



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de modificación al proceso convencional de
diseños de mezcla de concreto en el LEMC**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Diego Angel Mario Cánova Valladolid

Asesor:
MSc. Ing. Christian Mario Varhen García

Piura, octubre de 2021



A Dios,

*A mis padres por su amor, dedicación y perseverancia,
a mi familia por su apoyo y confianza.*

A mis amigos y profesores por el respaldo brindado.





Agradecimientos

Quiero agradecer al MSc. Christian Varhen García, y al personal técnico del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMC), en especial a Francisco Castro Cruz por su tiempo y ayuda brindada.

También reconocer a mis compañeros Eric Vega, Renzo San Martín, Yelitza Ochoa y Angie Castro por su apoyo durante el desarrollo de la investigación.





Resumen

La presente tesis busca evaluar una propuesta para modificar el procedimiento en laboratorio realizado para encontrar la dosificación de materiales requerido para un diseño de mezclas de concreto convencional. Se emplean agregados locales y cemento tipo MS. Para el diseño inicial se sigue lo recomendado por el ACI 211.1 y las normas técnicas peruanas.

Para realizar un diseño de mezcla, usualmente en laboratorio se elaboran varias dosificaciones con el fin de encontrar una correcta proporción de materiales y una adecuada relación agua/cemento. De estas dosificaciones se realizan mezclas de prueba obteniendo parámetros del concreto fresco como temperatura, trabajabilidad (slump) y peso unitario; luego se elaboran probetas de $\phi 15 \times 30$ cm para cada mezcla. Este procedimiento requiere de mínimo tres tandas de prueba. La modificación propuesta consiste en realizar el diseño a partir de una sola tanda de concreto, distribuidos en probetas de $\phi 10 \times 20$ cm. Se inicia con una dosificación teórica de relación agua/cemento y slump bajos y, mediante adiciones controladas de agua, se obtienen otras relaciones agua/cemento cada vez mayores. De esta manera, al finalizar el procedimiento, los datos obtenidos permitieron elaborar diagramas de comportamiento mecánico y de trabajabilidad.

El procedimiento modificado muestra resultados coherentes para un concreto convencional, valores de slump y resistencia dentro de lo esperado. La ejecución del procedimiento LEMC implica tres tandas diferentes de concreto, para las cuales es necesario pesar, mezclar y limpiar en cada una de ellas. Por otro lado, el procedimiento modificado solo necesita de una tanda, esto hace que pueda ser realizado en un menor tiempo de ejecución.

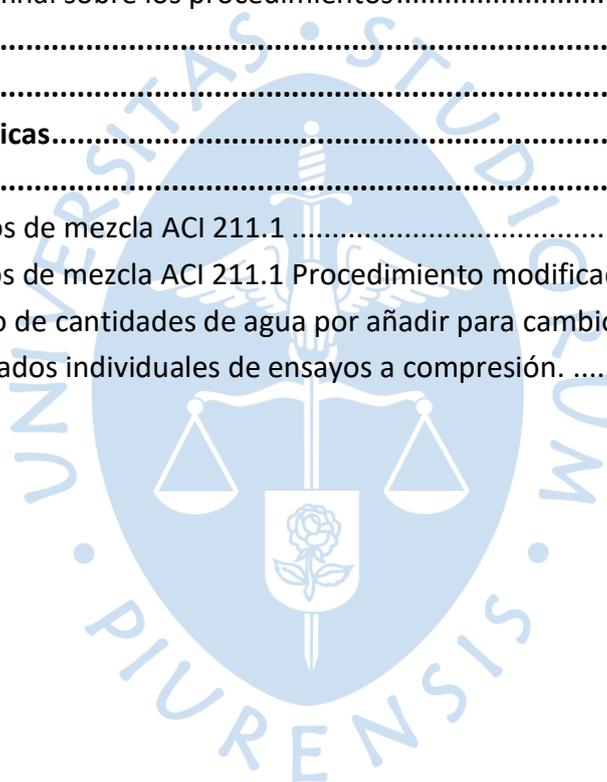
La investigación determinó que la propuesta planteada permite obtener concretos convencionales con resistencia a la compresión y trabajabilidad requeridas. La principal diferencia de este procedimiento se encuentra en que para su desarrollo el número de tandas a realizar y en el tiempo necesario para su ejecución es menor, sin embargo, la cantidad de datos representativos que se obtienen es mayor comparado con el procedimiento LEMC. Se debe considerar que, al haber sido realizada una sola vez, esta no admite plantear comparaciones estadísticamente concluyentes y deja abierta la necesidad de más estudios para conseguir mayores datos y asegurar que la calidad del concreto no se vea afectada.



Tabla de contenido

Introducción.....	15
Capítulo 1 Generalidades y marco teórico	17
1.1 Diseño de mezcla - ACI 211.1	17
1.2 Método IBRACON	23
1.3 Relación agua/materiales secos (H)	29
Capítulo 2 Programa experimental	31
2.1 Ensayos	31
2.1.1 Caracterización de agregados para concreto	32
2.1.1.1 <i>Granulometría de agregados</i>	32
2.1.1.2 <i>Peso unitario de los agregados</i>	32
2.1.1.3 <i>Peso específico y capacidad de absorción de los agregados</i>	32
2.1.1.4 <i>Humedad total</i>	32
2.1.2 Concreto en estado fresco	32
2.1.2.1 <i>Asentamiento (slump)</i>	32
2.1.2.2 <i>Temperatura</i>	33
2.1.2.3 <i>Peso unitario y contenido de aire</i>	33
2.1.2.4 <i>Elaboración de especímenes y curado</i>	33
2.1.3 Concreto en estado endurecido.....	33
2.1.3.1 <i>Resistencia a la compresión</i>	33
2.2 Materiales.....	33
2.2.1 Cemento	33
2.2.2 Agua.....	34
2.2.3 Agregados.....	34
2.2.3.1 <i>Agregado fino</i>	34
2.2.3.2 <i>Agregado grueso</i>	37
2.3 Diseños de mezcla	39
2.3.1 Planteamiento inicial de los procedimientos de mezcla.....	39
2.3.2 Procedimiento actual del LEMC	39
2.3.3 Procedimiento modificado.....	43
2.3.4 Comprobación de diseños de mezcla teóricos.....	48

Capítulo 3 Resultados y discusión	51
3.1 Concreto en estado fresco	51
3.1.1 Temperatura.....	51
3.1.2 Peso unitario	53
3.1.3 Asentamiento	54
3.1.4 Relación entre agua / materiales secos (H%).....	57
3.2 Concreto en estado endurecido.....	58
3.2.1 Resistencia a la compresión	58
3.2.2 Patrones de falla de las probetas	60
3.3 Diagramas de diseño resultantes	60
3.4 Verificación de diseños resultantes	65
3.5 Comentario final sobre los procedimientos.....	67
Conclusiones	69
Recomendaciones	71
Referencias bibliográficas	73
Apéndices	77
Apéndice A - Diseños de mezcla ACI 211.1	79
Apéndice B - Diseños de mezcla ACI 211.1 Procedimiento modificado	85
Apéndice C - Cálculo de cantidades de agua por añadir para cambio de diseños.	87
Apéndice D - Resultados individuales de ensayos a compresión.	89



Lista de tablas

Tabla 1. Valores de slump recomendados para varios tipos de construcciones.....	18
Tabla 2. Cantidad aproximada de agua de mezcla y contenido de aire, para diferentes slump y tamaños máximos nominales.....	19
Tabla 3. Relaciones agua/cemento para condiciones de resistencias a la compresión	20
Tabla 4. Máximas relaciones permisibles de relaciones a/c para concreto en exposición severa	21
Tabla 5. Volumen de agregado grueso por volumen de concreto	21
Tabla 6. Límites de aplicación del método IBRACON.....	24
Tabla 7. Granulometría del agregado fino	35
Tabla 8. Tabla resumen de la caracterización del agregado fino.....	36
Tabla 9: Granulometría del agregado grueso	38
Tabla 10. Tabla resumen de la caracterización del agregado grueso.....	39
Tabla 11. Diseños de mezcla teóricos – Procedimiento LEMC	40
Tabla 12. Proporciones finales para elaboración de concreto	41
Tabla 13. Diseño de mezcla teórico inicial – Procedimiento modificado	44
Tabla 14. Proporciones finales para elaboración de concreto – Procedimiento modificado .	44
Tabla 15. Resumen de adiciones de agua para variar relaciones agua-cemento.....	48
Tabla 16. Relación entre el slump y el contenido de agua.	56
Tabla 17. Relación de agua/materiales secos (H%) en las tanda elaboradas.....	57
Tabla 18. Diseño final de procedimiento LEMC.....	61
Tabla 19. Proporciones para tanda de comprobación.....	64
Tabla 20. Cantidades en condición OD para procedimiento modificado	64
Tabla 21. Cantidades finales para procedimiento modificado	65



Lista de figuras

Figura 1. Resumen del método ACI 211.1	18
Figura 2. Resumen del método IBRACON	25
Figura 3. Diagrama de dosaje IBRACON	28
Figura 4. Ubicación cantera Chulucanas	34
Figura 5. Muestra de agregado fino	35
Figura 6. Muestra de agregado fino	36
Figura 7. Ubicación cantera Santa Cruz.....	37
Figura 8. Muestra de agregado grueso	37
Figura 9. Curva granulométrica del agregado grueso.....	38
Figura 10. Procedimiento LEMC – 3 tandas distintas.....	40
Figura 11. Materiales para 03 tandas de concreto	41
Figura 12. Probetas obtenidas del procedimiento LEMC.....	42
Figura 13. Curado de probetas de 15x30cm.	43
Figura 14. Lógica del procedimiento modificado – 1 tanda para 4 diseños	43
Figura 15. Pesado de materiales para proceso modificado	45
Figura 16. Probetas obtenidas del proceso modificado.....	46
Figura 17. Proceso de curado de probetas 10x20cm	47
Figura 18. Cálculo para cambio de $a/c=0.45$ a $a/c=0.49$	48
Figura 19. Temperatura de concreto fresco para procedimiento LEMC.	51
Figura 20. Temperatura de concreto fresco para procedimiento modificado.	52
Figura 21. Pesos unitarios reales para procedimiento LEMC.....	53
Figura 22. Pesos unitarios para procedimiento modificado.	54
Figura 23. Valores de asentamiento para tandas de procedimiento LEMC.	55
Figura 24. Ensayo de slump – Procedimiento LEMC.....	55
Figura 25. Valores de asentamiento para procedimiento modificado.	56
Figura 26. Ensayo de slump – Procedimiento modificado.....	57
Figura 27. Valores de resistencia a la compresión tanda LEMC.....	59
Figura 28. Valores de resistencia a la compresión tanda modificada.....	59
Figura 29. Tipo de falla en probeta 15x30cm y 10x20cm.	60
Figura 30. Diagrama de dosificación – Procedimiento LEMC	61
Figura 31. Diagrama de dosificación – Procedimiento modificado	62

Figura 32. Diagrama de trabajabilidad – Procedimiento modificado	62
Figura 33. Cálculo del valor de “m” para la tanda de comprobación.	63
Figura 34. Cálculo de proporciones de la tanda de comprobación	63
Figura 35. Cálculo de materiales en tanda de comprobación.....	64
Figura 36. Ensayo de asentamiento tanda de comprobación LEMC	65
Figura 37. Resistencia a la compresión de tanda de comprobación LEMC.....	66
Figura 38. Asentamiento de la tanda de comprobación del proceso modificado.....	66
Figura 39. Resistencia a la compresión de tanda de comprobación modificada.....	67



Introducción

En la actualidad, el concreto es un elemento fundamental en la sociedad pues es el material de construcción más usado a nivel mundial, y aunque la cantidad de CO₂ producida durante su manufactura es relativamente baja, es precisamente su alta demanda lo que lo vuelve un problema ambiental (National Ready Mixed Concrete Association NRMCA, 2012).

La contaminación que se origina en la fabricación del cemento llega a ser el 8% del balance total de emisiones mundiales de CO₂ (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2016). Así mismo, se espera que este valor aumente pues se estima que la producción global de cemento se incrementará entre 12-23% hacia el año 2050 (International Energy Agency IEA, 2016).

Es evidente la gran importancia que tiene el uso correcto del concreto, incluso desde su etapa de diseño pues esto repercutirá en su producción en obra. Diversos investigadores buscan mejorar el uso adecuado de materiales y hallar las proporciones de mezcla de la forma más acertada posible. Es así que, un estudio utilizó gráficamente el módulo de fineza del agregado y la trabajabilidad, intentando ajustar la proporción correcta de agregados en una mezcla, esto presentó mejoras en la trabajabilidad, mayores resistencias y menor uso de cemento (Lindquist, Darwin, Browning, McLeod, & Yuan, 2015).

De manera similar, otra investigación establece una mezcla de agregados para un concreto con bajo contenido de cemento. Mediante simulación matemática y experimentos en laboratorio optimizan el empaquetamiento de agregados pétreos. Utilizando curvas granulométricas y evaluando la superficie del agregado, obtienen una proporción óptima que resulta en la reducción del uso de cemento e incremento de la resistencia del concreto en 37% (Moini, Flores-Vivian, Amirjanov, & Sobolev, 2015).

Siguiendo esta iniciativa, surgió la idea de evaluar una propuesta de modificación del procedimiento de laboratorio, la cual permita un ahorro en materiales y en tiempo de ejecución.

En primer lugar, se siguió el procedimiento actual realizado por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMC), esto es, la elaboración de tres tandas de concreto con relaciones agua/cemento distintas, producidas cada una individualmente. Por otro lado, para realizar el procedimiento modificado, se diseñó y elaboró un concreto con una

relación agua/cemento y valor de slump bajo, a partir de una sola tanda de concreto. Posteriormente, con adiciones controladas de agua se modificó la relación agua/cemento de la mezcla, permitiendo obtener diferentes diseños (dosificaciones).

La presente investigación expone en el capítulo 1, el marco teórico acerca del diseño de mezcla de concreto. Se menciona el método ACI 211.1 (ACI COMMITTEE 211, 2008), utilizado para calcular las proporciones iniciales de experimentación, y también el método utilizado por el Instituto Brasileiro del Concreto (IBRACON, 2011), el cual tiene influencia en parte del proceso de mejora propuesto. El capítulo 2 presenta el programa experimental, detallando los materiales usados y los ensayos para su caracterización. También se indica los requerimientos que se desean alcanzar mediante el diseño de concreto. El capítulo 3 muestra los resultados de la investigación, los gráficos de diseño producidos, y las proporciones finales que derivan del mismo. Se presenta el análisis de la comparación entre los procedimientos. Finalmente se expone las conclusiones de la investigación, así como sugerencias y comentarios para la mejora del método.



Capítulo 1

Generalidades y marco teórico

El concreto es un material que consiste en una mezcla de cemento, agua y agregados pétreos (gruesos y finos), y algunas veces contiene aditivos o adiciones. Las proporciones y el tipo de materiales que conforman el concreto depende de los requerimientos necesarios para satisfacer las condiciones del proyecto. Para poder establecer estas proporciones, se tienen diversos métodos de diseño, cada uno con características y consideraciones propias, que sirven como una iteración preliminar a la dosificación final del diseño de mezcla.

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron dos de estos métodos: como base para los cálculos se siguieron los pasos propuestos por el comité ACI 211.1. Por su parte, en el procedimiento modificado se emplearon algunas variables y consideraciones del método empleado por el Instituto Brasileño de Concreto (IBRACON).

1.1 Diseño de mezcla - ACI 211.1

Este método propuesto por el Instituto Americano del Concreto, describe los pasos para hallar una primera aproximación de las proporciones de un diseño de concreto tomando en cuenta la trabajabilidad, durabilidad y resistencia a la compresión requeridas por el elemento y las condiciones de obra. Esta primera dosificación debe ser verificada mediante mezclas de prueba en laboratorio, y según sea necesario, ser ajustada para producir el concreto con las características deseadas (ACI Committe 211, 2002).

Para poder diseñar un concreto que cumpla con las especificaciones requeridas, se necesita información sobre las propiedades de los materiales que serán usados para su fabricación.

A continuación, se detalla el método de diseño ACI 211.1 como una secuencia de pasos a seguir luego de analizadas las condiciones del concreto a diseñar. Previo a la explicación de cada paso, se muestra un resumen del proceso en la **Figura 1**.

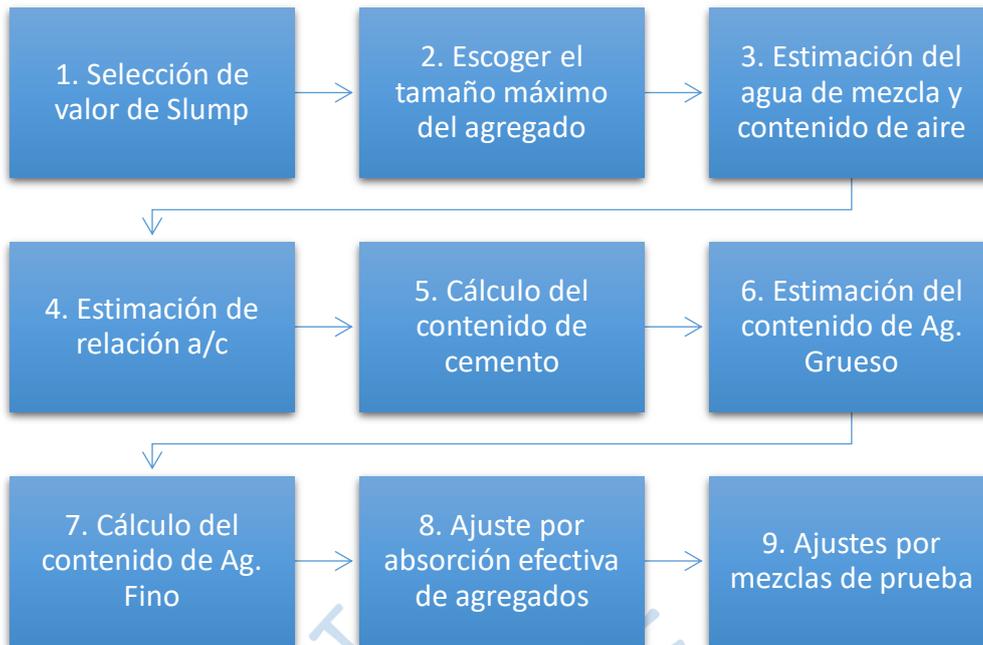


Figura 1. Resumen del método ACI 211.1

Paso 1. Selección de slump:

Los valores de slump normalmente están establecidos por las condiciones de trabajo en donde se utilizará el concreto. Sin embargo, si el slump no está especificado, se puede estimar un valor apropiado de la **Tabla 1**. Es fundamental escoger correctamente un valor de slump para el diseño que permita una correcta colocación y compactación.

Tabla 1. Valores de slump recomendados para varios tipos de construcciones

Tipo de construcción	Slump (mm)		Slump (pulg)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Cimientos y muros reforzados	20	80	1	3
Cimientos de concreto simple, caissons y subestructuras de muros	20	80	1	3
Vigas y muros de concreto reforzado	20	100	1	4
Columnas de edificaciones	20	100	1	4
Pavimentos y losas de concreto	20	80	1	3
Concreto simple masivo	20	80	1	2

Fuente: Tabla 6.3.1 - (ACI Committe 211, 2002)

Paso 2. Escoger el tamaño máximo del agregado:

Se considera que el uso de un mayor tamaño máximo del agregado garantiza un requerimiento menor de mortero por volumen de concreto, siempre y cuando la granulometría muestre una distribución homogénea, lo que permitirá que las partículas del agregado se acomoden de una forma adecuada ajustando el espacio que debe rellenar el mortero (ACI COMMITTEE 211, 2008). Por lo tanto, se recomienda que el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso sea el mayor posible, por el beneficio económico que representa. Este valor también depende de las dimensiones del elemento en el que será colocado el concreto. Por eso se aconseja que el TMN del agregado grueso no debe ser mayor que: un quinto de la menor dimensión entre caras de encofrados, un tercio del peralte de la losa y tres cuartos del menor espacio libre entre barra individuales de refuerzo o tendones (ACI Committee 318, 2014).

Paso 3. Estimación del agua de mezcla y contenido de aire:

La cantidad de agua necesaria para elaborar concreto depende de varios factores, como el tipo de cemento, tamaño y forma de los agregados, la cantidad de aire atrapado, y el uso de adiciones o aditivos en la mezcla.

Tomando los valores obtenidos en los pasos anteriores, se utiliza la **Tabla 2**, la cual permite estimar un aproximado de la cantidad de agua, y del porcentaje de aire atrapado. Estas cantidades son referenciales y pueden ser modificadas según la experiencia práctica.

Tabla 2. Cantidad aproximada de agua de mezcla y contenido de aire, para diferentes slump y tamaños máximos nominales

Slump	Agua de mezcla (kg/m ³) para tamaños máximos de agregados gruesos						
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 ½"	2"	3"
Concreto sin aire incorporado							
1" – 2"	210	200	185	180	160	155	145
3" – 4"	225	215	200	195	175	170	160
6" – 7"	240	230	210	205	185	180	170
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3
Concreto con aire incorporado							
1" – 2"	180	175	165	160	145	140	135
3" – 4"	200	190	180	175	160	155	150
6" – 7"	215	205	190	185	170	165	160

Cantidad aproximada de aire atrapado (%)							
Leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
Moderado	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5
Extremo	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5

Fuente: Tabla 6.3.3 (ACI Committe 211, 2002)

La **Tabla 2** indica en la parte superior la cantidad aproximada de aire atrapado esperado en concretos convencionales. Cuando el concreto estará sometido a condiciones de congelamiento y descongelamiento, se recomienda el uso de incorporadores de aire, para estos casos en la parte inferior se indica la cantidad de agua a utilizar, así como el porcentaje aproximado de aire que se espera en dicho concreto.

Paso 4. Estimación de la relación agua/cemento:

El valor de la relación agua/cemento está determinado no solo por la resistencia a la compresión, también por otros factores como la durabilidad según las condiciones a la que estará expuesto el elemento. Basado en especímenes ensayados a 28 días, en condiciones estándar de laboratorio el método propone la **Tabla 3**, la cual brinda valores conservadores de relaciones agua/cemento para concretos cuyo requisito sea la resistencia a la compresión.

Tabla 3. Relaciones agua/cemento para condiciones de resistencias a la compresión

Resistencia a compresión a 28 días (kg/cm ²)	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
400	0.42	-
350	0.47	0.39
300	0.54	0.45
250	0.61	0.52
200	0.69	0.60
150	0.79	0.70

Fuente: Tabla 6.3.4(a) - (ACI Committe 211, 2002)

Para situaciones en donde la durabilidad del elemento es determinante, la relación a/c debe mantenerse en valores bajos, esto a pesar de que los resultados de resistencia a la compresión puedan superar lo requerido en planos. La **Tabla 4** muestra los límites recomendados.

Tabla 4. Máximas relaciones permisibles de relaciones a/c para concreto en exposición severa

Tipo de estructura	Relación agua/cemento	
	Estructuras frecuentemente húmedas y expuestas a congelamiento y deshielo.	Estructuras frecuentemente húmedas y expuestas a congelamiento y deshielo.
Secciones delgadas y secciones con menos de 1" de recubrimiento	0.45	0.40
Todas las otras secciones	0.50	0.45

Fuente: Tabla 6.3.4(b) - (ACI Committe 211, 2002)

Paso 5. Cálculo del contenido de cemento:

La cantidad de cemento se determina utilizando los datos obtenidos en los pasos 3 y 4. El contenido de cemento es igual al agua de mezcla estimada, dividida entre la relación agua/cemento.

Paso 6. Estimación del contenido de agregado grueso:

Agregados que tengan el mismo tamaño máximo nominal y granulometría, producirán concreto con propiedades adecuadas si un determinado volumen de agregado grueso es utilizado por unidad de volumen. Este volumen de agregado está estimado en condición seca, y dependerá del TMN del agregado grueso y del módulo de fineza del agregado fino, valores determinados en la etapa de caracterización de los agregados a utilizar. La información para determinar este volumen se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Volumen de agregado grueso por volumen de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Volumen varillado seco del agregado grueso por unidad de volumen de concreto			
	2.4	2.6	2.8	3
3/4"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.80	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Tabla 6.3.6 - (ACI Committe 211, 2002)

El volumen de agregado grueso obtenido se encuentra en condición varillada seca. Por lo tanto, para hallar la cantidad de agregado en la mezcla, este valor debe ser multiplicado por su peso unitario varillado en estado seco, valor encontrado durante los ensayos de caracterización de los agregados. En la **Ec. 1** se muestra el cálculo del peso de agregado grueso en estado seco.

$$\text{Peso}_{A.G(OD)} = (\text{Volumen varillado estimado}_{OD}) \times (\text{Peso Unitario Varillado}_{OD}) \quad \text{Ec. 1}$$

Paso 7. Cálculo del contenido de agregado fino:

Hasta este punto, todos los componentes del concreto han sido estimados a excepción del agregado fino, y para hacerlo se utiliza el método de los volúmenes absolutos, este consiste en que, del total de volumen producido, se deben restar los volúmenes ocupados por cada material, y por diferencia se obtiene el volumen del agregado fino. Las cantidades de estos materiales se calculan en estado saturado superficie seca.

Para calcular los pesos de los agregados en sus diferentes estados, se toman los datos de capacidad de absorción (CA) y humedad total (HT), hallados durante la caracterización de agregados, y reemplazados en **Ec. 2** y **Ec. 3** según sea necesario.

$$HT(\%) = \frac{W_{STOCK} - W_{OD}}{W_{OD}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$CA(\%) = \frac{W_{SSS} - W_{OD}}{W_{OD}} \quad \text{Ec. 3}$$

El volumen ocupado por los componentes es igual a su peso dividido por la densidad del material, estos valores se reemplazan en la **Ec. 4**

$$\text{Volumen}_{A.F(SSS)} = 1 - (\text{Vol.}_{\text{agua}} + \text{Vol.}_{\text{cemento}} + \text{Vol.}_{\text{aire}} + \text{Vol.}_{\text{ag. grueso}})_{SSS} \quad \text{Ec. 4}$$

Paso 8. Ajuste por absorción efectiva de agregados:

En la elaboración del concreto, las cantidades del agregado son pesadas en condiciones normales de ambiente (stock), por lo tanto, se debe considerar el estado de los agregados para ajustar correctamente el agua de mezclado, pues en caso el agregado tenga humedad libre en su superficie aportará agua, por el contrario, la absorberán si los agregados están secos.

Paso 9. Ajuste por mezclas de prueba:

La dosificación de mezcla calculada se corrobora mediante mezclas de prueba en el laboratorio. El concreto debe ser verificado mediante el cálculo de slump, peso unitario real, aire incorporado y también se recomienda que no presente segregación.

Si el slump de la mezcla de prueba no cumple con lo esperado, el comité ACI 211.1 aconseja modificar la cantidad de agua en 2 kg/m^3 por cada 10 mm de variación del valor de slump, pero este ajuste puede variar dependiendo de los datos del laboratorio o de la experiencia del personal que elabore la mezcla.

Una vez logradas las proporciones finales del diseño se procede a elaborar una nueva mezcla final, de las que se extraerán probetas para comprobar la resistencia a la compresión del concreto.

1.2 Método IBRACON

En Brasil, no existe un acuerdo exacto de cómo debería realizarse un diseño de concreto. La falta de un método definitivo reflejado en una norma nacional brasileña que especifique el procedimiento y parámetros de dosificación ha llevado a que varios especialistas propongan sus propios métodos, y aunque estos difieren, existen factores comunes, como el cálculo de resistencia a la compresión, la importancia de la relación agua/cemento, la correcta trabajabilidad para cada situación específica y la durabilidad del concreto.

Dentro de los más importantes se encuentran dos: el primero es el método ABCP (*Associação Brasileira de Cimento Portland*) publicado en 1984, que resulta ser la versión brasileña, con algunas modificaciones, de la metodología descrita por el comité ACI 211.

El segundo tiene sus inicios en 1992 cuando Paulo Helene y Paulo Terzian publican el Manual de dosificación y control de concreto (*Manual de dosagem e controle do concreto*), el cual combina investigaciones realizadas en la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo (EPUSP) y en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), este manual fue ampliamente difundido a nivel nacional, y desde el 2005 es conocido como el método IBRACON de dosificación de concreto (IBRACON, 2011).

Este último es un método que analiza el comportamiento del concreto de manera teórica, pero que requiere de un proceso experimental en el laboratorio. Este proceso es fundamental, pues busca el asentamiento requerido (slump) para diferentes proporciones de mortero seco (α), buscando hallar la mínima cantidad de agua para lograr la trabajabilidad deseada. En resumen, el método IBRACON entiende que la mejor proporción entre los agregados es aquella que consume menor cantidad de agua para obtener un determinado asentamiento y lo hace considerando la interacción entre los materiales aglomerantes y los agregados (IBRACON, 2011).

El método adopta como bases de comportamiento del concreto, las siguientes variables: **cantidad de mortero seco (α)**, **relación de agua/materiales secos (H)** y el **consumo de cemento por metro cúbico (C)**, las cuales se muestran en las **Ec. 5**, **Ec. 6** y **Ec. 7**.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad \text{Ec. 5}$$

$$H = \frac{a/c}{(1 + m)} \quad \text{Ec. 6}$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + a + p + a/c)} \quad \text{Ec. 7}$$

En donde:

- C [kg/m³] = consumo de cemento por m³ de concreto compactado.
 γ [kg/m³] = peso específico del concreto
a/c [kg/kg] = relación agua / cemento
a [kg/kg] = relación agregado fino seco / cemento
p [kg/kg] = relación agregado grueso seco / cemento
m = a + p = relación agregados secos / cemento
 α [kg/kg] = cantidad de mortero seco
H [kg/kg] = relación agua/materiales secos

Para una misma familia de concreto, se considera que la cantidad de mortero seco (α) debe ser constante para asegurar la misma cohesión, y que la relación agua / materiales secos (H) debe ser constante para garantizar el mismo asentamiento. A su vez, el método presenta ciertos límites para su aplicación, los cuales se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Límites de aplicación del método IBRACON

Propiedad y/o variable	Límites	
	Mínimo	Máximo
Resistencia a la compresión (f_c)	5 MPa \leq	\leq 150MPa
Relación agua/cemento (a/c)	0.15 \leq	\leq 1.50
Asentamiento (slump)	0 mm \leq	\leq 100 mm
Tamaño máximo del agregado	4.8 mm \leq	\leq 100 mm
Contenido de mortero seco (α)	30% <	< 90%
Factor agua / materiales secos (H)	5% <	< 12%
Módulo de fineza del agregado	No específico	No específico
Distribución granulométrica	No específico	No específico
Masa específica del concreto	> 1500kg/cm ³	-

Fuente: (IBRACON, 2011)

Teniendo en cuenta las variables y los límites indicados, se desarrolla el método IBRACON como una secuencia de pasos a seguir. Un resumen del proceso se muestra en la **Figura 2**.

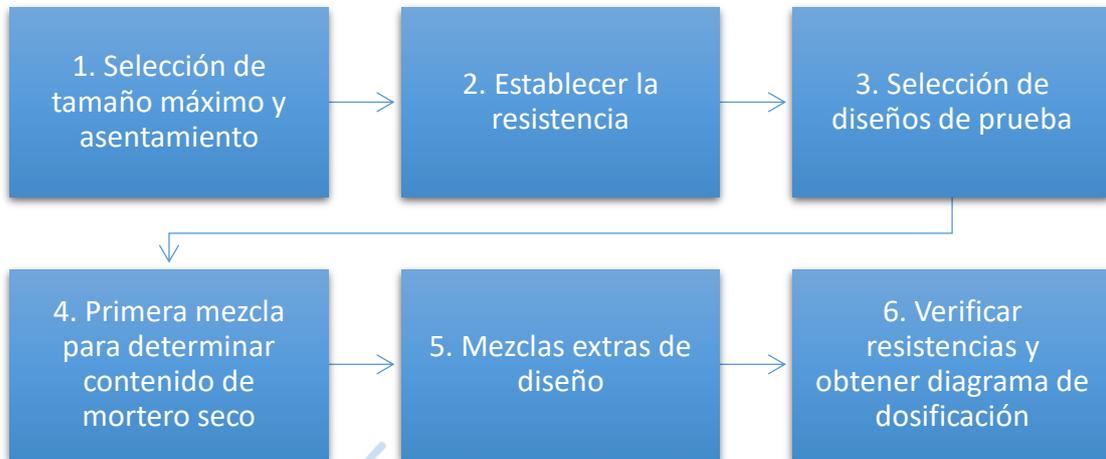


Figura 2. Resumen del método IBRACON

Paso 1. Selección de tamaño del agregado y asentamiento

En primer lugar, se selecciona la dimensión máxima que caracterice al agregado grueso, la cual debe ser compatible con los espacios disponibles entre armaduras y encofrados de la estructura. También se debe elegir el asentamiento (slump) que obedezca a las necesidades del proyecto o la tecnología disponible en obra para la colocación del concreto.

Paso 2. Establecer la resistencia promedio

Para establecer la resistencia se sigue lo indicado por la norma brasileña para preparación, control y recepción de concreto (ABNT NBR 12665). Esta norma analiza las condiciones ambientales a las que será sometido el concreto durante su vida útil y, considerando la variabilidad que puede presentar en la elaboración, define parámetros para hallar la desviación estándar y de esta forma estimar una resistencia promedio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006).

Paso 3. Selección de diseños de prueba

Con la intención de tener más datos representativos que permitan obtener un diseño final más adecuado, se debe escoger un mínimo de tres diferentes relaciones agregados secos / cemento (m), se recomienda valores próximos al calculado ($1:m$), por ejemplo: $(1 : m - 1)$ y $(1 : m + 1)$. Usualmente se sugiere utilizar un valor de “ m ” igual a 5.

Paso 4. Primera mezcla para determinar el contenido de mortero seco (a)

Se realiza una primera mezcla en laboratorio con las proporciones correspondientes al valor $(1:m)$, del apartado anterior. Se comienza con un contenido de mortero seco (α) = 0.30

y subiendo ese valor de 0.02 en 0.02 para encontrar el punto óptimo por medio del ensayo de slump y de observaciones visuales, las cuales se explican más adelante.

El ajuste del contenido de mortero seco (α) no es más que la sustitución gradual del agregado grueso por el fino, sin cambiar la cantidad de cemento. Por ejemplo, un diseño 1: 5, α del 50% presenta una proporción de 1: 2: 3, al aumentar α a 52%, la proporción resultante es 1:2,12: 2,88, es decir, una mezcla con el mismo consumo de cemento, pero con 0,12 más arena y 0,12 menos grava.

En el laboratorio, el procedimiento empieza por humectar la mezcladora. Los materiales se vierten en el siguiente orden recomendado para concretos convencionales: 80% del agua, agregado grueso, cemento, y finalmente el agregado fino. El tiempo de mezclado es de 5 minutos, con una parada intermedia para la limpieza de las cuchillas.

Una vez concluido el mezclado, se verifica visualmente si el concreto presenta cohesión y plasticidad adecuada, de ser así, se realiza el ensayo de cono de Abrams. En caso no se logre el asentamiento esperado, se utiliza el 20% de agua restante para su corrección.

Como se mencionó previamente, para determinar el contenido ideal de mortero seco (α), se debe realizar un procedimiento basado en observaciones prácticas y percepciones visuales para cada contenido de mortero, estos se muestran a continuación:

- Introducir una paleta o cuchara en la mezcla fresca y levantarla en sentido vertical para verificar si la superficie expuesta tiene vacíos, indicando falta de mortero.
- Con el material en esa posición, verificar si hay desprendimiento de agregado grueso lo que también indicaría falta de mortero en la mezcla. Después de la observación, soltar la porción de concreto y comprobar si cae de modo homogéneo, lo que indica un contenido de mortero adecuado.
- En la misma muestra en la que se hizo el ensayo de slump se observa si la superficie lateral del concreto esta compacto y no presenta vacíos.
- Si luego del ensayo de slump, en la base del concreto aparece una película de agua, evidencia que existe un exceso de agua por falta de finos. Esto puede ser corregido con cambio en la granulometría de la arena o aumentar el contenido de cemento.
- Después del ensayo de slump, estando todavía el concreto en forma de cono, se debe golpear suavemente la base con ayuda de la varilla, esto se hace con el objetivo de verificar su caída. Si esta procede de manera cohesiva, sin derramamiento de porciones, indica que el mortero es apropiado.

Una vez realizadas varias mezclas de prueba, el valor óptimo de α será el mínimo valor con el que se logre realizar, de forma exitosa, los procedimientos antes descritos. También se toma en cuenta la cantidad de agua que se usó para obtener la mezcla óptima.

Obtenido el contenido de mortero seco ideal, se debe realizar una nueva mezcla y hallar todas las características del concreto fresco: relación a/c, consumo de cemento, consumo de agua, slump, contenido de aire y se elaboran probetas para los ensayos de concreto endurecido. Además, calcular las constantes de diseño: contenido de mortero seco (α) y la relación agua/materiales secos (H) según la **Ec. 6**.

Paso 5. Mezclas extras de diseño

Manteniendo constantes los valores de contenido de mortero seco (α) y la relación agua/materiales secos (H) hallados en el paso anterior, se calculan las proporciones para un mínimo de 2 diseños más (una mezcla con un **m** mayor y otra con uno menor, como se indica en el **Paso 3**) con el objetivo de verificar el mismo slump en distintas relaciones a/c. Realizadas estas nuevas mezclas se obtienen los datos y probetas correspondientes.

Paso 6. Resistencias y diagrama de dosificación

Al cumplirse los días establecidos para el diseño (7 y 28 días), se realizan ensayos a compresión de las probetas obtenidas, para ello se sigue los lineamientos propuestos por la norma ASTM C39.

Utilizando estos resultados, y los datos obtenidos durante el procedimiento se pueden establecer diversas relaciones:

- La resistencia a la compresión de las probetas vs. las relaciones agua/cemento de cada diseño
- Las relaciones agua/cemento vs. los valores de **m** utilizados en las mezclas
- Los valores de **m** vs. el contenido de cemento, el cual se calcula con la **Ec. 7**

al unirlos se da origen al diagrama de dosaje similar al mostrado en **Figura 3**.

Al usar este diagrama es posible obtener diversos diseños de mezcla de la misma familia de concreto, aunque con propiedades muy distintas. Se entiende por familia de concreto a todos aquellos que tengan los mismos materiales, slump similar, etc.; aunque estos pueden diferir en términos de resistencia debido a variaciones en la relación a/c.

Este diagrama de dosaje (**Figura 3**) indica en sus distintos cuadrantes las relaciones entre las propiedades del concreto elaborado.

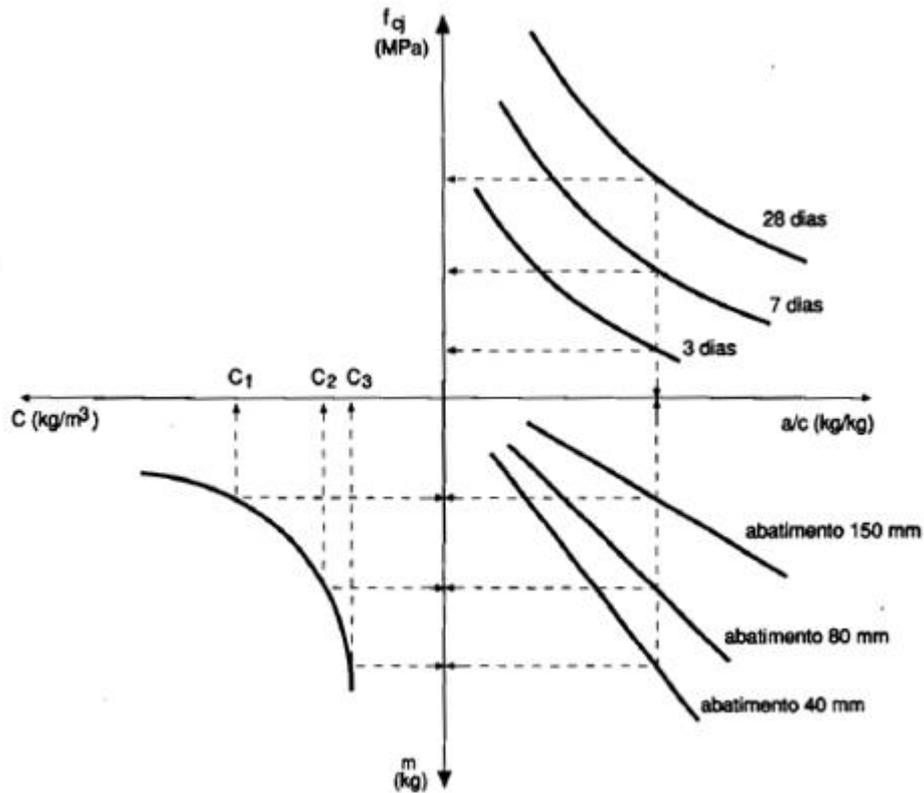


Figura 3. Diagrama de dosaje IBRACON

Fuente: (Helene & Terzian, 1993)

En el cuadrante superior derecho se muestra la relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua/cemento (a/c) para las distintas edades del concreto. De las líneas de tendencia formadas, se puede comprobar la Ley de Abrams (1918) que indica que la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua/cemento (IBRACON, 2011).

En el cuadrante inferior derecho se puede observar la correlación entre la relación a/c y la relación agregados secos / cemento (m), esta se conoce como Ley de Lyse (1932) que asegura que una vez fijados los agregados y el cemento, el valor de asentamiento del concreto dependerá de la cantidad de agua por metro cúbico (IBRACON, 2011).

En el cuadrante inferior izquierdo se tiene la relación entre la relación agregados secos / cemento (m) y el consumo de cemento, definida como la Ley de Prizskulnik & Kirilos (1947), esta indica que el consumo de cemento por metro cúbico es inversamente proporcional a la variación de la relación m (IBRACON, 2011).

En algunos casos es posible establecer una relación de rendimiento en el cuadrante restante, esto al comparar el consumo de cemento (C) y la resistencia a la compresión. Como el cemento es el elemento de mayor costo, esta relación podría dar una noción del costo del concreto en función de su resistencia.

1.3 Relación agua/materiales secos (H)

Para que un diseño de concreto sea considerado adecuado, existen diversas propiedades en estado fresco que se deben verificar durante su colocación en determinadas las condiciones del trabajo. Las principales son la consistencia, trabajabilidad, plasticidad y el poder de retención de agua; todas ellas relacionadas entre sí.

La consistencia es el mayor o menor grado de fluidez de la mezcla fresca, por lo tanto, está relacionado con la facilidad de desplazamiento del concreto en estado fresco y directamente con la trabajabilidad que mostrará. El factor principal que influye en esta propiedad es la relación entre el agua y los materiales secos (Araujo, Rodrigues, & Freitas, 2000).

$$H\% = \frac{W_{agua}}{W_{ag. fino} + W_{ag. grueso} + W_{cemento}} * 100 \quad \text{Ec. 8}$$

En donde:

W_{agua}	[kg/m ³]	=	Peso del agua de mezcla
$W_{ag. fino}$	[kg/m ³]	=	Peso del agregado fino en estado seco
$W_{ag. grueso}$	[kg/m ³]	=	Peso del agregado grueso en estado seco
$W_{cemento}$	[kg/m ³]	=	Peso del cemento

La relación de agua/materiales secos, mostrada en la **Ec. 8**, puede ser fácilmente simplificada y adecuada a la **Ec. 6** utilizada por la metodología IBRACON, como se muestra a continuación:

$$\frac{W_{agua}}{W_{ag. fino} + W_{ag. grueso} + W_{cemento}} = \frac{W_{agua} * \frac{1}{W_{cemento}}}{\frac{W_{ag. fino}}{W_{cemento}} + \frac{W_{ag. grueso}}{W_{cemento}} + \frac{W_{cemento}}{W_{cemento}}}$$

$$= \frac{\text{relación } a/c}{(a + p) + 1} = \boxed{\frac{a/c}{m + 1} = H}$$

Como se mostró en la **Tabla 6**, los valores ideales de H(%) se deben encontrar entre 5% y 12%, pero a su vez, se considera que el concreto es seco si el valor se encuentra entre 6 y 8%, plástico si es mayor que 8% y menor que 11%, y fluido si tiene una relación alta de 11% a más (Araujo, Rodrigues, & Freitas, 2000).



Capítulo 2

Programa experimental

En este capítulo se explica con detalle el desarrollo del plan experimental que permitió comparar los dos procedimientos para elaborar mezclas de concreto que se emplearon en la presente investigación. Uno de ellos es que se sigue actualmente en el laboratorio LEMC; el otro, es una modificación que se basa en la posibilidad de reducir el esfuerzo de trabajo y recursos para obtener el diseño de mezcla.

Para diseñar y elaborar las mezclas de concreto, primero se llevaron a cabo ensayos de caracterización de los materiales; en este caso fueron empleados agregados de la región, de los cuales se obtuvieron sus propiedades y características físicas. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMC).

Una vez concluida la caracterización de los agregados se procedió a realizar las estimaciones teóricas de proporciones utilizando el método ACI 211.1 para ambos procedimientos (LEMC y modificado).

La tanda patrón se realizó siguiendo el procedimiento actual del laboratorio LEMC, esto es: tres diseños con relaciones agua/cemento distintas ($a/c_1 = 0.50$, $a/c_2 = 0.54$, y $a/c_3 = 0.58$), elaborados cada uno individualmente.

El procedimiento modificado plantea obtener distintos diseños de mezcla a partir de la modificación de la relación agua/cemento de un concreto mediante adiciones controladas de agua, lo cual afecta directamente la trabajabilidad del concreto. Es por ello que, este procedimiento inicia con un concreto de relación $a/c_1 = 0.45$ y un valor de slump bajo (1" - 3"). La elección de un slump bajo se debe a que, al mantenerse fijos los materiales secos en la mezcla, las adiciones de agua afectarán el slump inicial.

2.1 Ensayos

Los ensayos presentados a continuación se realizaron durante tres etapas diferentes de la experimentación. Durante la primera etapa los ensayos se realizaron con el fin de caracterizar los agregados, previo al diseño. Posteriormente, se ejecutaron ensayos sobre el concreto en estado fresco y por último sobre el concreto endurecido (resistencia a la compresión).

2.1.1 Caracterización de agregados para concreto

2.1.1.1 Granulometría de agregados

Se utilizó la norma técnica NTP 400.012:2013 AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global (INACAL, 2018) para conocer la distribución granulométrica de los agregados utilizados. En este documento se muestran los principales lineamientos para realizar el tamizado, detallando herramientas, equipos y aberturas de tamices a utilizar. Mediante este ensayo se puede determinar la distribución del tamaño de partículas y determinar el módulo de fineza del agregado.

2.1.1.2 Peso unitario de los agregados

Para determinar el peso unitario de ambos agregados en estado suelto o compactado se siguieron las instrucciones indicadas en la norma técnica NTP 400.017:2011 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad y los vacíos en los agregados (Basada ASTM C 29/C29M-2009) (INACAL, 2016).

2.1.1.3 Peso específico y capacidad de absorción de los agregados

En este caso los procedimientos son distintos para cada agregado, y cada uno se desarrolla siguiendo una norma propia. Para el agregado grueso el proceso y fórmulas para el cálculo de los parámetros, se detallan en la norma técnica NTP 400.021:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso (INACAL, 2018), y para el agregado fino se usa la norma NTP 400.022:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino (INACAL, 2018).

2.1.1.4 Humedad total

Un parámetro importante para realizar un apropiado diseño de mezcla y sus correcciones es conocer el contenido de humedad dentro de una muestra de agregado fino o grueso. Para determinarlo se siguió la norma técnica NTP 339.185:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado (INACAL, 2018).

2.1.2 Concreto en estado fresco

2.1.2.1 Asentamiento (slump)

Al elaborar concreto, uno de los primeros ensayos a realizar es el asentamiento, el cual indicará si se cumple con el valor utilizado para el diseño. Todas las tandas de concreto realizadas fueron sometidas a este proceso siguiendo la norma técnica NTP 339.035 CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland (INACAL, 2015).

2.1.2.2 Temperatura

Una vez finalizado el tiempo de mezclado del concreto, se procede a determinar la temperatura del concreto fresco, para esto se siguió la NTP 339.184:2013 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto (INACAL, 2018).

2.1.2.3 Peso unitario y contenido de aire

Se realizó el ensayo para calcular el peso unitario del concreto y su contenido de aire siguiendo lo indicado en la norma técnica NTP 339.046:2019 CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto (INACAL, 2019).

2.1.2.4 Elaboración de especímenes y curado

Una vez determinadas las propiedades del concreto fresco se elaboraron probetas, y luego fueron sometidas al proceso de curado húmedo durante 7 y 28 días. En la presente investigación se usaron especímenes de $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ y de $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ siguiendo la norma técnica NTP 339.183:2013 CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio (INACAL, 2018).

2.1.3 Concreto en estado endurecido

2.1.3.1 Resistencia a la compresión

Luego de concluido el tiempo de curado, siguiendo la norma NTP 339.037:2015 CONCRETO - Práctica normalizada para el refrentado de testigos cilíndricos de concreto (INACAL, 2015) se debe verificar si es necesario refrentar las probetas antes de realizar el ensayo a compresión. En la presente investigación y con el objetivo de uniformizar los ensayos de compresión, todas las probetas fueron refrentadas con mortero de azufre; en ningún caso se utilizó cabezales con almohadillas de neopreno (NTP 339.216:2016). Posterior a esto, se ensayaron las probetas para conocer su resistencia a la compresión siguiendo la norma técnica NTP 339.034:2015 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas (INACAL, 2015).

2.2 Materiales

2.2.1 Cemento

La parte experimental se realizó utilizando el “Cemento FORTIMAX MS” fabricado por Cementos Pacasmayo S.A.A, el cual ofrece mayor impermeabilidad en el concreto, lo que favorece la protección contra el salitre. Además, es adecuado para obras en climas cálidos (Cementos Pacasmayo S.A.A, 2019). Según su especificación técnica su clasificación es un cemento Portland Tipo MS (MH), además sigue los requisitos de la norma técnica NTP 334.082 y la ASTM C1157. La especificación para cementos Portland especiales de Tipo MS y Tipo MH,

indican moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, respectivamente (INACAL, 2018).

2.2.2 Agua

De los diversos usos que se le puede dar al agua durante la elaboración del concreto, los más importantes son el uso durante el mezclado y su empleo para el proceso de curado del concreto endurecido.

En la presente investigación se utilizó agua potable obtenida de las redes de servicio del laboratorio LEMC que, al ser potable, en principio cumple con la normativa para el uso de agua para elaboración del concreto (BSI, 2002).

2.2.3 Agregados

La norma técnica NTP 400.037:2002 “Especificaciones normalizadas para agregados en concreto”, define como agregado grueso al material retenido en el tamiz normalizado N°4 y como agregado fino a las partículas que pasan el tamiz normalizado 9.5mm, y queda retenido en el tamiz N°200 (INACAL, 2018).

Para la elaboración de concreto se empleó agregado fino y grueso, de la cantera Chulucanas y Santa Cruz, respectivamente.

2.2.3.1 Agregado fino

Para el desarrollo experimental de la investigación se ha utilizado agregado fino de la Cantera Chulucanas, la cual se encuentra aproximadamente a 60 km al este de la ciudad de Piura. En la **Figura 4** se presenta la ubicación de la cantera, y en la **Figura 5** se presenta una muestra del agregado fino.

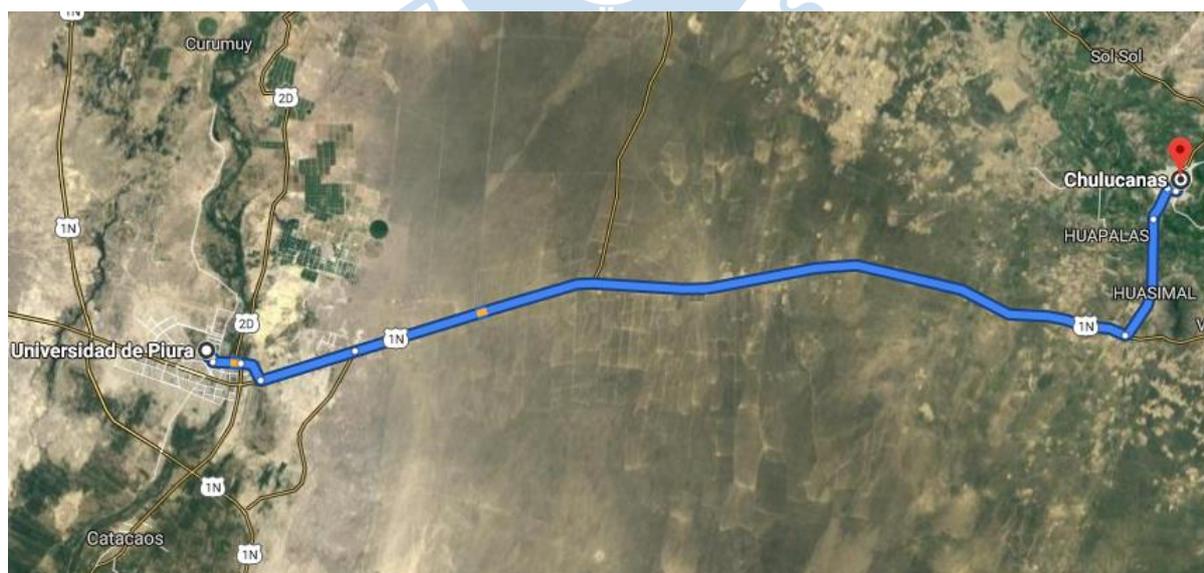


Figura 4. Ubicación cantera Chulucanas

Fuente: Google Earth



Figura 5. Muestra de agregado fino

El análisis por tamizado del agregado es normalmente representado de manera gráfica, en donde las ordenadas representan el porcentaje acumulado que pasa, mientras que las abscisas muestran la abertura del tamiz en escala logarítmica. (Neville A. M., 2013). Los resultados obtenidos para el agregado fino se muestran en la **Tabla 7**, y su respectiva curva granulométrica en la **Figura 6**.

Tabla 7. Granulometría del agregado fino

Tamiz	Contenido (g)	Retenido parcial	Retenido total	%Pasa
Tamiz 3/8"	0.00	0.00	0.00	100
Tamiz N°4	15.50	3.01	3.01	97
Tamiz N°8	28.00	5.43	8.44	92
Tamiz N°16	53.10	10.30	18.75	81
Tamiz N°30	109.90	21.33	40.07	60
Tamiz N°50	186.50	36.19	76.27	24
Tamiz N°100	82.70	16.05	92.32	8
Tamiz N°200	21.60	4.19	96.51	3
Fondo	17.20	3.34		
Total	514.50			
Inicial	515.30			
Pérdida	0.80			

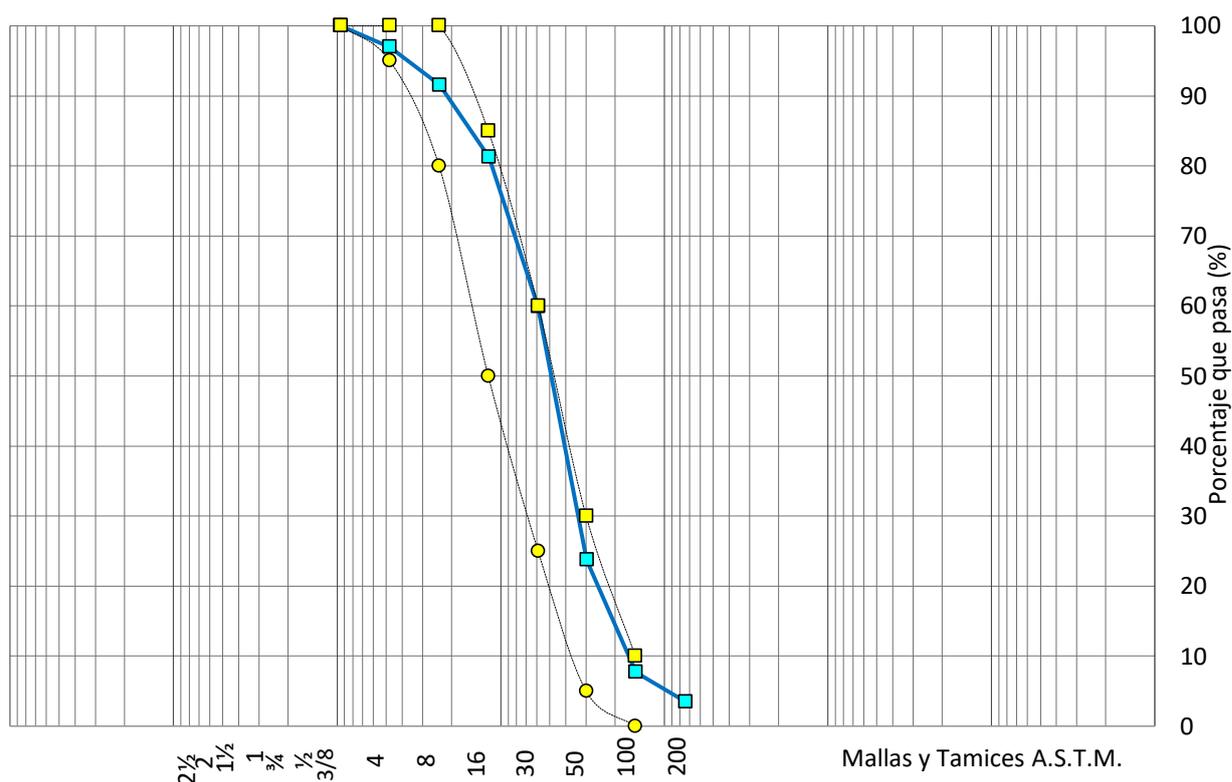


Figura 6. Muestra de agregado fino

Se puede observar en la **Figura 6** que el agregado fino utilizado se encuentra dentro del huso granulométrico recomendado por la norma NTP 400.037. A su vez, siguiendo la norma NTP 400.012 se calculó el módulo de fineza y se obtuvo un valor de 2.39.

Luego de culminados todos los ensayos correspondientes para la caracterización del agregado, se presenta el resumen de los parámetros físicos obtenidos del agregado fino en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Tabla resumen de la caracterización del agregado fino.

Descripción	A. fino	Unidades
Cantera	Chulucanas	-
Módulo de finura	2.39	-
Peso específico (SSS)	2.563	-
Peso unitario suelto (stock)	1528	kg/m ³
Peso unitario varillado (Stock)	1668	kg/m ³
Peso unitario varillado (OD)	1662	kg/m ³
Humedad total	0.33	%
Capacidad de absorción	1.28	%

2.2.3.2 Agregado grueso

Para el agregado grueso, se obtuvo material de la Cantera Santa Cruz, ubicada aproximadamente a 55 km al norte de la ciudad de Piura, al noreste de la ciudad de Sullana. El agregado es una grava natural redondeada. La ubicación de la cantera y el material usado se muestran en la *Figura 7* y *Figura 8* respectivamente.

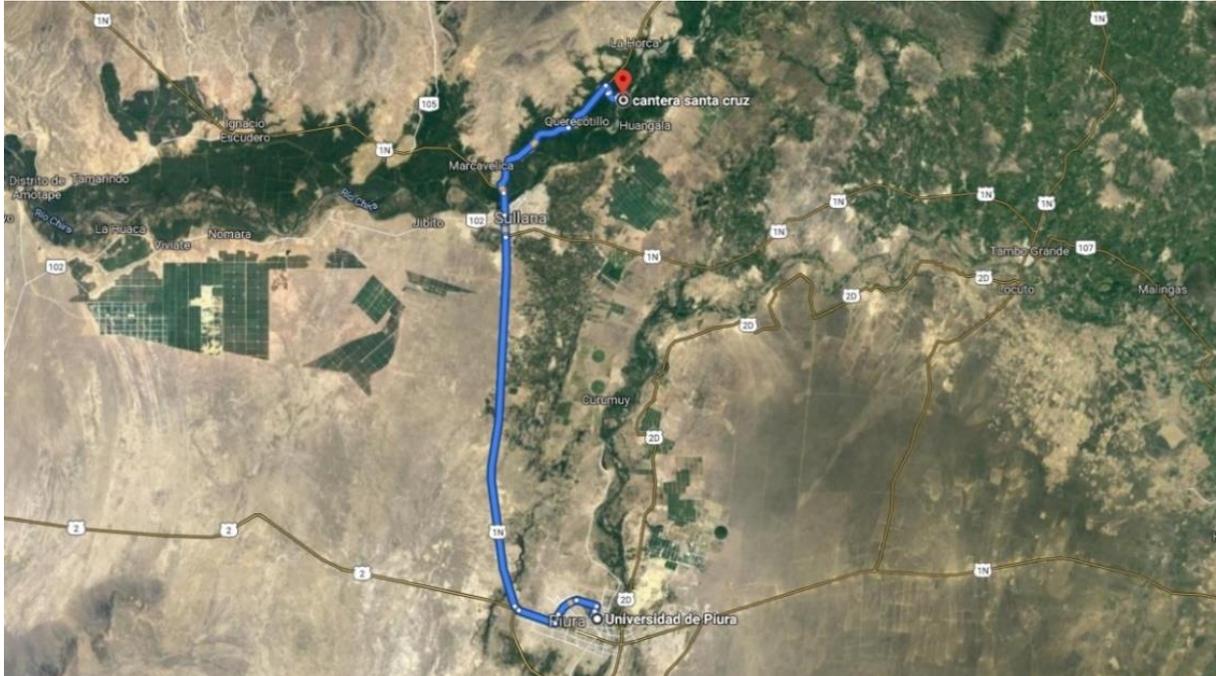


Figura 7. Ubicación cantera Santa Cruz

Fuente: Google Earth



Figura 8. Muestra de agregado grueso

El análisis granulométrico del agregado grueso se ha realizado respetando los lineamientos indicados por la norma respectiva. Los valores resultantes se detallan en la **Tabla 9** y su curva granulométrica en la **Figura 9**.

Tabla 9: Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Contenido (g)	Retenido parcial	Retenido total	%Pasa
Tamiz 1"	0.00	0.00	0.00	100
Tamiz 3/4"	1268.00	13.59	13.59	86
Tamiz 1/2"	3226.00	34.59	48.18	52
Tamiz 3/8"	2463.00	26.41	74.59	25
Tamiz N° 4	2316.00	24.83	99.42	1
Tamiz N° 8	33.00	0.35	99.77	0
Fondo	9.00			
Total	9315.0			
Inicial	9327.0			
Pérdida	12.0			

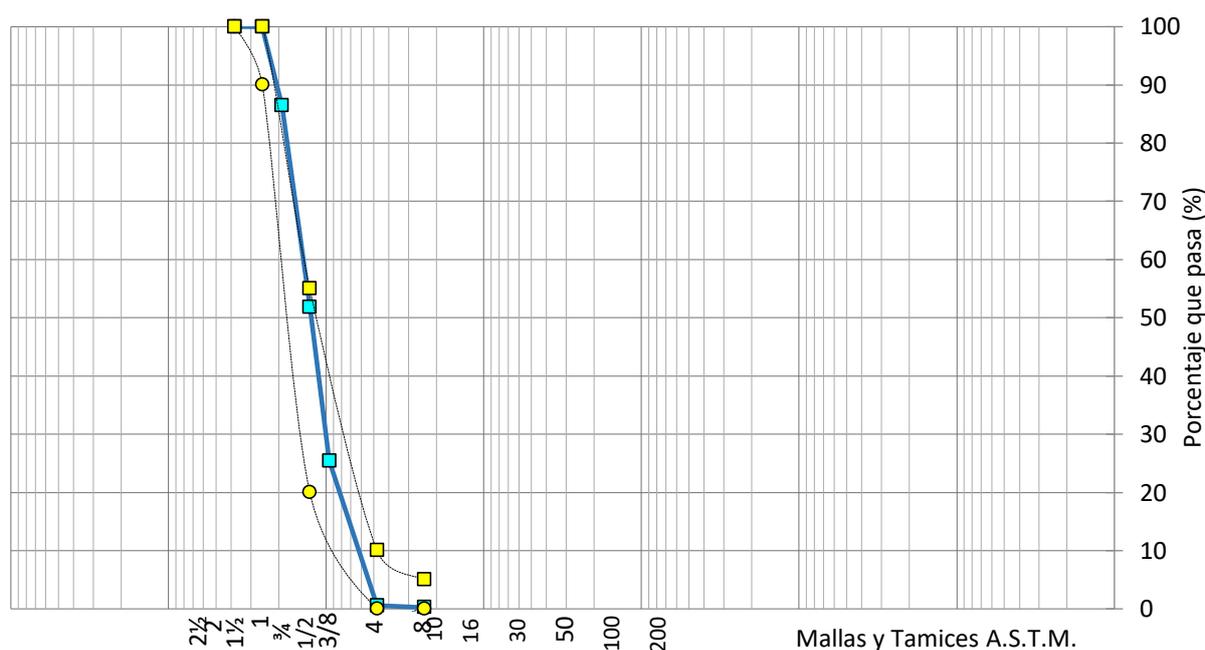


Figura 9. Curva granulométrica del agregado grueso.

Según la NTP 400.037 el agregado grueso se encuentra dentro del huso N° 57. Se calculó el módulo de fineza para el agregado grueso, obteniendo un valor de 6.87. Además, el valor de tamaño máximo nominal (TMN) es de 3/4".

Finalizados los ensayos del agregado grueso, se muestra el resumen de los valores obtenidos en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Tabla resumen de la caracterización del agregado grueso.

Tamiz	Contenido (g)	Retenido parcial
Cantera	Santa Cruz	-
Tamaño máximo	1	pulgada
Tamaño máximo nominal	3/4	pulgada
Peso específico (SSS)	2.765	-
Peso unitario suelto (stock)	1505	kg/m ³
Peso unitario varillado (stock)	1621	kg/m ³
Peso unitario varillado (OD)	1616	kg/m ³
Humedad total	0.35	%
Capacidad de absorción	1.24	%

Con todos los datos obtenidos de la caracterización de los agregados, se calcularon los diseños de mezcla teóricos de ambos procedimientos.

2.3 Diseños de mezcla

2.3.1 Planteamiento inicial de los procedimientos de mezcla

Siguiendo los pasos recomendados por ACI 211.1, se estimaron las proporciones iniciales de los diseños de mezcla. Para el procedimiento LEMC, se calcularon 3 diseños distintos ($a/c_1 = 0.50$, $a/c_2 = 0.54$, y $a/c_3 = 0.58$). De igual modo, para el procedimiento modificado se calculó un concreto inicial con relación $a/c_1 = 0.45$ y un valor bajo de slump (1" - 3").

Debido a que el método ACI 211.1 es solo la primera aproximación teórica de proporciones para un diseño, es recomendable realizar tandas de prueba con la finalidad de comprobar si los valores de slump teóricos coinciden con los reales. Siguiendo la norma técnica NTP 339.035, se realizaron dichas tandas y, según los resultados, se ajustaron las proporciones iniciales.

Una vez determinado el valor óptimo de agua, se elaboraron las tandas para la fabricación de las probetas.

2.3.2 Procedimiento actual del LEMC

De los requerimientos solicitados para el concreto y lo calculado a través del método ACI 211.1, se obtiene una relación agua/cemento. Partiendo de este valor, adicionalmente se diseña para una relación a/c mayor y una menor, esto tiene la finalidad de conseguir mayor información sobre el comportamiento del concreto y, en caso no se logre los valores de resistencia esperados, poder interpolar un diseño final entre los resultados obtenidos.

Una vez obtenidas las proporciones teóricas finales de los tres diseños, el procedimiento LEMC consiste en realizar los tres (03) diseños de mezcla (diferentes relaciones a/c) en tandas individuales.

En la presente investigación, para replicar el procedimiento del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMC), se realizó un diseño convencional de concreto, sin uso de aditivos, para una resistencia especificada de 210 kg/cm^2 , y un slump entre 1" a 2". Se realizaron tres (03) diseños de mezcla teóricos, con relaciones agua-cemento $a/c_1 = 0.50$, $a/c_2 = 0.54$, y $a/c_3 = 0.58$.

Una representación gráfica se muestra en la **Figura 10**.

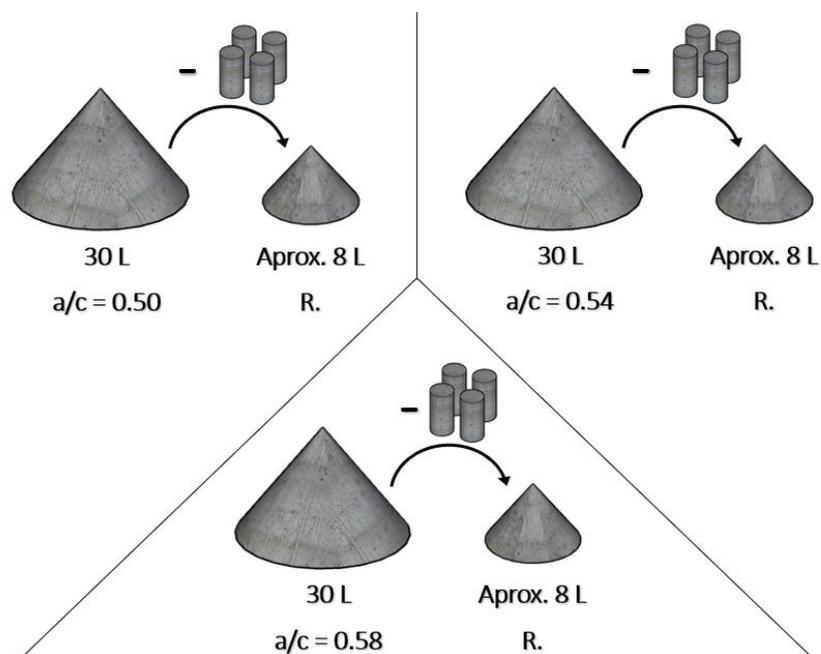


Figura 10. Procedimiento LEMC – 3 tandas distintas

Las proporciones finales para cada diseño se presentan en la **Tabla 11** a manera de resumen, y el detalle del cálculo se muestra en el **Apéndice A**.

Tabla 11. Diseños de mezcla teóricos – Procedimiento LEMC

Diseño	a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Peso unitario teórico
LEMC 0.50	0.50	378.00	205.23	1022.70	756.20	2362.15
LEMC 0.54	0.54	350.00	205.44	1024.60	777.00	2357.07
LEMC 0.58	0.58	325.86	205.63	1026.20	795.00	2352.69

*Materiales en Stock.

**Unidades: kilogramos/ metro cúbico.

Estas proporciones corresponden a 1.00 m^3 de concreto, y deben ser multiplicadas por el volumen a elaborar que depende de la capacidad de la mezcladora y la cantidad de testigos cilíndricos a elaborar.

En el LEMC, usualmente se utilizan probetas cilíndricas de $\phi 15 \times 30 \text{cm}$, las cuales son ensayadas a edades de 7 y 28 días. Entonces para hallar correctamente los valores de resistencia a la compresión, se promedia el resultado mínimo dos (02) probetas de $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ ensayadas a compresión a la misma edad (ACI Committee 318, 2014).

Por lo tanto, por cada diseño se elaboraron cuatro (04) testigos cilíndricos, esto hace un volumen aproximado de 25 litros de concreto, sin embargo, para compensar el desperdicio al ejecutar los ensayos, se realizaron tandas de 30 litros. A partir de las proporciones mostradas en la **Tabla 11**, se calculan las cantidades para la elaboración del volumen requerido (ver **Tabla 12**), estas cantidades son pesadas y ordenadas como se muestra en la **Figura 11**.

Tabla 12. Proporciones finales para elaboración de concreto

Diseño	a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino
LEMC 0.50	0.50	11.34	6.16	30.68	22.69
LEMC 0.54	0.54	10.50	6.16	30.74	23.31
LEMC 0.58	0.58	9.78	6.17	30.79	23.85
Material usado		31.62	18.49	92.21	69.85
Total			212.17		

*Materiales en Stock. Tanda calculada para 30 litros de concreto.

**Unidades: kilogramos



Figura 11. Materiales para 03 tandas de concreto

Una vez pesados los materiales a utilizar, se siguen las pautas para el mezclado a máquina indicado en la NTP 339.183. Antes de iniciar con el mezclado se debe elaborar un

mortero con las mismas proporciones del diseño, que, al adherirse y humectar las paredes de la mezcladora, evitará pérdidas de pasta (INACAL, 2018).

Se inicia el procedimiento con el diseño de menor relación agua/cemento, en este caso $a/c_1 = 0.50$. Para iniciar se debe encender la mezcladora y añadir el agregado grueso, una parte de agua, el agregado fino, el cemento y el agua restante. Mezclar durante 3 minutos, seguido por 1 minuto de reposo y luego 2 minutos finales de mezclado (INACAL, 2018).

Una vez concluido el mezclado se realizaron los ensayos de concreto en estado fresco, en el siguiente orden: Temperatura (NTP 339.184), Medición de asentamiento (NTP 339.035), Peso unitario (NTP 339.046), y luego se elaboraron las cuatro (04) probetas (NTP 339.183) correspondientes al primer diseño.

Se repitió este proceso para las otras relaciones agua/cemento restantes, para esto es necesario retirar el sobrante de material que haya quedado en la mezcladora con ayuda de una cuchara. Conviene considerar que debido a los residuos adheridos a las paredes de la tanda anterior ya no es necesario volver a humectar el interior del equipo.

Completadas las tandas para cada relación agua-cemento, se obtienen doce (12) probetas como se muestra en la **Figura 12**. En la etapa inicial del curado se debe prevenir la evaporación del agua cubriendo inmediatamente el concreto fresco con material no absorbente. Los especímenes se desmoldaron $24h \pm 8h$ después del vaciado (INACAL, 2018), y fueron sumergidos en la poza de curado (**Figura 13**). La realización completa de este procedimiento LEMC, desde el pesado de los materiales hasta la limpieza de instrumentos, toma un aproximado de 5 horas.



Figura 12. Probetas obtenidas del procedimiento LEMC

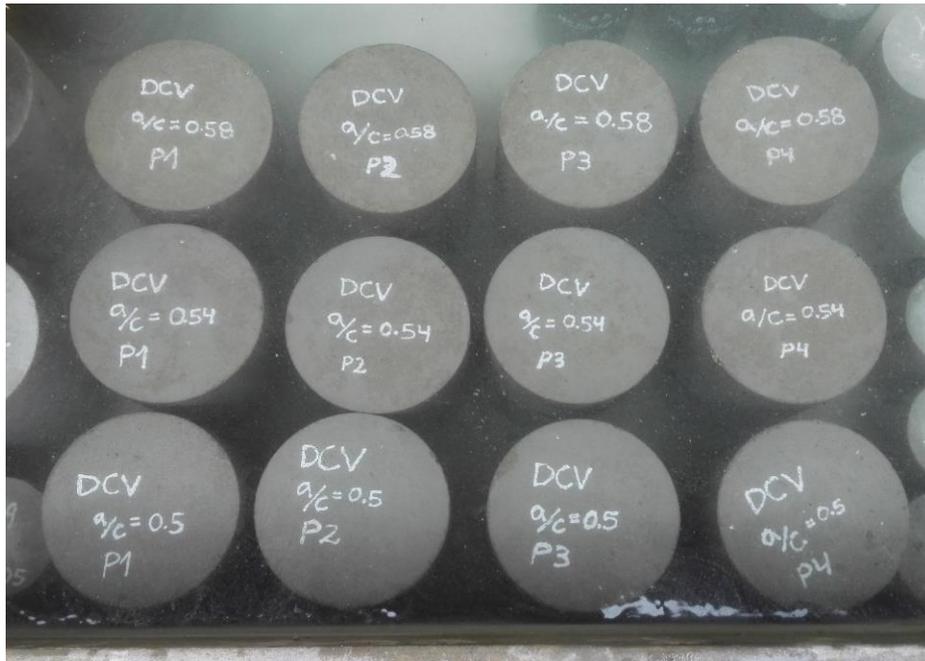


Figura 13. Curado de probetas de 15x30cm.

2.3.3 Procedimiento modificado

Mediante este procedimiento se pretende obtener la mayor cantidad de información representativa, utilizando la menor cantidad posible de recursos. Se busca ahorrar materiales y tiempo, al proponer el diseño de concreto en laboratorio realizando una sola tanda, de la cual, se extraerán cuatro (04) diseños diferentes. Se considera que esto permitirá una aproximación más precisa del comportamiento final de concreto. La lógica de este procedimiento se presenta en la **Figura 14**.

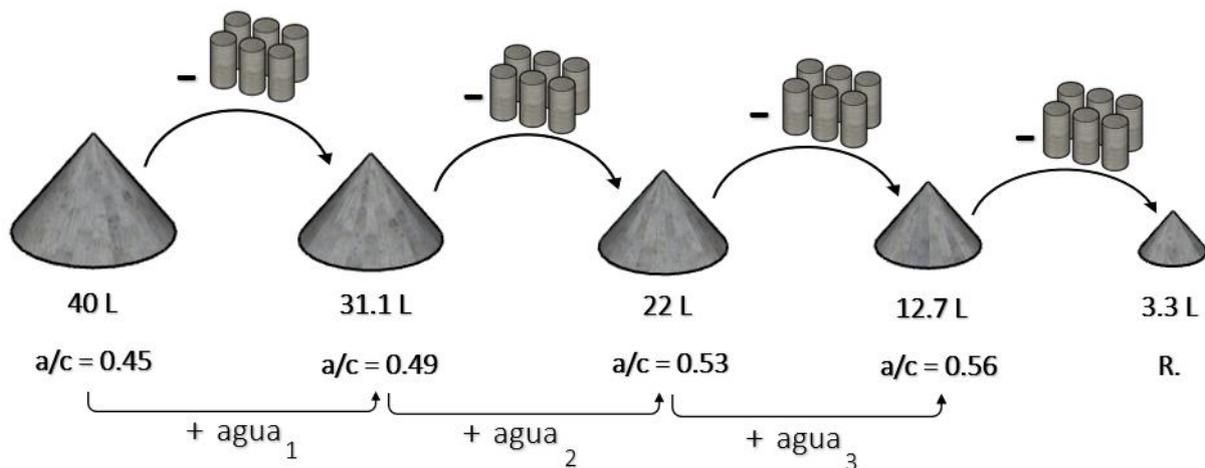


Figura 14. Lógica del procedimiento modificado – 1 tanda para 4 diseños

Este procedimiento también parte de un diseño de mezcla teórico obtenido de seguir los pasos del comité ACI 211.1, pero para este caso solo es necesario uno de ellos. Los diseños de mayores relaciones a/c serán obtenidos solamente añadiendo cantidades calculadas de agua, es por esto que se inicia con valores bajos de relación a/c y slump. De iniciar este procedimiento con relaciones a/c y slump altos, el modificar notablemente el diseño añadiendo agua podría generar otros problemas como segregación.

Se realizaron estos 4 diseños con la intención de que dentro de los resultados obtenidos se encuentre el diseño requerido final.

El plan experimental inició con un diseño de mezcla convencional, para un valor de slump de 1" a 3", y una relación $a/c_1 = 0.45$, las proporciones iniciales de este diseño se indican en la **Tabla 13**. El cálculo a detalle se encuentra en **Apéndice B**.

Tabla 13. Diseño de mezcla teórico inicial – Procedimiento modificado

Diseño	a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Peso unitario teórico
MOD 0.45 (STOCK)	0.45	391.11	192.12	1054.42	749.60	2387.2
MOD 0.45 (SSS)	0.45	391.11	176.00	1063.77	756.37	2387.2

* Unidades: kilogramos/ metro cúbico.

Partiendo del diseño mostrado, se busca hallar cuatro (04) relaciones agua-cemento, con edades de ensayo de 7 y 28 días, por eso se consideró el uso de probetas cilíndricas de $\phi 10 \times 20$ cm, y para hallar la resistencia a la compresión es necesario promediar el resultado de al menos tres (03) de ellas a la misma edad (ACI Committee 318, 2014), esto hace un total de 24 probetas.

El volumen total calculado es de aproximadamente 38 litros de concreto, pero considerando el desperdicio se elaboró una tanda de 40 litros. Las proporciones ajustadas para el volumen indicado se muestran en la **Tabla 14**, y el material pesado en la **Figura 15**.

Tabla 14. Proporciones finales para elaboración de concreto – Procedimiento modificado

Diseño	a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino
MOD 0.45 (STOCK)	0.45	15.64	7.68	42.17	29.98
MOD 0.45 (SSS)	0.45	15.64	7.04	42.55	30.25
Total				95.5	

*Materiales en Stock. Tanda calculada para 40 litros de concreto.

**Unidades: kilogramos



Figura 15. Pesado de materiales para proceso modificado

Para este procedimiento modificado, se consideró relaciones a/c que sean aproximadas a las trabajadas en el procedimiento LEMC, por lo tanto se establecieron cuatro (04) de ellas, estas fueron $a/c_1 = 0.45$, $a/c_2 = 0.49$, $a/c_3 = 0.53$ y $a/c_4 = 0.56$. Se pesó la cantidad de agua necesaria para cada cambio de relación a/c ; el cálculo para estas modificaciones se muestra más adelante.

Para el proceso de mezclado, se siguió lo indicado en la norma NTP 339.183. Similar a lo antes explicado, con las mismas proporciones del diseño se elaboró un mortero para humectar las paredes de la mezcladora y evitar pérdidas de pasta.

Se inició el procedimiento con las proporciones calculadas del diseño inicial, en este caso $a/c_1 = 0.45$. Se sigue el proceso establecido de mezclado: encender la mezcladora y añadir el agregado grueso, una parte de agua, luego el agregado fino, el cemento y el agua restante. Se mezcló durante 3 minutos, luego 1 minuto de reposo y finalmente 2 minutos más de mezclado (INACAL, 2018).

Una vez concluido el mezclado del primer diseño, se realizaron los ensayos de concreto fresco, los cuales siguen el siguiente orden: Temperatura (NTP 339.184), Medición de asentamiento (NTP 339.035), Peso unitario (NTP 339.046), y luego de esto se elaboraron las seis (06) probetas (NTP 339.183) correspondientes al diseño. Cabe mencionar que el concreto utilizado para la realización de los ensayos de asentamiento y de peso unitario, es recuperado y devuelto a la mezcladora.

Se debe indicar que el procedimiento considera que el material restante en la mezcladora mantiene las mismas proporciones, lo que permite calcular la cantidad de agua exacta que ayude a lograr la siguiente relación a/c buscada, este cálculo se explica posteriormente.

En este punto, se vuelve a encender la mezcladora y se añadió la primera cantidad de agua calculada para cambiar la relación actual a $a/c_2 = 0.49$, y se mezcló durante 1 minuto. Luego de esto se realizó nuevamente el grupo de ensayos en concreto fresco, y se fabricaron las seis (6) probetas respectivas para este nuevo diseño 2. Este procedimiento de corrección y remezclado se repitió para las relaciones $a/c_3 = 0.53$ y $a/c_4 = 0.56$.

Una vez concluida la tanda, se obtuvieron veinticuatro (24) probetas como se muestra en la **Figura 16**, procediendo a cubrir con material no absorbente para prevenir la evaporación del agua. Los especímenes se deben desmoldar $24h \pm 8h$ después del vaciado (INACAL, 2018), y luego ser introducidos en la poza de curado (**Figura 17**) por el periodo respectivo a la edad de ensayo.

La realización completa de este procedimiento modificado, desde el pesado de los materiales hasta la limpieza de instrumentos, toma un aproximado de 2.5 horas.



Figura 16. Probetas obtenidas del proceso modificado



Figura 17. Proceso de curado de probetas 10x20cm

Cálculo de cantidad de agua para variar relación a/c:

Para poder calcular las adiciones de agua necesarias para variar las relaciones a/c dentro del concreto fresco, es necesario recordar que, por regla general, se considera que los agregados dentro de la mezcla trabajan en estado saturado en superficie seca (SSS) (Neville A. M., 2013), y por esto, el agua indicada en las proporciones de mezcla en stock se encuentra afectada por la corrección por absorción efectiva de los agregados. Por lo tanto, en el cálculo de las variaciones se trabaja con las proporciones en condición SSS, pues en esta condición, la relación agua/cemento se puede hallar directamente con una división simple entre sus cantidades.

Para cada cambio de diseño, se considera cuatro puntos claves: En primer lugar, conocer la disminución de volumen que representa extraer de la mezcla seis (6) probetas cilíndricas de $\phi 10 \times 20$ cm; en segundo lugar, suponer que la cantidad de desperdicio, durante la ejecución de los ensayos de concreto fresco en cada diseño, es mínima y despreciable en las operaciones; en tercer lugar, considerar que durante el procedimiento el concreto se mezcla de manera homogénea, y que cada volumen extraído presenta las proporciones correspondientes al diseño; y por último, la cantidad de agua que se añade para cada cambio de diseño genera una variación en el volumen de concreto producido en la tanda, y en este caso, sí se considera en el cálculo. Además, es importante mencionar que a lo largo de todas las variaciones de diseños la proporción de agregados se mantiene, pues la única modificación que sufre el concreto es en la cantidad de agua.

El proceso de mezcla inició con 40 litros de concreto (0.040 m^3). Luego de elaboradas las primeras 6 probetas (0.00942 m^3), se tiene en la mezcladora un volumen teórico restante de 0.0306 m^3 . Este valor multiplicado por el diseño de mezcla inicial (condición SSS) resulta en cantidades de agua y cemento de 5.38 kg y 11.96 kg respectivamente. El cálculo continúa como se muestra en la **Figura 18**.

DISEÑO 1		DISEÑO 2
$a/c = 0.45$		Para lograr $a/c = 0.49$
$Vol_{concreto} = 0.0306 \text{ m}^3$		$agua = 0.49 \times 11.96$
Agua = 5.38 kg Cemento = 11.96 kg	→	$= 5.86 \text{ kg}$
Condición SSS		$agua_{corrección \text{ N}^\circ 1}$
		$= 0.478 \text{ kg}$
		$Vol_{concreto}$
		$5.86 - 5.38 = 0.478 \text{ kg}$
		$= 0.0311 \text{ m}^3$

Figura 18. Cálculo para cambio de $a/c=0.45$ a $a/c=0.49$.

Luego del remezclado, nuevamente se elaboraron probetas. El volumen teórico restante es de 0.022 m^3 , con este, se volvió a realizar el cálculo para cambio de relación a/c , pero ahora para hallar la tercera relación $a/c_3 = 0.53$; este mismo procedimiento se repite para el cuarto diseño. Un resumen de las modificaciones para todas las relaciones se muestra en la **Tabla 15**. El cálculo a detalle se encuentra en **Apéndice C**.

Tabla 15. Resumen de adiciones de agua para variar relaciones agua-cemento

Diseño	a/c	Adición de agua	Volumen (m^3)	Agua	Cemento	Agregado grueso	Agregado fino
MOD 0.45	0.45	-	0.0400	7.04	15.64	42.55	30.25
MOD 0.49	0.49	+ 0.478	0.0311	5.86	11.96	32.53	23.13
MOD 0.53	0.53	+ 0.333	0.0220	4.41	8.33	22.65	16.11
MOD 0.56	0.56	+ 0.143	0.0127	2.66	4.75	12.93	9.19

*Materiales en estado SSS.

**Unidades: kilogramos

2.3.4 Comprobación de diseños de mezcla teóricos

Culminado el tiempo de curado y realizados los ensayos de compresión respectivos, se utilizan estos datos para construir gráficas de comportamiento que permitan encontrar el diseño de mezcla final requerido en cada procedimiento.

Con estos diseños obtenidos, y siguiendo la norma NTP 339.183, se realizó una tanda de comprobación para cada método, con el objetivo de establecer una comparación entre ellos. Para el procedimiento LEMC se realizó una tanda de 30 litros, utilizando probetas cilíndricas de $\phi 15 \times 30 \text{cm}$, y para el procedimiento modificado se realiza una tanda de 18 litros utilizando probetas cilíndricas de $\phi 10 \times 20 \text{cm}$. Las probetas obtenidas son ensayadas a edades de 7 y 28 días y los resultados se presentan y discuten finalizando el siguiente capítulo.





Capítulo 3

Resultados y discusión

El presente capítulo muestra los resultados de los ensayos realizados al concreto en estado fresco y endurecido. Estos datos corresponden a la tanda del procedimiento LEMC, y también de la tanda del procedimiento modificado. Así se puede conocer las principales propiedades y el comportamiento de ambos, para su posterior comparación.

3.1 Concreto en estado fresco

3.1.1 Temperatura

Los resultados se obtuvieron siguiendo la NTP 339.184. La toma de datos se realizó para ambos métodos de diseño. Todos los valores encontrados son menores de 30°C, y están dentro del rango permitido para un concreto normal (INACAL, 2018).

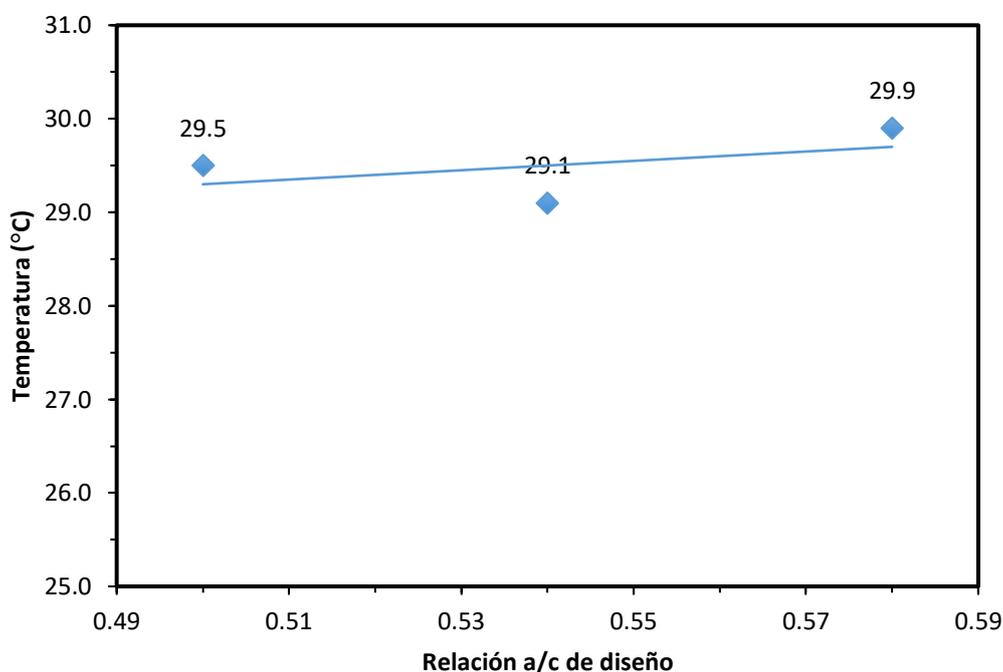


Figura 19. Temperatura de concreto fresco para procedimiento LEMC.

Recordar que el procedimiento LEMC consiste en 3 tandas de concreto distintas elaboradas una después de la otra, por lo tanto, se espera que las temperaturas correspondientes a su elaboración sean similares como se puede observar en la **Figura 19**.

Se puede apreciar que la temperatura de todas las mezclas de prueba del procedimiento LEMC son muy cercanas a 29°C. Las variaciones mínimas en estos valores se pueden deber a los cambios en la temperatura ambiente, y a la temperatura de los agregados al realizar el concreto.

Con respecto al procedimiento modificado, al realizarse en una sola tanda es lógico considerar que sus temperaturas tienen relación entre sí mismas. Como se muestra en la **Figura 20**, la temperatura del concreto tiene valores cercanos a 27°C, aunque presenta diferencias mínimas se puede observar que disminuye conforme se van modificando las relaciones a/c.

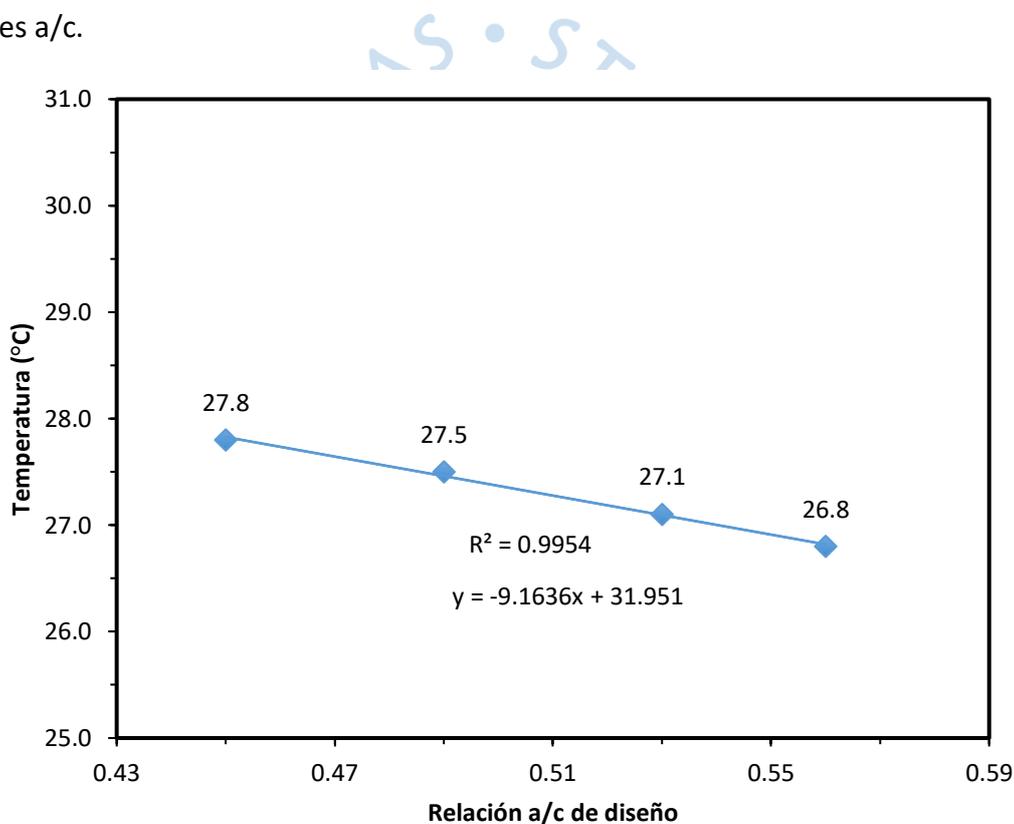


Figura 20. Temperatura de concreto fresco para procedimiento modificado.

Si bien, la temperatura muestra una ligera variación descendiente, esta se encuentra dentro del rango de medición permitido de $\pm 2^\circ\text{C}$ (INACAL, 2018).

3.1.2 Peso unitario

Para este ensayo se siguieron los lineamientos indicados en la NTP 339.046. Los resultados encontrados están entre 2200 hasta 2400 kg/m³, los cuales son valores aceptables para concretos convencionales (ACI Committee 318, 2014).

Del procedimiento LEMC, realizado en tandas distintas y cuyos datos se presentan en la **Figura 21**, se observa que cuando la relación agua/cemento aumenta el peso unitario disminuye de manera leve.

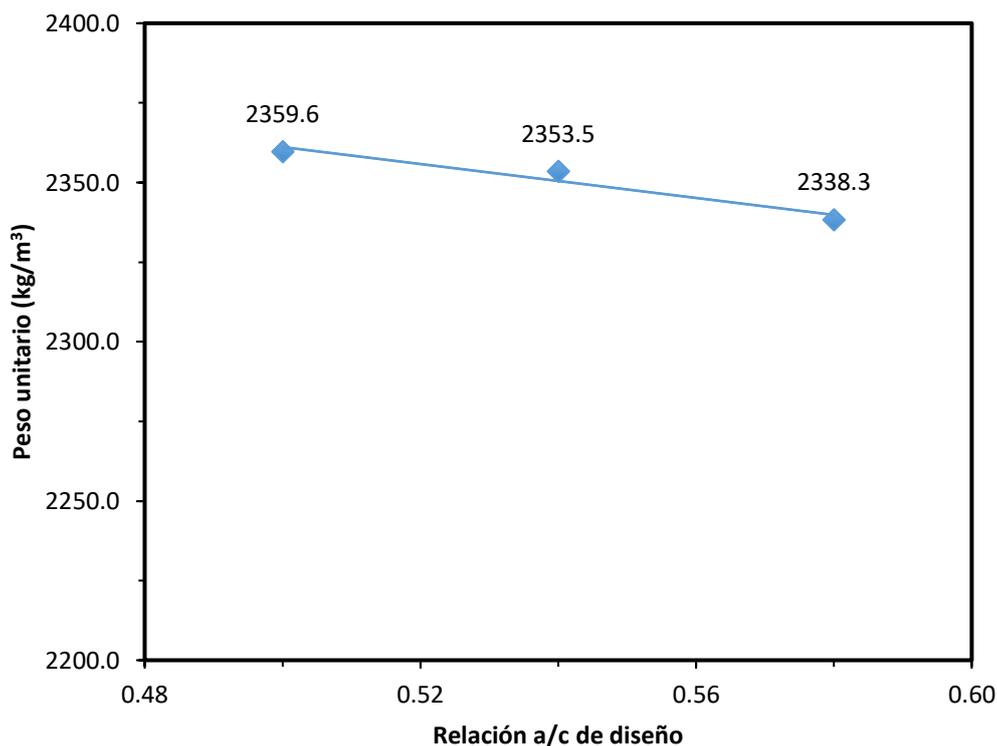


Figura 21. Pesos unitarios reales para procedimiento LEMC.

El peso unitario del concreto depende de la cantidad y peso específico de los agregados, la compactación, y la cantidad de cemento y agua. De estos materiales, quien presenta menor densidad es el agua, por lo tanto, para un volumen conocido de concreto, si en las proporciones la presencia de agua es mayor, el peso unitario será más bajo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Bajo esta lógica, los datos obtenidos en el procedimiento modificado son coherentes, pues se esperaba que acorde al aumento de la relación agua/cemento, el peso unitario del concreto disminuya como se muestra en la **Figura 22**.

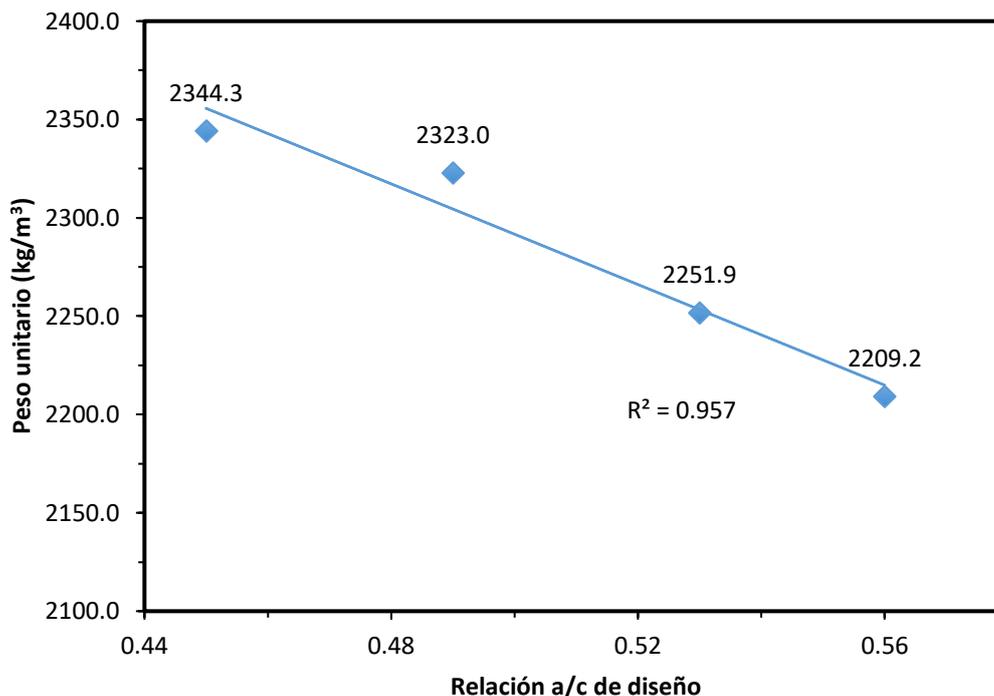


Figura 22. Pesos unitarios para procedimiento modificado.

3.1.3 Asentamiento

El ensayo para la medición del asentamiento en estado fresco mediante el cono de Abrams se realizó siguiendo la NTP 339.035. Evaluar esta propiedad tiene una importancia significativa para cada caso. En el procedimiento LEMC, al realizar las tres tandas distintas se espera que el concreto tenga el mismo valor de asentamiento. Sin embargo, en el procedimiento modificado las adiciones de agua alteran la relación agua/cemento y afectan directamente el valor de asentamiento, haciendo que este aumente.

Como se ha mencionado previamente, el diseño LEMC se calculó para un valor de asentamiento entre 1" a 3", aunque la **Tabla 2** presenta los valores sugeridos de agua de mezcla, esta cantidad se ajusta dependiendo del resultado de las tandas de pruebas que se realizan.

La **Figura 23** resume los valores de slump obtenidos de las tres tandas realizadas para el procedimiento LEMC. Aunque los asentamientos no son iguales, son bastantes cercanos y están dentro del rango de valores esperados. La **Figura 24** muestra el ensayo.

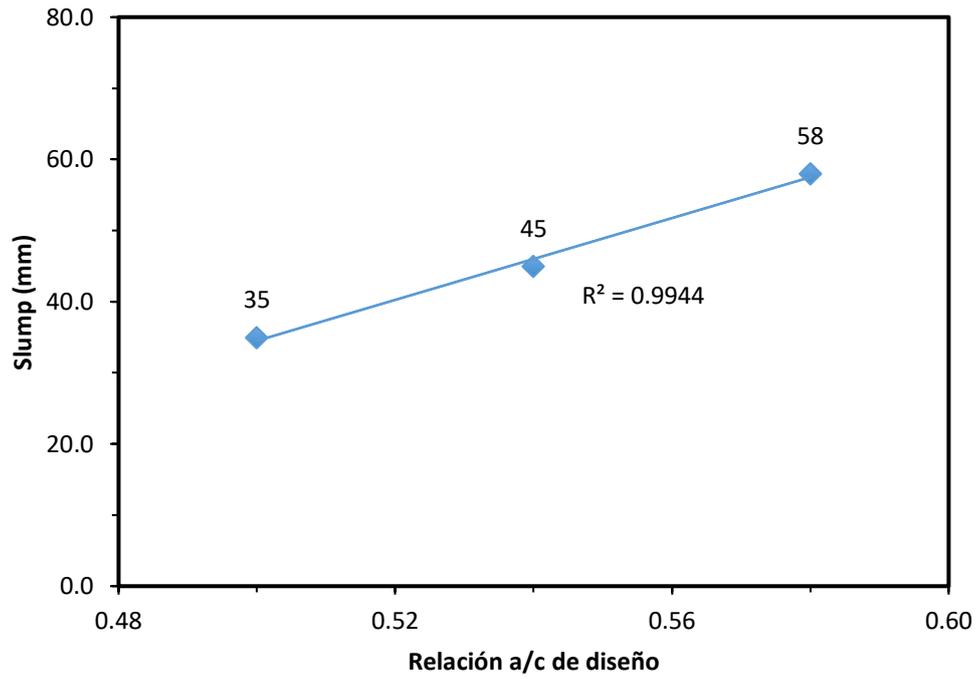


Figura 23. Valores de asentamiento para tandas de procedimiento LEMC.



Figura 24. Ensayo de slump – Procedimiento LEMC.

La **Figura 25** muestra los valores de asentamiento obtenidos en el procedimiento modificado, el cual presentó el comportamiento lógico esperado, pues aumentó su valor con cada adición de agua a la mezcla para los distintos diseños.

Esto es fácilmente apreciable en la **Tabla 16**, donde se puede ver que, a mayor contenido de agua en la mezcla, mayor es el valor de slump obtenido. En la **Figura 26** se muestra uno de los ensayos de slump realizados.

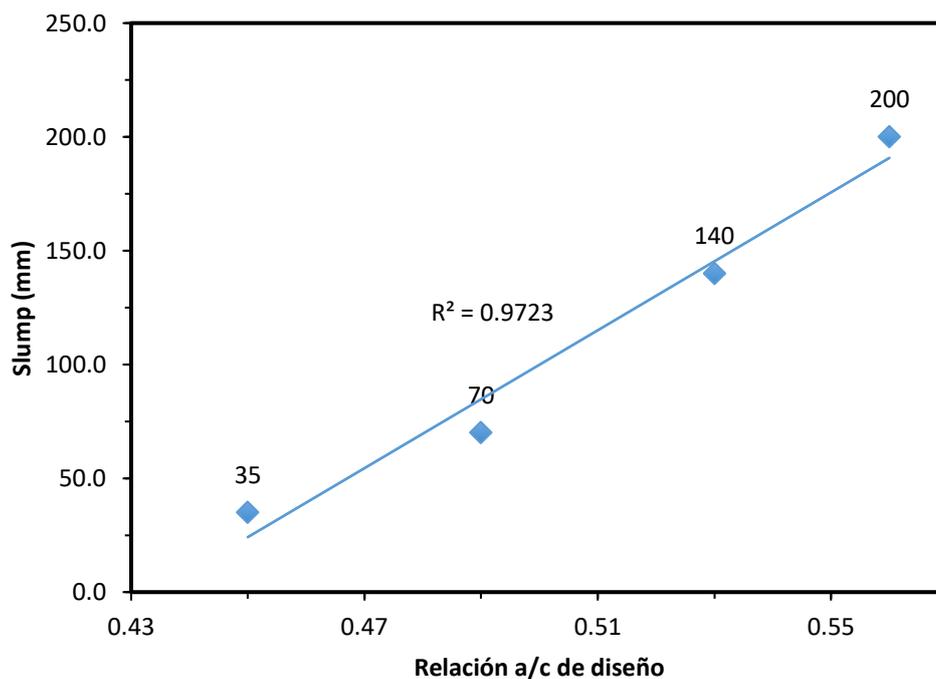


Figura 25. Valores de asentamiento para procedimiento modificado.

Tabla 16. Relación entre el slump y el contenido de agua.

Diseño	Relación a/c	Slump (mm)	Contenido de agua estimado en mezcla (litros)
MOD 0.45	0.45	35	176.0
MOD 0.49	0.49	70	188.7
MOD 0.53	0.53	140	201.0
MOD 0.56	0.56	200	210.0



Figura 26. Ensayo de slump – Procedimiento modificado.

3.1.4 Relación entre agua / materiales secos (H%)

Si bien el cálculo de este parámetro se realiza idealizando las proporciones de los materiales dentro de la mezcla, este permite tener una noción de la consistencia que presentará el concreto en su estado fresco, según lo explicado en el **Capítulo 1** Generalidades y marco teórico. En la **Tabla 17** se muestran los valores obtenidos para en el procedimiento modificado, usando la **Ec. 6**.

Tabla 17. Relación de agua/materiales secos (H%) en las tanda elaboradas

Insumo	a/c=0.45	a/c=0.49	a/c=0.53	a/c=0.56
Agua (kg)	7.68	6.35	4.76	2.86
Cemento (kg)	15.64	11.96	8.33	4.75
Ag. Grueso (kg) STOCK	42.17	32.23	22.45	12.82
Ag. Grueso (kg) OD	42.02	32.12	22.37	12.77
Ag. Fino (kg) STOCK	29.99	22.93	15.97	9.12
Ag. Fino (kg) OD	29.88	22.84	15.91	9.08
c (kg/kg)			1.00	
a (kg/kg)			1.91	
p (kg/kg)			2.69	
m (kg/kg)			4.60	
H (%)	8.04%	8.76%	9.47%	10.01%

En la **Tabla 17** se observa que la relación entre los agregados y el cemento (m) presenta valores iguales para todos los diseños, esto se debe a que se considera que los materiales dentro del concreto están mezclados de manera homogénea, y mantienen sus proporciones aun cuando va disminuyendo el volumen a lo largo del procedimiento.

Como se ha explicado, se sabe que a mayor valor de H% el concreto será más fluido. Por lo tanto, según los datos mostrados y los valores de slump resultantes (**Figura 25**) se comprueba que el comportamiento presentado por el concreto es coherente, mientras mayor sea el valor de H, mayor es el valor de asentamiento hallado. Así mismo se mantiene entre el rango de 8-11% por lo que se considera un concreto plástico (Araujo, Rodrigues, & Freitas, 2000).

3.2 Concreto en estado endurecido

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión que se realizaron a las probetas de ambos procedimientos. Estos valores fueron utilizados para realizar gráficas que permitieron determinar el diseño final resultante de cada método, y posteriormente elaborar una mezcla para comprobación.

3.2.1 Resistencia a la compresión

Respetando lo indicado por la norma NTP 339.034 se elaboraron probetas cilíndricas de $\phi 15 \times 30$ cm para la tanda LEMC, y probetas cilíndricas de $\phi 10 \times 20$ cm para la tanda modificada. Los ensayos fueron realizados a 7 y a 28 días.

Según las dimensiones de los testigos usados en cada procedimiento, para hallar correctamente los valores de resistencia a la compresión, cada punto de las gráficas es el resultado promedio de mínimo dos (02) probetas de $\phi 15 \times 30$ cm y de al menos tres (03) probetas de $\phi 10 \times 20$ cm (ACI Committee 318, 2014).

La **Figura 27** grafica los resultados obtenidos en el procedimiento LEMC ($\phi 15 \times 30$ cm). En este caso, cada punto representa el promedio del ensayo de dos probetas y se observa que los resultados presentaron un comportamiento lógico para ambas edades. Siguiendo una tendencia a la disminución de la resistencia a compresión cuando los valores de las relaciones agua/cemento aumentan.

Los resultados de los ensayos individuales de resistencia a la compresión de cada probeta se encuentran en el **Apéndice D**.

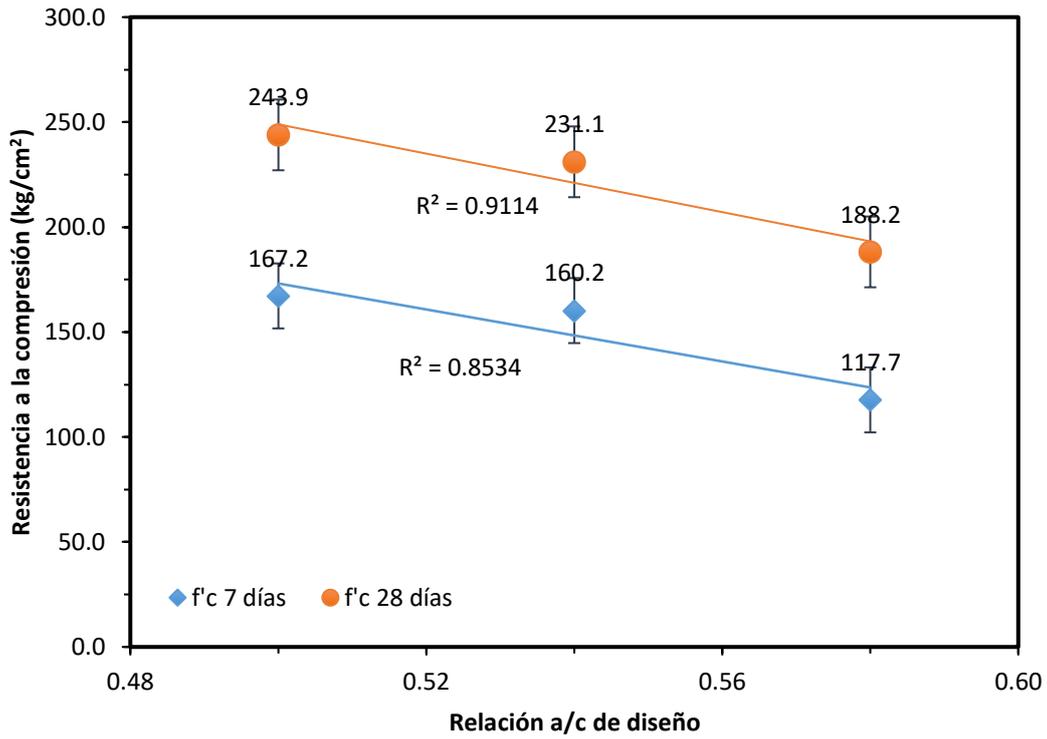


Figura 27. Valores de resistencia a la compresión tanda LEMC.

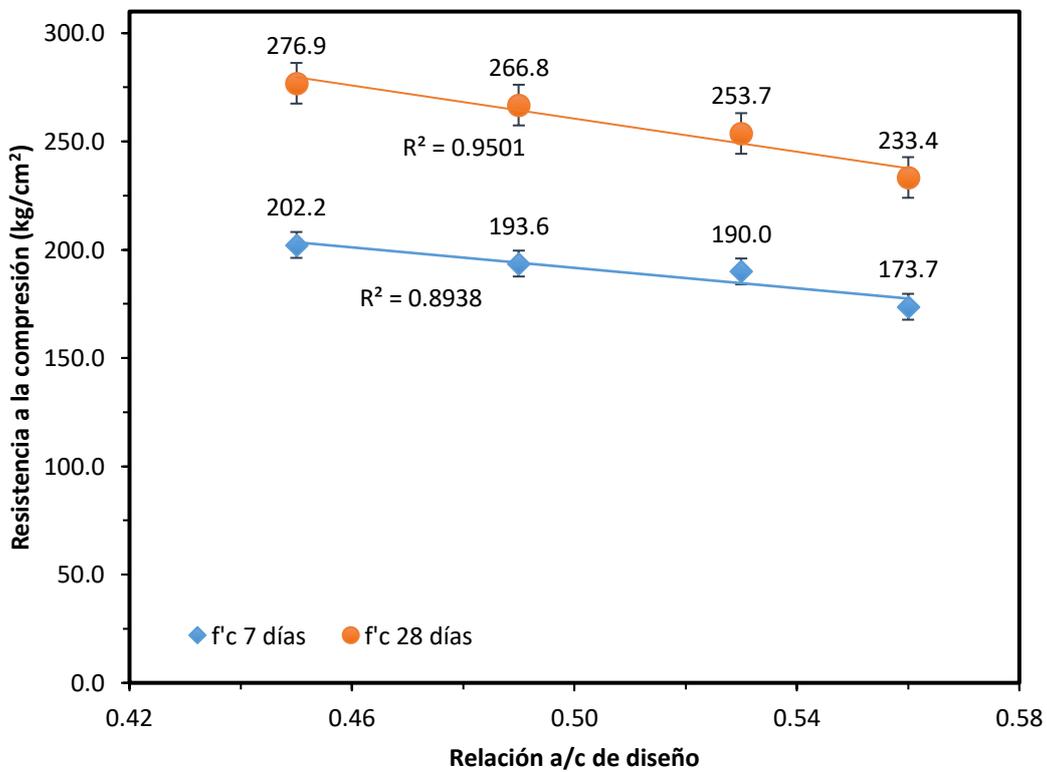


Figura 28. Valores de resistencia a la compresión tanda modificada.

Por otro lado, la **Figura 28** muestra las resistencias a la compresión presentadas por el concreto de la tanda modificada ($\phi 10 \times 20 \text{cm}$), en este caso cada punto representa el promedio del ensayo de 3 probetas. Se puede observar que presentó comportamiento similar al visto en la tanda normal, y las resistencias disminuyeron acorde al aumento de la relación a/c.

3.2.2 Patrones de falla de las probetas

Realizados los ensayos de compresión, se procedió a verificar los tipos de fracturas generadas en ambos tamaños de probetas. La norma NTP 339.034 indica 6 tipos de falla, de los cuales los que más predominaron en el presente estudio fueron Tipo 4 (fractura diagonal sin grietas en las bases) y Tipo 2 (cono bien formado sobre una base, desplazamiento de grietas verticales a través de las capas) como se muestra en la **Figura 29**.

La NTP 339.034 no indica un patrón de falla como el más adecuado, pero se observó un comportamiento normal y similar en ambos procedimientos, esto se debe a que la relación de esbeltez ($L/d=2.00$) es igual en ambos tipos de probetas ($\phi 15 \times 30 \text{cm}$ y $\phi 10 \times 20 \text{cm}$).



Figura 29. Tipo de falla en probeta 15x30cm y 10x20cm.

3.3 Diagramas de diseño resultantes

Una vez concluidos todos los ensayos de las tandas de diseño, el paso siguiente es utilizar los datos obtenidos en ambos procedimientos para determinar un diseño de mezcla final. Posteriormente, se realizaron tandas para comprobar los diseños obtenidos.

Para el procedimiento LEMC se obtuvo el gráfico mostrado en la **Figura 30**. Para diseñar la tanda de comprobación se escoge una resistencia de 220 kg/cm^2 a los 28 días, esto resultó en una relación agua/cemento de 0.541, y se debería obtener un slump similar al de las tandas de diseño. Con estos datos se realiza nuevamente la dosificación siguiendo los pasos ACI 211.1.

Tomar en cuenta que, si por algún motivo se presentan cambios de humedad en el agregado antes de la realización de la nueva tanda, se deberá corregir previamente el contenido de agua. Las proporciones finales se muestran en la **Tabla 18**.

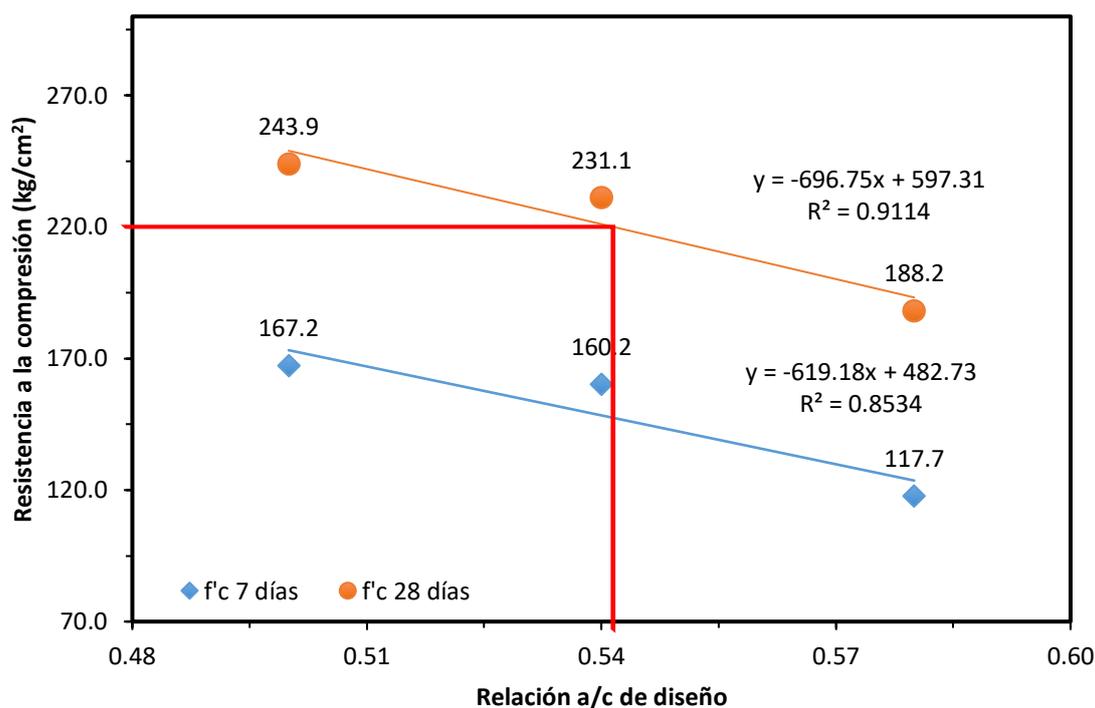


Figura 30. Diagrama de dosificación – Procedimiento LEMC

Tabla 18. Diseño final de procedimiento LEMC

Diseño	a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Peso unitario teórico
LEMIC	0.541	349.35	202.89	1023.05	762.16	2337.46

*Materiales en Stock.

**Unidades: kilogramos/ metro cúbico.

De igual forma, para el procedimiento modificado se obtuvo una gráfica de comportamiento en función a la relación a/c y a la resistencia a la compresión, pero además se elaboró una gráfica de trabajabilidad que relaciona el valor de slump con la relación de agua/materiales secos.

Utilizando los valores de resistencia y slump, es posible determinar una nueva dosificación. Las gráficas son mostradas en la **Figura 31** y **Figura 32**.

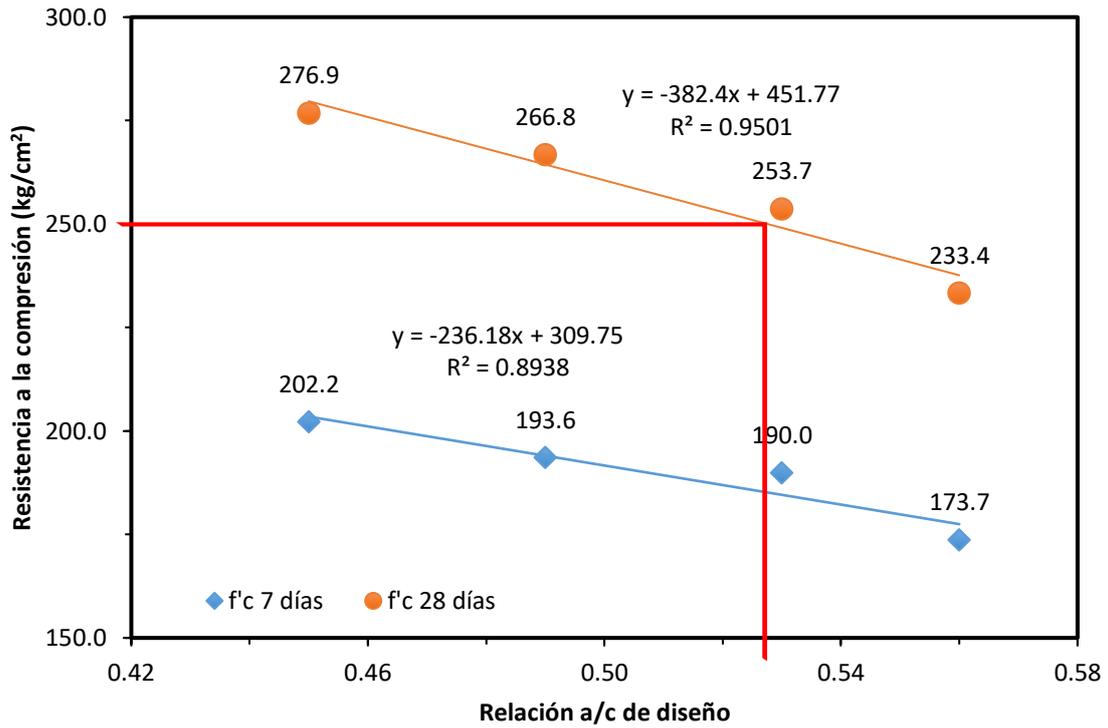


Figura 31. Diagrama de dosificación – Procedimiento modificado

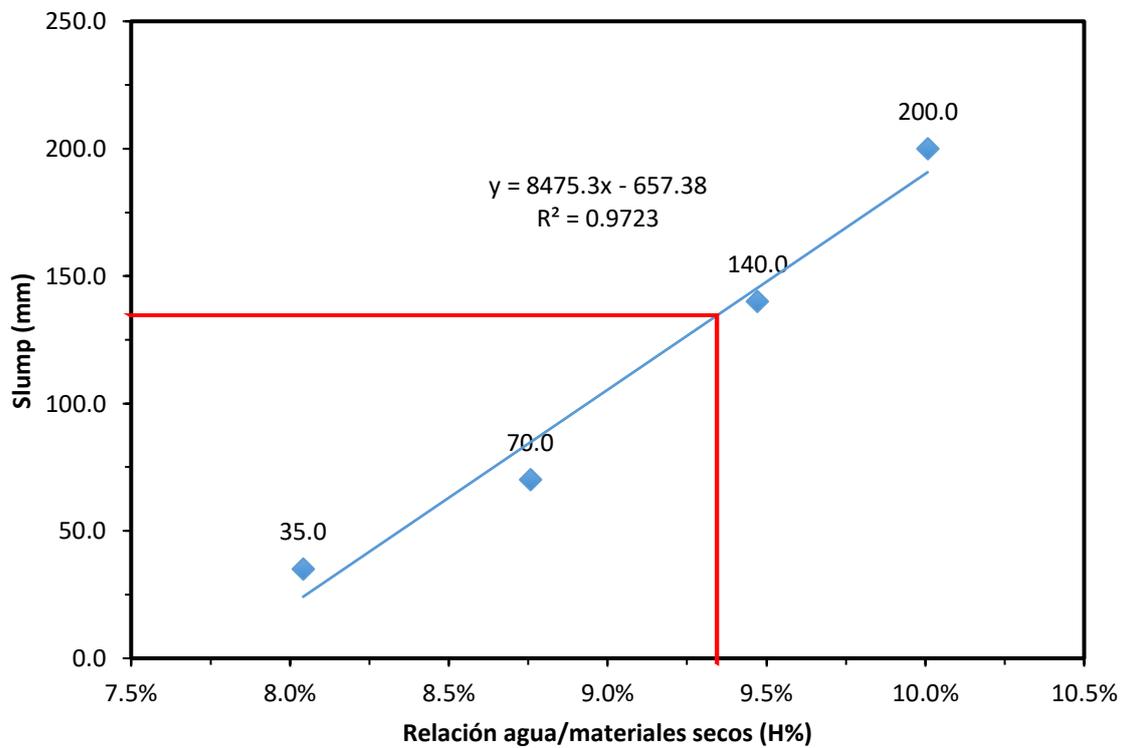


Figura 32. Diagrama de trabajabilidad – Procedimiento modificado

Como primer paso para diseñar la tanda de comprobación, se tomaron unos valores de resistencia a la compresión (similar a la obtenida en el procedimiento LEMC) y de asentamiento. En la **Figura 31** se utilizó una resistencia de 250 kg/cm² y se obtuvo una relación agua/cemento de 0.528. Mientras que en la **Figura 32**, con un asentamiento de 130 mm resultó un parámetro H = 9.29%, y de este valor se calculó que la relación agregados/cemento (m) es 4.68 kg/kg como se muestra en la **Figura 33**.

Diseño de comprobación	
Datos obtenidos de gráficos: $f'_{cr} = 250 \text{ kg/cm}^2$ $a/c = 0.528$ $Slump = 130 \text{ mm}$ $H = 9.29\%$	\rightarrow
	Donde: $H = \frac{a/c}{(1+m)}$ $9.29 = \frac{0.528}{(1+m)} * 100$ $m = \frac{0.528}{9.29/100} - 1$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">$m = 4.68$</div>

Figura 33. Cálculo del valor de “m” para la tanda de comprobación.

El segundo paso fue utilizar el parámetro “m” calculado y, manteniendo las proporciones de la tanda de diseño, se hallan las nuevas proporciones de mezcla mediante una regla de tres simple como se muestra en la **Figura 34**, y se resume en la **Tabla 19**.

Proporción de tanda de diseño	Proporción de tanda de comprobación
$m_1 = 4.60$ $a = 1.91$ $p = 2.69$	$m_2 = 4.68$ Por regla de tres simple: Si $m_1 = 4.60 \rightarrow a = 1.91$ $m_2 = 4.68 \rightarrow a = ?$ $a = \frac{4.68 * 1.91}{4.60}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">$a = 1.94$</div> Si $m_1 = 4.60 \rightarrow p = 2.69$ $m_2 = 4.68 \rightarrow p = ?$ $p = \frac{4.68 * 2.69}{4.60}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">$p = 2.74$</div>

Figura 34. Cálculo de proporciones de la tanda de comprobación

Tabla 19. Proporciones para tanda de comprobación

	a/c	m (kg/kg)*	a (kg/kg)*	p (kg/kg)*
Tanda de diseño	-	4.60	1.91	2.69
Tanda de comprobación	0.528	4.68	1.94	2.74

*Materiales en estado seco.

Previo al siguiente paso del procedimiento, es importante recordar el significado de las variables utilizadas, las cuales fueron mostradas en el **Método IBRACON**.

a [kg/kg] = relación agregado fino seco / cemento

p [kg/kg] = relación agregado grueso seco / cemento

$m = a + p$ = relación agregados secos / cemento

Proporción de tanda	Cantidades de tanda	
$m = 4.68$	$a = \frac{ag.fino_{OD}}{cemento}$	$\therefore Ag.Fino_{OD} = a * cemento$
$a = 1.94$	$\rightarrow p = \frac{ag.grueso_{OD}}{cemento}$	$\therefore Ag.Grueso_{OD} = p * cemento$
$p = 2.74$		
$H = 9.29\%$	$H = \frac{a/c}{(1+m)}$	$\therefore Agua = H * (1 + m) * cemento$

Figura 35. Cálculo de materiales en tanda de comprobación.

Se puede observar en la **Figura 35** que todas las cantidades de la mezcla dependen del valor que se le asigne al cemento. Por ello, si se fija una cantidad de cemento entre 6 a 8 kilogramos se asegura una tanda de entre 15 a 20 litros de concreto.

Con las proporciones de la **Tabla 19** y una valor de cemento de 7 kilos, se obtienen las cantidades que se muestran en la **Tabla 20**, las cuales representan una tanda de un volumen aproximado de 18 litros.

Tabla 20. Cantidades en condición OD para procedimiento modificado

	Relación a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Total
Tanda de comprobación	0.528	7.00	3.70	19.14	13.61	43.45

*Materiales en OD (kg).

Para realizar la tanda de comprobación se debe calcular las cantidades en condición STOCK y es necesario conocer la humedad de los agregados. Según el ensayo realizado, se halló que el agregado fino y grueso tenían un valor de HT de 0.45% y 0.50% respectivamente. Las cantidades finales de agregado quedan como se muestra en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Cantidades finales para procedimiento modificado

	Relación a/c	Cemento	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Total
Tanda de comprobación	0.528	7.00	3.95	19.24	13.67	43.86

*Materiales en Stock (kg).

3.4 Verificación de diseños resultantes

Para el procedimiento LEMC, se realizó una tanda de verificación 28 litros de concreto y se obtuvo una temperatura de 28.3°C, se observa que este valor es muy cercano a la línea de tendencia graficada en la **Figura 19**.

Posteriormente, el ensayo de slump resultó un valor de 40mm, como se muestra en la **Figura 36**, esto muestra coherencia entre el diseño final y su comportamiento real.



Figura 36. Ensayo de asentamiento tanda de comprobación LEMC

De esta tanda se esperaba una resistencia a la compresión de 220 kg/cm² a la edad de 28 días, sin embargo, los valores obtenidos a esta edad superaron este valor (**Figura 37**).

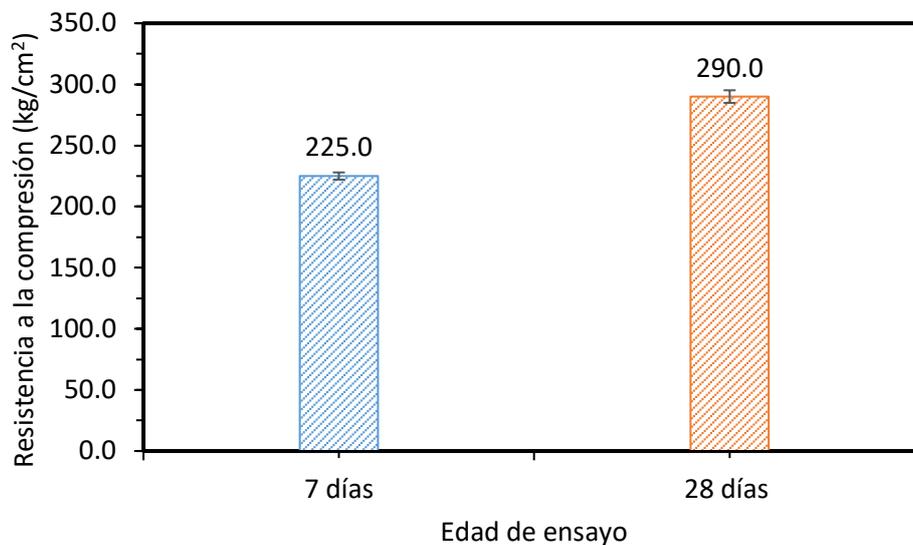


Figura 37. Resistencia a la compresión de tanda de comprobación LEMC

Por otro lado, en la tanda de comprobación del procedimiento modificado se obtuvo una temperatura de 27.C°, la cual es cercana a la línea de tendencia mostrada en la **Figura 20**.

En el ensayo de slump se obtuvo 140mm (**Figura 38**), valor bastante cercano al esperado (130mm), lo que muestra que se ha cumplido con la condición de asentamiento.



Figura 38. Asentamiento de la tanda de comprobación del proceso modificado

Así mismo, a los 28 días se pretendía obtener un valor de resistencia a la compresión de 250 kg/cm², como se muestra en la **Figura 39**, este valor también fue superado.

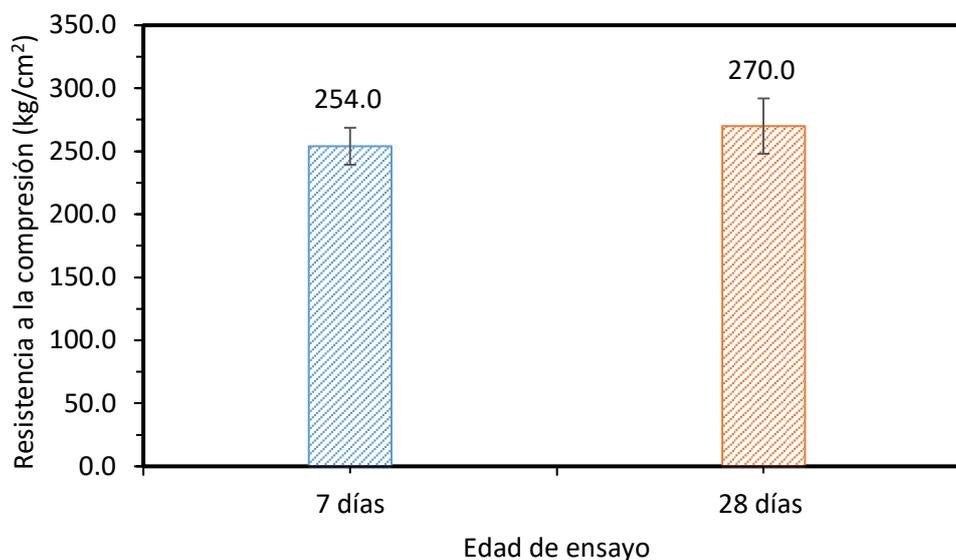


Figura 39. Resistencia a la compresión de tanda de comprobación modificada

3.5 Comentario final sobre los procedimientos

Si bien, haber realizado este plan experimental una sola vez no admite plantear comparaciones estadísticamente válidas o confiables, se considera que esta propuesta de modificación presenta una posibilidad que podría permitir obtener diseños de mezcla de concretos convencionales en un menor tiempo de ejecución.

El procedimiento LEMC implica tres tandas diferentes de concreto, para las cuales es necesario pesar, mezclar y limpiar en cada una de ellas. Por otro lado, el procedimiento modificado solo necesita de una tanda.

Comparando la cantidad de concreto utilizado, en la forma planteada para ambos procedimientos, se puede evidenciar una notable diferencia. Sin embargo, el procedimiento utilizado en el LEMC (probetas $\phi 15 \times 30 \text{cm}$) podría cambiarse a probetas de $\phi 10 \times 20 \text{cm}$, lo cual generaría cantidades de concreto similares al procedimiento modificado. En este contexto, la diferencia se encontraría en la cantidad de tandas a realizar, en el número de datos que se obtienen y en el tiempo necesario para su ejecución.



Conclusiones

Analizando los datos obtenidos a lo largo de la investigación se considera que, al igual que el procedimiento convencional usado en el laboratorio, el procedimiento modificado propuesto también permite obtener concretos con la resistencia a la compresión y la trabajabilidad requeridas.

Dentro del contexto de la investigación realizada se observa que, si bien ambos procedimientos permiten obtener diseños de mezcla normales, la principal diferencia se encontraría en que para el desarrollo del procedimiento modificado la cantidad de tandas a realizar y en el tiempo necesario para su ejecución es menor, sin embargo, la cantidad de datos que se obtienen es mayor.

Aunque el valor de slump es actualmente el más usado para evaluar la trabajabilidad de un concreto fresco. La experiencia de esta investigación valida el empleo de la relación agua/materiales secos (H%) como una medida de consistencia, la cual supone otra posibilidad de predecir el comportamiento del concreto en estado fresco.



Recomendaciones

La presente investigación aproximó la tendencia de la resistencia del concreto a una recta debido a la reducida cantidad de datos obtenidos. Por ello, se recomienda repetir este procedimiento varias veces, y así obtener una mayor cantidad de datos representativos que permitan simular el comportamiento del concreto con mayor exactitud.

Por temas económicos, las mezclas de comprobación de los diseños obtenidos se realizaron una sola vez, por lo que no se puede asegurar la confiabilidad de las gráficas en su totalidad, por eso se sugiere realizar nuevas comprobaciones para otros valores de resistencia y de slump, utilizando materiales similares.

Se ha evidenciado durante el desarrollo de esta investigación que el uso de probetas de $\phi 10 \times 20 \text{cm}$, en lugar de las probetas $\phi 15 \times 30 \text{cm}$, favorece la comodidad del técnico durante la elaboración de concreto. Por ello se sugiere motivar el uso de las probetas de menores dimensiones en las mezclas convencionales.

Para el desarrollo del programa experimental de esta investigación se utilizaron agregados típicos de la zona de Piura, sería interesante repetir el procedimiento empleando diversos tipos de agregados, ya sea de diferentes características físicas o de otras canteras locales.

Es importante recomendar que, previo a realizar tandas de concreto que pertenezcan a la parte experimental, es necesario elaborar mezclas de entrenamiento que permitan familiarizarse con los procedimientos y el uso de los equipos y herramientas, de esta forma se adquieren habilidades mínimas para la correcta realización de los ensayos.



Referencias bibliográficas

- ACI Committe 211. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). Farmington Hills, Michigan, USA.: American Concrete Institute.
- ACI COMMITTEE 211. (2008). Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials. Farmington Hills: ACI.
- ACI Committee 318. (2014). ACI 318-14 - Building Code Requirements for Structural Concrete . Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Araujo, Rodrigues, & Freitas. (2000). Materiais de construção. Río de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento . Rio de Janeiro: ABNT.
- BSI. (2002). BS EN 1008:2002 - Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. Londres: British Standards Institution.
- Cementos Pacasmayo S.A.A. (8 de Enero de 2019). PACASMAYO PROFESIONAL. Obtenido de <https://www.pacasmayoprofesional.com/soluciones?prod=2>
- Helene, P., & Terzian, P. (1993). Manual de Dosagem e Controle do Concreto. Sao Paulo: PINI LTDA.
- IBRACON. (2011). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Isaia G. C.
- INACAL. (2015). NTP 339.034:2015 - CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. 4ª Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2015). NTP 339.035:2015 - CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland. 4a. Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2015). NTP 339.037:2015 - CONCRETO. Práctica normalizada para el refrentado de testigos cilíndricos de concreto. 4ª Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.

- INACAL. (2016). NTP 339.216:2016 - CONCRETO. Práctica normalizada para la utilización de cabezales con almohadillas de neopreno en el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido (EQV. ASTM C1231/C1231M:2014). Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2016). NTP 400.017:2011 (revisada el 2016) - AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados. 3a. Edición (Basada ASTM C 29/C29M-2009). LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 334.090:2016 - CEMENTOS. Cemento Pórtland. Requisitos de desempeño. MODIFICACIÓN TÉCNICA 1. 1a Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 339.183:2013 - CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio. 2ª Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 339.184:2013 (revisada el 2018) - CONCRETO. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto. 2ª Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 339.185:2013 (revisada el 2018) - AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados porsecado. 2ª Edición. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 400.012:2013 (revisada el 2018) - AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. 3ª Edición. LIMA: INSTITUTO NACIONAL DE LA CALIDAD.
- INACAL. (2018). NTP 400.021:2013 (revisada el 2018) - AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. 3a Edición. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 400.022:2013 (revisada el 2018) - AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. 3a Edición. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL. (2018). NTP 400.037:2018 - AGREGADOS. Agregados para concreto. Requisitos. 4ª Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- INACAL. (2019). NTP 339.046:2019 - CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto. 3a Edición. Lima: Instituto Nacional de la Calidad.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI. (2006). Glosario básico de términos estadísticos. Lima: INEI.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1 de JUNIO de 2013). INEI. Obtenido de INEI: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1095/libro.pdf
- International Energy Agency IEA. (2016). Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, EEUU.: Portlan Cement Association.
- Lindquist, W., Darwin, D., Browning, J., McLeod, H. A., & Yuan, J. (2015). Implementation of concrete aggregate optimization. *Construction and Building Materials* 74, 49-56.
- Moini, M., Flores-Vivian, I., Amirjanov, A., & Sobolev, K. (2015). The optimization of aggregate blends for sustainable low cement. *Construction and Building Materials* 93, 627-634.
- National Ready Mixed Concrete Association NRMCA. (2012). Concrete CO2 Fact Sheet . Virginia: NRMCA.
- Neville, A. (2000). Water Cinderella Ingredient of Concrete. *Concrete International*, 66-71.
- Neville, A. M. (2013). *Tecnología del Concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2016). Trends in global CO2 emissions: 2016 Report. Bruselas: European Commission, Joint Research Centre.





Apéndices





Apéndice A - Diseños de mezcla ACI 211.1

DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1

Diseño para procedimiento LEMC - Relación a/c=0.50

Datos

f'c =	210	Kg/cm1	 ← Celdas que indican ingreso de datos
f'cr =	295	Kg/cm2	
TMN =	3/4"		
Slump =	1" a 2"	mm	
Aire =	no	Aire incorporado	
Tipo de cemento =	MS		
Peso unitario del cemento =	3150	Kg/m3	

Parámetros físicos de los agregados

	Ag. Fino	Ag. Grueso
MF	2.40	
TMN (pulg.)		3/4"
Peso unitario varillado seco(kg/m3)		1615.6
Peso específico (SSS)	2.563	2.765
Capacidad de absorción (%)	1.28	1.24
Humedad total (%)	0.33	0.35
Contenido de agua =	170	Kg/m3
% aire =	2	
w/c =	0.50	

	Ag. Grueso	Ag. Fino
CANTERA	Santa Cruz	Chulucanas
TMN	3/4"	-
Modulo de Fineza	-	2.4
PU suelto stock (kg/m3)	1505	1528
PU varillado stock (kg/m3)	1621	1668
PU varillado OD (kg/m3)	1616	1662
Peso específico (SSS)	2.765	2.563
Capacidad de Absorción	1.24%	1.28%
Humedad Total	0.35%	0.33%

Pesos de componentes

Volumen de agregado grueso (varillado seco) =	0.66	m3/m3
Cemento =	340.0	Kg/m3
	8.00	bis/m3
Ag. Grueso (OD) =	1066.3	Kg/m3
Ag. Fino (OD) =	788.61	Kg/m3

Volumen de componentes

V. de agua =	0.170	m3
V. cemento =	0.108	m3
V. aire =	0.02	m3
V. Ag. Grueso =	0.390	m3
V. Ag. Fino =	0.312	m3

Corrección debido a la humedad de los agregados

Cantidad de agua que da agregado grueso =	-9.49	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-7.49	Kg
	-16.98	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1070.1	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Fino =	791.2	Kg

Cantidades por m3 para mezcla de prueba:

Agua =	186.98	Kg/m3
Cemento =	340.0	Kg/m3
Ag. Grueso =	1070.1	Kg/m3
Ag. Fino =	791.2	Kg/m3

Peso unitario de la mezcla de prueba =	2388.26	Kg/m3
--	---------	-------

Corrección por slump

Slump de diseño =	20	mm
Slump encontrado en prueba =	0	mm
cantidad de agua adicional por m ³ =	19	Kg
Cantidad de agua en nueva mezcla =	189	Kg
Cemento =	378.00	Kg

Volumen de los componentes

V. de agua =	0.189	m ³
V. cemento =	0.120	m ³
V. aire =	0.020	m ³
V. de agregados =	0.671	m ³

Cantidad de agregados

Ag. Grueso =	1019.15	Kg
Ag. Fino =	753.72	Kg

Corrección debido a la absorción efectiva

Cantidad de agua que da el agregado grueso =	-9.07	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-7.16	Kg
	-16.23	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1022.7	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Fino =	756.2	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	205.23	Kg
Cemento =	378.00	Kg
Ag. Grueso =	1022.7	Kg
Ag. Fino =	756.2	Kg
Peso unitario de la mezcla de prueba =	2362.15	Kg/m ³

DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1

Diseño para procedimiento LEMC - Relación a/c=0.54

Datos

f'c =	210	Kg/cm ¹	← Celdas que indican ingreso de datos
f'cr =	295	Kg/cm ²	
TMN =	3/4"		
Slump =	1" a 2"	mm	
Aire =	no	Aire incorporado	
Tipo de cemento =	M5		
Peso unitario del cemento =	3150	Kg/m ³	

Parámetros físicos de los agregados

	Ag. Fino	Ag. Grueso
MF	2.40	
TMN (pulg.)	3/4"	
Peso unitario varillado seco(kg/m ³)		1615.6
Peso específico (SSS)	2.563	2.765
Capacidad de absorción (%)	1.28	1.24
Humedad total (%)	0.33	0.35
Contenido de agua =	170	Kg/m ³
% aire =	2	
w/c =	0.54	

	Ag. Grueso	Ag. Fino
CANTERA	Santa Cruz	Chulucanas
TMN	3/4"	-
Modulo de Fineza	-	2.4
PU suelto stock (kg/m ³)	1505	1528
PU varillado stock (kg/m ³)	1621	1668
PU varillado OD (kg/m ³)	1616	1662
Peso específico (SSS)	2.765	2.563
Capacidad de Absorción	1.24%	1.28%
Humedad Total	0.35%	0.33%

Pesos de componentes

Volumen de agregado grueso (varillado seco) =	0.66	m ³ /m ³
Cemento =	314.8	Kg/m ³
	7.41	bis/m ³
Ag. Grueso (OD) =	1066.3	Kg/m ³
Ag. Fino (OD) =	808.85	Kg/m ³

Volumen de componentes

V. de agua =	0.170	m ³
V. cemento =	0.100	m ³
V. aire =	0.02	m ³
V. Ag. Grueso =	0.390	m ³
V. Ag. Fino =	0.320	m ³

Corrección debido a la humedad de los agregados

Cantidad de agua que da agregado grueso =	-9.49	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-7.68	Kg
	-17.17	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1070.1	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	811.5	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	187.17	Kg/m ³
Cemento =	314.8	Kg/m ³
Ag. Grueso =	1070.1	Kg/m ³
Ag. Fino =	811.5	Kg/m ³

Peso unitario de la mezcla de prueba = 2383.56 Kg/m³

Corrección por slump

Slump de diseño =	20	mm
Slump encontrado en prueba =	0	mm
cantidad de agua adicional por m ³ =	19	Kg
Cantidad de agua en nueva mezcla =	189	Kg
Cemento =	350.00	Kg

Volumen de los componentes

V. de agua =	0.189	m ³
V. cemento =	0.111	m ³
V. aire =	0.020	m ³
V. de agregados =	0.680	m ³

Cantidad de agregados

Ag. Grueso =	1021.02	Kg
Ag. Fino =	774.48	Kg

Corrección debido a la absorción efectiva

Cantidad de agua que da el agregado grueso =	-9.09	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-7.36	Kg
	-16.44	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1024.6	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Fino =	777.0	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	205.44	Kg
Cemento =	350.00	Kg
Ag. Grueso =	1024.6	Kg
Ag. Fino =	777.0	Kg
Peso unitario de la mezcla de prueba =	2357.07	Kg/m ³

DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1

Diseño para procedimiento LEMC - Relación a/c=0.58

Datos

f'c =	210	Kg/cm ¹	← Celdas que indican ingreso de datos
f'cr =	295	Kg/cm ²	
TMN =	3/4"		
Slump =	1" a 2"	mm	
Aire =	no	Aire incorporado	
Tipo de cemento =	MS		
Peso unitario del cemento =	3150	Kg/m ³	

Parámetros físicos de los agregados

	Ag. Fino	Ag. Grueso
MF	2.40	
TMN (pulg.)		3/4"
Peso unitario varillado seco(kg/m ³)		1615.6
Peso específico (SSS)	2.563	2.765
Capacidad de absorción (%)	1.28	1.24
Humedad total (%)	0.33	0.35
Contenido de agua =	170	Kg/m ³
% aire =	2	
w/c =	0.58	

	Ag. Grueso	Ag. Fino
CANTERA	Santa Cruz	Chulucanas
TMN	3/4"	-
Modulo de Fineza	-	2.4
PU suelto stock (kg/m ³)	1505	1528
PU varillado stock (kg/m ³)	1621	1668
PU varillado OD (kg/m ³)	1616	1662
Peso específico (SSS)	2.765	2.563
Capacidad de Absorción	1.24%	1.28%
Humedad Total	0.35%	0.33%

Pesos de componentes

Volumen de agregado grueso (varillado seco) =	0.66	m ³ /m ³
Cemento =	293.1	Kg/m ³
	6.90	bis/m ³
Ag. Grueso (OD) =	1066.3	Kg/m ³
Ag. Fino (OD) =	826.29	Kg/m ³

Volumen de componentes

V. de agua =	0.170	m ³
V. cemento =	0.093	m ³
V. aire =	0.02	m ³
V. Ag. Grueso =	0.390	m ³
V. Ag. Fino =	0.327	m ³

Corrección debido a la humedad de los agregados

Cantidad de agua que da agregado grueso =	-9.49	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-7.85	Kg
	-17.34	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1070.1	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	829.0	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	187.34	Kg/m ³
Cemento =	293.1	Kg/m ³
Ag. Grueso =	1070.1	Kg/m ³
Ag. Fino =	829.0	Kg/m ³

Peso unitario de la mezcla de prueba =	2379.52	Kg/m ³
--	---------	-------------------

Corrección por slump

Slump de diseño =	20	mm
Slump encontrado en prueba =	0	mm
cantidad de agua adicional por m ³ =	19	Kg
Cantidad de agua en nueva mezcla =	189	Kg
Cemento =	325.86	Kg

Volumen de los componentes

V. de agua =	0.189	m ³
V. cemento =	0.103	m ³
V. aire =	0.020	m ³
V. de agregados =	0.688	m ³

Cantidad de agregados

Ag. Grueso =	1022.60	Kg
Ag. Fino =	792.41	Kg

Corrección debido a la absorción efectiva

Cantidad de agua que da el agregado grueso =	-9.10	Kg
Cantidad de agua que da el agregado grueso =	-7.53	Kg
	-16.63	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1026.2	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	795.0	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	205.63	Kg
Cemento =	325.86	Kg
Ag. Grueso =	1026.2	Kg
Ag. Fino =	795.0	Kg
Peso unitario de la mezcla de prueba =	2352.69	Kg/m ³

Apéndice B - Diseños de mezcla ACI 211.1 Procedimiento modificado

DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1

Diseño para procedimiento modificado - Relación a/c=0.45

Datos

TMN =	3/4"	 ← Celdas que indican ingreso de datos	
Slump =	1" a 2"		mm
Aire =	no		Aire incorporado
Tipo de cemento =			
Peso unitario del cemento =	3150		Kg/m ³

Parámetros físicos de los agregados

	Ag. Fino	Ag. Grueso
MF	2.40	
TMN (pulg.)		3/4"
Peso unitario varillado seco(kg/m ³)		1616.0
Peso específico (SSS)	2.563	2.765
Capacidad de absorción (%)	1.28	1.24
Humedad total (%)	0.37	0.35
Contenido de agua =	170	Kg/m ³
% aire =	2	
w/c =	0.45	

	Ag. Grueso	Ag. Fino
CANTERA	Santa Cruz	Chulucanas
TMN	3/4"	-
Modulo de Fineza	-	2.4
PU suelto stock (kg/m ³)	1505	1528
PU varillado stock (kg/m ³)	1621	1668
PU varillado OD (kg/m ³)	1616	1662
Peso específico (SSS)	2.765	2.563
Capacidad de Absorción	1.24%	1.28%
Humedad Total	0.35%	0.37%

Pesos de componentes

Volumen de agregado grueso (varillado seco) =	0.66	m ³ /m ³
Cemento =	377.8	Kg/m ³
	8.89	bls/m ³
Ag. Grueso (OD) =	1066.6	Kg/m ³
Ag. Fino (OD) =	758.05	Kg/m ³

Volumen de componentes

V. de agua =	0.170	m ³
V. cemento =	0.120	m ³
V. aire =	0.02	m ³
V. Ag. Grueso =	0.391	m ³
V. Ag. Fino =	0.300	m ³

Corrección debido a la humedad de los agregados

Cantidad de agua que da agregado grueso =	-9.49	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-6.87	Kg
	-16.36	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1070.3	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	760.9	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	186.36	Kg/m ³
Cemento =	377.8	Kg/m ³
Ag. Grueso =	1070.3	Kg/m ³
Ag. Fino =	760.9	Kg/m ³

Peso unitario de la mezcla de prueba =	2395.31	Kg/m ³
--	---------	-------------------

Corrección por slump

Slump de diseño =	20	mm
Slump encontrado en prueba =	0	mm
cantidad de agua adicional por m ³ =	6	Kg
Cantidad de agua en nueva mezcla =	176	Kg
Cemento =	391.11	Kg

Volumen de los componentes

V. de agua =	0.176	m ³
V. cemento =	0.124	m ³
V. aire =	0.020	m ³
V. de agregados =	0.680	m ³

Cantidad de agregados

		SSD	STOCK
Ag. Grueso =	1050.74	1063.77	1054.42
Ag. Fino =	746.81	756.37	749.60

Corrección debido a la absorción efectiva

Cantidad de agua que da el agregado grueso =	-9.35	Kg
Cantidad de agua que da el agregado fino =	-6.77	Kg
	-16.12	

Corrección debido al contenido de humedad total de los agregados

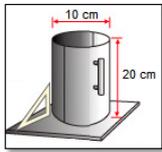
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Grueso =	1054.4	Kg
Cantidad en peso, en su estado natural de humedad, Ag. Fino =	749.6	Kg

Cantidades por m³ para mezcla de prueba:

Agua =	192.12	Kg
Cemento =	391.11	Kg
Ag. Grueso =	1054.4	Kg
Ag. Fino =	749.6	Kg
Peso unitario de la mezcla de prueba =	2387.25	Kg/m ³

Apéndice C - Cálculo de cantidades de agua por añadir para cambio de diseños.

EXPERIMENTO PARA PROBETAS DE 10X20CM



PROBETAS	
Diametro	10 cm
Altura	20 cm
Volumen	0.00157 m ³

PESO UNITARIO	
Capacidad	7.035 litros
Volumen	0.0000 m ³
W molde	3.6080 kg

N° Probetas 7 días	3
N° Probetas 28 días	3
Total de probetas	6

por diseño

24 probetas = 0.0376992 m³

Tenemos 0.04 m³

$$m = a + p$$

$$H = \frac{a/c}{1 + m}$$

a/c : Relación agua cemento en masa (kg/kg)
 a = relación agregado fino seco / cemento en masa (kg/kg)
 p = relación agregado grueso seco / cemento en masa (kg/kg)
 m = relación agregados secos / cemento en masa (kg/kg)
 H = Relación agua / materiales secos : 5% < H < 12%
 debe ser constante para asegurar el mismo slump (kg/kg)

Diseño final = 1 : a : p (en masa kg/kg)

PRIMERA RELACIÓN $a/c = 0.45$

Proporciones en mezcla

Agua = 7.68 kg
 Cemento = 15.64 kg
 Ag. Grueso = 42.18 kg
 Ag. Fino = 29.98 kg

Proporción		
c	a.fino	a.grueso
1	1.91	2.69

Resultados	
a/c	0.45
Slump	- mm
H	8.04%
Consumo	387.7

	SSS multiplicado por		
	Diseño en mezcladora	0.0400	
Agua =	176.00	7.04	7.04
Cemento =	391.11	15.64	
Ag. Grueso =	1063.77	42.55	
Ag. Fino =	756.37	30.25	
	2387.25		

Vol. probetas 0.00942 m³
 Vol. de PU 0.00000 m³

Restan 0.03058 m³

Restan

Agua = 5.87 kg
 Cemento = 11.96 kg
 Ag. Grueso = 32.24 kg
 Ag. Fino = 22.92 kg

Agua para corrección
 0.4783 litros

agua real 7.040
 a/c real 0.45

Tenemos 0.0311 m³

SEGUNDA RELACIÓN $a/c = 0.49$

Proporciones en mezcla

Agua = 6.35 kg
 Cemento = 11.96 kg
 Ag. Grueso = 32.24 kg
 Ag. Fino = 22.92 kg

Proporción		
c	a.fino	a.grueso
1	1.91	2.69

Resultados	
a/c	0.4900
Slump	- mm
H	8.76%
Consumo	381.7

	SSS multiplicado por			
	Diseño en mezcladora	0.0306		
Agua =	176.00	5.38	5.86	0.478
Cemento =	391.11	11.96		
Ag. Grueso =	1063.77	32.53		
Ag. Fino =	756.37	23.13		
		a/c deseada	0.49	

Vol. probetas 0.00942 m³
 Vol. de PU 0.00000 m³

Restan 0.0216 m³

Restan

Agua = 4.42 kg
 Cemento = 8.33 kg
 Ag. Grueso = 22.45 kg
 Ag. Fino = 15.96 kg

Agua para corrección
 0.333 litros

agua real 5.860
 a/c real 0.49

Tenemos 0.022 m³

TERCERA RELACIÓN $a/c = 0.53$

Proporciones en mezcla

Agua = 4.76 kg
 Cemento = 8.33 kg
 Ag. Grueso = 22.45 kg
 Ag. Fino = 15.96 kg

Proporción		
c	a.fino	a.grueso
1	1.91	2.69

Resultados	
a/c	0.5300
Slump	- mm
H	9.47%
Consumo	367.6

	SSS multiplicado por			
	Diseño en mezcladora	0.0216		
Agua =	188.69	4.08	4.41	0.3332
Cemento =	385.09	8.33		
Ag. Grueso =	1047.39	22.65		
Ag. Fino =	744.71	16.11		
		a/c deseada	0.53	

Vol. probetas 0.00942 m³
 Vol. de PU 0.00000 m³

Restan 0.0125 m³

Restan

Agua = 2.72 kg
 Cemento = 4.75 kg
 Ag. Grueso = 12.82 kg
 Ag. Fino = 9.11 kg

Agua para corrección
 0.143 litros

agua real 4.414
 a/c real 0.53

Tenemos 0.0127 m³

CUARTA RELACIÓN a/c = 0.56

Proporciones en mezcla

Agua = 2.86 kg
 Cemento = 4.75 kg
 Ag. Grueso = 12.82 kg
 Ag. Fino = 9.11 kg

Proporción		
c	a.fino	a.grueso
1	1.91	2.69

Resultados	
a/c	0.560
Slump	- mm
H	10.01%
Consumo	358.9

SSS multiplicado por

	Diseño en mezcladora	0.0125		
Agua =	201.00	2.52	2.66	0.1426
Cemento =	379.24	4.75		
Ag. Grueso =	1031.50	12.93		
Ag. Fino =	733.42	9.19		

a/c deseada 0.56

agua real 2.663
 a/c real 0.56

Vol. probetas 0.00942 m³
 Vol. de PU 0.00000 m³

Restan

Restan 0.0033 m³

Sobran 3.25 litros

Agua = 0.73 kg
 Cemento = 1.22 kg
 Ag. Grueso = 3.29 kg
 Ag. Fino = 2.34 kg



Apéndice D - Resultados individuales de ensayos a compresión.

- Resultados tanda de diseño para procedimiento LEMC

		EDAD: 7 DIAS					
		0.5		0.54		0.58	
DIAMETRO PROM	cm	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
RADIO	cm	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
AREA	cm ²	181.46	181.46	181.46	181.46	181.46	181.46
CARGA	kg.f	30779	29906	29595	28555	21827	20881
Resistencia	kg/cm ²	169.6	164.8	163.1	157.4	120.3	115.1
		167.2		160.2		117.7	

		EDAD: 28 DIAS					
		0.5		0.54		0.58	
DIAMETRO PROM	cm	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
RADIO	cm	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
AREA	cm ²	181.46	181.46	181.46	181.46	181.46	181.46
CARGA	kg.f	44413	44109	42055	41814	33649	34644
Resistencia	kg/cm ²	244.8	243.1	231.8	230.4	185.4	190.9
		243.9		231.1		188.2	

- Resultados tanda de diseño para procedimiento modificado

		EDAD: 7 DIAS											
		0.45			0.49			0.53			0.56		
DIAMETRO PROM	cm	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10
RADIO	cm	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
AREA	cm ²	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12
CARGA	kg.f	16179	16184	16227	15578	15173	15790	14918	15230	15527	13915	14352	13490
Resistencia	kg/cm ²	201.9	202.0	202.5	194.4	189.4	197.1	186.2	190.1	193.8	173.7	179.1	168.4
		202.2			193.6			190.0			173.7		

		EDAD: 28 DIAS											
		0.45			0.49			0.53			0.56		
DIAMETRO PROM	cm	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10
RADIO	cm	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
AREA	cm ²	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12
CARGA	kg.f	21527	22891	22134	19364	22600	22166	19861	21251	19867	18834	19454	17809
Resistencia	kg/cm ²	268.7	285.7	276.3	241.7	282.1	276.7	247.9	265.2	248.0	235.1	242.8	222.3
		276.9			266.8			253.7			233.4		

- Resultados tanda de verificación para procedimiento LEMC

		EDAD: 7 DIAS		EDAD: 28 DIAS	
		7 días		28 días	
DIAMETRO PROM	cm	15.20	15.20	15.20	15.20
RADIO	cm	7.60	7.60	7.60	7.60
AREA	cm ²	181.46	181.46	181.46	181.46
CARGA	kg.f	40353	41430	51711	53598
Resistencia	kg/cm ²	222.4	228.3	285.0	295.4
		225		290	

- Resultados tanda de verificación para procedimiento modificado

		EDAD: 7 DIAS			EDAD: 28 DIAS		
		7 días			28 días		
DIAMETRO PROM	cm	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10
RADIO	cm	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
AREA	cm ²	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12	80.12
CARGA	kg.f	20752	20809	19490	20851	23511	20461
Resistencia	kg/cm ²	259	260	243	260	293	255
		254			270		

