación general que representen la evolución de la resistencia con la edad si se cambia alguno de estos factores.

Con los resultados de las resistencias a compresión a distintas edades para los tres grupos de hormigones estudiados en este trabajo se han encontrado ecuaciones que relacionan la resistencia con la edad, para cada grupo por separado y también todos juntos y para las condiciones de curado normalizado y acelerado y luego al aire, teniendo en cuenta sólo la relación agua cemento.

2.- ECUACIONES QUE VINCULAN LA RESISTENCIA CON LA EDAD.

Se ha estudiado la mejor regresión que permita calcular la resistencia en función de la edad, para cada tipo de curado, resultando una expresión potencial en todos los casos.

- Hormigones del Grupo I

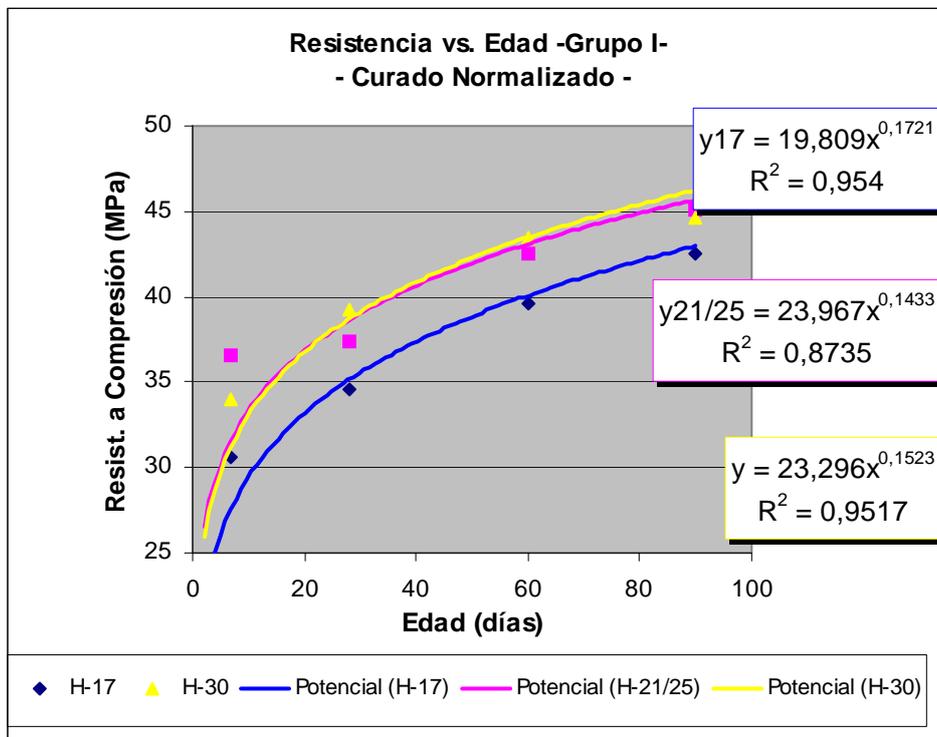


Figura 7.1. Hormigones del grupo I – Curado normalizado

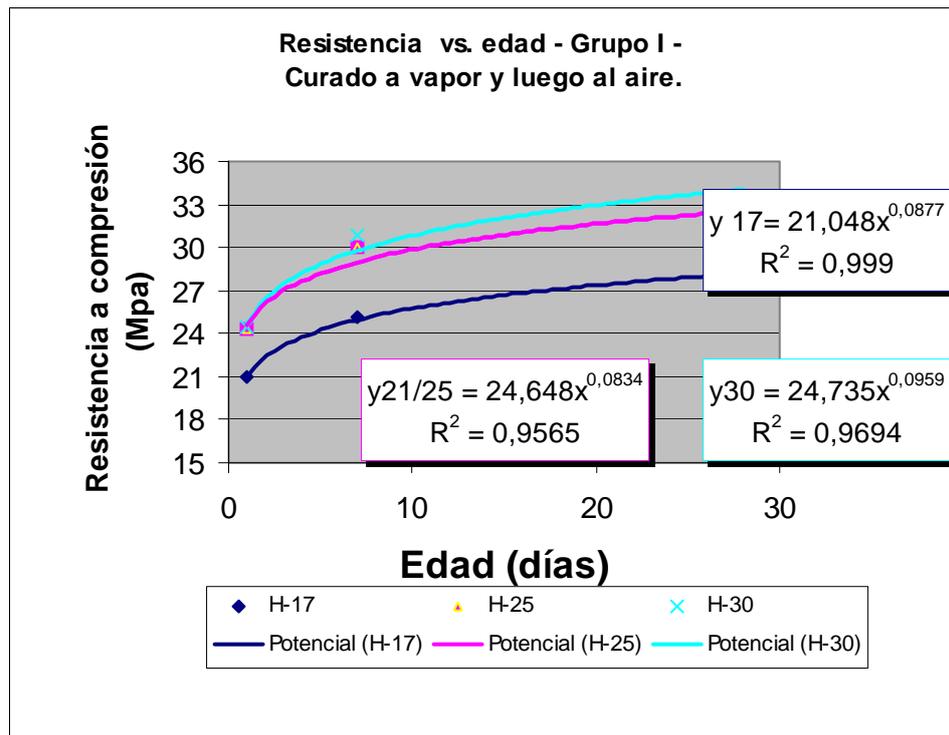


Figura 7.2. Hormigones del grupo I – Curado a vapor y luego al aire

- Hormigones del Grupo II:

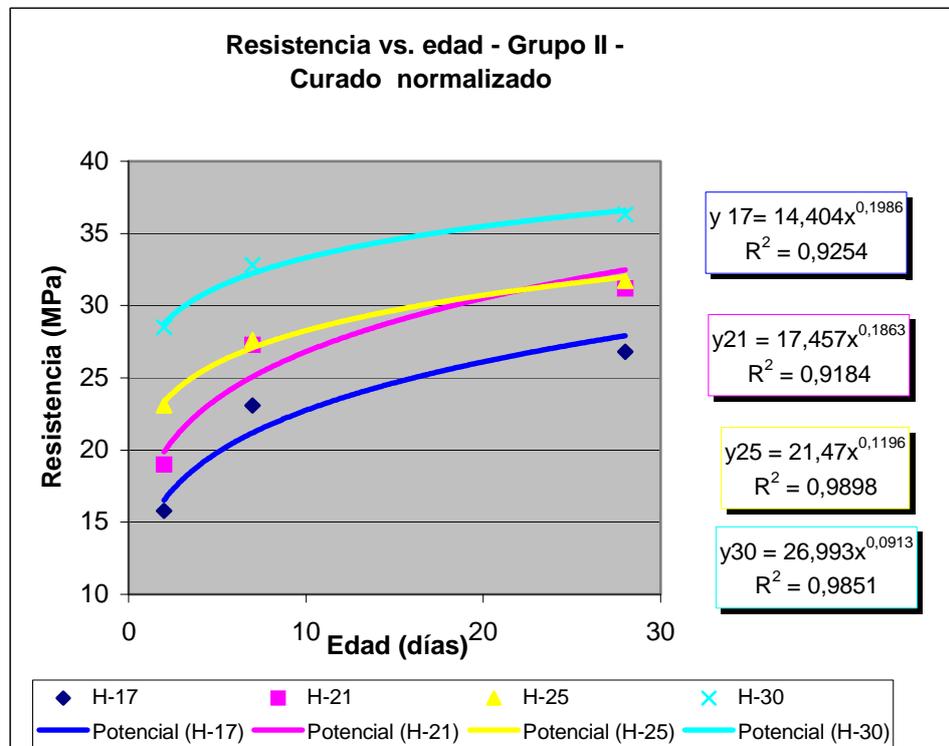


Figura 7.3. Hormigones del grupo II – Curado Normalizado

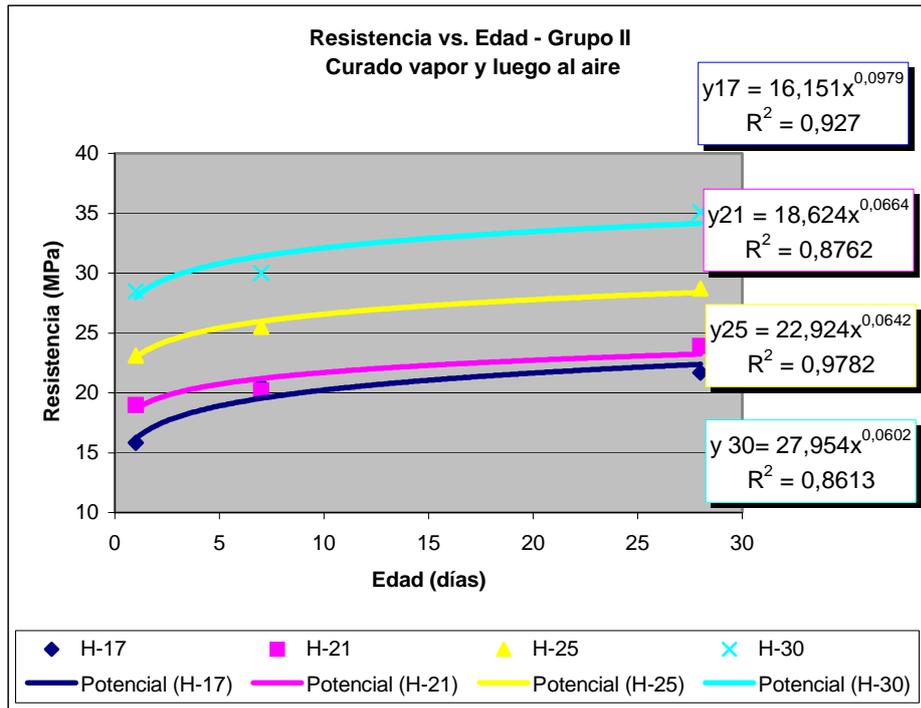


Figura 7.4. Hormigones del grupo II – Curado a vapor y luego al aire

Hormigones del Grupo III-

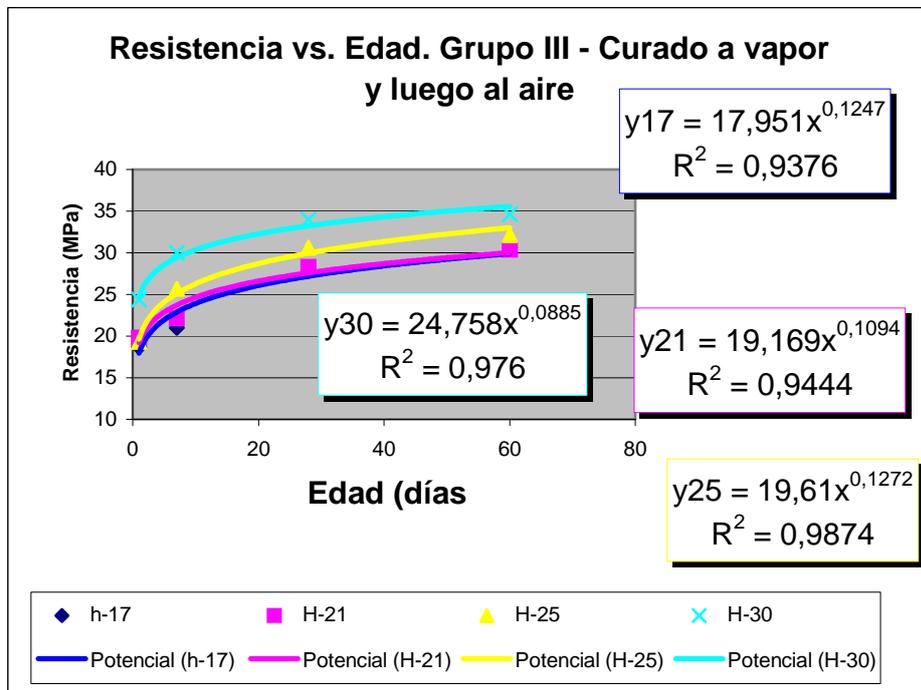


Figura 7.5. Hormigones del grupo III – Curado a vapor y luego al aire

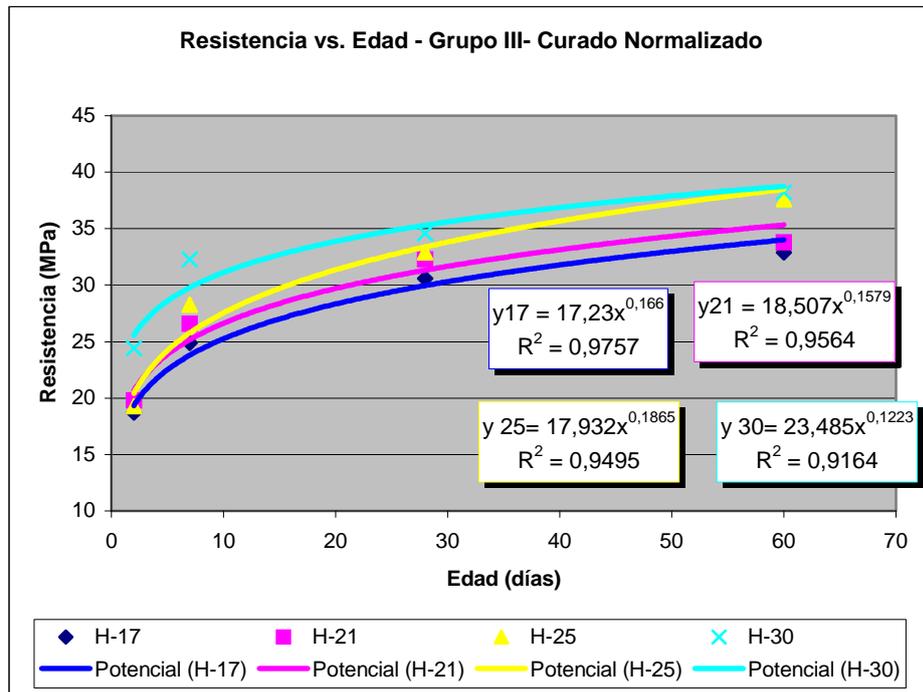


Figura 7.6. Hormigones del grupo III – Curado Normalizado

Como se observa en los gráficos, las ecuaciones obtenidas de la resistencia en función de la edad son del tipo:

$$y = k_1 x^{k_2}$$

Donde : y: resistencia a compresión a la edad de x días

x : edad en días

k₁ y k₂: constantes que dependen del nivel de resistencia y tipo de curado

En la siguiente tabla se presentan los valores que toman las constantes para cada grupo de hormigón estudiado.

		H-17			H-21			H-25			H-30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Curado Nor	K ₁	19.809	14.404	17.230	-	17.457	18.507	23.967	21.470	17.932	23.296	26.993	23.485
	K ₂	0.1721	0.1986	0.166	-	0.1863	0.1579	0.1433	0.1196	0.1865	0.1523	0.0913	0.1223
Curado v. y a	K ₁	21.048	16.151	17951	-	18.624	19.169	24.648	22.924	19.61	24.735	27.954	24.76
	K ₂	0.0877	0.0979	0.1247	-	0.0664	0.1247	0.0834	0.0642	0.127	0.0959	0.0602	0.089

Tabla 7.1: Valores de los coeficientes k₁ y k₂ de las ecuaciones de resistencia en función de la edad.

Del análisis de estas ecuaciones surge que para todos los hormigones los exponentes en el curado normal son siempre mayores que los correspondientes en el curado a vapor y luego al aire. Esto pone de manifiesto que hay una desaceleración del proceso de hidratación, causado precisamente por la exposición al aire.

Además, se observa que la variación de la resistencia con la edad para cada nivel de hormigón identificado por su resistencia característica, no solo depende de la relación agua-cemento y del tipo de curado, sino de otros factores, puesto que existe una ecuación diferente para cada uno de los grupos estudiados.

Esto confirma que la resistencia se ve influida también por el volumen total de cavidades (poros del gel, aire incluido, poros capilares, aire atrapado, e incluso por la forma de los poros), el que a su vez depende de otros factores como : relación cemento agregado, granulometría, textura superficial, forma , tamaño máximo del agregado y grado de compactación de la mezcla.

Por ejemplo se observa que para igual consistencia (hormigones del grupo II y III) y relación agua-cemento, los hormigones elaborados con mayor tamaño máximo ganan resistencia más rápido en la condición de exposición al aire. Se sabe que a mayor tamaño máximo menor espacios vacíos.

Si se analizan las ecuaciones de los hormigones del grupo I y II, curados a vapor y luego al aire, que corresponden a mezclas de igual tamaño máximo, pero uno ultraseco y otro plástico, se comprueba que los exponentes de las ecuaciones del grupo I son también mayores que los correspondientes del grupo II, y además varían mucho menos con la relación agua cemento.

Es de esperar que la compactación energética que hayan recibido los hormigones del grupo I, junto con el menor volumen de pasta, hagan que tengan menos espacios vacíos. La presencia de vacíos favorece la autodesecación.

En el caso de curado normalizado, se observan también diferencias, pero poco significativas, como se explicó en el Capítulo 6, apartado 1, "Influencia del tamaño máximo".

Hay que remarcar que para que la resistencia se desarrolle satisfactoriamente, no es necesario que se hidrate todo el cemento, y de hecho esto nunca ocurre, sino que el espacio lleno de agua en el hormigón fresco, sea mayor que el volumen que se puede llenar con los productos de hidratación. (et al Neville).

Se ha podido observar que las mezclas con menor relación agua cemento ganan mas rápidamente resistencia hasta los 28 días pero luego la velocidad disminuye. Lo contrario ocurre con las mezclas de mayor relación agua cemento

Estos resultados indican la necesidad de estudiar más a fondo el tema, tratando de caracterizar las mezclas con algún parámetro que sea más sensible a todos los factores simultáneamente, como podría ser el caso de la relación gel /espacio en lugar de la relación agua cemento, puesto que la cantidad de gel presente en la pasta de cemento en un determinado momento es una función en sí misma de la edad y del tipo de cemento.(et al Neville)

3.- VARIACIÓN RELATIVA DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

En este punto se estudia la variación relativa de la resistencia con la edad de los hormigones curados a vapor y luego al aire referida a la resistencia a 28 días curado normalizado.

Se presentan las tablas, las correspondientes figuras y la ley que rige la variación porcentual de la resistencia.

- Hormigones del grupo I: Tmax. 3/8"- Ultrasecos.

Clase de hormigón	Edad (días)	Resistencias		Resistencia (Mpa) 28 días normalizada
		MPa	Relat. (%)	
H - 17	1	21	60	35
	7	25	71	
	28	28	80	
	60	31	89	
	90	35	100	
H - 21/25	1	24	63	38
	7	30	79	
	28	32	84	
	60	35	92	
	90	39	103	
H - 30	1	25	64	39
	7	31	79	
	28	34	87	
	60	39	100	
	90	40	103	

Tabla 7.2.: Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo I

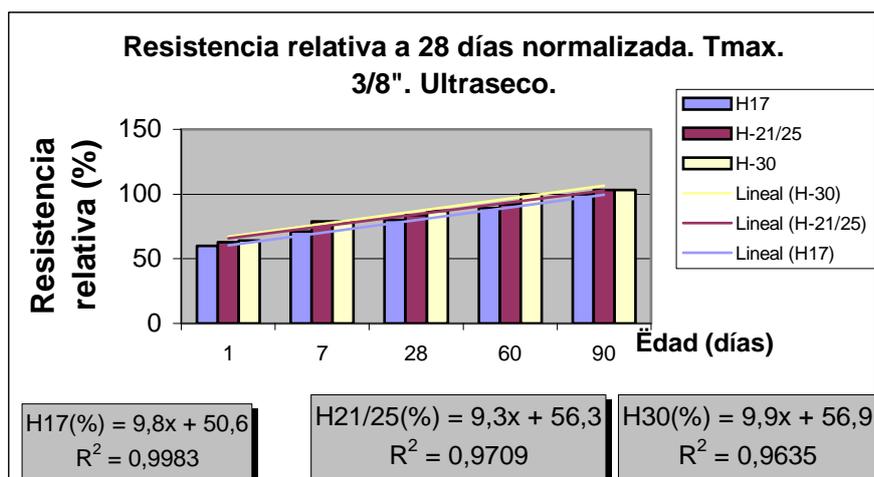


Figura 7.7. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo I

Las ecuaciones de tendencia son:

$H17(\%) = 9,8x + 50,6$

$H21/25(\%) = 9,3x + 56,3$

$H30 = 9,9x + 56,9$

Con x = número de intervalo analizado, toma los valores 1, 2, 3, 4, o 5

- Hormigones del grupo II: Tmax. 3/8". Consistencia plástica.

Hormigón	Ed (días)	Resistencias		(Mpa) 28 días normalizada
		Pa	Relat. (%)	
H - 17	1	16	60	27
	7	21	78	
	28	22	81	
H - 21	1	19	61	31
	7	20	65	
	28	24	77	
H - 25	1	23	64	32
	7	26	72	
	28	29	81	
H - 30	1	29	81	36
	7	29	81	
	28	35	97	

Tabla 7.3. Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo II

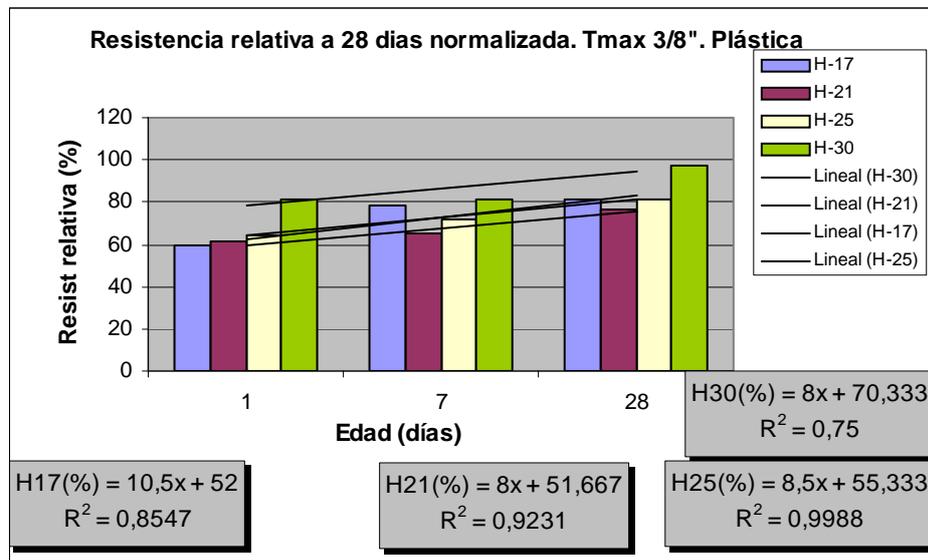


Figura 7.8. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo II

Las ecuaciones de tendencia son:

$H17(\%) = 10,5 x + 52$

$H21(\%) = 8 x + 51,667$

$H25(\%) = 8,5 x + 55,333$

$H30(\%) = 8 x + 70,333$

Con x = número de intervalo analizado, toma los valores 1, 2, o 3

- Hormigones del grupo III: Tmax. 1". Consistencia plástica.

Identificación de hormigón	Edad (días)	Resistencia (MPa)	Resistencia Relat. (%)	Resistencia (Mpa) 28 días normalizada
H-17	1	19	61	31
	7	21	68	
	28	28	90	
	60	31	100	
H - 21	1	20	63	32
	7	22	69	
	28	28	88	
	60	31	97	
H - 25	1	19	56	33
	7	26	79	
	28	31	94	
	60	32	97	
H - 30	1	25	71	35
	7	30	86	
	28	34	97	
	60	35	100	

Tabla 7.4. Variación porcentual de la resistencia relativa. Grupo III

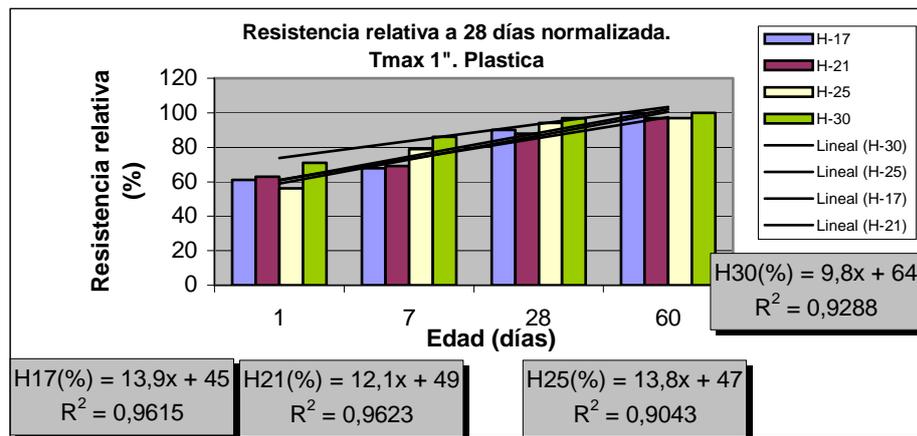


Figura 7.9. Variación de la resistencia relativa con la edad. Grupo III.

$H17(\%) = 13.9 x + 45$

$H21(\%) = 12.1 x + 49$

$H25(\%) = 13.8 x + 47$

$H30(\%) = 9.8 x + 64$

Con x = número de intervalo analizado, toma los valores 1, 2, 3, o 4

Del análisis de los resultados presentados en las figuras 7,8 y 9, surge:

Para hormigones ultrasecos (Tmax. 3/8")

- Que el curado a vapor que se aplica permite obtener resistencias porcentuales del orden del 60, 63 y 64% para los hormigones identificados como H-17, H-21/25, y H-30 respectivamente de las correspondientes resistencias a 28 días curado normalizado. Se observa un aumento con la disminución de la relación agua cemento, pero poco significativa.

- Que el curado al aire posterior retrasa la evolución de la resistencia en todos los casos y en consecuencia se alcanza la resistencia de los 28 días curado normalizado a los 90 días.

Para hormigones plásticos (Tmax. 3/8"y 1")

- Que el curado a vapor que se aplica permite obtener resistencias porcentuales variables con la calidad de los hormigones que van de 60 a 80% de la resistencia a 28 días del curado normalizado. También aquí se observa un aumento porcentual de la resistencia con la disminución de la relación a/c, poco significativa para los hormigones identificados como H-17, H-21 y H-25, y más importante para los H-30.
- Que el curado al aire posterior retrasa la evolución de la resistencia en todos los casos y en consecuencia se alcanza la resistencia de los 28 días curado normalizado a los 60 días.

Los resultados de la resistencias a compresión después de n horas de tratamiento y de 28, 60 y 90 días al aire expresadas como porcentajes de la resistencia a 28 días curado normalizado, confirman con muy buena aproximación los valores presentados en la siguiente tabla extraída de las recom. del RILEM (Moscú 1964).

Tabla 7.5: Recomendaciones del RILEM. Distintos métodos de curado.

Método	Período Preliminar (hs)	Tiempo de endurecimiento (hs)	Tiempo de enfriamiento (hs)	Tiempo total (hs)	Resistencia a compresión en % de B ₂₈			Adherencia %	Retracción
					B _{v_n}	B ₂₈	B ₉₀		
Endurecimiento Normal		672				100	120	100	1
Calor hasta 100°C presión atmosférica	1	4	3	8	25	60	55	40	0.9
	3	5	3	12	30	70	70	40	
	5	6	2	13	50	80	85	50	
	6	8	2	16	60	90	95	60	
	8	12	2	22	75	95	100	70	
	24	24	1	49	100	110	125	80	

- Cemento NZ 275, 1:3 GT,W/Z=04
- B₂₈ : resistencia a compresión a 28 días, curado normalizado
- B_{v_n} : resistencia a compresión después de n horas de tratamiento
- B₂₈ : resistencia a compresión a 28 días del hormigón tratado térmicamente.
- B₉₀ : resistencia a compresión a 90 días del hormigón tratado térmicamente
-

Sin embargo, estos datos estimativos pueden mejorarse si se tiene en cuenta que existe un comportamiento diferente según se trate de mezclas ultra secas, o plásticas, con compactación energética y normal respectivamente.

CAPITULO 8

ESTIMACIÓN DEL GRADO DE ENDURECIMIENTO
USANDO LA RESISTENCIA POTENCIAL Y DE LA
RESISTENCIA POTENCIAL USANDO LA RESISTENCIA
ACELERADA

1.- INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de este trabajo fue el de poder estimar el grado de endurecimiento de los hormigones curados a vapor y luego al aire a partir de las resistencias obtenidas en laboratorio con curado normalizado (resistencia potencial), como así también, estimar la resistencia potencial de los 28 días a partir de la resistencia acelerada obtenida con el curado a vapor.

Para ello se correlacionaron los resultados de los ensayos a compresión de ambos tipos de curado, para cada uno de los tres grupos de hormigones y finalmente para todos juntos.

2. CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA POTENCIAL Y EL GRADO DE ENDURECIMIENTO PARA CADA GRUPO DE HORMIGONES.

Se presentan las ecuaciones que vinculan las resistencias potenciales y el grado de endurecimiento logrado en condiciones de clima cálido y húmedo (temperatura media diaria =30 °C y humedad relativa 90%), para cada grupo de hormigones y cada nivel de resistencia, las que resultaron lineales de la forma

$$y = m x + b$$

donde:

y = Grado de endurecimiento del hormigón curado a vapor y luego al aire

x = Resistencia potencial del hormigón curado normalizado.

2.1.-GRUPO I : Tmax. 3/8” – Ultraseco

Mezcla (1)	Edad (2)	Grado End. Experim. (3)	Grado End. Estimada (part) (4)	Grado end. Estimada (gal) (5)	Res. Potencial (6)
H – 17					
	7	25,1	25.2	26.6	30,6
	28	28,1	28.0	30.1	34,6
	60	30,8	31.4	34.5	39,6
	90	34,4	33.4	37.1	42,5
	150	35,9	36.3	40.6	46,6
H- 21 / 25	1	24,3			
	7	30	30.2	31.8	36,6
	28	31,9	31.1	32.5	37,4
	60	35,3	36.5	37.0	42,5
	90	38,9	39.3	39.3	45,1
	150	42	41.0	40.7	46,6
H-30	1	24,4			
	7	30,8	30.2	29.6	34
	28	33,4	34.8	34.2	39,3
	60	38,7	38.3	37.8	43,4
	90	39,9	39.3	38.9	44,6
	150	41,2	41.4	41.0	47

Tabla 8.1. Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Hormigones del Grupo I.

En las Tablas 8.1, 8.2 y 8.3 se han volcado los resultados experimentales (columnas (3) y (6)) y los valores estimados con las ecuaciones de correlación particulares (columna (4)) y correlación general (columna(5)). Las figuras 8.1 a la 8.11, muestran las correlaciones obtenidas para cada grupo de hormigones.

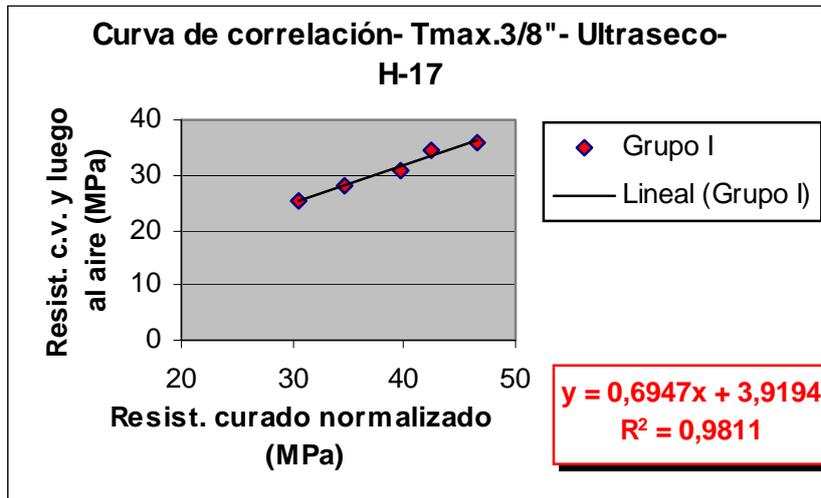


Figura 8.1: Curva de correlación – H-17 - Ultraseco

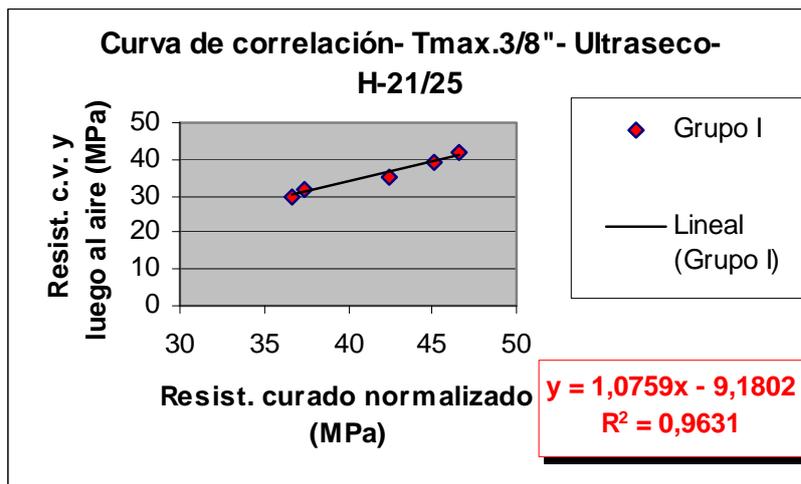


Figura 8.2: Curva de correlación – H21/25 - Ultra seco

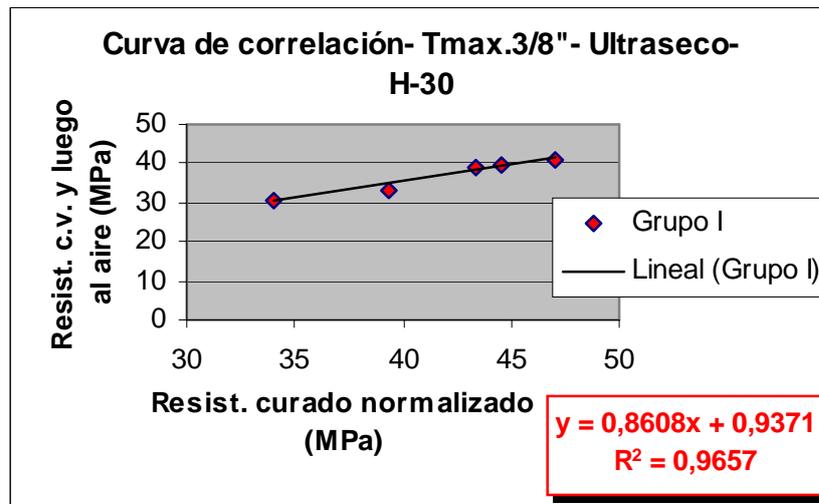


Figura 8.3: Curva de correlación – H-30 - Ultraseco

2.2.- GRUPO II: Tmax. 3/8"- Plástico

Mezcla (1)	Edad (2)	Grado End. Experim. (3)	Grado End. Estimada (part) (4)	Grado end. Estimada (gral) (5)	Res. Potencial (6)
H-17	1	15,8			-
	7	20,6	20,6	20,0	23,1
	28	21,7	21,7	23,3	26,8
H-21	1	19			-
	7	20,2	20,2	23,7	27,3
	28	23,9	23,9	27,1	31,2
H-25	1	23,1			-
	7	25,5	25,5	24,0	27,6
	28	28,7	28,7	27,6	31,7
H-30	1	28,5			-
	7	28,7	28,7	28,5	32,8
	28	35,1	35,1	31,6	36,3

Tabla 8.2. Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Estimación del grado de endurecimiento. Hormigones del Grupo II.

A continuación se muestran las correlaciones efectuadas.

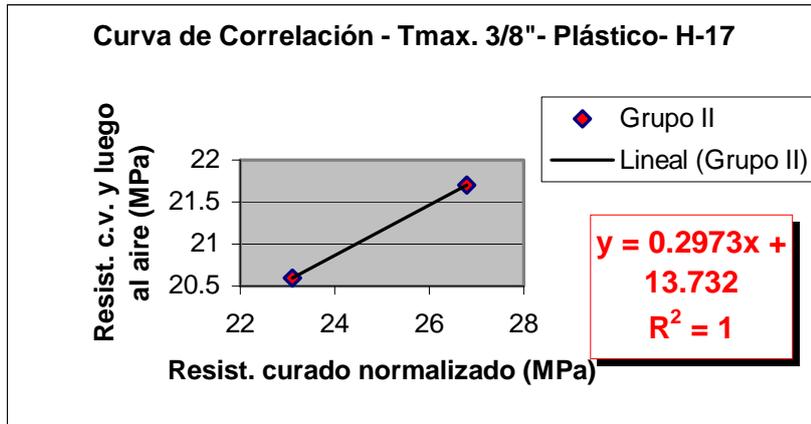


Figura 8.4: Curva de correlación – H-17 – Plástico (3/8")

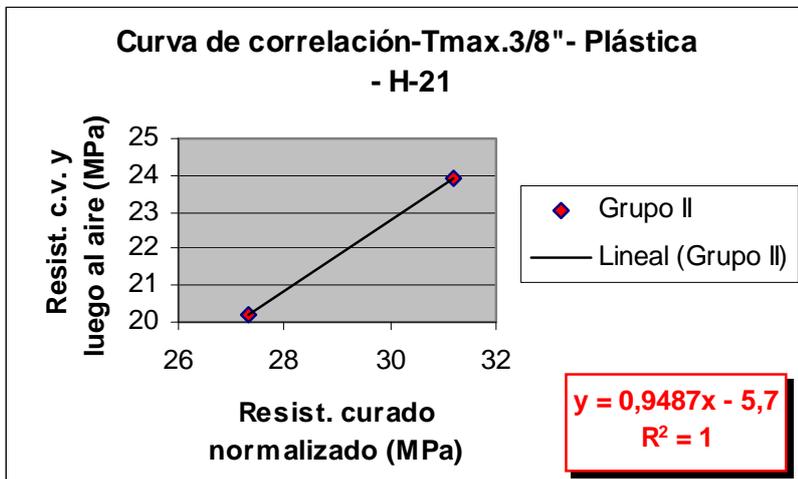


Figura 8.5: Curva de correlación – H-21 – Plástico (3/8")

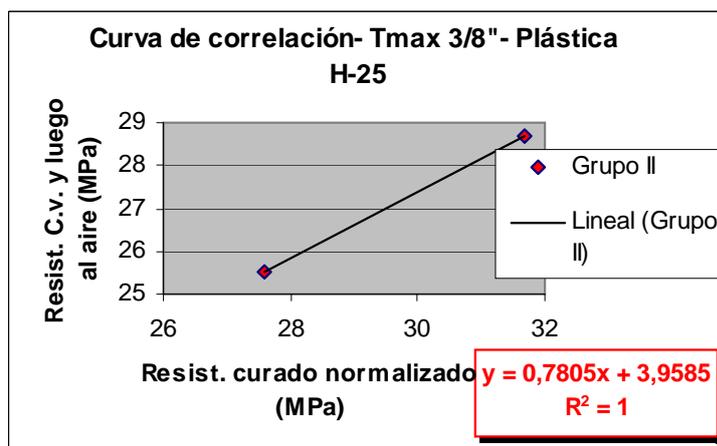


Figura 8.6: Curva de correlación – H-25 – Plástico (3/8")

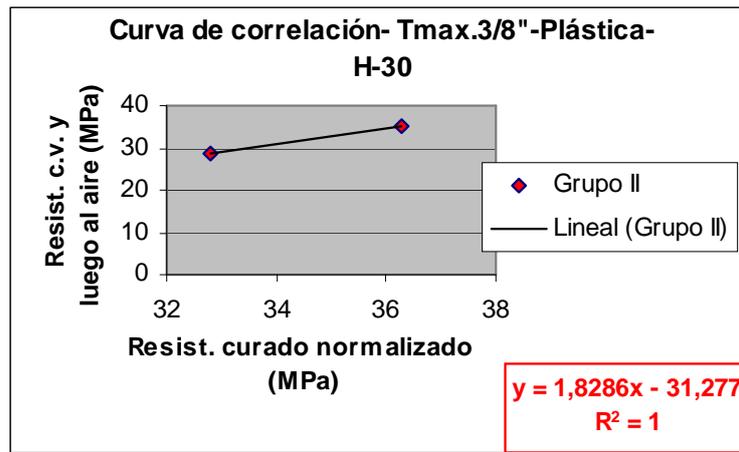


Figura 8.7: Curva de correlación – H-30 – Plástico (3/8’')

2.3.- -GRUPO III : Tmax. 1’'- Plástico.

Mezcla	Edad	Grado End. Experm.	Grado End. Estimada (part)	Grado end. Estimada (gral)	Res. Potencial
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
H-17	7	21	21.0	21.6	24,9
	28	27,8	27.8	26.6	30,6
	60	30,6	30.6	28.6	32,9
H-21	7	22,1	22.1	23.1	26,6
	28	28,3	28.5	28.1	32,3
	60	30,4	30.2	29.4	33,8
H-25	7	25,7	26.3	24.6	28,3
	28	30,6	29.4	28.6	32,9
	60	32,1	32.7	32.7	37,6
H-30	7	30	30.9	28.1	32,3
	28	34	32.6	30.1	34,6
	60	34,6	35.2	33.3	38,2

Tabla 8.3. Resistencias vs. edad con curado a vapor y luego al aire y curado normalizado. Estimación del Grado de endurecimiento. Hormigones del Grupo III.

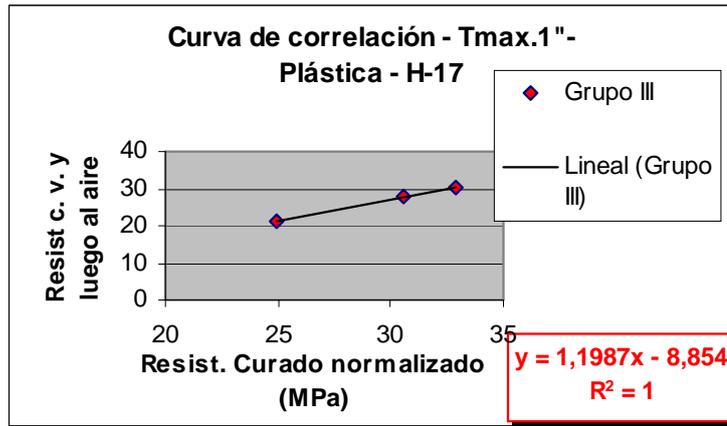


Figura 8.8: Curva de correlación – H-17 – Plástico (1”)

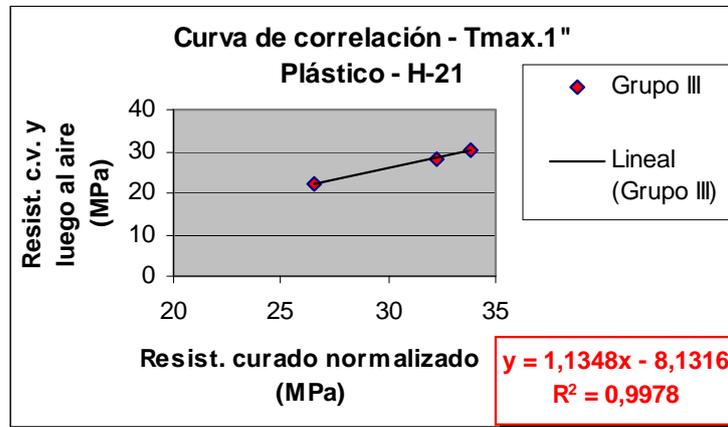


Figura 8.9: Curva de correlación – H-21 – Plástico (1”)

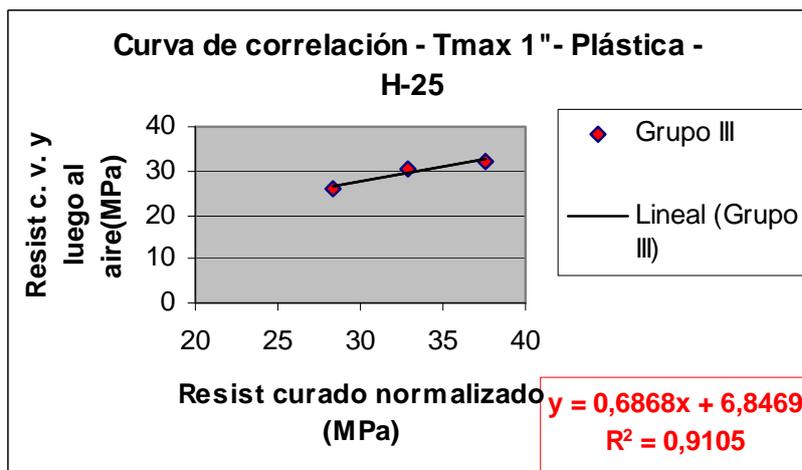


Figura 8.10: Curva de correlación – H-25 – Plástico (1”)

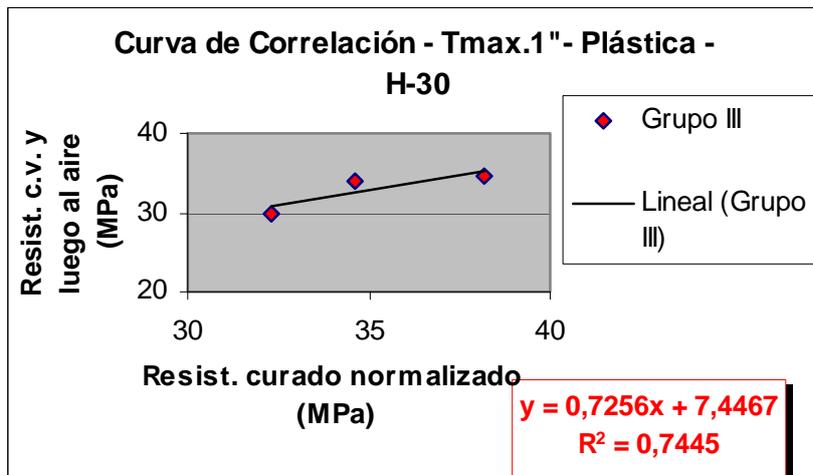


Figura 8.11: Curva de correlación – H-30 – Plástico (1”)

3.- CORRELACIÓN ENTRE RESISTENCIA POTENCIAL Y GRADO DE ENDURECIMIENTO DE TODOS LOS HORMIGONES JUNTOS.

Se ha encontrado buena correlación lineal para todos los hormigones, independiente del tamaño máximo, consistencia, niveles de resistencia y edad, que a los fines prácticos resulta más fácil de ser utilizada. Así mismo en el gráfico se presentan también las correlaciones exponencial y logarítmica, aunque sus coeficientes de regresión son algo menores, con el único objeto de mostrar que la correlación lineal es la mejor. Los valores estimados con la ecuación 8.12 figuran en la columna (5) de la Tablas 8.1, 8.2, y 8.3.

La correlación encontrada responde a la fórmula:

$$y = 0,8781x - 0,2647 \quad (\text{MPa}) \quad (8.12)$$

donde:

y: Grado de endurecimiento del hormigón curado a vapor y luego al aire

x: Resistencia potencial del hormigón curado normalizado

Así, conocida la resistencia potencial a una edad particular se puede estimar el grado de endurecimiento del hormigón que ha recibido curado a vapor y luego al aire, para esa misma edad.

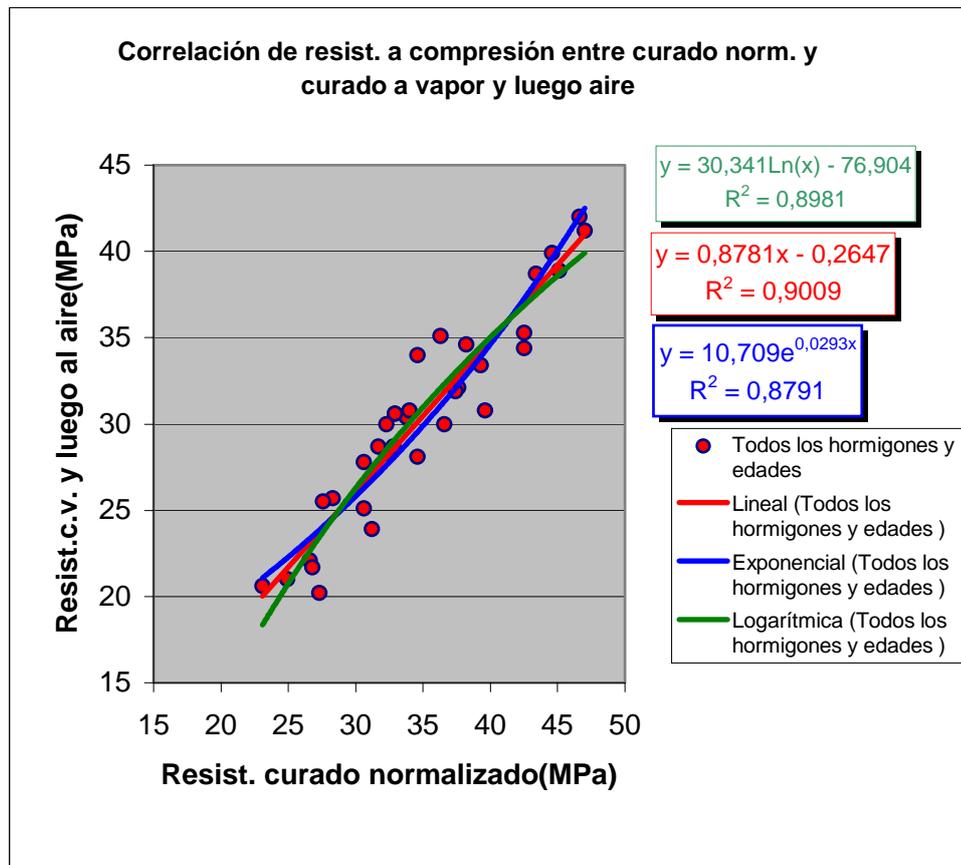


Figura 8.12: Curva de correlación general entre resistencia curado a vapor y luego al aire y curado normalizado

4.- CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA ACELERADA, CURADO A VAPOR Y LA DE 28 DÍAS CURADO NORMALIZADO.

En algunos casos puede resultar de utilidad predecir la resistencia a los 28 días curado normalizado a partir de la resistencia obtenida una vez que se finaliza el curado a vapor. La preocupación permanente de poder estimar la resistencia de los 28 días antes de esta edad, ha llevado a estudiar y proponer diversos métodos.

La estimación de la resistencia a partir de la de los 7 días, está muy influida por las características del cemento utilizado y por ello tiene mayor aceptación el de utilizar algún mecanismo de curado acelerado, como el desarrollado por King. Este método consiste en moldear cubos junto con la colocación del hormigón en la estructura, sellarlos herméticamente y después de 30 minutos, colocarlos en horno a 93⁰C durante 5 horas, luego se desmoldan, se dejan enfriar y se ensayan. De esta manera se puede determinar la resistencia del hormigón después de las 7 horas siguientes al colado, la que muestra buena correlación con la resistencia a 7 y 28 días del curado normalizado. Así mismo la norma ASTM C684-81, propone tres procedimientos con el mismo fin: el de sumergir las probetas en agua caliente a 95⁰C +/- 3⁰C durante 23 ½ h +/- 30 min. , el de sumergir las probetas en agua hirviendo durante 3 ½ h +/- 5 min. , y el método

autógeno en el que la elevación de la temperatura de curado se obtiene por el calor de hidratación del cemento.

Con los mismos fines, se han establecido las correlaciones entre las resistencias de los hormigones curado a vapor a presión atmosférica (resistencia acelerada) y las correspondientes a 28 días curado normalizado (resistencia potencial), para cada grupo de hormigones y para todos juntos, con excelentes coeficientes de regresión.

Por tal motivo se presentan dos gráficos y las correlaciones obtenidas:

1. Se analizan por separado los tres grupos de hormigones obteniéndose las siguientes correlaciones (Figura 8.13):

Grupo I: $f_{cm\ pot.} = 4.1077 (f_{cm\ acelerada})^{0.6997}$ (MPa)
(8.13.1)

Grupo II: $f_{cm\ pot} = 7.4603 (f_{cm\ aacelerada})^{0.4706}$ (MPa)
(8.13.2)

Grupo III: $f_{cm\ pot} = 10,799 (f_{cm\ acelerada})^{0.3659}$ (MPa)
(8.13.3)

2. Se analizan los tres grupos de hormigones juntos (Figura 8.14):

Todos los grupos: $f_{cm\ pot} = 7,4295 (f_{cm\ acelerada})^{0,4879}$ (MPa) **(8.14)**

Esta expresión satisface los valores experimentales con una diferencia porcentual de + 10%, por lo que se puede aplicar en lugar de las obtenidas para cada grupo por separado.

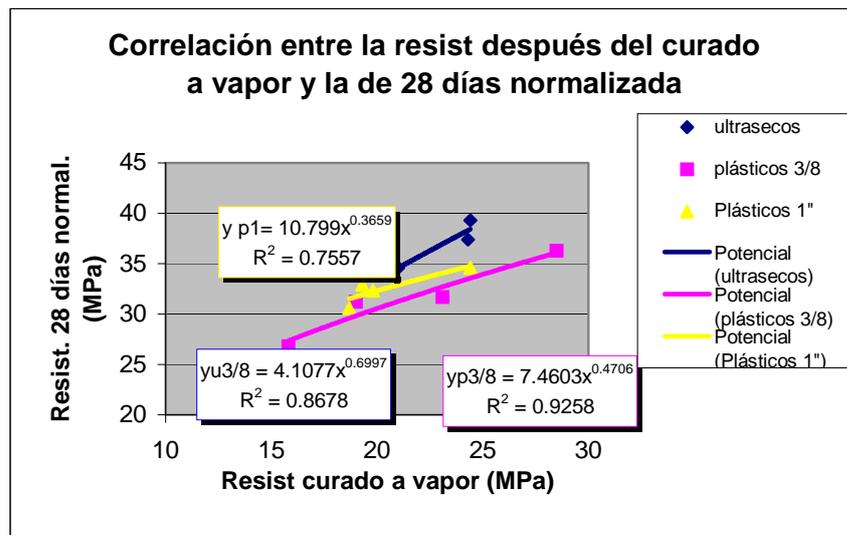


Figura 8.13: Correlación de la resistencia curado a vapor y 28 días curado normalizado para cada grupo de hormigones.

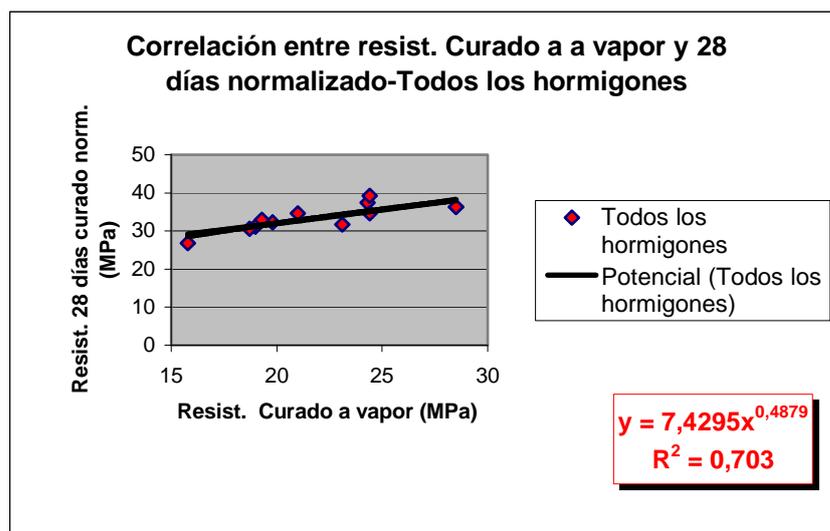


Figura 8.14. Correlación entre la resistencia curado a vapor y 28 días curado normalizado. Todos los hormigones.

Edad	Resistencia Acelerada (Mpa)	Resistencia Potencial (Mpa)	Resist. Potencial Estimada Con la ec. 8.14 (Mpa)	Dif. %	Reist. Potencial estimada con las ecs. (8.13) (Mpa)	Dif. %	Mezcla	
1d-28d	21	34.6	32.8	5.1	34.6	0	H-17	Ultrasecos Grupo I
	24.3	37.4	35.2	5.8	38.3	-2.4	H-21/25	
	24.4	39.3	35.3	10.2	38.4	2.3	H-30	
	15.8	26.8	28.6	-6.6	27.3	-2.0	"H-17	Plásticos 3/8" Grupo II
	19	31.2	31.3	-0.2	29.8	4.4	H-21	
	23.1	31.7	34.4	-8.4	32.7	-3.1	H-25	
	28.5	36.3	38.1	-4.9	36.1	0.6	H-30	
	18.7	30.6	31.0	-1.3	31.5	-3.0	"H-17	Plásticos 1" Grupo III
	19.8	32.3	31.9	1.3	32.2	0.3	H-21	
	19.3	32.9	31.5	4.3	31.9	3.0	H-25	
	24.4	34.6	35.3	-2.0	34.7	-0.5	H-30	

Tabla Nro.8.4: Resistencias potenciales y aceleradas. Correlaciones particulares y general

Un análisis de los resultados presentados en la Tabla Nro. 8.4 permite concluir que para un ciclo de curado a vapor como el analizado se puede aplicar la ecuación general para estimar la resistencia potencial de los 28 días, a partir de la resistencia acelerada independientemente del tamaño máximo del agregado y de la consistencia de la mezcla.

CAPÍTULO 9

RESISTENCIA Y MADUREZ

1.- INTRODUCCIÓN

Se ha analizado en el Capítulo 2, apartado 7, el concepto de madurez y su relación con la resistencia . Esto ha dado origen al llamado método de la madurez que sirve para estimar la resistencia del hormigón in-situ bajo determinadas condiciones de curado.

El principio que justifica el método dice que: “cuando la madurez alcanzada con curado normalizado es la misma que con curado acelerado, la resistencia potencial es igual a la resistencia efectiva”, si se cumplen dos requisitos:

- a)- Debe haber siempre suficiente agua para continuar la hidratación.
- b)- El hormigón de la estructura es el mismo con el que se determinan las relaciones resistencia potencial- madurez.

Son numerosos los trabajos de investigación realizados que dan un marco de limitaciones y de aplicabilidad, pero todos concuerdan en la necesidad de mas estudios experimentales.

Por tal motivo se verá la aplicación del método al caso que nos ocupa de una fábrica de elementos prefabricados curados a vapor a presión atmosférica, para estimar la resistencia acelerada o sea la obtenida una vez concluido el curado acelerado, y para diseñar el ciclo de curado acelerado.

Un aspecto no abordado en la literatura es el empleo de la madurez para predecir o evaluar el grado de endurecimiento del hormigón de obra en la etapa posterior al curado, puesto que en los cálculos de madurez se sobreentiende que la humedad es la de saturación (período de curado), requisito necesario para que la hidratación del cemento se desarrolle satisfactoriamente.

Con miras a poder extender el concepto de madurez para estimar el grado de endurecimiento del hormigón curado a vapor y luego al aire, se introduce el concepto de madurez ambiental relativa a las condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente.

2.- MADUREZ AMBIENTAL

Madurez ambiental, (M_{am}) es el producto de tiempo y temperatura media, a una humedad relativa ambiente inferior a la de saturación alcanzada durante el período de exposición al aire, en $^{\circ}\text{C}$ horas o $^{\circ}\text{C}$ días.

Para su cálculo se tuvieron en cuenta los registros de temperaturas extremas diarias durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1998 y los meses de enero, febrero, marzo y abril de 1999, como así también la humedad relativa media, que resultaron:

- Temperatura media ambiente = 30°C
- Humedad relativa media ambiente = 90%

Estos resultados corresponden a clima cálido y húmedo característico de la ciudad de San Miguel de Tucumán durante los meses considerados.

La madurez ambiental será entonces:

$$M_{am} = \text{Tiempo} (\text{temperatura media} + T_0) (^\circ \text{C h}) / (^\circ \text{C día})$$

Con T_0 = temperatura de referencia, que depende de los materiales empleados en la elaboración del hormigón. Se toma $T_0 = -11,7^\circ \text{C}$ para ser coherente con otras investigaciones, ya que -11.7 es la temperatura a partir de la cual el hormigón puede fraguar. Otros autores toman -10°C e incluso ninguna. Este es un valor que aún se discute. Entonces:

$$M_{am} = \text{Tiempo} (30 + 11.7) = \text{Tiempo} \times 41.7 (^\circ \text{C h}) \quad (1)$$

Madurez acelerada (M_a) es el producto de tiempo y temperatura durante el tratamiento acelerado (conocida en la literatura simplemente como madurez)

Para su cálculo se tienen en cuenta la temperatura de cada período involucrado en el tratamiento a vapor a presión atmosférica por el tiempo que dura. Las temperaturas de los períodos de calentamiento y enfriamiento se toman como promedio de las extremas.

Período inicial6 horas,
temperatura 25°C6(25 + 11.7) = 220.2

Período calentamiento..2 horas,
temperatura de 25°C a 78°C2(63.2 + 11.7) = 101.4

Período vaporización....8 horas, temperatura 78°C8(78 + 11.7) = 717.6

Período enfriamiento....8 horas,
Temperatura de 78°C a 25°C8(63.2 + 11.7) = 505.6

$$M_a = 1569.8^\circ \text{Ch}$$

Madurez total (M_t) es la suma de la madurez acelerada y la madurez ambiental.

$$M_t = M_a + M_{am} \quad (2)$$

$$M_t = 1569.8 + (41.7^\circ \text{C} \times \text{tiempo}) \quad (3)$$

Madurez normalizada (M_n), es el producto de tiempo y temperatura durante el curado normalizado (21°C), conocida simplemente como madurez. Entonces:

$$M_n = \text{Tiempo} (21^\circ \text{C} + 11.7^\circ \text{C})$$

$$M_n = 32.7^\circ \text{C} \times \text{Tiempo} \quad (4)$$

Bajo la premisa de que “a igual madurez acelerada y normal igual resistencia”, se procede a calcular la edad a la que con curado normalizado se alcanza la resistencia del curado acelerado.

$$tiempo = \frac{Ma}{tnormal} = \frac{1569.8}{(21+11.7)} = 48(horas)$$

O sea que el hormigón con curado acelerado alcanza la resistencia de los 2 días del curado normal , lo que se pudo comprobar experimentalmente, dando validez a la regla de referencia.

3.- CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A PARTIR DEL LOGARITMO DE LA MADUREZ.

Se han trazado las curvas de resistencia en función del logaritmo de la madurez total para los hormigones curados a vapor y luego al aire y del logaritmo de la madurez normal para los correspondientes curados normalizado. Las mismas resultaron líneas rectas, pero se obtuvo una ecuación diferente para cada grupo de hormigón, nivel de resistencia y tipo de curado sin que se pueda apreciar un comportamiento patrón que permita concluir una regla general.

Las Figuras 9.1, 9.2, 9.3, y 9.4 muestran tales variaciones y las ecuaciones encontradas.

-
- Hormigones del grupo I
-

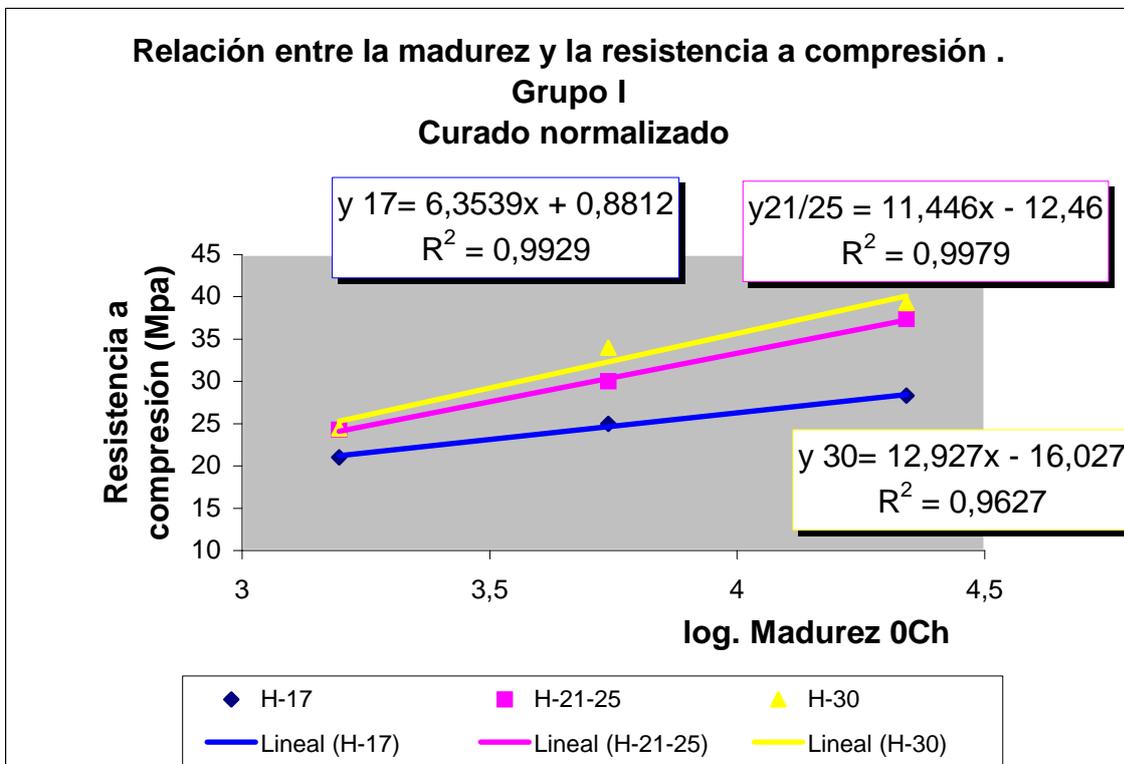


Figura 9.1: Resistencia vs. log. de la madurez. Curado normalizado. Grupo I

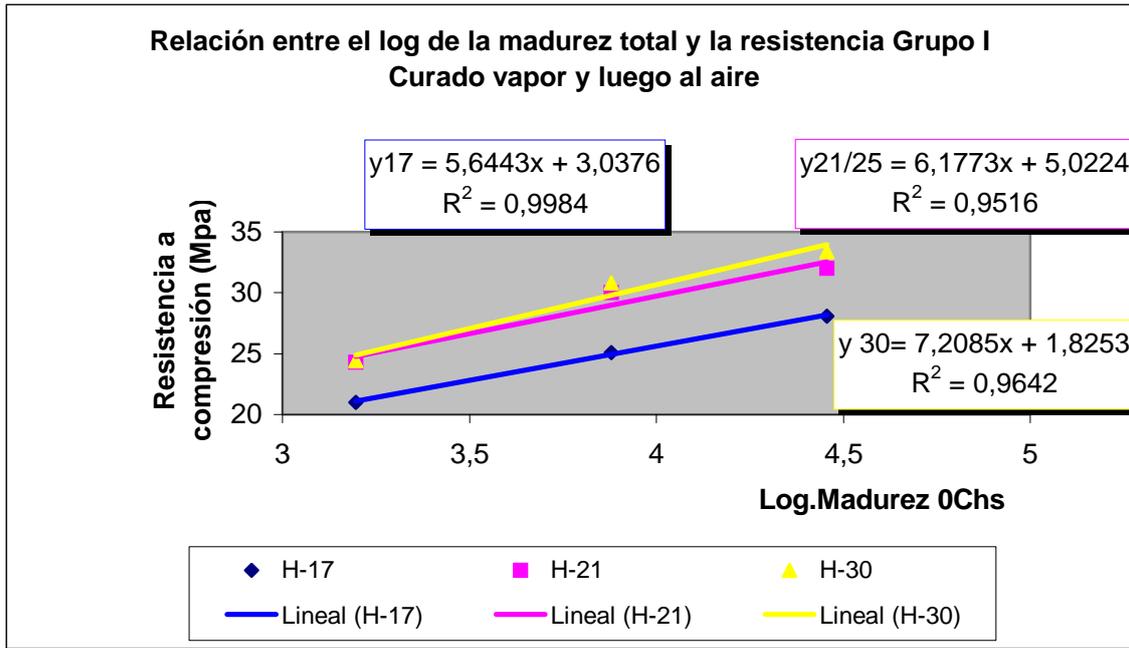


Figura 9.2: Resistencia vs. log. de la madurez. Curado a vapor y luego al aire. Grupo I

- Hormigones del grupo II

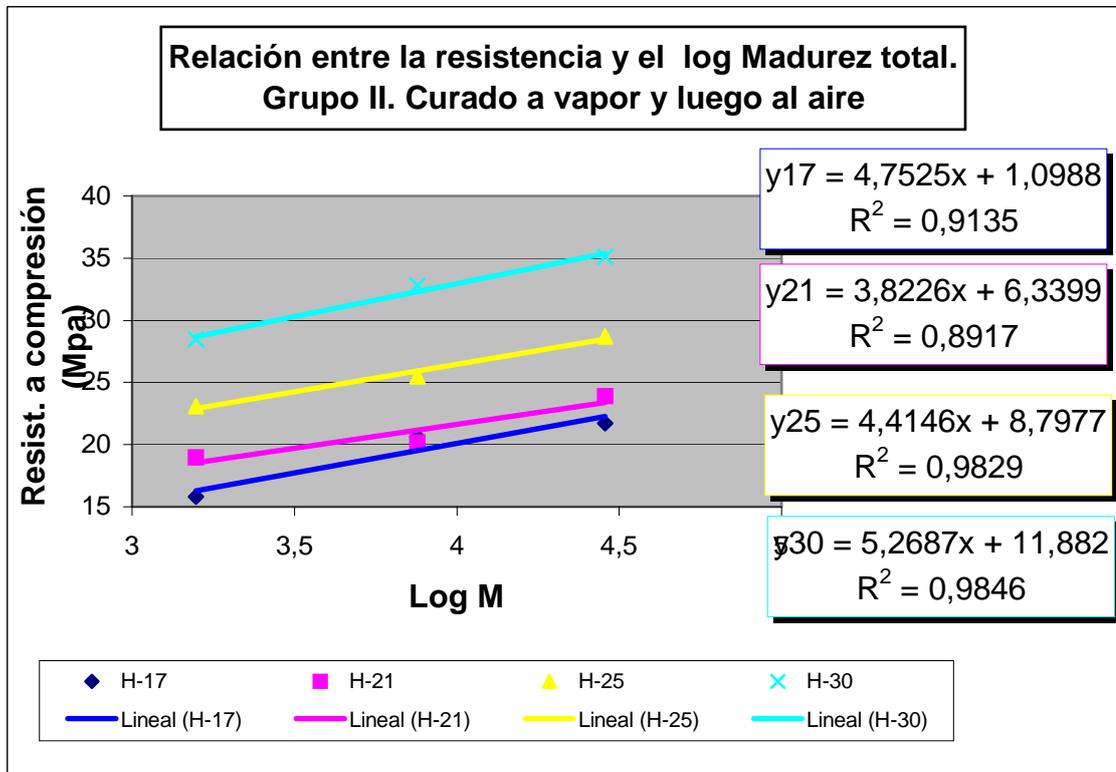


Figura 9.3: Resistencia vs. log de la madurez. Curado vapor y luego al aire. Grupo II.

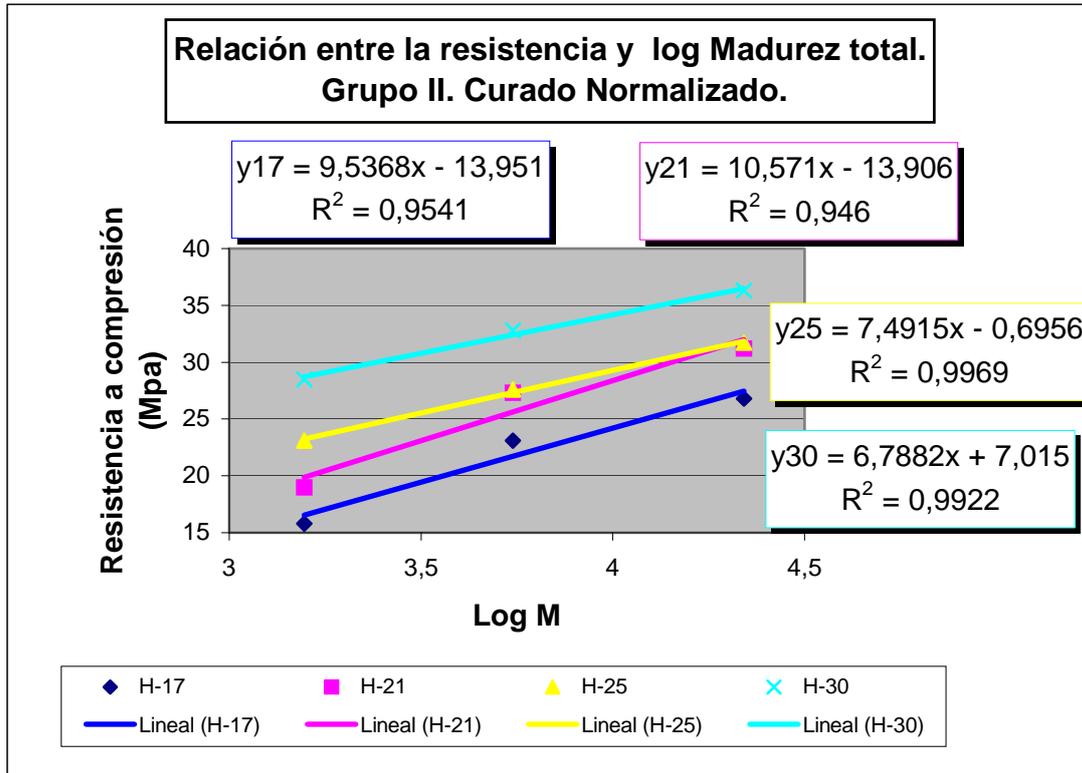
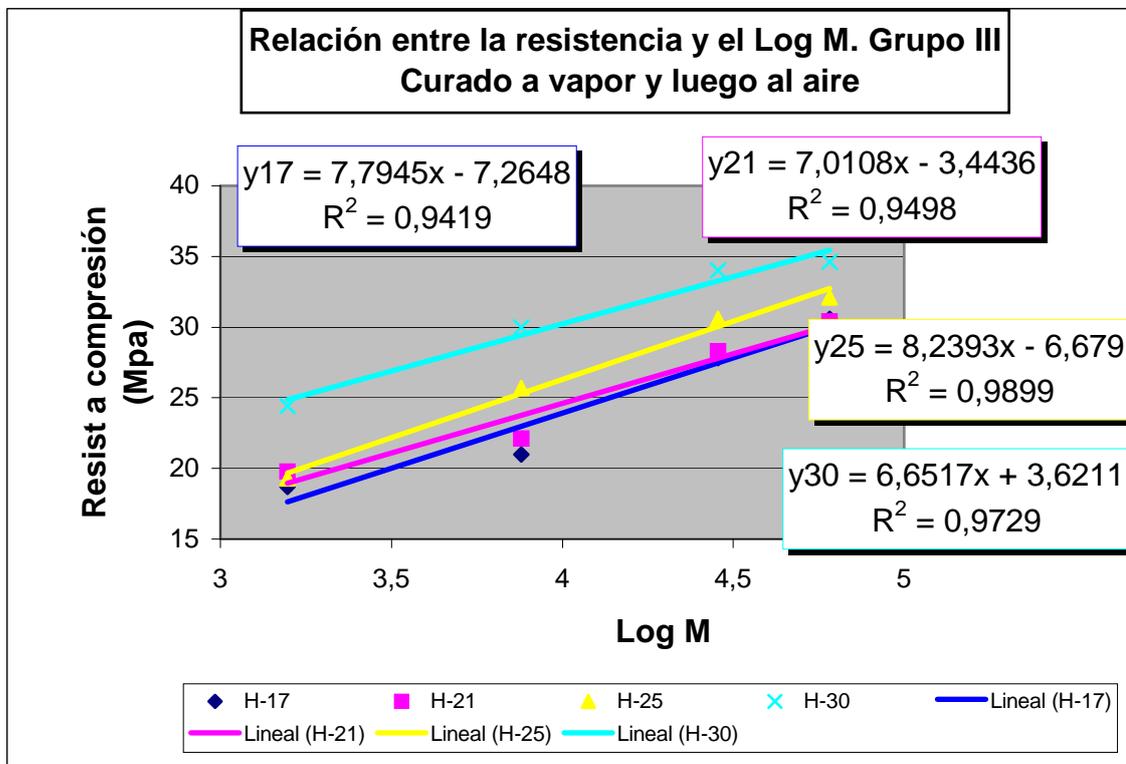


Figura 9.4: Resistencia vs. log de la madurez. Curado normalizado. Grupo II.



- Figura 9.5: Resistencia vs. log de la madurez. Curado vapor y luego al aire. Hormigones del grupo III

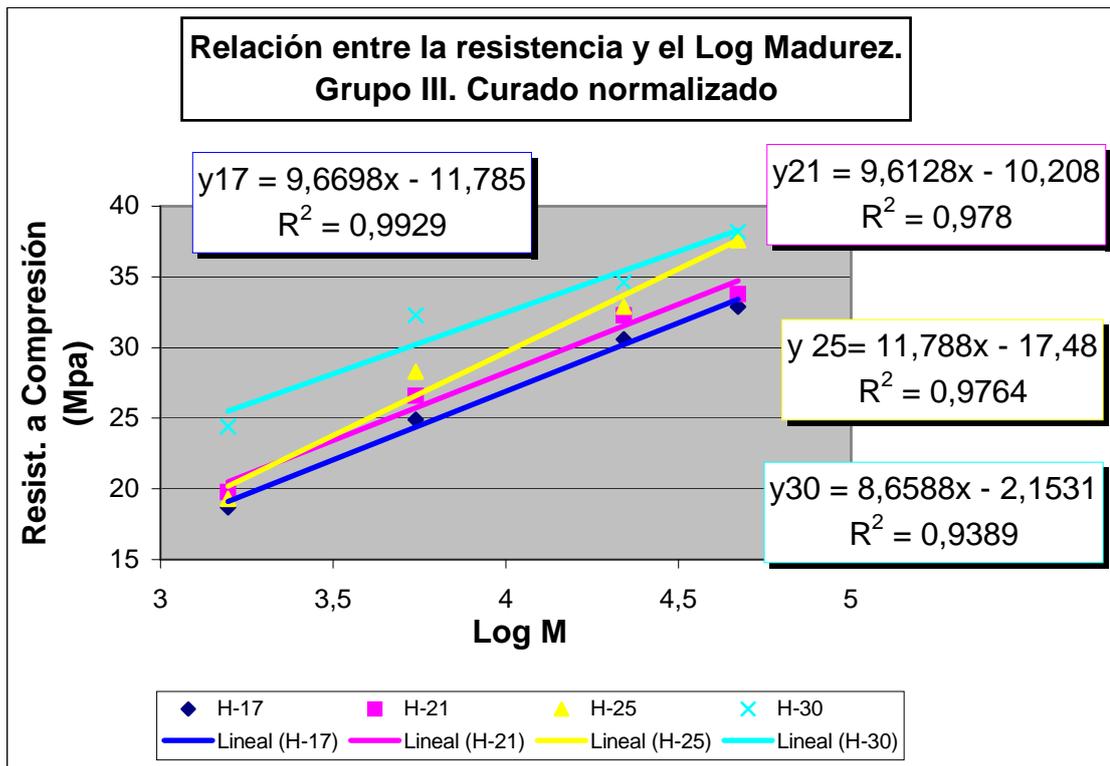


Figura 9.6: Resistencia vs log. de la madurez. Curado normalizado. Grupo III.

4.- VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA MADUREZ.

Se sabe que la resistencia es una propiedad reológica que también se ve influenciada por la temperatura y que la madurez ha sido definida para tener en cuenta simultáneamente estas dos variables: tiempo y temperatura.

En el capítulo 6 se ha analizado la resistencia en función de la edad, la que varía en forma potencial, obteniéndose una ecuación por cada grupo, nivel de resistencia y tipo de curado, con altísimos coeficientes de regresión, lo que pone en evidencia que son muchos los factores que intervienen en la evolución de dicha resistencia, y es lógico que así sea pues cada mezcla es única en si misma. La forma general es:

$$f'_c = k x_1^n$$

Donde:

f'_c : Resistencia a compresión (MPa)

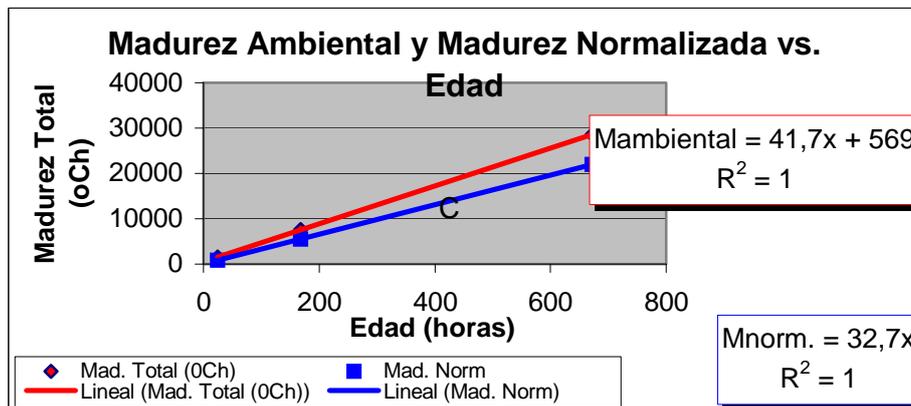
x_1 : Edad (días / horas)

K y n : constantes que dependen del nivel de resistencia y curado

Sin embargo tratando de simplificar el problema, se han encontrado ecuaciones generales que reúnen a los tres grupos de hormigones por nivel de resistencia, para curado normalizado y para curado a vapor y luego al aire, que aunque tienen coeficientes de regresión menores que los de las ecuaciones individuales, arrojan

valores que no difieren en +/- 10% de los obtenidos experimentalmente, y por lo tanto excelentes dentro del contexto de la aplicación práctica.

Si se analiza la variación de la madurez, sea esta total o normalizada según el caso, con la edad vemos que es una función lineal de ésta, con pendiente igual a la temperatura de curado o exposición.



Por lo tanto, expresando la edad en función de la madurez, la variación de la resistencia con la madurez deberá tener una variación potencial de la forma:

- para la madurez normalizada:

$$fcm = k \left(\frac{M_{norm}}{32.7} \right)^n$$

- para la madurez ambiental:

$$fcm = k \left(\frac{M_{ambiental} - 569}{41.7} \right)^n$$

- para la madurez total:

$$fcm = k \left(65,408 + \frac{M_{ambiental} - 569}{41.7} \right)^n$$

A continuación se analizan las curvas de resistencia vs. madurez para cada grupo de hormigón, tipo de curado y exposición.

Hormigones del grupo I

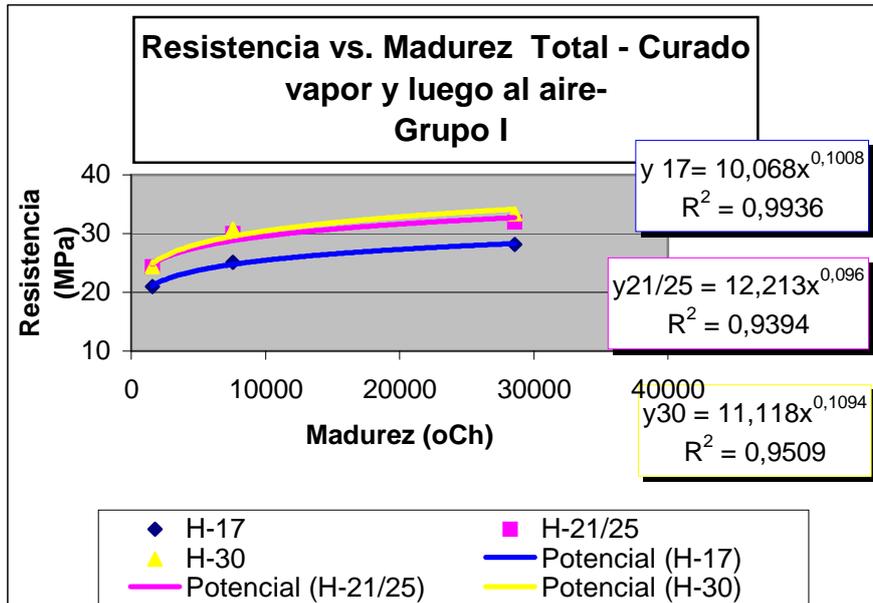


Figura 9.7: Variación de la resistencia con la madurez. Grupo I. Curado a vapor y luego al aire.

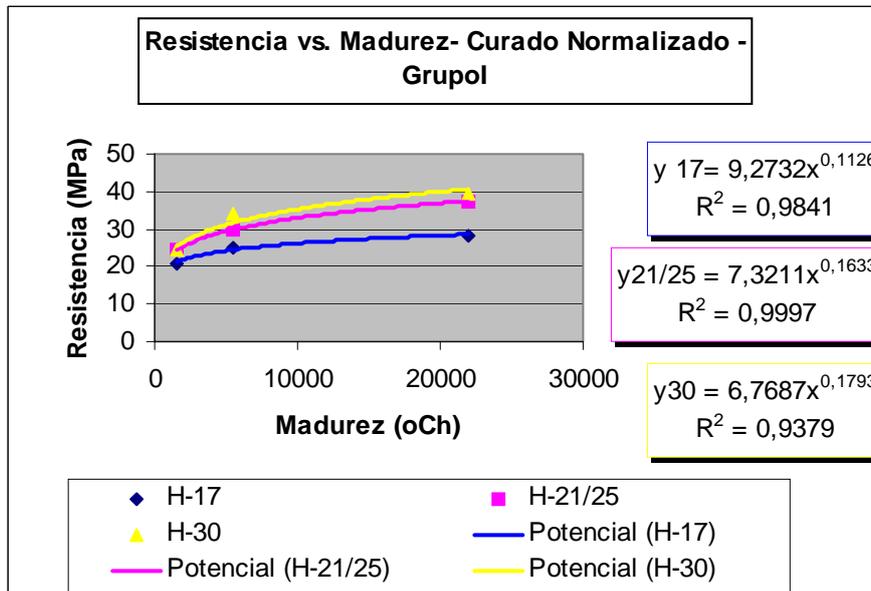


Figura 9.8: Variación de la resistencia con la madurez. Grupo I. Curado normalizado.

Hormigones del Grupo II

Figura 9.9: Variación de la resistencia con la madurez. Grupo II. Curado a vapor y luego al aire.

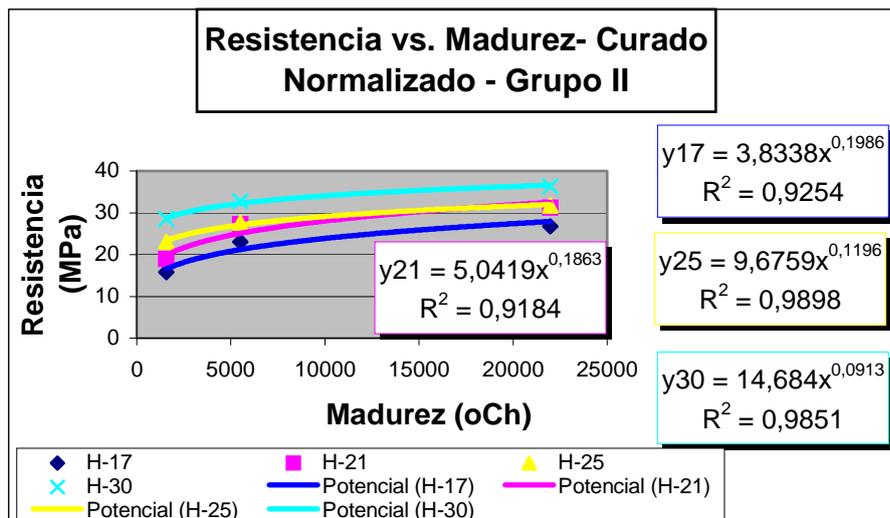
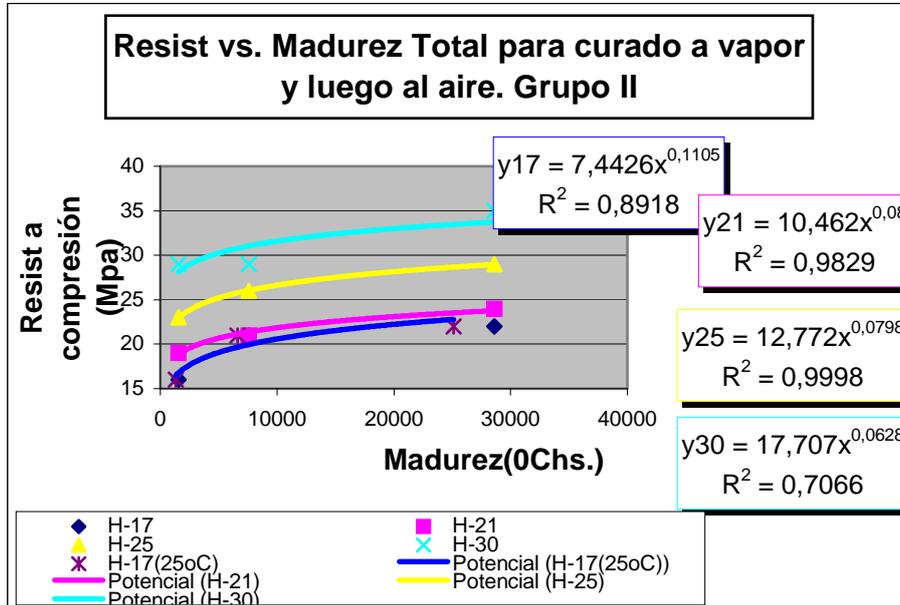


Figura 9.10: Variación de la resistencia con la madurez. Grupo II. Curado normalizado.

Hormigones del Grupo III

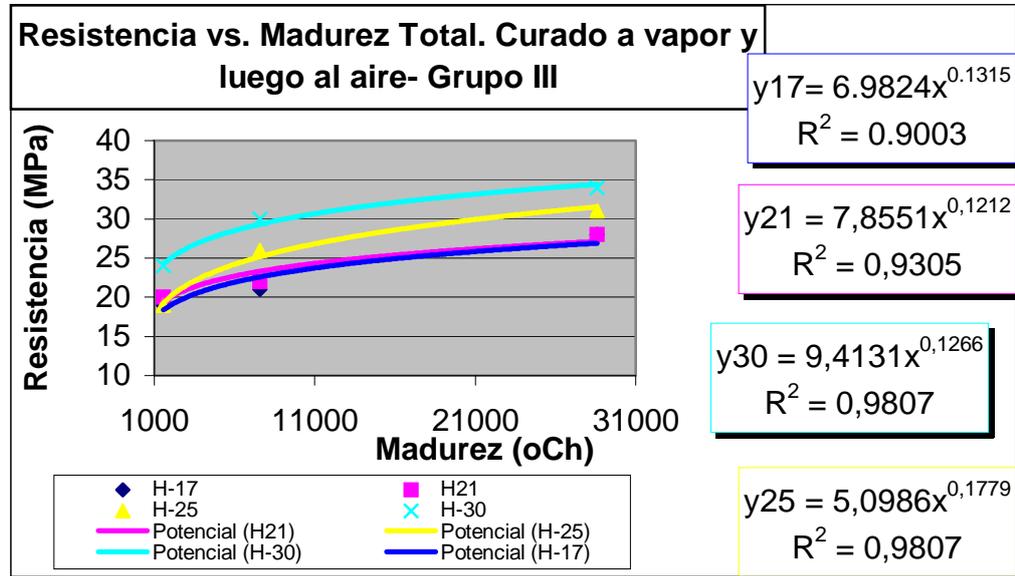


Figura 9.11: Variación de la resistencia con la edad. Grupo III. Curado a vapor y luego al aire.

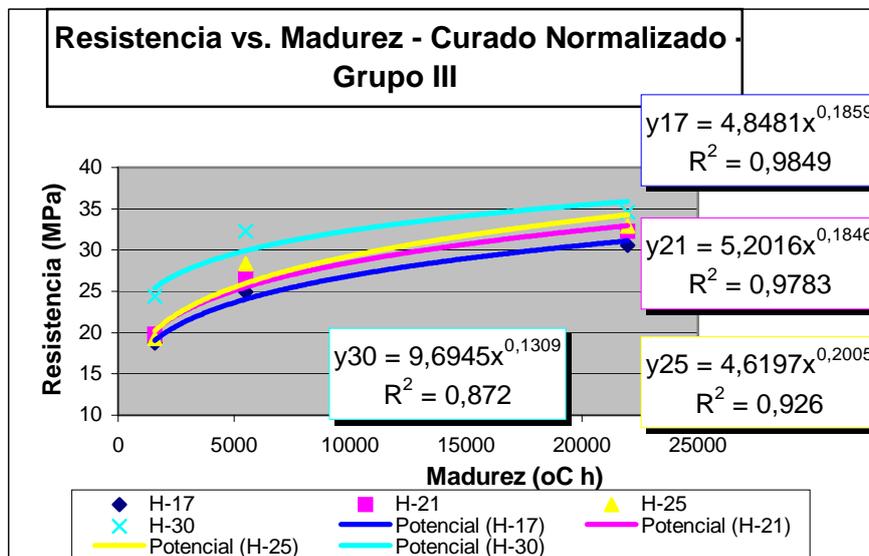


Figura 9.12: Variación de la resistencia con la madurez. Grupo III. Curado Normalizado.

Finalmente se encontraron las ecuaciones generales que reúnen a los tres grupos de hormigones, para curado acelerado y luego al aire y para curado normalizado.

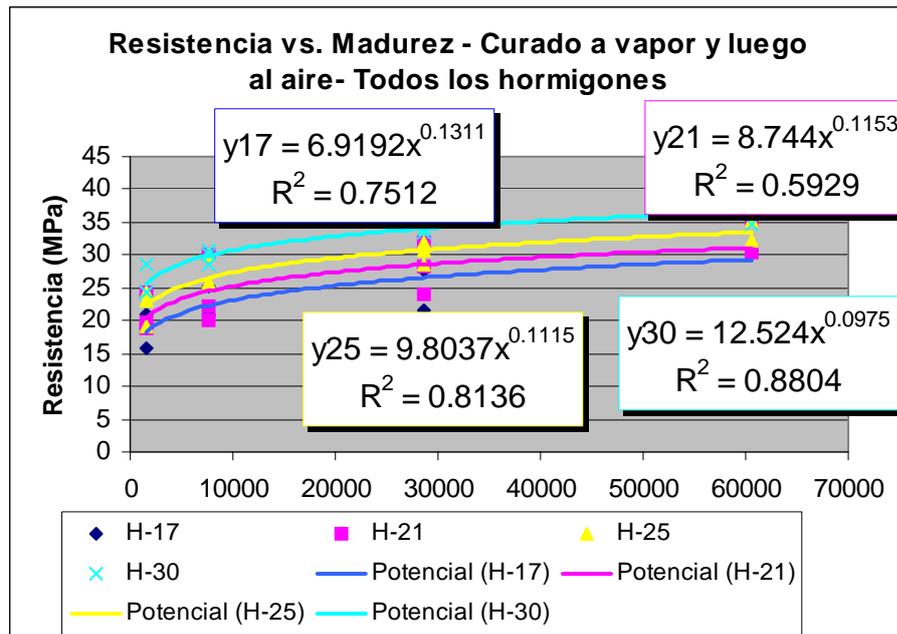


Figura 9.13: Variación de la resistencia con la madurez. Todos los hormigones. Curado vapor y luego al aire.

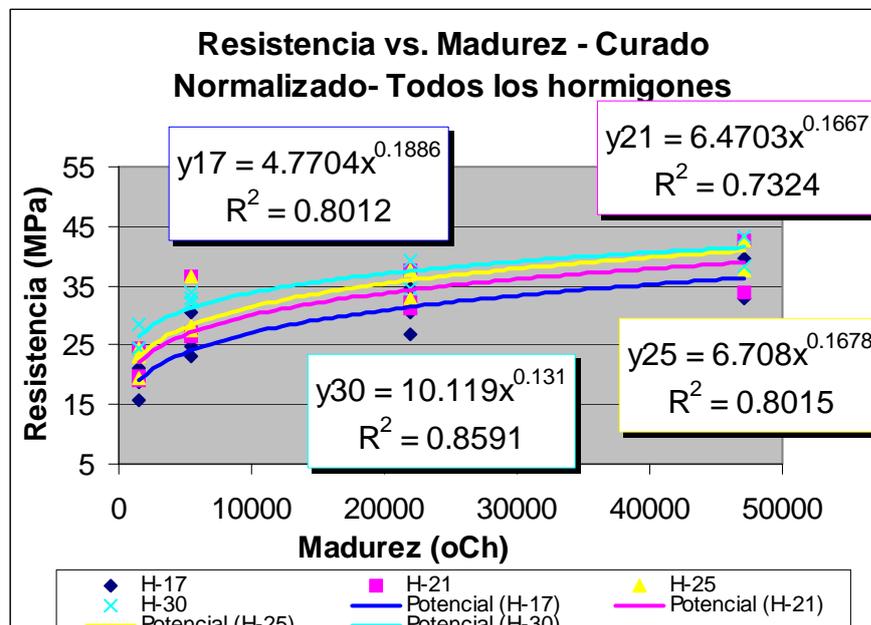


Figura 9.14: Variación de la resistencia con la madurez. Todos los hormigones. Curado normalizado.

Las ecuaciones que figuran en las Figuras 9.13 y 9.14, reflejan adecuadamente la evolución de la resistencia con la madurez, sea esta total o normalizada. Para interpretarlas se toma logaritmo y se grafican las familias de rectas.

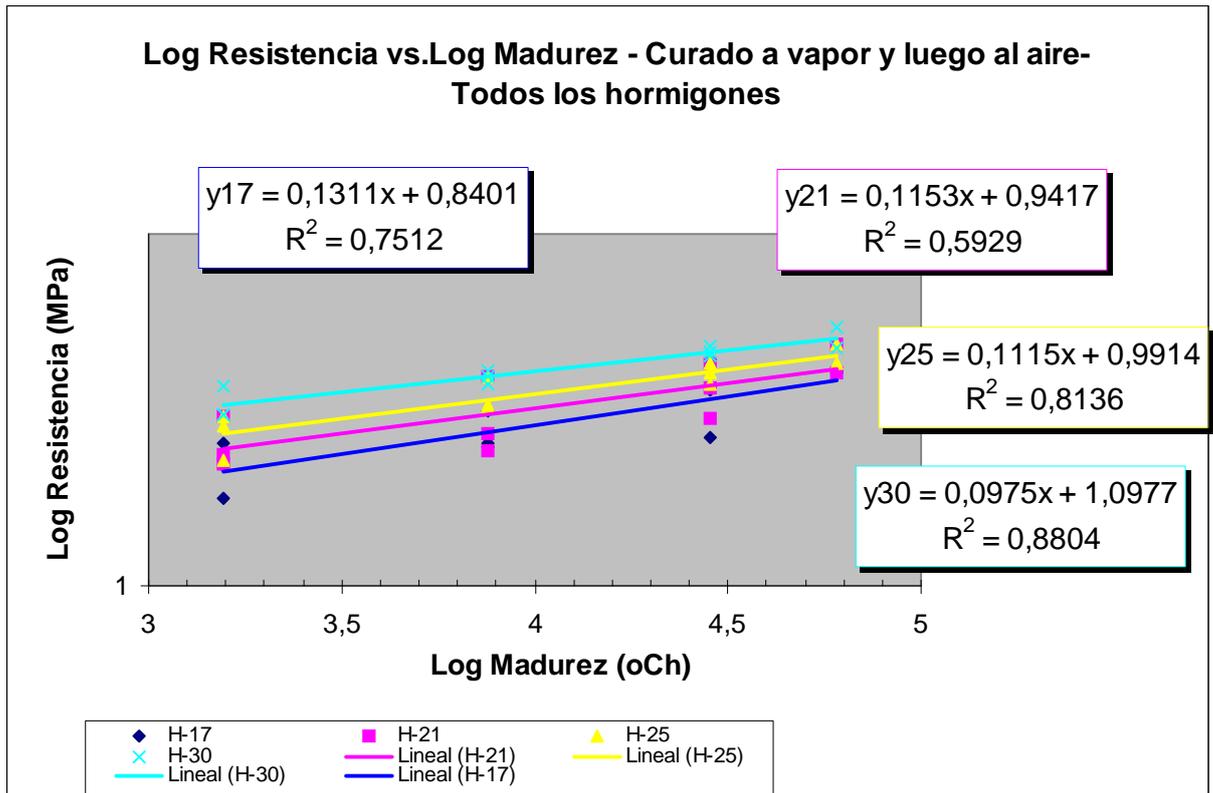


Figura 9.15: Variación del log. de resistencia y el log. de la madurez. Todos los hormigones. Curado a vapor y luego al aire.

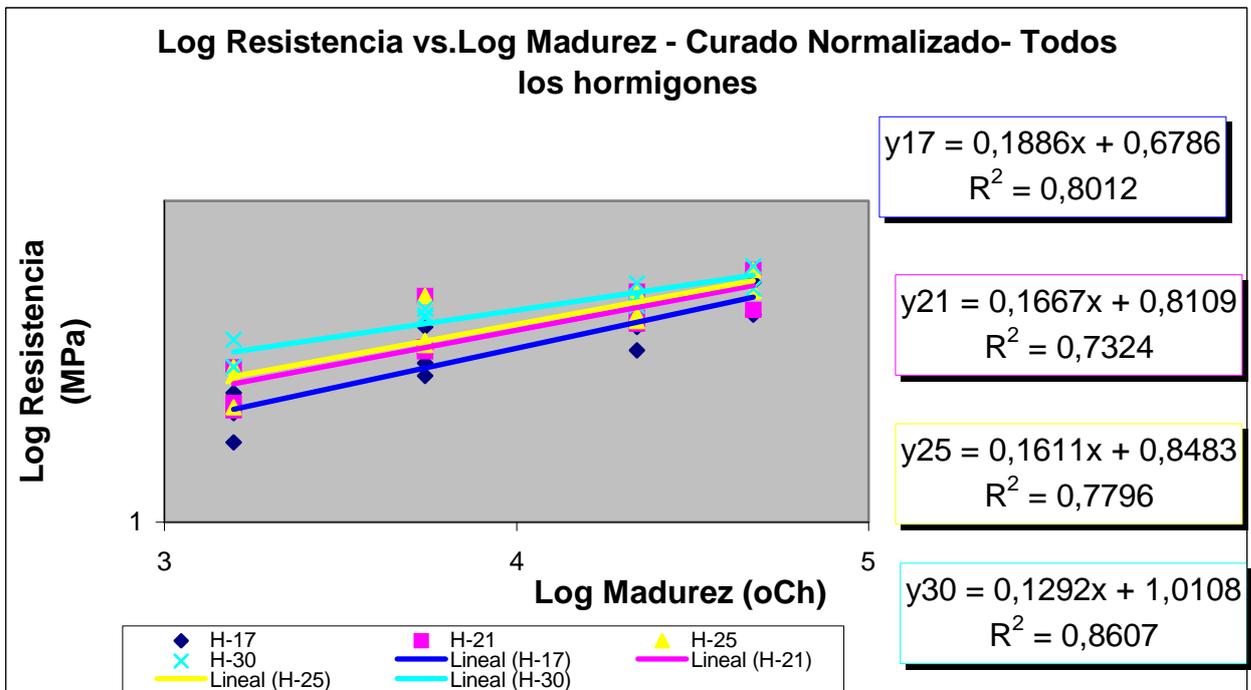


Figura 9.16: Variación del log. de resistencia y el log. de la madurez. Todos los hormigones. Curado normalizado.

Las ordenadas al origen de estas rectas aumentan con el nivel de resistencia y además las que corresponden a curado acelerado y luego al aire resultan algo mayores que las de curado normalizado lo que refleja el aumento de resistencia temprana lograda con el curado acelerado.

Las pendientes de estas rectas varían con el nivel de resistencia y disminuyen a medida que ésta aumenta.

Como la pendiente nos estaría indicando el ritmo con que ganan resistencia los hormigones, resulta razonable que los hormigones que recibieron curado acelerado pero luego exposición al aire, tengan menos pendiente que los correspondientes curado normalizado.

Los trabajos de Ramakrishman y Shu-t'len Li, concluyen que la relación resistencia y madurez expresada en la forma $f_{cu} = K (M)^n$ tiene excelente acuerdo con otras investigaciones, que es independiente de la temperatura y método de curado, que la constante K depende del rango de resistencia y que el exponente "n" se puede tomar igual a 0.4 para todos los casos. En la siguiente tabla se indican los valores por ellos propuestos de $\log k$ y los obtenidos en este trabajo:

Valores encontrados por Palazzi y Castría			Valores encontrados por Ramakrisman y Shu-t'len Li	
Resist. (MPa)	Curado Norm Logk	Curado vapor y al aire Logk	Resistencia (Psi)	Logk
17	0.68	0.84	2000 - 3000	1.55
21	0.81	0.94	3000 - 4000	1.75
25	0.85	0.99	4000 - 5000	1.85
30	1.01	1.10	5000 - 6000	1.95

Tabla 9.1: Valores de $\log k$

Como se trata de una expresión aplicable a cualquier método y temperatura de curado, es aplicable al caso de curado normalizado.

Sin embargo las ecuaciones generales de la resistencia en función de la madurez obtenidas en este trabajo, indican que tanto el coeficiente k como el exponente "n" varían con cada nivel de resistencia. Se transcriben las mismas:

Curado normalizado

$$f_{cm17} = 4.7704 M_n^{0.1896}$$

Curado a vapor y luego al aire

$$f_{cm17} = 6.9192 M_t^{0.1311}$$

$$f_{cm21} = 6.4703 M_n^{0.1667}$$

$$f_{cm21} = 8.7440 M_t^{0.1153}$$

$$f_{cm25} = 6.7080 M_n^{0.1678}$$

$$f_{cm25} = 9.8037 M_t^{0.1115}$$

$$f_{cm30} = 10.119 M_n^{0.131}$$

$$f_{cm30} = 12.524 M_t^{0.0975}$$

Con

f_{cm_i} : resistencia media (MPa)

Se ha podido comprobar que el concepto de madurez total puede representar satisfactoriamente las condiciones de curado acelerado y luego exposición al aire, y por lo tanto el grado de endurecimiento alcanzado en tales condiciones.

Tabla 9.2: Aplicación de las ecuaciones de las funciones R – M. Grupo I

Mezcla	Edad (días)	RESISTENCIA POTENCIAL (Mpa)			GRADO DE ENDURECIMIENTO (Mpa)		
		Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales	Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales
H-17					21.0**	13.0	18.2
	7	30.6	20.9	24.2	25.1	11.0	22.3
	28	34.6	9.2	31.4	28.1	5.4	26.6
	60	39.6	9.4	36.3	30.8	4.9	29.3
H-21/25	1	-		-	24.3**	8.0	22.3
	7	36.6	22	28.5	30.0	12.0	26.5
	28	37.4	4.1	35.9	31.9	3.5	30.8
	60	42.5	4.0	40.8	35.3	5.1	33.5
H-30	1	-		-	24.4**	4.9	25.6
	7	34.0	8.0	31.3	30.8	3.0	29.9
	28	39.3	4.6	37.5	33.4	2.1	34.1
	60	43.4	4.7	41.4	38.7	5.4	36.6

** resistencia acelerada

Tabla 9.3: Aplicación de las ecuaciones de las funciones R – M. Grupo II

Mezcla	Edad (días)	RESISTENCIA POTENCIAL (Mpa)			GRADO DE ENDURECIMIENTO (Mpa)		
		Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales	Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales
H-17	1				15.8**	15.0	18.2
	7	23.1	4.0	24.2	20.6	8.2	22.3
	28	26.8	17.0	31.4	21.7	22.5	26.6
H-21	1	-		-	19.0**	1.0	19.2
	7	27.3	-	27.2	20.2	14.8	23.2
	28	30.5	12.4	34.3	23.9	13.8	27.2
H-25	1	-		-	23.1**	3.0	22.3
	7	27.6	3.2	28.5	25.5	2.0	25.0
	28	31.9	12.5	35.9	30.4	3.9	31.6
H-30	1	-		-	28.5**	10.0	25.6
	7	32.8	4.6	31.3	28.7	1.7	29.2
	28	36.6	2.5	37.5	33.6	2.6	34.5

** resistencia acelerada

Tabla 9.4: Aplicación de las ecuaciones de las funciones R – M. Grupo III

Mzcla	Edad (días)	RESISTENCIA POTENCIAL (Mpa)			GRADO DE ENDURECIMIENTO (Mpa)		
		Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales	Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales
H-17	1	-		-	18.7**	1.0	18.2
	7	24.9	2.9	24.2	21.0	6.2	22.3
	28	30.6	2.6	31.4	27.8	4.4	26.6
	60	32.9	10.3	36.3	30.6	4.3	29.3
H-21	1	-		-	20.2**		19.2
	7	26.6	2.2	27.2	22.1	10.8	24.5
	28	32.3	6.1	34.3	28.3	0.7	28.5
	60	33.8	11.7	38.8	30.4	2.9	31.3
H-25	1	-		-	19.3**	15.5	22.3
	7	28.7	1.0	28.5	25.7	3.1	26.5
	28	33.1	8.4	35.9	30.6	0.6	30.8
	60	37.6	8.5	40.8	32.1	4.3	33.5
Mzcla	Edad (días)	RESISTENCIA POTENCIAL (Mpa)			GRADO DE ENDURECIMIENTO (Mpa)		
		Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales	Obtenida de ensayo	Dif. %	Estimada con ecs. Generales
H-30	1	-		-	24.0**	4.1	25.0
	7	32.1	2.5	31.3	30.2	1.0	29.9
	28	34.8	7.7	37.5	34.0	0	34.1
	60	38.2	8.4	41.4	34.6	5.7	36.6

** resistencia acelerada

CAPÍTULO 10

UN CRITERIO PARA DOSIFICAR O AJUSTAR
MEZCLAS ÓPTIMAS
CURADAS A VAPOR Y LUEGO AL AIRE

1.- INTRODUCCIÓN

Las mezclas se diseñan para que satisfagan requisitos en estado fresco, de modo que tengan adecuada consistencia, cohesión, sin segregación y de acuerdo al destino, a los métodos de mezclado, colocación y compactación disponibles y además que en estado endurecido tengan una cierta resistencia mínima y durabilidad, de modo que respondan a las exigencias estructurales y de exposición.

De todas las mezclas posibles se elige la más económica, traducida esta economía en el menor contenido de cemento.

Los períodos de curado húmedo recomendados por las normas varían según el tipo de cemento empleado y el tipo de exposición, y las resistencias mecánicas se controlan mediante ensayos normalizados sobre probetas elaboradas a tal fin a la edad de 28 días a menos que se utilice algún cemento especial, aditivo o adición en cuyo caso la edad de ensayo puede adelantarse o retrasarse.

Cuando se diseñan mezclas de hormigón para una fábrica de elementos estructurales premoldeados curados a vapor a presión atmosférica deben agregarse otras consideraciones que tienen que ver con el menor tiempo empleado para que el producto este listo para su utilización.

Para el caso de curado a vapor a presión atmosférica los reglamentos fijan especificaciones. Nuestro reglamento C.I.R.S.O.C. – 201, establece en el apartado 7.12.3, incisos e), f), y g)

- Que las probetas para verificar la resistencia del hormigón a distintas edades, se moldearán en moldes metálicos y se colocarán en lugares de las cámaras donde temperatura y humedad sean representativas de las medias reinantes.
- Que los elementos estructurales podrán ser trasladados cuando la resistencia media alcance el valor especificado por el Proyectista de la Estructura, y que inmediatamente después del traslado de los elementos estructurales y de las probetas de control, ambos se someterán a curado húmedo continuo adicional, hasta que la resistencia media de las probetas sea igual o mayor que el ochenta por ciento (80%) de la resistencia característica especificada (f_{ck}) mas el coeficiente K_1 de la Tabla 6.2. del citado reglamento.

Para cumplir estas especificaciones existen tres posibilidades:

1.- Dosificar hormigones para las resistencias características de diseño y después del curado acelerado proseguir con curado húmedo hasta cumplir las especificaciones del 80% ($f_{ck} + k_1$).

2.- Dosificar hormigones para las resistencias características de diseño y modificar los tiempos y temperaturas del tratamiento acelerado de modo de lograr la resistencia especificada al finalizar el tratamiento.

3.- Dosificar hormigones con mayor resistencia característica de modo de cumplir el requisito del ochenta por ciento de la resistencia característica más el coeficiente k_1 una vez concluido el curado acelerado, sin modificar el tratamiento.

De las tres alternativas las dos primeras se descartan, la primera porque precisamente, en la medida de lo posible se quiere evitar el curado húmedo adicional por razones de espacio y costo, la segunda porque habría que prolongar el período de vaporización ya que la temperatura usada está próxima a los valores máximos recomendados, corriéndose el riesgo de que al lograr elevadas resistencias tempranas conduzcan a una reducción de las de largo plazo. De modo que se estudió la tercera alternativa considerando que era la más ventajosa, y se procedió de la siguiente manera:

a).- Se estudió el esqueleto granular para lograr la mezcla de mayor compacidad.

b).- Se estudió la variación de la resistencia con distintas relaciones a/c para los tres grupos de hormigones. El efecto de la compacidad lograda en los hormigones del grupo I, (ultrasecos, enérgicamente vibrados) que implican una mayor resistencia que la obtenida según la ley de la relación a/c, se aprecia en dicha variación.(Figura 10.1).

c).- Se buscó el menor volúmen de pasta que satisfaga la consistencia requerida en cada caso con contenido unitario de cemento nunca menor que 290 kg/m^3 y que además cumpla con los demás requisitos en estado fresco.

d).- Se determinó para cada mezcla el porcentaje de la resistencia a 28 días curado normalizado que se alcanza al finalizar el curado a vapor con el tratamiento que habitualmente utiliza la fábrica, considerando que los tiempos y temperaturas empleados en los distintos períodos del mismo, responden a las recomendaciones de los códigos. Además se controlaron las resistencias a edades más allá de los 28 días para ver si las mismas a largo plazo no bajan a causa del curado acelerado.(Tablas 7.2, 7.3, y 7.4).

2.- PROCEDIMIENTO SEGUIDO Y RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla 10.1 se caracterizan a los hormigones como H-17, 21,25 y 30 según la resistencia característica requerida, y se presentan las resistencias medias obtenidas después del curado acelerado y a 28 días curado normalizado como así mismo las correspondientes relaciones a/c utilizadas, para cada grupo de hormigones estudiados.

	H - 17			H - 21			H - 25			H - 30		
	a/c	f _{cv}	f _{28cn}									
Grupo I	0.53	21	35	-	-	-	0.49	24	37	0.44	24	39
Grupo II	0.60	16	27	0.55	19	31	0.51	23	32	0.44	29	36
Grupo III	0.60	19	31	0.55	20	32	0.51	19	33	0.44	24	35

Tabla Nro:10.1 Resistencias medias acelerada y normalizada 28 días para cada grupo de hormigones

Si calculamos el requisito especificado de 80% ($f_{ck} + k_1$) para cada nivel de resistencia característica especificada obtenemos con $k_1 = 3$, la resistencia media que deben alcanzar una vez finalizado el curado acelerado para que no haya necesidad de proseguir con curado húmedo.

$$\text{Para H-17} \quad 0.80 \times (17 + 3) = 16 \text{ MPa} \quad (9.1)$$

$$\text{Para H-21} \quad 0.80 \times (21 + 3) = 19.2 \text{ MPa} \quad (9.2)$$

$$\text{Para H-25} \quad 0.80 \times (25 + 3) = 22.4 \text{ MPa} \quad (9.3)$$

$$\text{Para H-30} \quad 0.80 \times (30 + 3) = 26.4 \text{ MPa} \quad (9.4)$$

Con estos datos se puede calcular la resistencia media a 28 días curado normalizado que deben tener las respectivas mezclas, haciendo cumplir la siguiente condición:

$$0.80 \cdot (f_{ck} + K_1) = \infty f_{cm \text{ potencial}} \quad \therefore$$

$$f_{cm \text{ potencial}} = 0.80 (f_{ck} + K_1) / \infty \quad (9.5)$$

donde:

∞ : es el porcentaje de la resistencia media a 28 días curado normalizado obtenida con el curado acelerado, y cuyos valores figuran en las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4

En la Tabla Nro. 10.2 se han volcado los resultados que surgen de aplicar la ec.9.5, como así también la resistencia potencial media obtenida con las dosificaciones propuestas.

Si comparamos los valores de las resistencias potenciales medias a la edad de 28 días requeridas y las obtenidas con las dosificaciones estudiadas, vemos que prácticamente todas las mezclas satisfacen el requisito planteado, e incluso se podrían ajustar alguna de ellas si se considera necesario para hacerlas más económicas. Sólo tres de las mezclas no estarían cumpliendo y entonces conviene volver a dosificar.

	F_{ck} de diseño	α (%)	f_{cm} requerida	f_{cm} obtenida
Grupo I	H-17	60	27	35
	H-25	63	36	38
	H-30	64	41	39
Grupo II	H-17	60	27	27
	H-21	61	31	31
	H-25	72	31	32
	H-30	81	33	36
Grupo III	H-17	61	26	31
	H-21	63	30	32
	H-25	58	39	33
	H-30	71	37	35

Tabla Nro:10.2 – Resistencias medias requeridas para cada grupo de hormigones

Para dosificar o ajustar las mezclas se puede proceder de la siguiente manera:

1. Usando las expresiones que vinculan las resistencias medias del curado a vapor (resistencia acelerada) y las correspondientes resistencias medias curado normalizado (resistencia potencial) ec. (8.14) Capítulo 8 se estima la resistencia potencial media reemplazando el valor de la resistencia acelerada calculadas s/ 9.1, 9.2, 9.3, y 9.4.

$$f_{cm} = 7.4295 (f_{acelerada})^{0.4879} \quad (8.14)$$

Esta ecuación es aplicable a cualquier hormigón. Si lo que se quiere es ajustar la mezcla se pueden usar las ecuaciones obtenidas para cada grupo de hormigones:

$$\text{Grupo I: } f_{cm} = 4.1077(f_{acelerada})^{0.6997} \quad (8.13.1)$$

$$\text{Grupo II: } f_{cm} = 7.4303(f_{acelerada})^{0.4706} \quad (8.13.2)$$

$$\text{Grupo III: } f_{cm} = 10.799(f_{acelerada})^{0.3659} \quad (8.13.3)$$

Donde : f_{cm} : resistencia potencial media a los 28 días

$f_{acelerada}$: resistencia media acelerada e igual a $0.80(f_{ck} + k_1)$, obtenida con el curado a vapor y estimadas con las ecuaciones (9.1,9.2, 9.3, y 9.4).

2. Usando las figuras 10.1 de la variación de la resistencia media curado normalizado (resistencia potencial) con la relación a/c (válida para interpolar entre 0.4 y 0.6) para la edad de 28 días, se determina la relación a/c. O la 10.2 para extrapolar valores mayores o menores a 0.6 o 0.4.
3. Se determina la cantidad de agua requerida para la consistencia especificada, para lo cual se puede utilizar como guía las tablas del CIRSOC

o ACI de los correspondientes métodos de dosificación si se dosifica, o se mantiene la cantidad de agua si se ajusta.

4. *Se calcula la cantidad de cemento con la relación a/c estimada según punto 2.*
5. *Conocido el volumen de pasta, se calcula el volumen absoluto total de agregados.*
6. *Se calcula el porcentaje de grueso y de fino teniendo en cuenta los porcentajes que hacen máxima la compacidad del esqueleto granular si se dosifica, o se mantienen los ya calculados si se ajusta.*

Veamos la aplicación del método con un ejemplo:

De la Tabla 10.2 tomemos el caso del hormigón H- 30 del Grupo II, cuya resistencia potencial media a 28 días requerida = 33MPa. y que resulta menor que la resistencia potencial obtenida = 37 MPa para la dosificación estudiada. Este sería un caso de ajuste.

Las cantidades de los materiales con los que se elaboró el hormigón cuya resistencia potencial es 37 MPa. son:

a/c = 0.44
 Cemento: 439 kg.
 Agua :193 litros
 Arena : 1014 kg.
 Binder : 682 Kg.

1.- Se calcula la resistencia acelerada que cumple el requisito para que no haya necesidad de continuar con curado húmedo adicional una vez concluido el curado a vapor.

$$0.80 (f_{ck} + k_1) = 0.80 (30 + 3) = 26.4 \text{ MPa.}$$

2.- Se estima la resistencia potencial media a los 28 días haciendo uso de la ecuación (8.13.2) correspondiente al caso particular del Grupo II.

$$\text{Grupo II : } f_{cm} = 7.4603(f_{acelerada})^{0.4706} \quad (8.13.2)$$

$$f_{cm} = 7.4603(26.4)^{0.4706} = 34.8 \text{ MPa.}$$

3.- Con el valor de la resistencia potencial requerida de 34.8 MPa., de la Figura 10.1 estimo la relación a/c = 0.46

4.- Calculo la cantidad de cemento manteniendo la cantidad de agua:

$$193 / 0.46 = 420 \text{ Kg.}$$

5.- Calculo la cantidad de pasta:

$$V \text{ pasta} = V \text{ agua} + V \text{ cemento} = 326 \text{ dm}^3$$

6.-Manteniendo el volumen absoluto de binder de la dosificación original, se calcula el volumen absoluto de arena:

$$V \text{ binder} = 258 \text{ dm}^3$$

$$V \text{ arena} = 1000 - V \text{ pasta} - V \text{ aire} - V \text{ binder}$$

$$1000 - 326 - 30 - 258 = 386 \text{ dm}^3.$$

Con lo que la dosificación ajustada resulta:

Cemento: 420 kg.
Agua : 193 litros
Arena : 1023 kg
Binder : 682 kg.

De este modo se economizan 19 kg de cemento por m³ de hormigón.

3.- Conclusiones

El criterio seguido en este trabajo para dosificar o ajustar mezclas de hormigón curadas a vapor a presión atmosférica de una fábrica de elementos premoldeados ha dado los resultados esperados, pudiéndose hacer importantes ahorros en el consumo de cemento sin perjuicio de las propiedades requeridas.

Para el conjunto de mezclas estudiadas en este trabajo y las condiciones de exposición de clima cálido y húmedo, (temperatura media diaria = 30 °C y HR = 90%) , podemos estimar el grado de endurecimiento con la resistencia potencial de los 28 días curado normalizado., haciendo uso de las Figuras 8.1 a 8.12 o las ecuaciones que en ellas figuran (capítulo 8).

Una reflexión a realizar es que la sola condición del 80% de la resistencia característica más el coeficiente k_1 , lograda con el curado acelerado para evitar continuar con curado húmedo adicional, no es suficiente para garantizar que las mezclas alcancen en menos tiempo la resistencia media de los 28 días curado normalizado (resistencia potencial), que es con la que se estima la resistencia característica o de diseño del elemento estructural, ya que la posterior exposición al aire, e incluso la sola supresión del curado, causa una disminución de la velocidad de ganancia de la resistencia, pudiendo en algunos casos llegar a tener importancia.

Este retraso posterior debe ser tenido en cuenta sobre todo en aquellos casos en los que el elemento estructural deba estar en condiciones de recibir la totalidad de la carga.

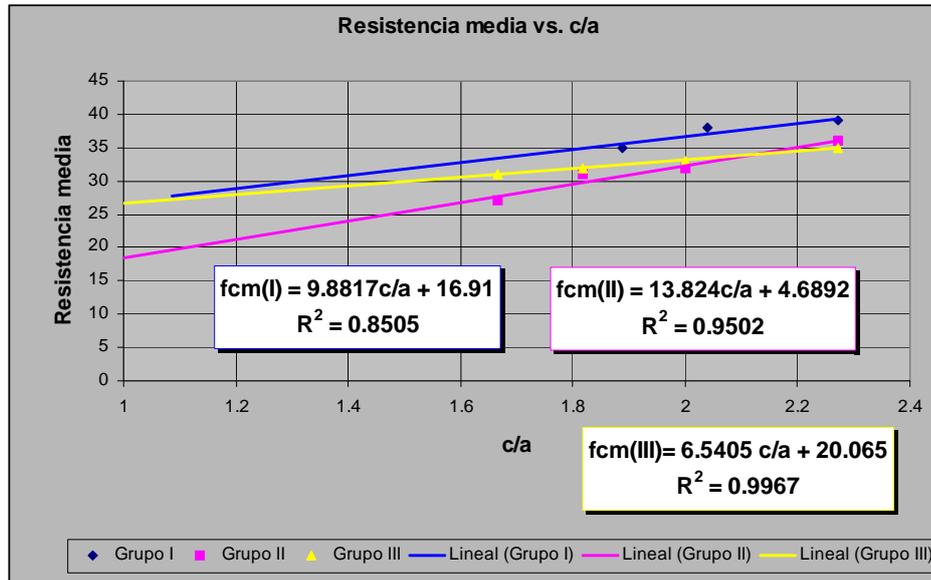


Figura 10.1: Variación de la resistencia media 28 días, en función de a/c.

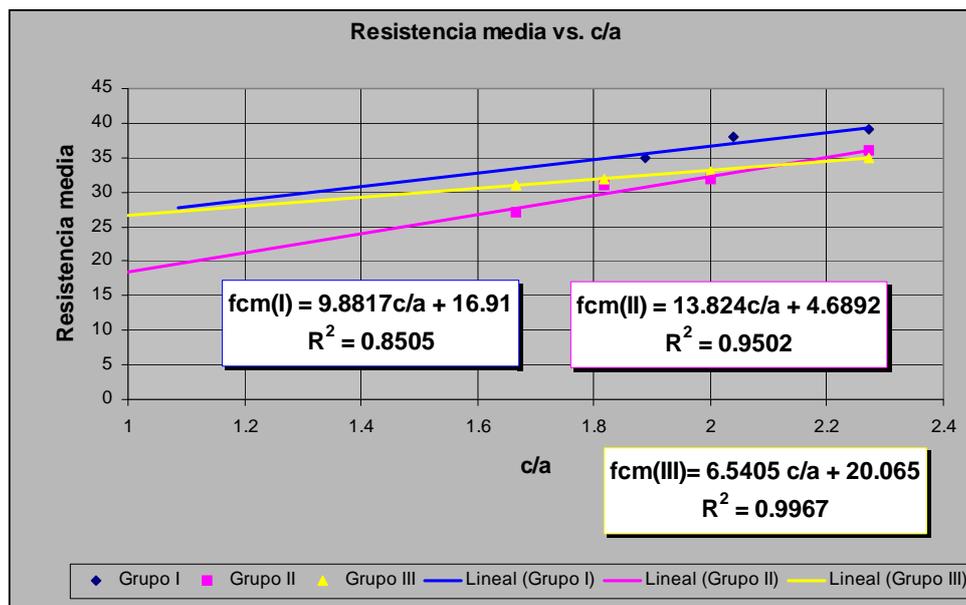


Figura 10.2: Variación de la resistencia media 28 días en función de c/a

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- CONCLUSIONES.

Siendo la resistencia a compresión la principal propiedad mecánica que se analiza para identificar la calidad del hormigón de cemento Pórtland, resulta de gran importancia para el tecnólogo e ingeniero en materiales conocer cómo influyen las características y proporciones de las mezclas en la evolución de dicha resistencia bajo diferentes condiciones de curado y en particular los que utiliza una industria local de elementos premoldeados y pretensados como ser: curado normalizado, curado a vapor a presión atmosférica y la posterior exposición al aire en clima cálido y húmedo propio de la ciudad de San Miguel de Tucumán durante los extendidos meses del verano.

Los diferentes análisis realizados apoyados por el resultado de alrededor de 500 probetas de hormigón sometidas a estos ambientes de curado y la variedad de tamaños máximos, consistencias y niveles de resistencia presentados en este trabajo, fijan pautas y recomendaciones que de manera sencilla permitan diseñar hormigones de buena calidad al menor costo posible con los materiales tradicionales.

Dada la diversidad de aspectos estudiados en detalle en los correspondientes capítulos se ordenan las conclusiones de la siguiente manera:

1.1- Métodos de dosificación:

Si bien es cierto, no es indispensable usar un método de dosificación para encontrar las cantidades de cada uno de los materiales, ni el aplicar alguno implica no realizar correcciones sobre pastones de prueba, puede resultar de gran ayuda, cuando se carece de experiencia, contar con un método de dosificación adaptado a las características de nuestros materiales, ahorrando no sólo materiales sino tiempo de pruebas.

- 1.1.- Mezclas plásticas: La aplicación de los métodos de dosificación propuestos por el ACI y el CIRSOC para mezclas plásticas, conducen a pastones de prueba que satisfacen los requisitos en estado fresco y endurecido, salvo en lo que respecta a la estimación de la resistencia en función de la relación agua-cemento, pues la calidad de los cementos Portland actuales permiten obtener mayores resistencias con mayores relaciones agua-cemento.
- 1.2.- Mezclas sin asentamiento: La aplicación rigurosa del método de dosificación para hormigones sin asentamiento del Comité ACI 211.3.75, no conduce a pastones de prueba que satisfacen los requisitos planteados, especialmente los ultrasecos en dos aspectos: primero porque no considera el efecto de la sobre resistencia lograda por la enérgica compactación en la estimación de la resistencia, la que la toma como función de la relación agua-cemento (las mismas utilizadas para hormigones plásticos) y segundo, porque la mayoración del volumen seco y compactado utilizando los coeficientes propuestos en la Tabla A2.3.5.1(b) de la citada recomendación conducen a esqueletos granulares fácilmente segregables, en todos los pastones preparados. Se podrían ajustar dichos factores de mayoración a las características de nuestros agregados con un número suficiente de pastones de prueba. Estas deficiencias se pueden subsanar de la siguiente manera:
- Para el caso de estimar la relación a/c en función de la resistencia potencial media a los 28 días, utilizar los gráficos o las expresiones obtenidas experimentalmente en

este trabajo, si el conjunto de materiales responde a las características de los aquí utilizados: cemento Pórtland CP40, canto rodado y arena procedente del río Salí cuarcítico (metamórfico de bajo grado, compuesto por: biotita, clorita, cuarzo y feldespato).

Si los valores de a/c están comprendidos entre 0.44 y 0.6 utilizar la fig. I, para valores menores a 0.44 y mayores a 0.6 utilizar la fig.II.

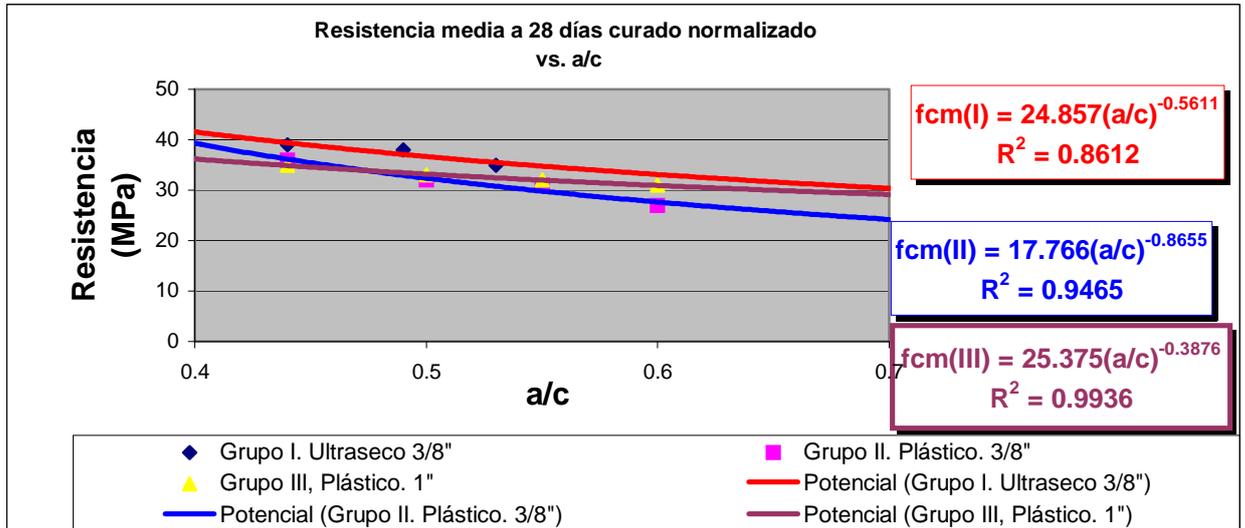


Figura I: Resistencia potencial a 28 días en función de la relación a/c .

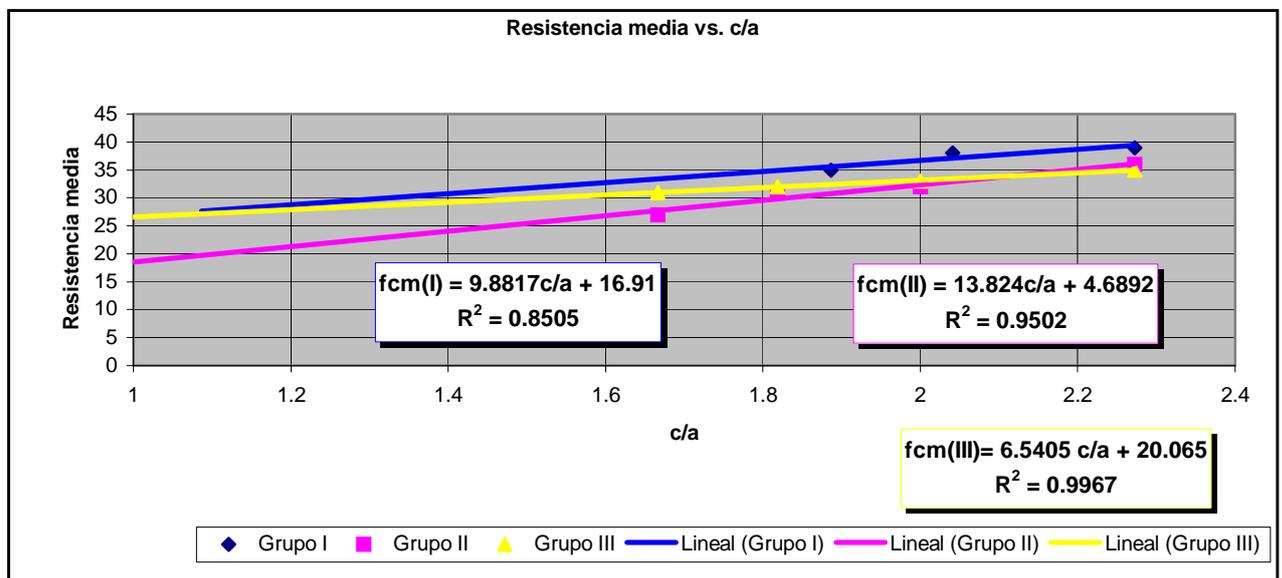


Figura II: Resistencia potencial a 28 días en función de la relación c/a .

- Para el caso de las proporciones de grueso y fino se aconseja estudiar la mezcla granulométrica de mayor compacidad en forma experimental, analítica o gráfica, en este trabajo se probó con el método de la ley de las mezclas propuesto por el CIRSOC, el método de Füller y luego se ajustó la composición granulométrica gráficamente por tanteos.(Capítulos 4 y 5).

- El procedimiento seguido para dosificar mezclas de hormigón no se aparta de los principios básicos de la Tecnología del hormigón en la que se basan todos los métodos de dosificación conocidos y se puede resumir como sigue

a).- Se estudió el esqueleto granular para lograr la mezcla de mayor compacidad.



b).- Se estudió la variación de la resistencia potencial con distintas relaciones a/c para los tres grupos de hormigones. El efecto de la compacidad lograda en los hormigones del grupo I, (ultrasecos, enérgicamente vibrados) que implican una mayor resistencia que la obtenida según la ley de la relación a/c, se aprecia en dicha variación.(Figuras I y II).



c).- Se buscó el menor volumen de pasta que satisfaga la consistencia requerida en cada caso con contenido unitario de cemento nunca menor que 290 kg/m^3 y que además cumpla con los demás requisitos en estado fresco.



d).- Se determinó para cada mezcla el porcentaje de la resistencia potencial a 28 días que se alcanza al finalizar el curado a vapor con el tratamiento que habitualmente utiliza la industria (resistencia acelerada), considerando que los tiempos y temperaturas empleados en los distintos períodos del mismo, responden a las recomendaciones de los códigos. Además se controlaron las resistencias a edades más allá de los 28 días para ver si las mismas no decrecían a largo plazo a causa del curado acelerado.

1.2.- Influencia del tamaño máximo, consistencia y relación agua/cemento en el curado.

La porosidad de la mezcla es tal vez el factor que mejor describe el comportamiento bajo diferentes condiciones de curado, pues en si misma involucra los distintos factores analizados por separado en este trabajo. (consistencia, tamaño máximo, relación a/c)

- En el curado acelerado: Los valores porcentuales de la resistencia acelerada referida a la resistencia potencial de 28 días, aumenta a medida que disminuye la relación a/c, independiente de la consistencia y del tamaño máximo.
- En el curado normalizado: Las mezclas plásticas con menor relación a/c ganan resistencia más rápidamente hasta los 28 días y para edades posteriores la velocidad de ganancia de resistencia disminuye.

Las mezclas ultrasecas no manifiestan este hecho.

- En exposición al aire cálido y húmedo: Las mezclas ultrasecas ganan resistencia más lentamente que las plásticas, de allí que las primeras alcancen la resistencia potencial de los 28 días a los 90 días aproximadamente, mientras que las segundas lo logran en 60 días.

1.3.- Estimación de la resistencia acelerada, de la resistencia potencial y del grado de endurecimiento.

1.3.1.- Método de la Madurez

- Se ha comprobado que la regla de madurez presentada por Saul, de la forma:

$$\text{Madurez (} ^\circ\text{C x días)} = a_t (t + t_0),$$

donde:

a_t = duración del curado en días

t = Temperatura de curado en $^\circ\text{C}$

t_0 = temperatura a partir de la cual el hormigón gana resistencia. Saul tomó 10°C , y en este trabajo se tomó 12°C .

se cumple satisfactoriamente en el curado a vapor a presión atmosférica con los ciclos de tiempo y temperaturas estudiados en este trabajo y permite adecuar las temperaturas y duración de los períodos del tratamiento para lograr una determinada resistencia al finalizar el curado acelerado, aceptando que a igual grado de madurez del curado acelerado y normalizado se alcanza igual resistencia.

- Se estudiaron las funciones R-M (resistencia potencial –Madurez) para cada grupo de hormigones y niveles de resistencia y se obtuvieron las ecuaciones de correlación correspondientes que describen la evolución de la resistencia potencial con la madurez, analizadas en detalle en el Capítulo 9 “ RESISTENCIA Y MADUREZ”. Estas ecuaciones particulares sirven para estimar la resistencia potencial media con la madurez normalizada.(temperatura de 21°C y HR mayor que el 95%)

Grupo I: Tmax. 3/8”, ultrasecos.

$$f_{cm17} = 9.2732M_{norm}^{0.1126}$$

$$f_{cm21/25} = 7.3211 M_{norm.}^{0.1633}$$

$$f_{cm30} = 6.7687 M_{norm.}^{0.1793}$$

Grupo II: T_{max}.3/8", plástico

$$f_{cm17} = 3.8338 M_{norm.}^{0.1986}$$

$$f_{cm21} = 5.0419 M_{norm.}^{0.1863}$$

$$f_{cm25} = 9.6759 M_{norm.}^{0.1196}$$

$$f_{cm30} = 14.684 M_{norm.}^{0.0913}$$

Grupo III: T_{max}.1", plástico

$$f_{cm17} = 4.8481 M_{norm.}^{0.1859}$$

$$f_{cm21} = 5.2016 M_{norm.}^{0.1846}$$

$$f_{cm25} = 4.6197 M_{norm.}^{0.2005}$$

$$f_{cm30} = 9.6945 M_{norm.}^{0.1309}$$

Nota: la madurez expresada en ($^{\circ}$ Ch) y la resistencia en (Mpa)

- Se obtuvo una ecuación de la función R-M por nivel de resistencia tomando el total de las mezclas para simplificar el uso de las ecuaciones particulares.

$$f_{cm17} = 4.7704 M_{norm.}^{0.1886}$$

$$f_{cm21} = 6.4703 M_{norm.}^{0.1667}$$

$$f_{cm25} = 6.708 M_{norm.}^{0.1678}$$

$$f_{cm30} = 10.119 M_{norm.}^{0.131}$$

Nota: la madurez expresada en ($^{\circ}$ Ch) y la resistencia en (Mpa)

Para poder estimar la resistencia potencial para relaciones a/c comprendidas entre 0.44 y 0.6 se han obtenido la variación gráfica y analítica de las ecuaciones generales de la función R-M, reduciéndose a una única expresión de la forma:

$$f_{cm} = A(M_{norm.})^B$$

con

$$A = -31.812(a/c) + 23.559$$

$$B = 0.3372(a/c) - 0.0118$$

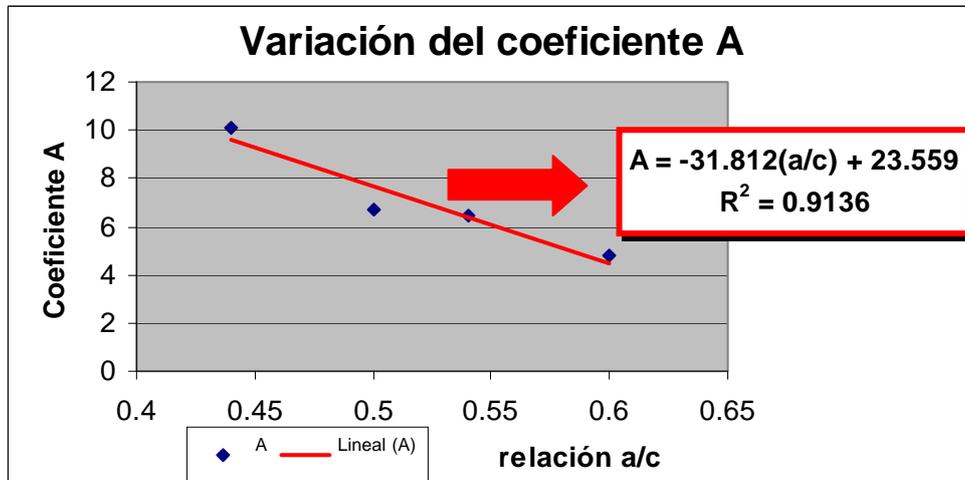


Figura III: Variación del coeficiente A con la relación a/c

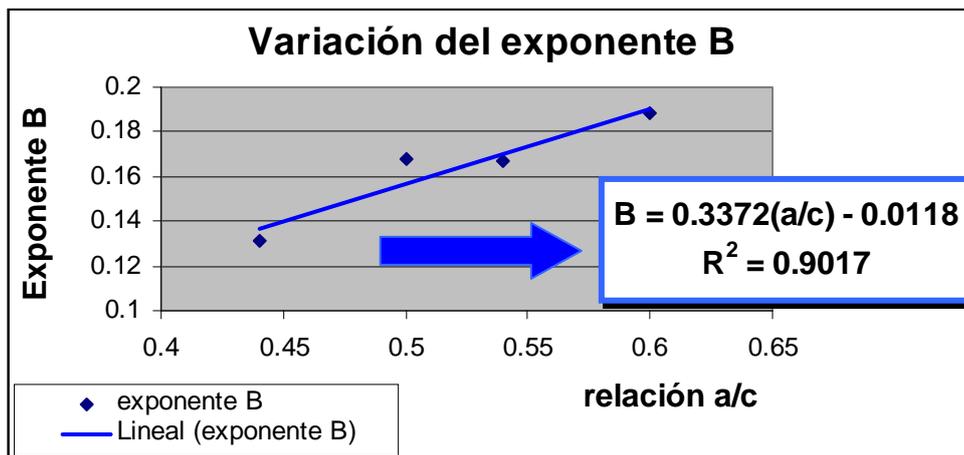
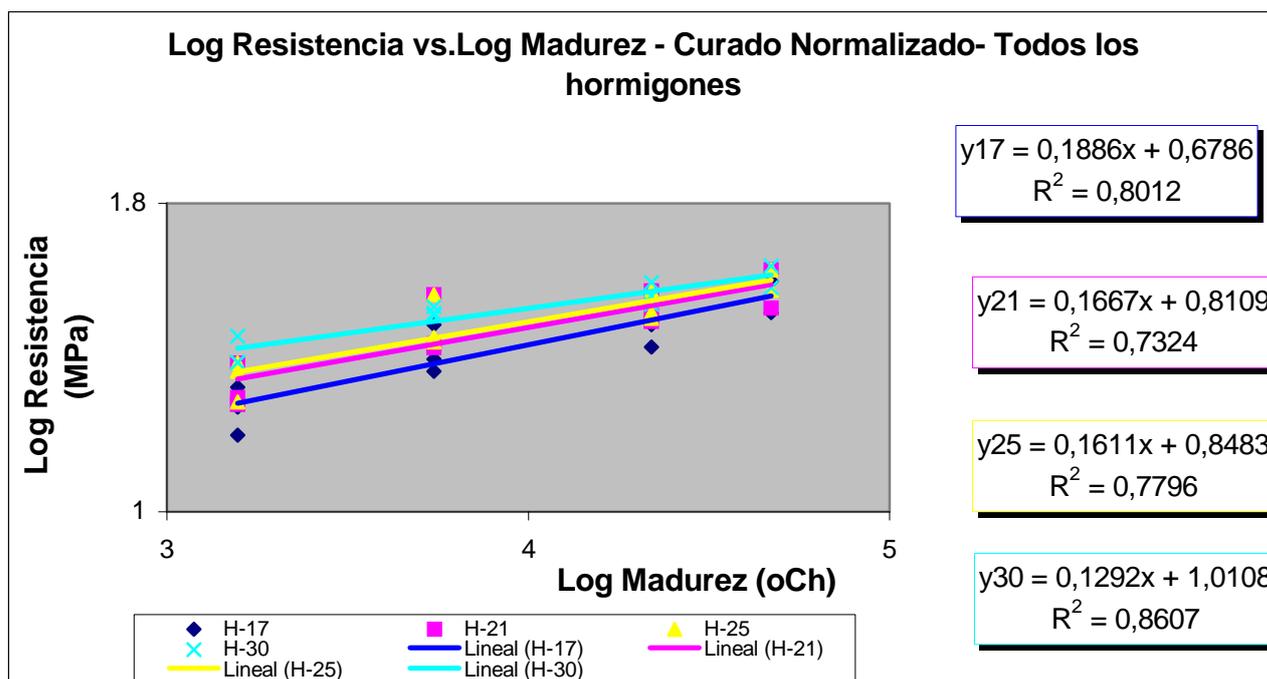


Figura IV: Variación del exponente B con la relación a/c

- En la bibliografía es común representar las funciones R-M como familia de rectas, para lo cual se toma logaritmo.



El trabajo de Ramakrishman y Shu-t'len Li titulado “ Relaciones Resistencia Madurez del concreto bajo diferentes condiciones de cura”, concluye que la relación resistencia y madurez expresada en la forma $f_{cu} = K (M)^n$ no depende de la temperatura ni del método de curado, que la constante K depende del rango de resistencia y que el exponente “n” se puede tomar igual a 0.4 para todos los casos, con lo que la familia de rectas resultan paralelas cuando se grafica el logaritmo de la función. Esta es la principal diferencia encontrada en este trabajo, pues las pendientes de las rectas varían con el nivel de resistencia.

En la siguiente tabla se indican los valores por ellos propuestos de log k y los obtenidos en este trabajo:

Valores encontrados por Palazzi			Valores encontrados por Ramakrisman y Shu-t'len Li	
<i>Resist. (MPa)</i>	<i>Curado Norm Logk</i>	<i>Curado vapor y al aire Logk</i>	<i>Resistencia (Psi)</i>	<i>Logk</i>
17	0.68	0.84	2000 – 3000	1.55
21	0.81	0.94	3000 – 4000	1.75
25	0.85	0.99	4000 – 5000	1.85
30	1.01	1.10	5000 – 6000	1.95

Valores de log k

1.3.2- Adaptación del Método de la madurez introduciendo el concepto de madurez ambiental.

- El concepto de madurez ambiental superpuesto al de madurez acelerada, llamada madurez total, que tiene en cuenta la historia térmica durante la exposición al aire, puede ser utilizado para estimar el grado de endurecimiento que adquiere el hormigón en las condiciones de curado acelerado y luego exposición al aire. Las funciones R-M y las expresiones que se proponen son solo válidas para una temperatura media diaria de 30°C y humedad relativa del 90%.y puede asumirse que el grado de endurecimiento es el que corresponde al hormigón del elemento estructural siempre que las dimensiones y volumen del mismo permitan mantener una temperatura uniforme.

Grupo I_{tmax}. 3/8", ultraseco

$$f_{cm17} = 10.068M_{total}^{0.1008}$$

$$f_{cm21/25} = 12.213M_{total}^{0.096}$$

$$f_{cm30} = 11.118M_{total}^{0.1094}$$

Grupo II: 3/8", plástico

$$f_{cm17} = 7.4426M_{total}^{0.1105}$$

$$f_{cm21} = 10.462M_{total}^{0.08}$$

$$f_{cm25} = 12.772M_{total}^{0.0796}$$

$$f_{cm30} = 17.707M_{total}^{0.0628}$$

Grupo III: 1", plástico

$$f_{cm17} = 6.9824M_{total}^{0.1315}$$

$$f_{cm21} = 7.8551M_{total}^{0.1212}$$

$$f_{cm25} = 5.0986M_{total}^{0.1779}$$

$$f_{cm30} = 9.4131M_{total}^{0.1266}$$

Nota: la madurez expresada en ($^{\circ}$ Ch) y la resistencia en (Mpa)

- Para simplificar las ecuaciones particulares de la función R-M se obtuvieron expresiones generales por nivel de resistencia.

$$f_{cm17} = 6.9192M_{total}^{0.1311}$$

$$f_{cm21} = 8.744M_{total}^{0.1153}$$

$$f_{cm25} = 9.8037M_{total}^{0.1115}$$

$$f_{cm30} = 12.524M_{total}^{0.0975}$$

Nota: la madurez expresada en ($^{\circ}$ Ch) y la resistencia en (Mpa)

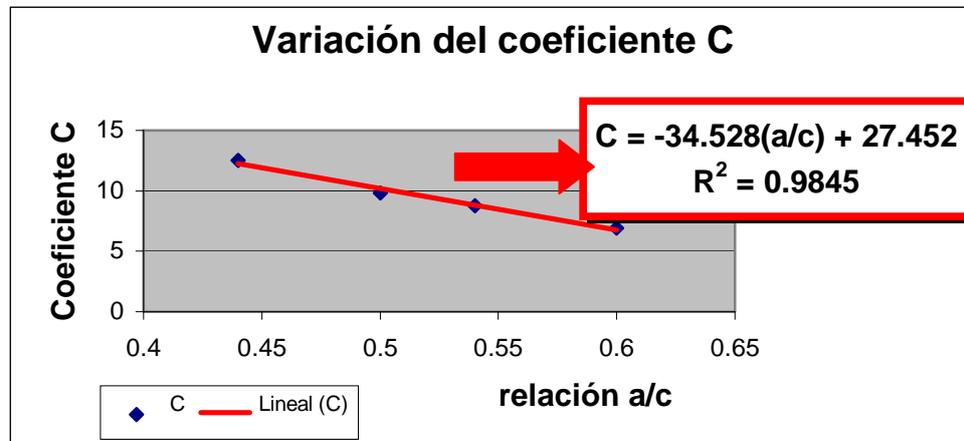
Para poder estimar el grado de endurecimiento para relaciones a/c comprendidas entre 0.44 y 0.60 se han obtenido la variación gráfica y analítica de las ecuaciones generales de la función R-M, reduciéndose a una única expresión de la forma:

$$f_{cm} = C(M_{total})^D$$

con:

$$C = -34.528(a/c) + 27.452$$

$$D = 0.2032(a/c) + 0.0082$$



FiguraV: Variación del coeficiente C con la relación a/c

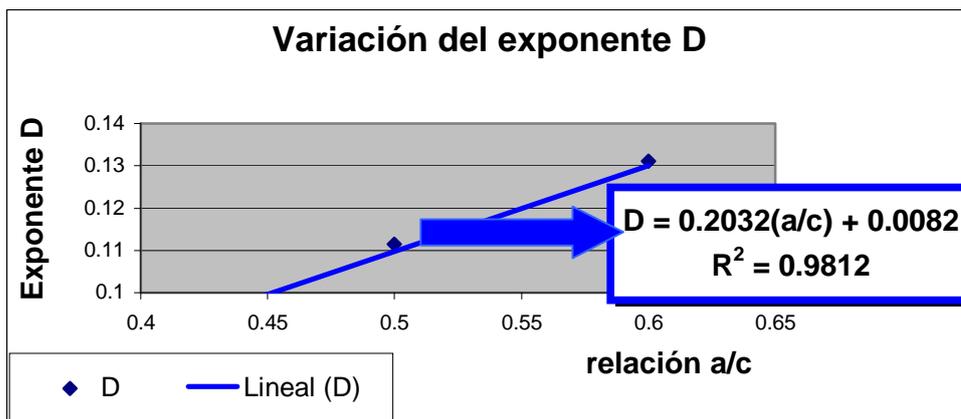


Figura VI: Variación del exponente D con la relación a/c.

1.3.3.- Variación de la resistencia con la edad

- Se estudió la evolución de la resistencia potencial con la edad obteniéndose para cada grupo de mezclas las siguientes expresiones:

Grupo I: Tmax.3/8", ultraseco

$$fcm17 = 19.809(edad)^{0.1721}$$

$$fcm21/25 = 23.967(edad)^{0.1433}$$

$$fcm30 = 23.296(edad)^{0.1523}$$

Grupo II: tmax.3/8", plástico

$$fcm17 = 14.404(edad)^{0.1986}$$

$$fcm21 = 17.457(edad)^{0.1863}$$

$$fcm25 = 21.47(edad)^{0.1196}$$

$$fcm30 = 26.993(edad)^{0.0913}$$

Grupo III: tmax.1", plástico

$$fcm17 = 17.23(edad)^{0.166}$$

$$fcm21 = 18.507(edad)^{0.1579}$$

$$fcm25 = 17.932(edad)^{0.1865}$$

$$f_{cm30} = 23.485(edad)^{0.1223}$$

Nota: con la edad expresada en días para todas las expresiones

- Se estudió la evolución del grado de endurecimiento con la edad en la condición de exposición al aire (temperatura media diaria = 30⁰ C y HR = 90%), obteniéndose las siguientes expresiones:

Grupo I: tmax.3/8", ultraseco

$$f_{cm17} = 21.048(edad)^{0.0877}$$

$$f_{cm21/25} = 24.648(edad)^{0.0834}$$

$$f_{cm30} = 24.735(edad)^{0.0959}$$

Grupo II: tmax.3/8", plástico

$$f_{cm17} = 16.151(edad)^{0.0979}$$

$$f_{m21} = 18.624(edad)^{0.0664}$$

$$f_{cm25} = 22.924(edad)^{0.0642}$$

$$f_{cm30} = 27.954(edad)^{0.0602}$$

Grupo III: tmax.1", plástico

$$f_{cm17} = 17.951(edad)^{0.1247}$$

$$f_{cm21} = 19.169(edad)^{0.1094}$$

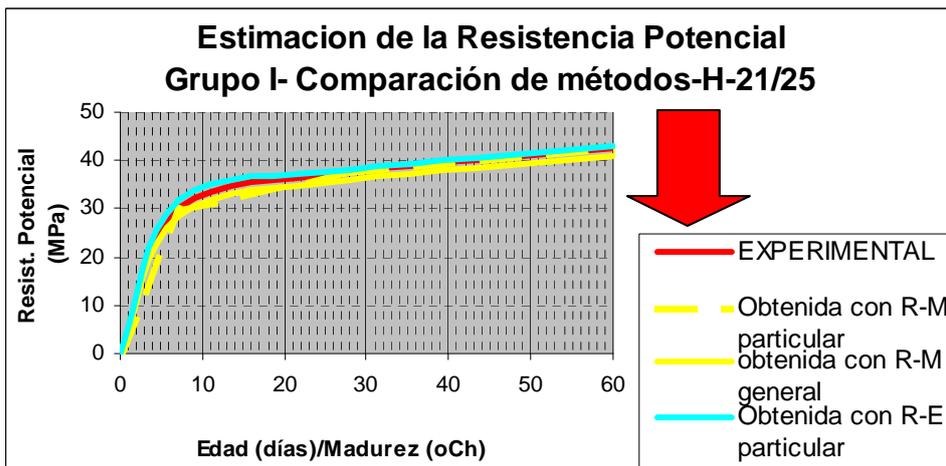
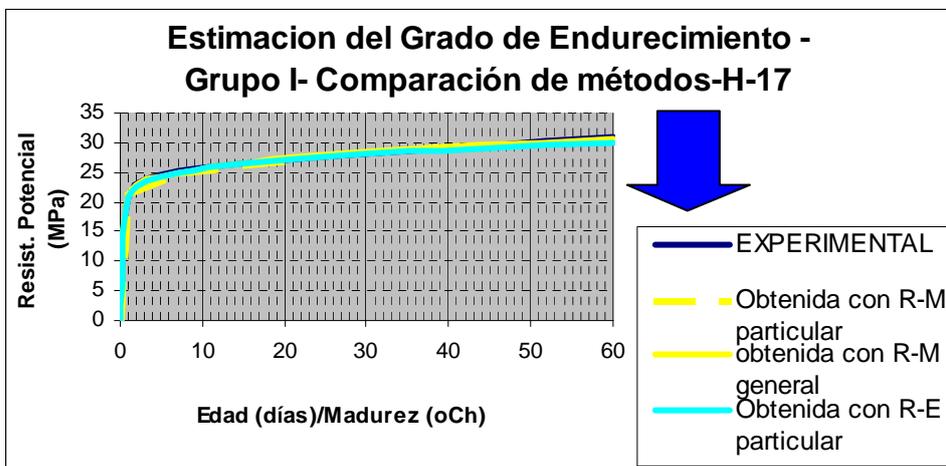
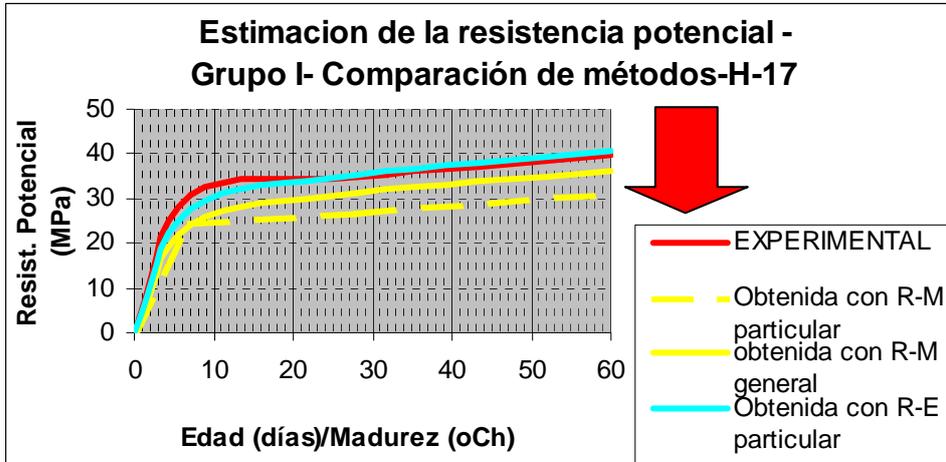
$$f_{cm25} = 19.61(edad)^{0.1272}$$

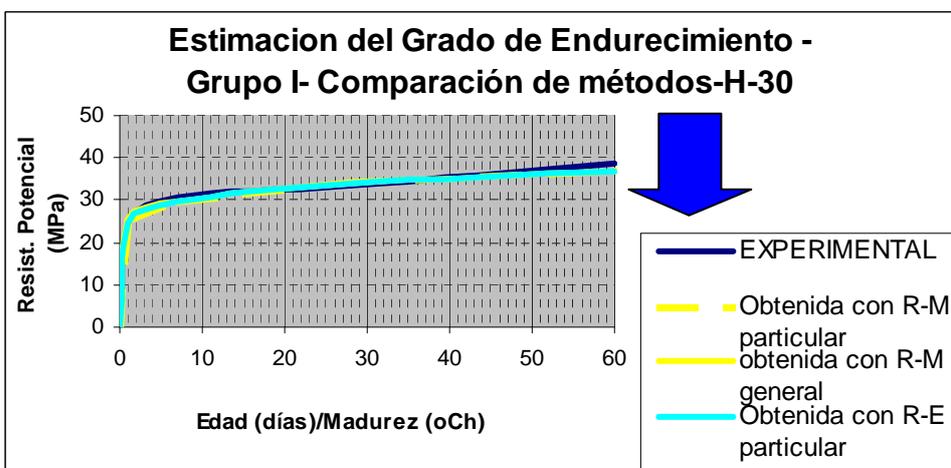
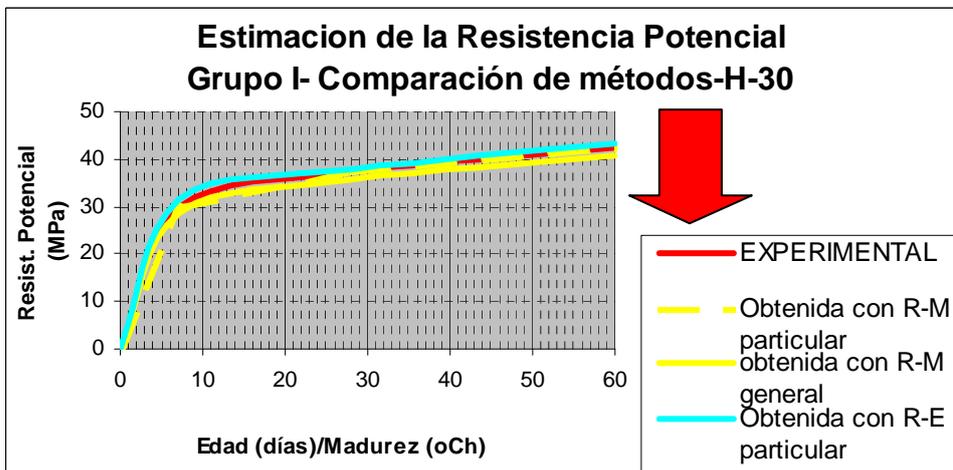
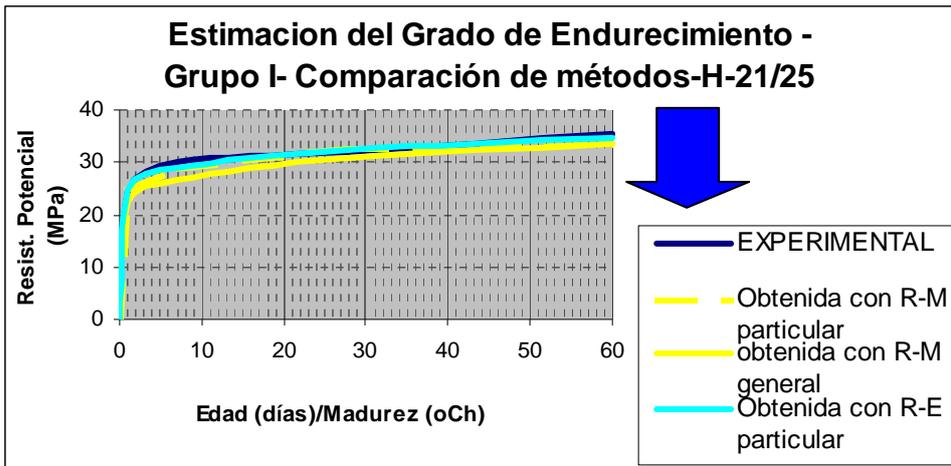
$$f_{cm30} = 24.758(edad)^{0.0885}$$

Nota: la edad expresada en (días) y la resistencia en (Mpa).

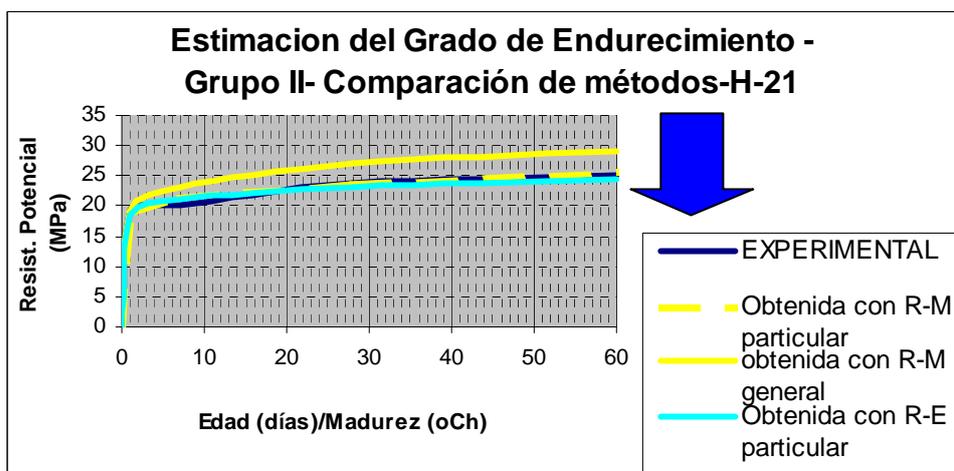
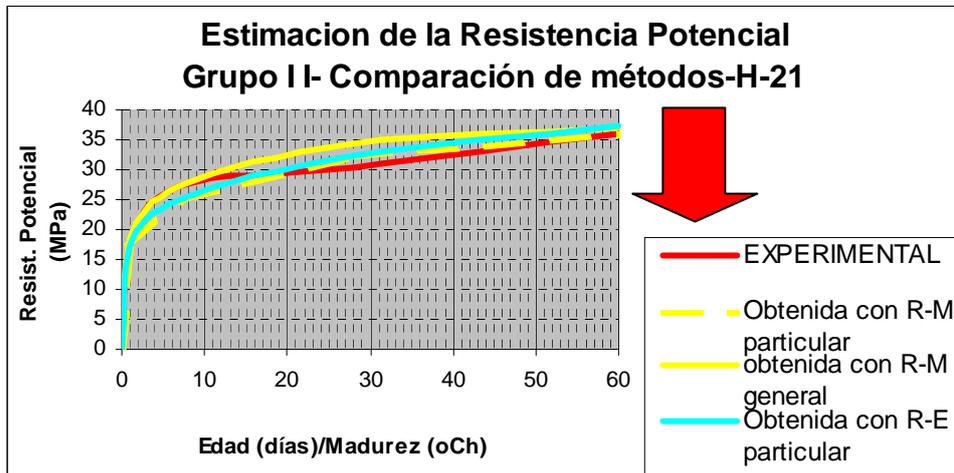
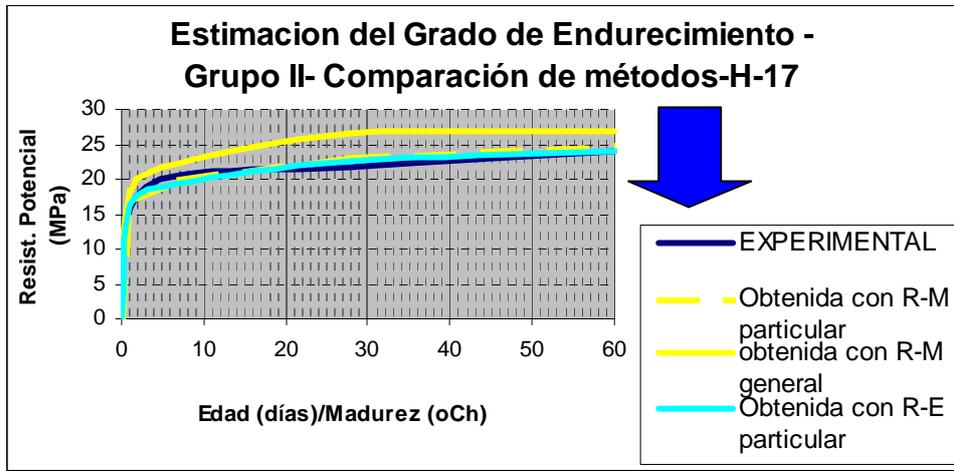
1.3.4.- Comparación de los resultados experimentales y los estimados con las distintas expresiones expuestas en los puntos 3.1, 3.2 y 3.3.

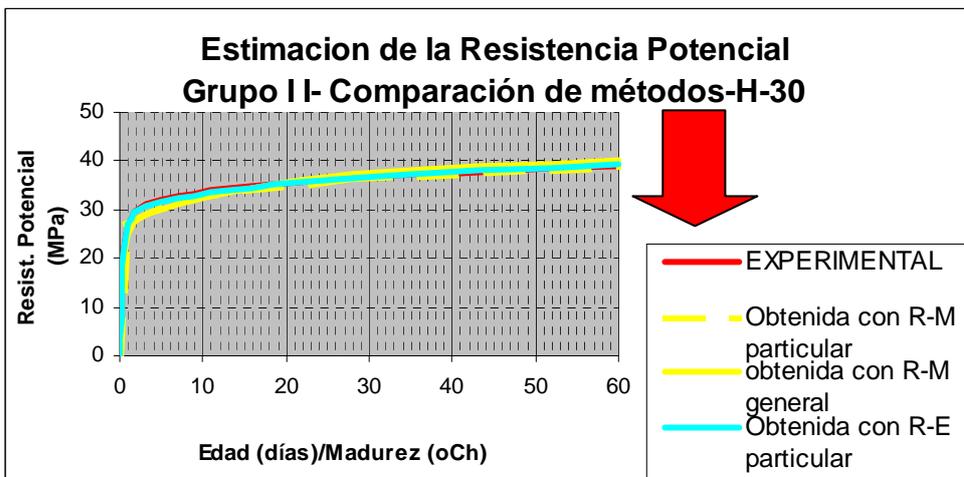
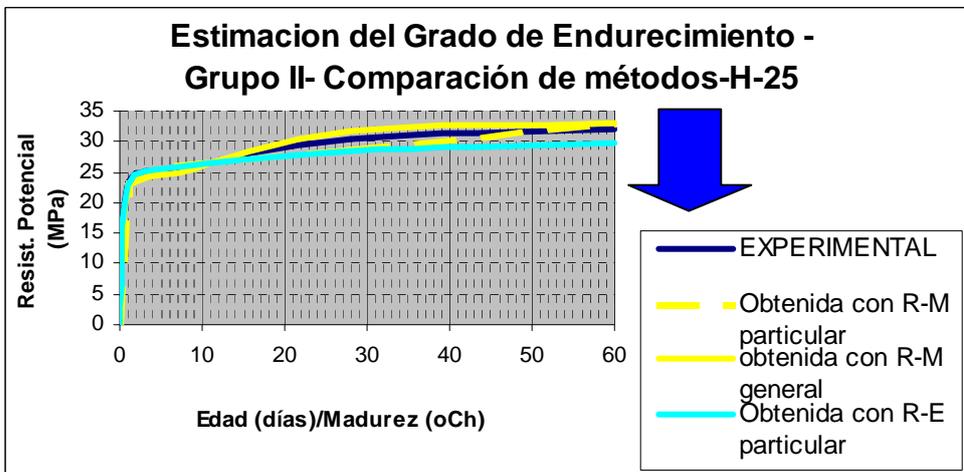
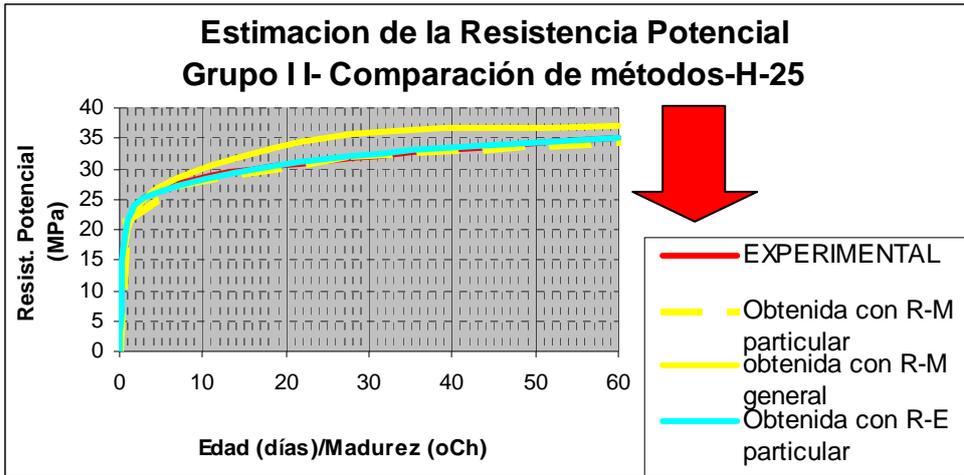
Grupol

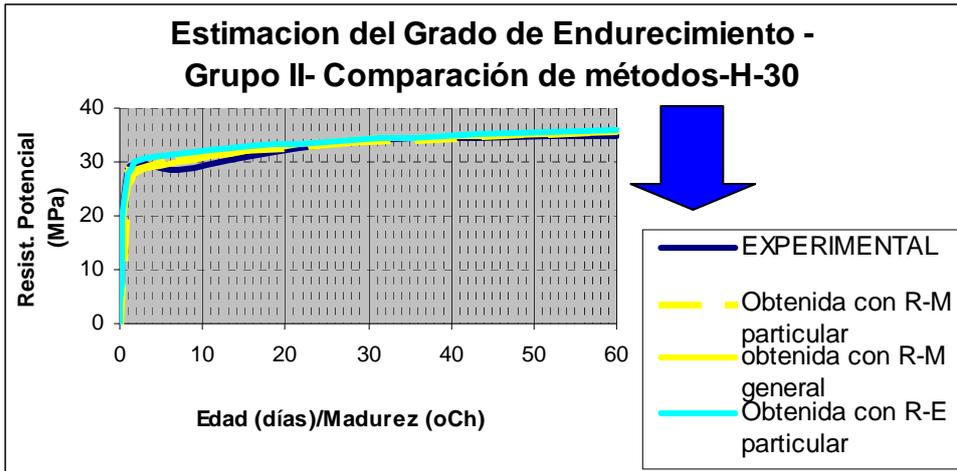




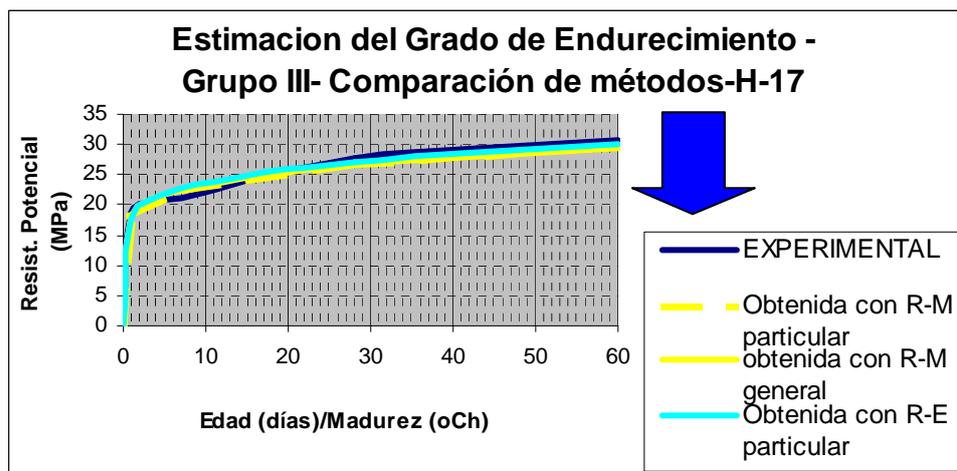
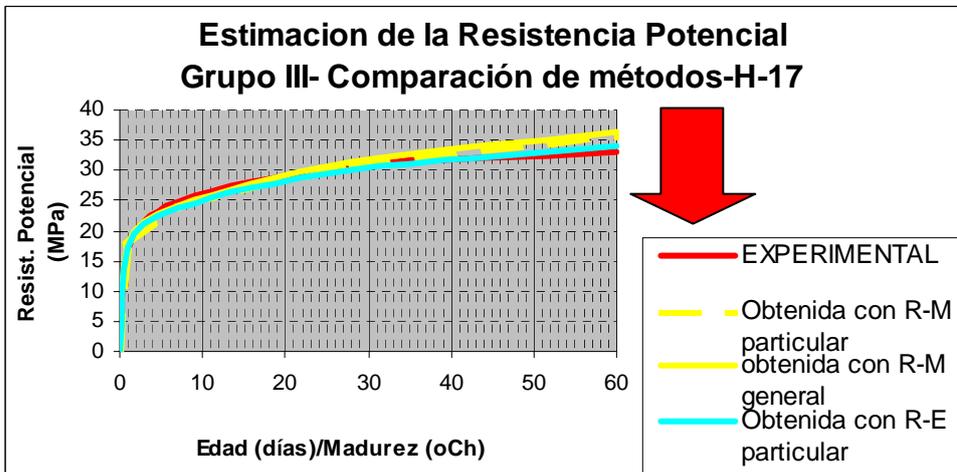
Grupoll

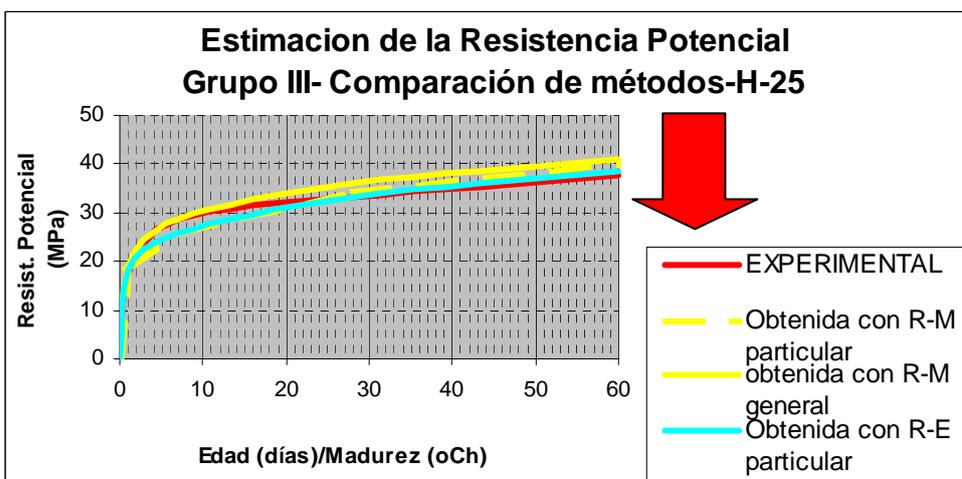
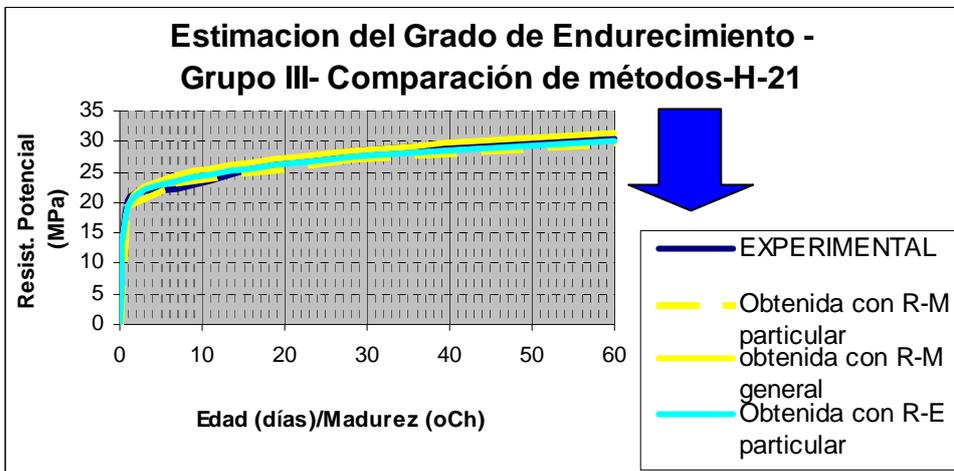
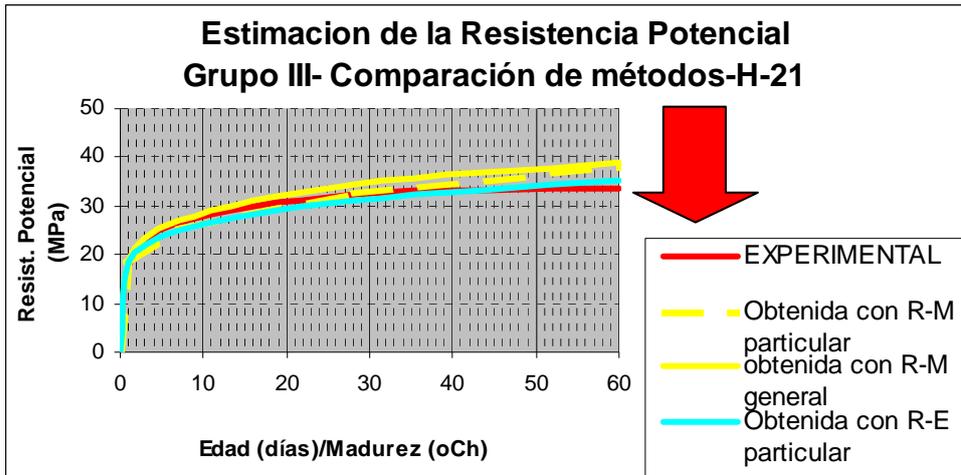


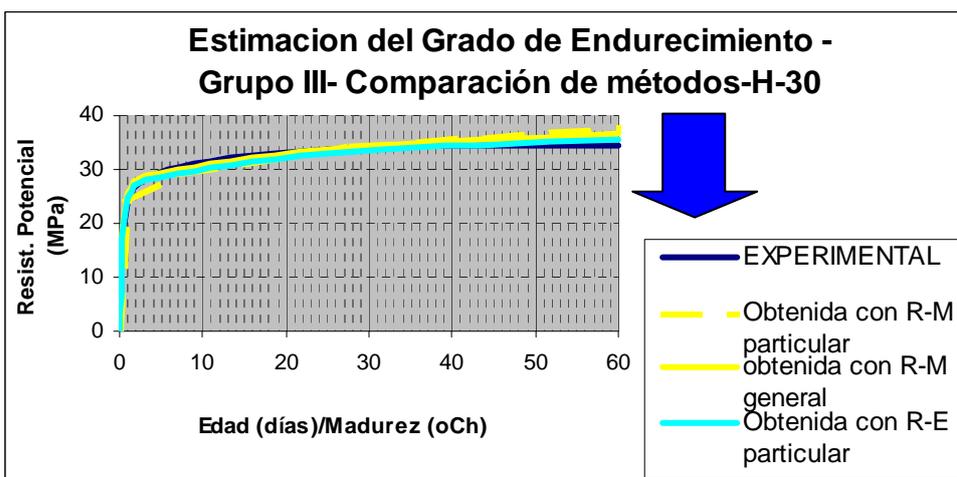
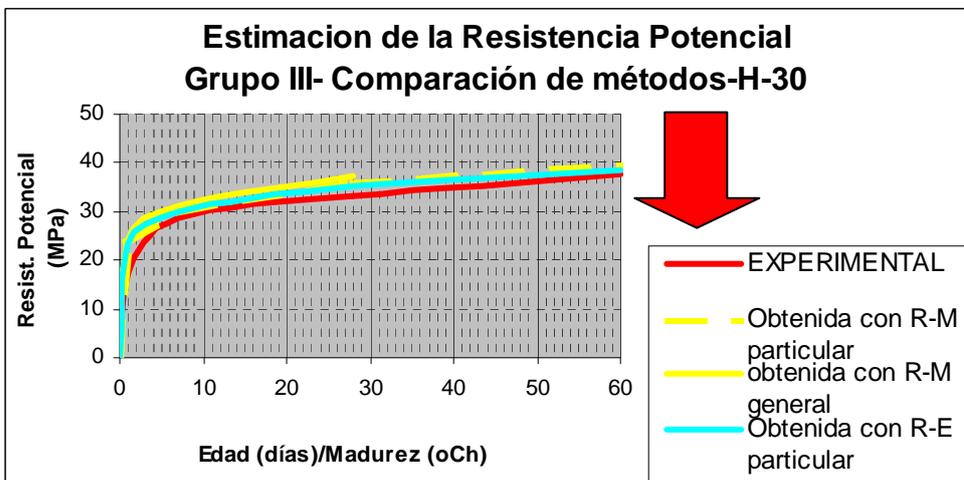
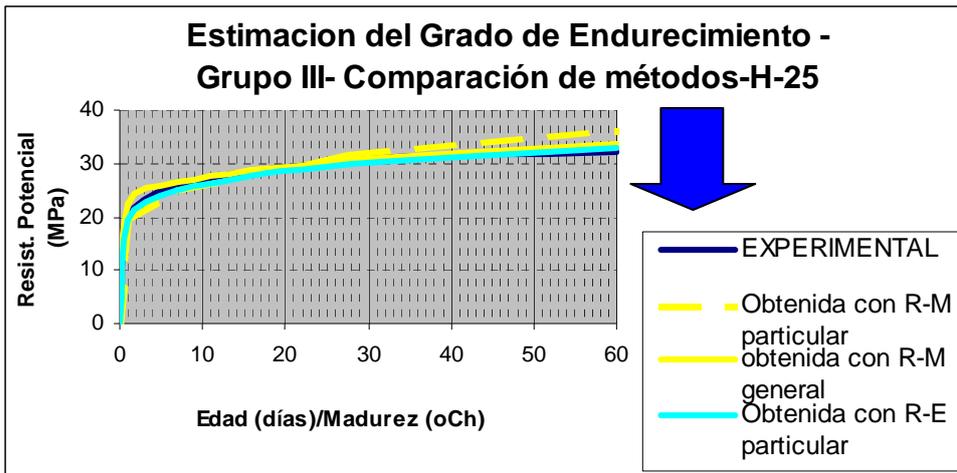




Grupo III







1.4.- Estimación de la resistencia potencial de los 28 días conociendo la resistencia acelerada.

- La preocupación permanente de poder estimar la resistencia de los 28 días antes de esta edad, ha llevado a estudiar y proponer diversos métodos. La estimación de la resistencia a partir de la de los 7 días, está muy influida por las características del cemento utilizado y por ello tiene mayor aceptación el de utilizar algún mecanismo de curado acelerado, como el desarrollado por King. Con los mismos fines, se han establecido las correlaciones entre las resistencias de los hormigones curado a vapor a presión atmosférica (resistencia acelerada) y las correspondientes a 28 días curado normalizado (resistencia potencial), para cada grupo de hormigones y para todos juntos, con excelentes coeficientes de regresión. En el Capítulo 8, se presenta en la tabla 8:4 los valores experimentales y los estimados con las expresiones siguientes:

Grupo I: $f_{c\text{potencial}} = 0.2627(f_{c\text{acelerada}})^{1.2402}$

Grupo II: $f_{c\text{potencial}} = 0.0241(f_{c\text{acelerada}})^{1.9673}$

Grupo III: $f_{c\text{potencial}} = 0.01253(f_{c\text{acelerada}})^{2.0655}$

Todos juntos: $f_{c\text{potencial}} = 7.4295(f_{c\text{acelerada}})^{0.4879}$

Nota: las resistencias expresadas en (Mpa).

Esta expresión puede ser utilizada para estimar la resistencia potencial de los 28 días independientemente del nivel de resistencia, consistencia y tamaño máximo. La verificación con los valores experimentales muestra una diferencia porcentual máxima del 10%.

Las figuras siguientes muestran las funciones que responden a estas expresiones.

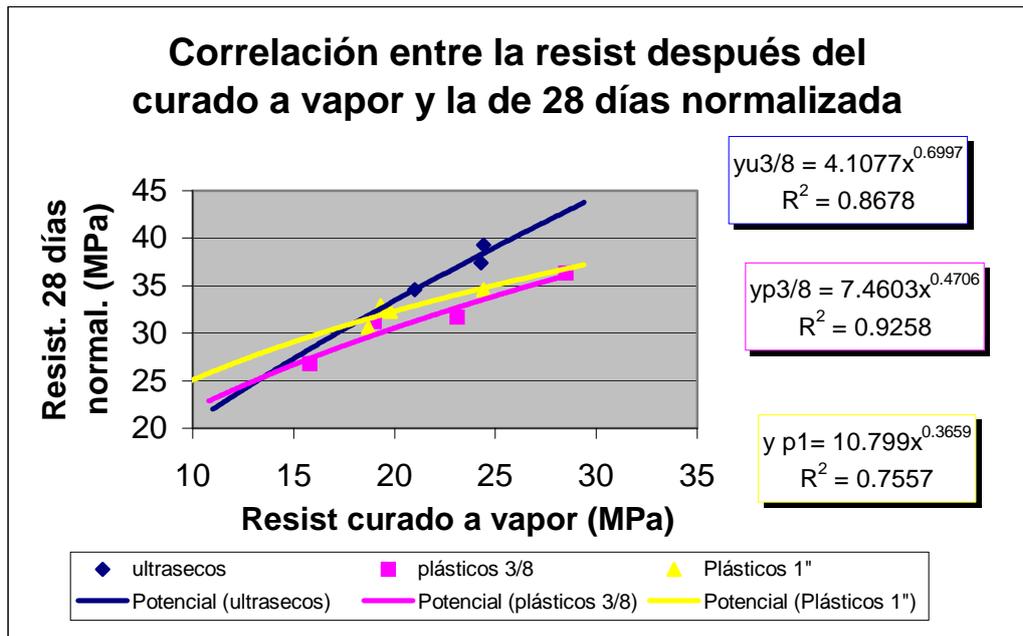


Figura VII: Una curva de correlación por cada grupo de hormigones.

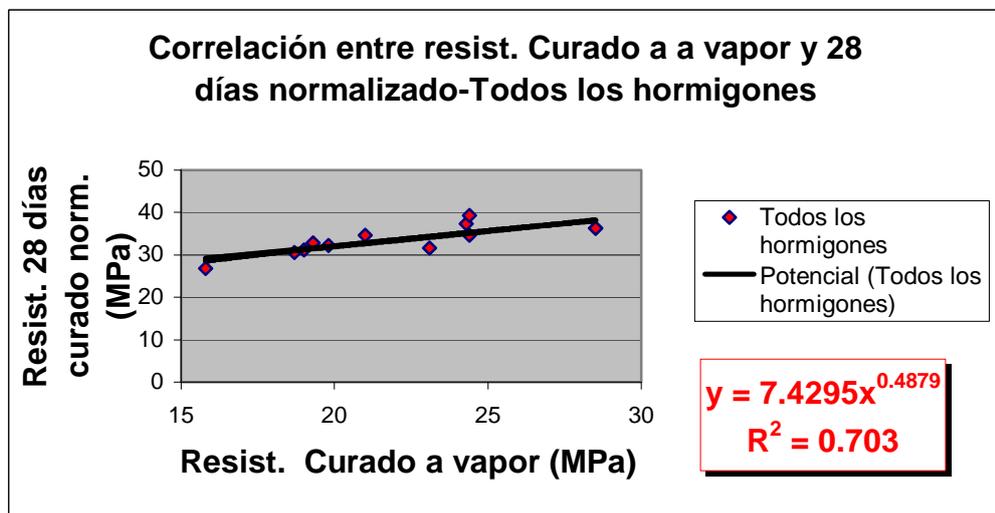


Figura VIII: Curva de correlación para todos los hormigones.

1.5.- Estimación del grado de endurecimiento a partir de la resistencia potencial obtenida en laboratorio.

- Los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido medidos sobre pastones elaborados en laboratorio y a escala natural, de cada grupo de mezclas muestran poca variación, por lo que utilizando las correlaciones estudiadas para cada mezcla, se puede estimar con buena confiabilidad el grado de endurecimiento del hormigón del elemento estructural curado a vapor y luego al aire, a partir de las resistencias potenciales de las mezclas estudiadas en laboratorio.

Sin embargo se puede utilizar la correlación general de las resistencias de los hormigones curados a vapor y luego al aire y curado normalizado, que reflejan con excelente aproximación el grado de endurecimiento a cualquier edad, consistencia, tamaño máximo y niveles de resistencia, para las condiciones de este trabajo. La expresión es:

$$(\text{grado de endurec.}) f_{cm} = 0.8781(f_{cm\text{potencial}}) - 0.2647 \quad (\text{Mpa})$$

La posibilidad de estimar el grado de endurecimiento en elementos prefabricados de cierta importancia, usados para acelerar los tiempos de ejecución, puede resultar de gran ayuda para planificar el montaje y contribuir a la seguridad de la obra.

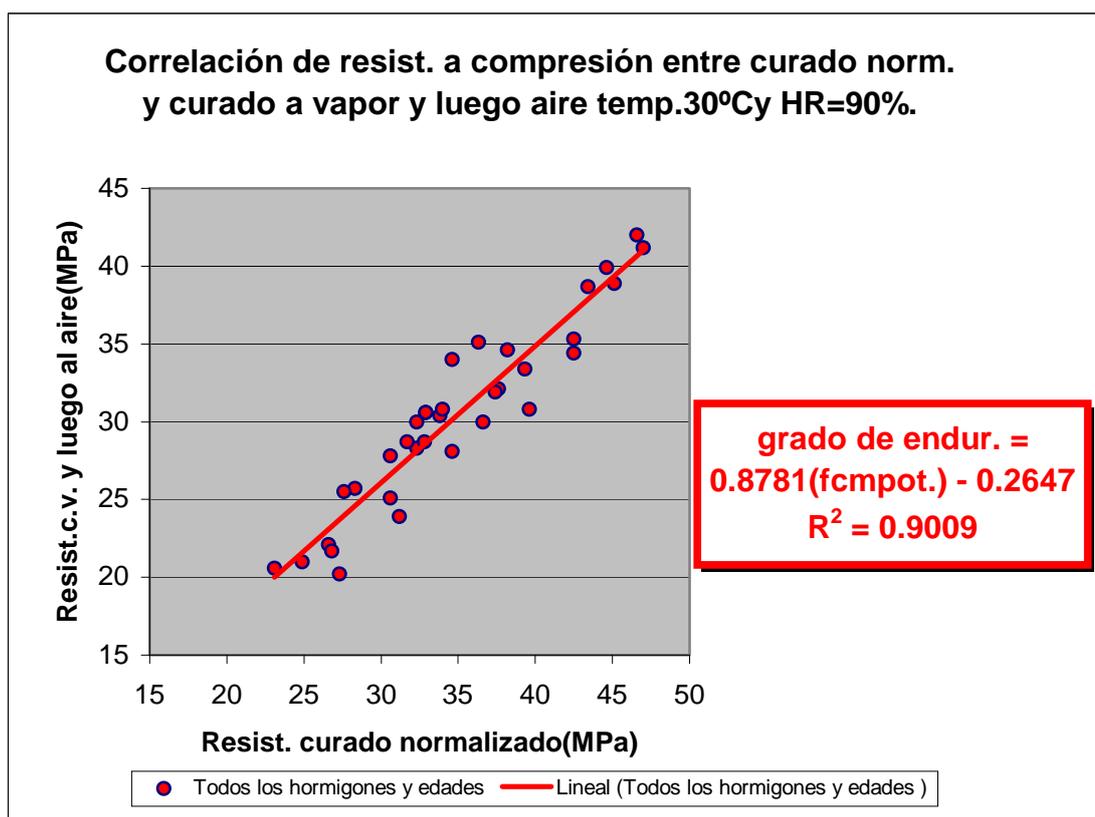


Figura IX: Estimación del grado de endurecimiento a partir de la resistencia potencial de mezclas elaboradas en laboratorio

1.6.- Criterio para dosificar o ajustar mezclas óptimas.

En base al conocimiento de la evolución de la resistencia a compresión de hormigones curados a vapor, y de las correlaciones encontradas entre resistencia acelerada y resistencia potencial, se propone un criterio que permite seleccionar las mezclas óptimas que cumpliendo los requisitos en estado fresco y endurecido resulten económicas contemplando los costos involucrados de los componentes, del tratamiento y del acopio, pues se logra obtener al finalizar el curado a vapor la resistencia necesaria para no continuar con curado húmedo adicional.

El aporte de este trabajo en cuanto a encontrar la mezcla óptima radica en que haciendo cumplir el requisito de que la resistencia acelerada sea igual a la exigida por los códigos para que después del curado acelerado no haya necesidad de continuar con curado húmedo adicional,

$$0.80 \cdot (f_{ck} + K_1) = f_{cm \text{ acelerada}}$$

y haciendo uso de las expresiones de correlación descritas en los puntos 4 y 5 podemos estimar la resistencia potencial de los 28 días,

$$\text{Grupo I:} \quad f_{cm \text{ pot.}} = 4.1077 (f_{cm \text{ acelerada}})^{0.6997} \text{ (MPa)}$$

$$\text{Grupo II:} \quad f_{cm \text{ pot}} = 7.4603 (f_{cm \text{ acelerada}})^{0.4706} \text{ (MPa)}$$

$$\text{Grupo III:} \quad f_{cm \text{ pot}} = 10,799 (f_{cm \text{ acelerada}})^{0.3659} \text{ (MPa)}$$

$$\text{Todos los grupos:} \quad f_{cm \text{ pot}} = 7,4295 (f_{cm \text{ acelerada}})^{0.4879} \text{ (MPa)}$$

Y de las Figuras I y II se estima la relación a/c, necesaria para obtener dicha resistencia potencial.

Procedimiento para ajustar mezclas de hormigón curadas a vapor a presión atmosférica.

Para ajustar mezclas se puede proceder de la siguiente manera:

 1.- Se calcula el requisito especificado de 80% ($f_{ck} + k_1$) para cada nivel de resistencia característica especificada obtenemos con $k_1 = 3$ (de la Tabla 6.2 del CIRSOC 201 M), la resistencia acelerada media que deben alcanzar para que no haya necesidad de proseguir con curado húmedo.

$$0.80 \cdot (f_{ck} + K_1) = f_{cm \text{ acelerada}}$$

donde:

f_{ck} : resistencia característica

$f_{cm\text{acelerada}}$: resistencia acelerada media.

$$\text{Para H-17} \quad 0.80 \times (17 + 3) = 16 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\text{Para H-21} \quad 0.80 \times (21 + 3) = 19.2 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\text{Para H-25} \quad 0.80 \times (25 + 3) = 22.4 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\text{Para H-30} \quad 0.80 \times (30 + 3) = 26.4 \text{ MPa} \quad (4)$$



2. Se estima la resistencia potencial media con el valor de la resistencia acelerada calculadas s/ las ecs. 1, 2, 3, y 4 usando las expresiones que vinculan las resistencias medias del curado a vapor (resistencia acelerada) y las correspondientes resistencias medias curado normalizado a los 28 días (resistencia potencial) ecs. 5, 6, 7, o 8.

La ecuación 8 se puede aplicar a cualquier hormigón, $t_{max} = 3/8"$ o $1"$ y consistencia ultraseca o plástica. Si la mezcla responde a las características de algún grupo I, II, o III, conviene usar las ecuaciones obtenidas para cada grupo de hormigones:

$$\text{Grupo I: } f_{cm\text{ potencial}} = 4.1077(f_{acelerada})^{0.6997} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

$$\text{Grupo II: } f_{cm\text{ potencial}} = 7.4303(f_{acelerada})^{0.4706} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

$$\text{Grupo III: } f_{cm\text{ potencial}} = 10.799(f_{acelerada})^{0.3659} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

$$\text{General: } f_{cm\text{ potencial}} = 7,4295 (f_{cm\text{ acelerada}})^{0,4879} \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

donde : f_{cm} : resistencia potencial a los 28 días

$f_{acelerada}$: resistencia media acelerada e igual a $0.80(f_{ck} + k_1)$, obtenida con el curado a vapor y estimadas con las ecuaciones (.1.,.2, 3 y 4).



3.- Se estima la relación a/c, usando la figura I de la variación de la resistencia media potencial con la relación a/c (válida para interpolar entre 0.44 y 0.6) para la edad de 28 días. O la figura II para extrapolar valores mayores o menores a 0.6 o 0.44.



4.- Se determina la cantidad de agua requerida para la consistencia especificada, para lo cual se puede utilizar como guía las tablas del CIRSOC o ACI de los correspondientes métodos de dosificación si se dosifica, o se mantiene la cantidad de agua si se ajusta.

-  5.- Se calcula la cantidad de cemento con la relación a/c estimada según punto 3.
-  6.- Conocido el volumen de pasta, se calcula el volumen absoluto total de agregados.
-  7.- Se calcula el porcentaje de grueso y de fino teniendo en cuenta los porcentajes que hacen máxima la compacidad del esqueleto granular si se dosifica, o se mantienen los ya calculados si se ajusta.

En capítulo 10 se detalla lo expuesto y se presenta un ejemplo.

2. - SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

1. Adecuar un método de dosificación de mezclas secas a las características de nuestros agregados y cementos.
2. Estudiar el comportamiento de las mezclas con aditivos y adiciones minerales.
3. Estudiar las curvas de resistencia en función de la madurez total para temperaturas ambientes medias inferiores a 30⁰C y humedades relativas inferiores a 90%.
4. Correlacionar el grado de endurecimiento medido sobre probetas con los métodos in situ para determinar la resistencia del hormigón de la estructura propuestos por el Comité ACI 228 (martillo de rebote, prueba de penetración, pullout, ultrasonido, madurez y extracción de testigos).
5. Aprovechar el uso de las mezclas estudiadas en la prefabricación de elementos estructurales y los ensayos de control de rutina para ajustar las expresiones obtenidas a mayor número de resultados.
6. Verificar la aplicación de las expresiones obtenidas de la resistencia en función de la edad para curado a vapor y luego al aire, a los hormigones de obra que reciben curado húmedo por períodos de tiempo inferiores a 28 días, en los que se utilicen agregados similares y cemento portland CP40 de otras marcas comerciales.
7. Estudiar el efecto del pretensado sobre la resistencia final de la pieza curada con vapor con relación a la pieza curada con vapor y no tesada.

Bibliografía

- ACI 116R-90, "Cement and Concrete Terminology".
- ACI 201.1R-92, "Guide for Making and Condition Survey of Concrete in Service".
- ACI 201.2R-92, "Guide to Durable Concrete".
- ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete".
-
- ACI 201.3-75 (Revised 1987), "Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete".
-
- ACI 214-77 (revised 1989), "Used of Accelerated Strength of Concrete".
-
- ACI 223-90, "Standard Practice for the use of Shinkage-Compesation Concrete".
-
- ACI 228.1R-89, "In-Place Methods for Determination of Strength of Concrete".
-
- ACI 304.1R-92, "State-of-the-Art Report on Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete".
-
- ACI 304R-89, "Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete".
-
- ACI 306R-88, "Cold Weather Concreting".
-
- ACI 308-92, "Standard Practice for Curing Concrete".
-
- ACI 311.4R-88, "Guide for Concrete Inspection".
-
- ACI 517-70 (Reafirmed 1976), "Curado Acelerado del Concreto a Presión Atmosférica".
-
- ANDERSEN P. J. AND JOHANSEN V., "Guide to Determining the Optimal Gradation of Concrete Aggregates", Idorn (G.M.) Consult A/S, Birkerøed, Denmark, 1993, vii, 200 pp (SHRP-C-334; PB93-191245).
- ARMAGHNI, J. M., "Testing of Concrete Permeability for Durability Evaluation", Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, Proceedings of Papers Presented at Structures Congress 93, Irvine, CA; De by H. S. ANG and r. VIILLAVARDE; New York, 1993, pp 989-995.
- CALLEJAS, J., "Tratamientos Térmicos del Hormigón". Instituto Eduardo Torrojas de la Construcción y del Cemento. España 1968.
- FRANJETIÇ, Z., "Endurecimiento rápido del hormigón". Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del cemento. España 1971.

- HANNANTH, D. J., *"Effect of heat on concrete strength"*. Engineering, 197, pág. 302. Londres, febrero 1964.
- HIGGINSON, E. C., *"Effect of steam curing on the important properties of concrete"*. J. Amer. Concr. Inst., 58, págs. 281-98. Setiembre 1961.
- KASAMI, H., *"Effect of elevated temperature exposure on the properties of concrete"*. Takenaka Tech. Res. Rept. No. 13, págs. 24-32. Tokio, Abril 1975.
- KLIEGERS, P., *"Curing requirements for scale resistance of concrete,"*ibid., págs. 18-31
- LAMOND, J. F., *"Accelerated strength testing by the warm water method"*. J. Amer. Concr. Inst., 76, No. 4, págs. 499-512. 1979.
- MALHOTRA, H. L., *"The effect of temperature on the compressive strength of concrete"*. Mag. Concr. Res., 8, No. 23, págs. 85-94. Agosto 1956.
- MALHOTRA, V. M., *"An accelerated method of estimating the 28-day splitting tensile and flexural strengths of concrete accelerated strength testing"*. Amer. Concr. Inst. Sp. Publicn. No. 56, págs.147-67. 1978.
- NEVILLE, A. M., *"Tecnología del Concreto"*. Editorial LIMUSA. 1989
- MEYERS, S. L., *"How temperature and moisture changes may effect the durability of concrete,"* Rock Products, págs. 153-157. Chicago, agosto de 1951.
- PHILLEO, R., *"Some physical properties of concrete at high temperatures,"*J. Amer. Concr. Inst., 54, págs. 857-64. Abril de 1958.
- POWER, T. C., exposición sobre *"Maturity and strength of concrete"*, por J. M. Plowman, Mag. Concrete Res. , 8, No. 24, págs. 178-9, nov. 1956.
- SMITH, P., *"Resistance to high temperatures"*. Ibid., págs. 388-419. 1978.
- WALKER, S. and BLOEM, D.L. y W. G., *"Effects of temperature changes on concrete as influenced by aggregates,"*J. Amer. Concr. Inst., 48, págs. 661-79. Abril 1952.
- ZOLDNERS, G., *"Effect of high temperatures on concrete incorporating different aggregates,"* Mines Branch Research Report R. 64.

Normas de Ensayos:

- ASTM C29-78: *"Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates."*
- ASTM C31-84: *"Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimen in the Field."*
- ASTM C39-86: *"Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens"*.
- ASTM C143-78: *"Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete."*
- ASTM 150-85: *"Standard Specification for Portland Cement"*.

- ASTM C185-85: *“Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar.”*
- ASTM C192-81: *“Standard Method of Curing and Making Concrete Test Specimen in Laboratory.”*
- ASTM 231-82: *“Estándar Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”.*
- ASTM C873-85: *“Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds”.*
- ASDTM C1074—87: *“Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”.*

Apéndice A

“CURADO ACELERADO DEL CONCRETO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA”. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. (Traducido del informe original publicado por el American Concrete Institute – Comité ACI 517 -)

El Comité ACI 517 (American Concrete Institute) ha realizado un informe detallado y analizaremos aquí las recomendaciones que se realizan para elementos prefabricados de hormigón agrupados en:

Mampostería de hormigón

Tuberías de hormigón

Productos de hormigón prefabricados y pretensados.

1.1.- Recomendaciones de los ciclos de curado para piezas de mampostería de hormigón

La característica más notable en la fabricación de piezas de hormigón para mampostería es que se trata de un hormigón no plástico sin asentamiento, y se vuelve plástico sólo a través de vibración y presión enérgicas.

Actualmente se siguen las recomendaciones del ACI 517-70 “ Recommended Practice for Atmospheric Pressure Steam curing of concrete, reaffirmed 1976” en la mayoría de las fábricas, las que se resumen en la siguiente tabla:

Ciclos de curado con vapor para unidades de mampostería

Período de curado	Tiempo, horas	Temperatura o velocidad de cambio de temperatura Grados F	de temperatura Grados C
Período de curado inicial *			
Bloque peso ligero	1 mínimo	60-100	16-38
Bloque peso normal	2 mínimo	60-100	16-38
Incremento de la temperatura		40-60 por hora	22-23 por hora
Temperatura máx.**	12 (mínimo) para períodos combinados de temperatura máxima mas períodos de saturación	180-190 150-165	82-88 66-74
Saturación***		5 ^o F por hora, disminución del máximo promedio	2.8 ^o disminución del máximo promedio

- *Incrementar el período de curado inicial a 1 hora cuando la temperatura ambiente esté bajo 32^oF (0^oC)
- **Cuando se emplean puzolanas como parte del ligante, las temperaturas máximas de 200-210^oF(93-99^oC) deberán investigarse tanto para unidades de peso ligero como normal.

- ***El ciclo de curado puede incluir una saturación o un período de temperatura máxima constante, pero no es necesario incluir ambos. La saturación más un tiempo de temperatura máxima no deberán sumar 12 horas como mínimo. El tiempo de saturación puede reducirse en una cantidad de tiempo igual al tiempo de temperatura máxima.

Investigaciones reciente indican que resulta conveniente un período más largo para desarrollar la misma resistencia temprana que la lograda para 16⁰C.

1.1.1. Efecto de la variación del ciclo de curado sobre la resistencia a compresión y otras propiedades mecánicas del hormigón para mampostería.

Como todas las etapas del ciclo de curado a vapor están interrelacionadas, un cambio en alguna de ellas puede producir efectos adversos en cualquier otra etapa.

La causa principal para una correcta planificación del tiempo de curado y vaporización es la diferencia que existe en los coeficientes de dilatación térmica del agua, del aire, de la pasta de cemento y de los agregados de la mezcla, lo que originan esfuerzos durante el calentamiento y si a edad temprana no se tiene suficiente resistencia pueden ocurrir daños. No hay suficientes investigaciones sobre este hecho pero algunos estudios ^{3,2}, indican que si se eleva la temperatura de la mezcla por medio de inyección de vapor se reduce considerablemente el período de curado con vapor.

1.1.2. Período de curado inicial para mampostería de hormigón

Las recomendaciones del Comité indican un período inicial de curado mínimo de 1 hora para bloques ligeros, y de 2 horas para bloques de peso normal. , antes de aplicar vapor. Sin embargo estas recomendaciones se basan en valores promedios y por lo tanto su estricta aplicación no siempre da buenos resultados. Por ejemplo si la compactación del bloque ha sido inadecuada y la superficie es más porosa, se podría empezar a elevar la temperatura en el horno en forma inmediata sin que ello ocasione daño alguno. Si el bloque es de alta resistencia, usado para fachadas arquitectónicas de gran altura, es posible que un período de 2 horas de curado inicial a 16⁰C sea inadecuado.

1.1.3. Período de elevación de temperatura para mampostería de hormigón.

Al igual que en el período inicial, en éste la elevación de la temperatura deberá ajustarse al producto y a l ajuste de las instalaciones y equipos de la planta. Por ejemplo en bloques de alta resistencia (24.6 Mpa a 42.2 Mpa) el rango de elevación de temperatura no exceda los 33⁰C por hora, aún empleando períodos de curado inicial de 4 horas a temperaturas superiores a 16⁰C. Es importante que tanto en el período inicial como en el de elevación la humedad relativa se mantenga por arriba del 90%.

1.1.4. Período de curado inicial y de saturación para mampostería de hormigón.

La práctica más común en la industria es el emplear períodos iniciales y de saturación de 12 horas, o más, de las 24 horas empleadas en el proceso normal de cimbrado y curado, resultando suficiente períodos de 12 horas.

Si después del período inicial de curado sigue un ciclo de secado dentro del mismo horno se pueden reducir las 12 horas. Es muy común usar temperaturas de

secado del orden de 121⁰C y en algunos casos se puede elevar a 232⁰C sin que se afecten las unidades. Se deben llevar a cabo pruebas individuales en planta para determinar el mejor ciclo de secado y su duración dependerá del contenido de humedad que se desee en el bloque.

1.2. Tuberías de hormigón curadas con vapor.

El método más común para curar tuberías de hormigón es con vapor a presión atmosférica. Las temperaturas y los ciclos empleados dependen de los equipos de fabricación, del tipo de compactación y colocación. En algunos casos los moldes se retiran inmediatamente después del colado del hormigón y en otros se mantiene el molde durante el curado.

Un factor importante a tener en cuenta es el contenido de humedad de la muestra, ya que las consistencias para lo distintos procesos van de “tierra húmeda” a asentamientos de 152.4 o 177.8 mm. Y para cada caso existe un ciclo adecuado.

En todos los casos se debe asegurar un suministro de humedad por medio de la condensación del vapor y en las mezclas más secas cuando se retiran los moldes inmediatamente se requiere una cantidad adicional de agua durante los períodos inicial y final de incremento de humedad. La falta de humedad puede producir reducción de la resistencia y agrietamiento por contracción plástica.

1.2.1. Métodos de fabricación para tuberías de hormigón

Los métodos pueden ser:

- a.- Colado manual
- b.- Centrifugado
- c.- Con máquina

En algunos casos se puede usar hormigón lanzado y en todos los casos se utilizan moldes. Las principales diferencias entre uno y otro método son la consistencia de la mezcla y la cantidad de superficie de hormigón expuesta.

a.- Colado Manual: En este caso se coloca el hormigón en el espacio anular situado entre dos moldes en forma de cilindros verticales, colocados concéntricamente. La base del tubo es un anillo hecho a máquina y la superior tiene un acabado a máquina. Por lo general las mezclas varían sus asentamientos entre 0 y 15 cm o más, como en tuberías pequeñas o delgadas, El hormigón se compacta con vibradores externos sujetos al molde y durante el curado solo queda expuesta la parte superior del molde.

También se suele emplear el colado en seco, similar al anterior sólo que la mezcla tiene asentamiento cero y el molde se retira inmediatamente después de aplicarle vibración energética con cabezas vibratorias.

b.- Centrifugado: Como su nombre lo indica este método se lleva a cabo utilizando hormigón de consistencias similar al caso anterior, y centrifugándolo. Durante el centrifugado el agua tiende a eliminarse del hormigón por lo que resulta con menos agua que aquel con asentamiento cero. No se utilizan cimbras interiores por lo que la superficie interior queda expuesta al curado.

c.- Con maquinaria: En este caso se compacta en forma mecánica una mezcla relativamente seca, en un molde de acero para formar el tubo. La compactación se puede realizar con un obturador, con varilla compactadora o con un rodillo en combinación con la vibración. El proceso de fabricación varía según sea el método de compactación empleado.

1.2.2. Ciclos de curado para tubos de hormigón

Período de curado inicial: Los resultados óptimos se obtienen cuando este período coincide con el tiempo de fraguado inicial determinado según normas para el tipo de cemento empleado. Las mezclas más secas de tierra húmeda utilizadas en el proceso de colado seco o máquina, pueden soportar períodos relativamente cortos de curado inicial sin causar daños pues tienen un bajo contenido de agua.

Si el período de curado es menor que el requerido puede aparecer fisuras debido a una expansión térmica, pues la estructura de los materiales no alcanzó una resistencia suficiente para soportar esfuerzos internos.

En general períodos más largos de curado inicial no son tan perjudiciales como los demasiado cortos.

En este período se debe mantener la temperatura lo más próxima a la temperatura del hormigón y de los moldes.

Período de incremento de la temperatura: Después del período inicial se debe elevar la temperatura paulatinamente hasta alcanzar la de vaporización. Hay que controlar el incremento de la temperatura para evitar daños, pues si se eleva demasiado rápido la temperatura se originan esfuerzos por gradientes de temperatura. Si el llenado del molde es manual la incidencia es mayor porque los moldes de acero se expanden antes que el hormigón, siendo más sensibles los tubos de mayor diámetro.

También es importante controlar el punto de aplicación del vapor, para evitar el impacto en el elemento y lograr que el vapor se distribuya de manera que minimice la expansión.

Período de curado: Por lo general cuanto más altas sean las temperaturas de vaporización menores serán las resistencias alcanzadas a los 28 días. Las experiencias indican que para una reducción de la temperatura de 60^o a 49^o la resistencia no varía de la lograda a los dos días.

Período de enfriamiento: No se ha realizado ninguna investigación que indique hasta que punto es perjudicial un enfriamiento rápido después del curado. Sin embargo un período de enfriamiento controlado es práctico y benéfico pues se minimiza el choque térmico.

1.3. Productos de hormigón prefabricados y pretensados curados con vapor.

En el ciclo de curado a vapor de elementos prefabricados y pretensados intervienen todos factores, y el ciclo óptimo solo puede determinarse a través de pruebas.

1.3.1. Período de curado inicial.

En general se recomienda un período inicial de curado mayor a tres horas. En algunos casos aumentar este período a siete horas permite obtener resultados óptimos tanto en lo que hace a la economía de la operación de planta como en las propiedades estructurales del producto a edades tempranas como tardías.

1.3.2. Índice de incremento de la temperatura.

Este índice puede variar entre 11⁰C a 33⁰C, después de un período de curado inicial apropiado. Si no se toma en cuenta el período inicial se recomiendan los índices más bajos. En la mayoría de los casos se usa un índice práctico máximo de 22⁰C a 33⁰C, con un período inicial de tres a cinco horas.

1.3.3. Temperatura máxima de curado.

Se ha demostrado que los resultados óptimos se obtienen para temperaturas de vaporización entre 66 y 82⁰C.

Las temperaturas más bajas son mejores para períodos de vaporización mayores a 24 horas.

Las temperaturas más altas, cuando el período inicial es más prolongado. Las resistencias tempranas son más altas pero a los 28 días suelen ser menores.

1.3.4. Duración de la vaporización.

Por lo general las mesas de colado como las cimbras, se vuelven a usar después de 24 horas. Entonces las proporciones de las mezclas y las temperaturas de vaporización se ajustan de modo que el ciclo completo de curado no exceda las 18 horas.

La operación de vaporización disminuye su efectividad y economía en forma rápida con la edad del elemento por lo que no se recomiendan períodos de vaporización largos.

1.3.5. Período de enfriamiento

Lo importante en este período es evitar los cambios bruscos de temperatura para reducir los agrietamientos de los elementos de hormigón, debido a la contención en moldes y a los materiales empleados en el pretensado.

1.3.6. Efecto de las variaciones en el ciclo de curado en la resistencia a compresión y otras propiedades.

No existe un ciclo de curado que sea óptimo para todas las plantas. Cada planta es única. Muchos son los factores que interactúan durante un ciclo de curado y que influyen en la resistencia y otras propiedades. Por lo general aquellos que propician las altas resistencias a edades tempranas se oponen a los que favorecen las posteriores. A continuación analizaremos estos factores en los períodos de : curado inicial, elevación de temperatura, vaporización, y enfriamiento.

Período de curado inicial:

En este período intervienen principalmente dos factores a saber: **calor de hidratación, y temperatura de la mezcla antes de la aplicación del calor.**

El calor de hidratación: es el que se genera cuando el cemento se combina químicamente con el agua. Aunque el índice de evolución del calor es relativamente lento y alcanza su máximo a las 8 a 12 horas después de mezclado (por lo general mayor que los períodos de curado inicial empleados) si se alcanza este calor favorece la aceleración de resistencia.

La temperatura de la mezcla antes de la aplicación del calor: desempeña un papel importante en la resistencia del hormigón, a tal punto que se esta usando mucho el aumentar la temperatura de la mezcla mediante la inyección de vapor vivo a la mezcla antes de agregar el agua. La temperatura del hormigón puede llegar a lo 60° C, y ya que se necesita poco vapor , la condensación sustituye solo una pequeña parte del agua en la mezcla. Debido a las diferencias del contenido de calor en el vapor y en el agua, el agua a punto de ebullición no puede sustituirse directamente por vapor sin que se exceda la relación agua/cemento requerida.^{3.5}

Al inyectar vapor directamente a la mezcla, permite obtener una temperatura uniforme. Sin embargo la pérdida de resistencia última que resulta de un rápido incremento de la temperatura parece ser un fenómeno tanto físico como químico.

Según Saul^{3.9}el **efecto químico**, se debe a la rápida hidratación del C_3A y a una deficiencia en el contenido de yeso. Puesto que la solubilidad del yeso disminuye con el aumento de la temperatura, puede ocurrir que este recubrimiento impida la formación posterior de los productos de hidratación que intervienen en la obtención de las resistencias últimas.

El efecto físico^{3.6}, se relaciona con los diferentes coeficientes de expansión térmica de los materiales. Así el cemento y los agregados tienen aproximadamente los mismos coeficientes, siendo los del agua y el aire de 20 y 200 veces mayores respectivamente que los correspondientes al cemento y agregados. Por lo tanto el hormigón fresco calentado a temperatura ambiente debe resistir una serie de fuerzas expansivas que se presentan a diferentes índices. Hanson, indicó que estas fuerzas disociadoras producen en el hormigón pequeñas grietas horizontales, con grietas más largas^{3.2}.

Si se aplican estos efectos al hormigón calentado por medio de inyección de vapor, las fuerzas disociadoras debidas a las expansiones diferenciales, no serían problema puesto que la estabilidad de volumen a partir de efectos térmicos estarían presentes antes de que ocurriese cualquier manifestación de rigidez en el hormigón. Pero los fenómenos químicos tendrían mayor influencia, pues surgiría una reacción más rápida entre el C_3A y el agua, con incrementos importantes de temperatura como $58^{\circ}C$, que inhibirían posteriormente la solubilidad posterior del yeso.

Si bien es cierto existe una buena correlación del período óptimo de curado inicial entre los especímenes de prueba y los correspondientes elementos estructurales curados juntos, es necesario proponer un método de campo, fácil de realizar, que se base el grado de fraguado del hormigón.

Período de incremento de la temperatura

En este caso intervienen dos factores a saber: **velocidad de aumento de la temperatura y humedad relativa**.

La **velocidad de aumento de la temperatura** si es baja mejoran la calidad del hormigón, en cambio si es alta, pueden aparecer grietas, al igual que ocurre para períodos muy cortos de curado inicial. Los índices de incremento de temperatura en la práctica por lo general no exceden los 16⁰ C por hora. Para índices más altos se recomienda períodos de curado inicial más prolongados.

La **humedad relativa** alta ya sea en el horno o bajo cubierta es importante para evitar la evaporación del agua necesaria para la hidratación del cemento. Una baja humedad relativa puede repercutir en disminución de la resistencia final.

Período de vaporización

En este período influye directamente **la temperatura óptima**. Si lo que se busca es mayor resistencia a las 24 horas la temperatura del vapor deberá estar comprendida entre los 55⁰ y 75⁰ C,^{3,9} en cambio si lo que se busca es mayor resistencia a los 28 días la temperatura del vapor deberá exceder los 75⁰ C. Estas recomendaciones concuerdan con lo obtenido por Higginson^{3,3}.

Período de enfriamiento

Durante este período se lleva el hormigón a la temperatura ambiente, y cuando mas lento es el proceso mejor resulta, evitándose agrietamientos y cuarteaduras que resultan de la formación de gradientes de temperatura y esfuerzos diferenciales. Un índice máximo según Kirkbride^{3,5}, es de 39⁰ C por hora. Para períodos de curado más cortos se recomiendan índices más bajos de enfriamiento para compensar en parte la reducción final de la resistencia. Por lo general las piezas se pueden retirar una vez que al tacto resulten aceptables.

Referencias

- 3.1 *Brown H.E.* "An Investigation of Effect of the Gypsum Content and Steam Curing Variation on the Compressive Strength of Portland Cement Concrete", MSc Thesis, University of Virginia, Charlottesville, agosto 1963
- 3.2 *Hanson J.A.* "Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants", ACI Journal, Proceedings vol 60, num I, enero 1963, págs. 75-100.
- 3.5 *Kirkbridge, T.*, "Review of Accelerated Curing Procedures", Precast Concrete (Londres), vol. 2, núm. 2, febrero 1971, págs. 87-90
- 3.6 *Mansfield, G. A.*, "Curing a Problem in Thermodynamics," Rock Products, vol. 51, núm. 8, agosto 1948, pág. 212.
- 3.9 *Schmidt, Emil y Schutz, Raymond J.*, "Steam Curing", Journal, Prestressed Concrete Institute, vol. 2, núm.2, sept. 1957. Págs. 37-40.