

74  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN  
MÉXICO, D.F.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
I N G E N I E R O C I V I L -  
P R E S E N T A:  
R O D O L F O P E Ñ A R O J A S -

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-197/95

Señor  
**RODOLFO PEÑA ROJAS**  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. ALVARO ORTIZ FERNANDEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

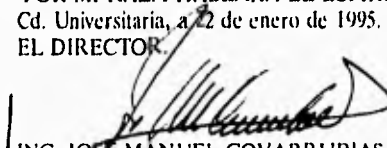
**"CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO"**

- INTRODUCCION**
- I. GENERALIDADES**
  - II. USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**
  - III. DISEÑO DE MEZCLAS PARA CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**
  - IV. COMPACTACION DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**
  - V. ESPECIFICACIONES Y CONTROL DE CALIDAD**
  - VI. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria, a 22 de enero de 1995.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

JMCS/GMP\*nl

**A MI MADRE :**

**ALGO TAN IMPORTANTE  
COMO DIFÍCIL DE AGRADECER,  
EXISTE EL DESEO DE EXPRESARLO,  
PERO ES ALGO TAN LEJOS DE VALORAR,  
COMO SI PARECIERA QUE TODO  
QUE CUALQUIER UNIVERSO FUESE POCO.  
ALGO TAN VALIOSO COMO SENCILLO  
Y QUE AHORA TE PERTENECE,  
GRAN PARTE DE ESTA VERDAD ES TUYA.  
G R A C I A S  
POR TENERME PACIENCIA  
POR CONFIAR EN MÍ  
POR QUERERME  
POR TODO Y MÁS QUE TODO.  
ESTARÁS EN MI CORAZÓN HASTA  
EL FIN DEL TIEMPO  
Y UN POCO MÁS.**

**A MI PADRE :**

**CREO QUE LAS PALABRAS  
SALEN SOBRANDO,  
NO HAY NADA O CON QUÉ  
PODER AGRADECER,  
SÓLO ESTE SENCILLO HOMENAJE**

**A TODO LO QUE  
REALMENTE TE DEBO**

**GRACIAS.....**

***A MIS HERMANOS :***

***CUÁNTAS EXPERIENCIAS VIVIDAS,  
CUÁNTOS CAMINOS RECORRIDOS,  
MOMENTOS DE ALEGRÍA, DE NOSTALGIA  
TAL VEZ DE TRISTEZA,  
SON PARTE DE MÍ MISMO . . . . .***

***POR TODO EL APOYO  
QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO  
POR SUS CONSEJOS  
POR SU AMISTAD  
POR SABER ESPERAR  
G R A C I A S . . . . .***

**A MIS HERMANAS :**

**NUNCA NADIE PUEDE  
ESTAR MÁS AGRADECIDO  
CON USTEDES QUE YO,  
LES DEBO ALGO MÁS  
QUE EL VER UN SUEÑO CUMPLIDO,  
COMO PAGAR ALGO  
QUE NO TIENE PRECIO.  
  
QUE TODO LO BUENO  
ESTE HOY Y SIEMPRE CON USTEDES.  
  
G R A C I A S . . . . .**

**AL ING. ÁLVARO ORTÍZ FERNÁNDEZ**

*Dichoso el que halla sabiduría,  
el que obtiene inteligencia;  
porque son más provechosas que  
la plata . . . . .*

*Proverbios 2.13*

**POR EL INTERÉS PUESTO PARA**

**LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO,**

**POR SU PACIENCIA,**

**POR EL TIEMPO TAN VALIOSO**

**DEDICADO A LA REVISIÓN DEL MISMO,**

**MI MÁS SINCERO AGRADECIMIENTO . . . . .**



**BONITA :**

*Nunca dejes de mirar al cielo  
y encontrarás tu estrella . . . . .*

**UNA VERDAD QUE HA SURGIDO**

**DEL CONCEBIR DE LA VIDA**

**Y QUE PARARA EN NO SE QUÉ.**

**PALABRAS QUE HAN CONSOLADO**

**MI MUNDO**

**MUJER QUE HA ENTENDIDO**

**MI EXISTENCIA**

**GRACIAS . . . . .**

***A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO***

***A LA FACULTAD DE INGENIERÍA***

***POR SER PARTE INTEGRAL***

***EN LA CONSTRUCCIÓN DEL FUTURO DE MEXICO . . . . .***

***A MIS AMIGOS :***

***Lo que más se necesita  
para aprender es un  
espíritu humilde . . . . .  
Confucio***

***ALGO TAN VALIOSO COMO***

***SU AMISTAD NO SE VALORA,***

***GRACIAS . . . . .***

**LA IMAGINACIÓN ES MÁS IMPORTANTE QUE EL CONOCIMIENTO,  
PUESTO QUE EL CONOCIMIENTO ES LIMITADO,  
MIENTRAS QUE LA IMAGINACIÓN ABARCA EL UNIVERSO ENTERO. . .**

**ALBERT EINSTEIN**

**EL INTELIGENTE NO HACE  
ALARDE DE SU SABER,  
PERO EL NECIO HACE GALA  
DE SU ESTUPIDEZ . . . . .**

**PROVERBIOS 12.23**

**YO NO ESTIMO TESOROS NI RIQUEZAS;  
Y ASÍ, SIEMPRE ME CAUSA MÁS CONTENTO  
PONER RIQUEZAS EN MI ENTENDIMIENTO  
QUE NO MI ENTENDIMIENTO EN LAS RIQUEZAS. . . . .**

**SOR JUANA INÉS DE LA CRUZ.**

## **INDICE**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
---------------------------	----------

### **CAPITULO I**

#### **GENERALIDADES**

<b>1.1.- EL CONCRETO COMO MATERIAL .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.- DIFERENTES CLASES DE CONCRETO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3.- DEFINICIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO ...</b>	<b>13</b>
<b>1.4.- DESARROLLO HISTÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5.- PROPIEDADES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN ESTADO FRESCO Y EN ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5.1.- PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5.2.- PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>23</b>
<b>1.6.- COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO .....</b>	<b>29</b>
<b>1.7.- COMPARACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO CON OTROS TIPOS DE CONCRETO .....</b>	<b>33</b>

## **CAPITULO II**

### **USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

#### **II.1.- USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

**EN PRESAS ..... 37**

#### **II.2.- USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

**EN PAVIMENTOS ..... 42**

#### **II.3.- COMPARACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO**

**CON RODILLO EN PRESAS Y CONCRETO COMPACTADO**

**CON RODILLO EN PAVIMENTOS ..... 46**

#### **II.4.- APLICACIONES DIVERSAS DEL CONCRETO COMPACTADO**

**CON RODILLO ..... 49**

#### **II.5.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO**

**COMPACTADO CON RODILLO ..... 51**

##### **II.5.1.- VENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO COMPACTADO**

**CON RODILLO ..... 51**

##### **II.5.2.- DESVENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO COMPACTADO**

**CON RODILLO ..... 54**

## **CAPITULO III**

<b>DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO .....</b>	<b>56</b>
---	-----------

<b>III.1.- DISEÑO UTILIZANDO PRUEBAS DE COMPACTACIÓN</b>	
<b>DE SUELOS .....</b>	<b>58</b>
<b>III.1.1.- DISEÑO POR LA EVALUACIÓN EN BASE A LA</b>	
<b>CONSISTENCIA DE LA MEZCLA .....</b>	<b>60</b>
<b>III.2.- MATERIALES .....</b>	<b>62</b>
<b>III.2.1.- AGREGADOS .....</b>	<b>62</b>
<b>III.2.2.- CEMENTO .....</b>	<b>66</b>
<b>III.2.3.- AGUA .....</b>	<b>67</b>
<b>III.3.- PRODUCCIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO</b>	
<b>CON RODILLO .....</b>	<b>68</b>
<b>III.4.- RELACION AGUA/CEMENTO .....</b>	<b>70</b>
<b>III.5.- ADITIVOS .....</b>	<b>72</b>
<b>III.6.- EQUIPO DE MEZCLADO .....</b>	<b>73</b>
<b>III.6.1.- MEZCLADO EN PLANTAS PORTATILES .....</b>	<b>73</b>
<b>III.6.2.- MEZCLADO EN PLANTAS DE BACHA</b>	
<b>CONVENCIONALES .....</b>	<b>74</b>
<b>III.6.3.- TAMBORES Y CAMIONES MEZCLADORES .....</b>	<b>75</b>

## **C A P I T U L O   I V**

### **COMPACTACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

<b>IV.1.- TRANSPORTE .....</b>	<b>76</b>
<b>IV.2.- COLOCACIÓN .....</b>	<b>80</b>
<b>IV.2.1.- EQUIPOS .....</b>	<b>81</b>
<b>IV.3.- DEFINICIÓN DE COMPACTACIÓN .....</b>	<b>82</b>
<b>IV.4.- EQUIPO DE COMPACTACIÓN .....</b>	<b>85</b>
<b>IV.5.- ESPESOR DE LAS CAPAS A COMPACTAR .....</b>	<b>87</b>
<b>IV.6.- SECUENCIA DE COMPACTACIÓN .....</b>	<b>89</b>
<b>IV.6.1.- JUNTAS .....</b>	<b>92</b>
<b>IV.7.- TIEMPO DE COMPACTACIÓN .....</b>	<b>96</b>
<b>IV.8.- CURADO .....</b>	<b>97</b>
<b>IV.9.- TEXTURA FINAL .....</b>	<b>99</b>

## **C A P I T U L O   V**

<b>ESPECIFICACIONES Y CONTROL DE CALIDAD .....</b>	<b>101</b>
<b>V.1.- PRUEBAS DE CAMPO .....</b>	<b>103</b>
<b>V.2.- PRUEBAS DE LABORATORIO .....</b>	<b>106</b>
<b>V.3.- EXPERIENCIAS .....</b>	<b>108</b>

**CAPITULO VI**

**CONCLUSIONES ..... 110**

**BIBLIOGRAFÍA ..... 114**



## INTRODUCCIÓN

Con la continua evolución de los sistemas usados en la construcción, y los cambios que se han venido generando, la técnica del concreto compactado con rodillo tanto en presas como en pavimentos ha tenido un crecimiento amplio, esto lleva consigo un mejoramiento de las técnicas de diseño, construcción, control de calidad y control de costos.

La reducción de los tiempos de ejecución así como los costos de construcción, y la posibilidad de apertura inmediata, son las ventajas quizás más importantes que presenta el concreto compactado con rodillo sobre de otros materiales.

La posibilidad de emplear el concreto compactado con rodillo en otras aplicaciones diferentes a las convencionales (presas y pavimentos), han hecho que esta técnica empiece a ser utilizada en patios de maniobras de muelles, plataformas de aeropuertos, caminos de transporte pesado, etc., con registros de un adecuado comportamiento.

El concreto compactado con rodillo requiere de atención especial en cuanto a las características propias del material, en cuanto a su producción, a la colocación, a la compactación y en general en las propiedades de comportamiento como una técnica de construcción "relativamente nueva".

Por lo tanto, se expondrán en este trabajo una descripción general del concreto compactado con rodillo, las formas de diseño, compactación, se mencionarán las ventajas de su uso así como la forma de obtener un adecuado control de calidad.

Para lograr tales objetivos, en el capítulo I se mencionarán en términos generales el desarrollo histórico que como técnica de construcción ha tenido el concreto compactado con rodillo, se hace referencia a las propiedades que presenta el material tanto en estado fresco como en estado endurecido, asimismo se presenta una breve comparación entre el concreto compactado con rodillo y otros tipos de concretos que son utilizados para la construcción de obras de ingeniería, además de referirse al comportamiento que presenta el concreto compactado con rodillo.

En el capítulo II se hará una referencia hacia las ventajas y desventajas al utilizar el concreto compactado con rodillo, además se explicarán los diversos usos que se le pueden dar al material tanto en presas como en pavimentos, así como las aplicaciones que se han generado al acumular experiencias al utilizar esta tecnología.

En el capítulo III se comentarán los diferentes métodos para diseñar las mezclas de concreto compactado con rodillo, haciendo hincapié en los materiales a utilizar tales como: agregados, agua y cemento. Se hará una descripción de los equipos de mezclado la forma de producción y el uso de aditivos

En el capítulo IV se analiza la forma correcta de colocar el concreto compactado, después de mezclado éste, se definen los equipos de transporte, así como la manera de lograr una adecuada compactación, mencionándose para ello una secuencia de compactación no olvidando tanto el equipo como el tiempo de compactación.

También se hará hincapié en la forma de obtener un adecuado curado y como manejar la textura final del concreto.

En cuanto al capítulo V se tiene el como lograr y llevar a cabo un adecuado control de calidad, el cual será de suma importancia para lograr el objetivo deseado en cualquier obra construida con concreto compactado con rodillo.

Para ello se presentan una serie de controles que se deben de llevar a cabo tanto en campo como en laboratorio.

Así, finalmente en el capítulo VI se expondrán las conclusiones generadas al estudiar al concreto compactado con rodillo, que es el objetivo general de la realización de este trabajo.

## **I.- GENERALIDADES.**

### **I.1.- EL CONCRETO COMO MATERIAL.**

El concreto como material de construcción presenta grandes ventajas que lo hacen distinguirse de entre otros materiales como lo son la madera y el acero, esto debido a las diversas propiedades que le han permitido un sinnúmero de aplicaciones; la posibilidad de producir utilizando materiales de amplia difusión en cualquier país, la facilidad de conferirle cualquier forma debido a su plasticidad, la posibilidad de prever y adaptar sus características a cualquier tipo de obra, la posibilidad de construcción utilizando recursos simples o complejos según la naturaleza de la obra, la durabilidad y resistencia a todo tipo de medio ambiente, son quizás las propiedades más importantes que le han significado el reconocimiento como la materia prima más utilizada en el campo de la Ingeniería Civil. De esta forma, y gracias a innumerables estudios, se ha llegado a tener mejores conocimientos sobre las características y nuevas aplicaciones que como material de construcción nos ofrece el concreto, así sin olvidar las normas básicas para la correcta elección y dosificación de los elementos que integran al concreto, y eligiendo las unidades más apropiadas para el mezclado, transporte y colocación del mismo, es decir, dependiendo del control de calidad que se tenga sobre el material, estaremos en condiciones de producir un adecuado concreto, el cual se manifestará en una estructura sana y estable bajo cualquier condición de trabajo.

Las condiciones a las que llega a trabajar el concreto, permiten establecer las razones del uso tan difundido que ha alcanzado como material de construcción y que han hecho del mismo un material ampliamente utilizado en la construcción de obras de ingeniería de muy diversa naturaleza.

El concreto es un material artificial que consiste esencialmente de elementos como lo son el cemento, el agua, agregados pétreos ( grava y arena ) y aditivos, siendo este último elemento opcional. También puede contener cierta cantidad de aire atrapado y de aire incluido intencionalmente, obtenido este mediante el empleo de un aditivo o de un cemento inductor de aire.

Los elementos que componen el concreto se dividen en dos grupos: activos e inertes.

**SON ELEMENTOS ACTIVOS :** el agua y el cemento, los cuales al entrar en contacto inician una reacción química llamada hidratación, en la cual se genera cierta cantidad de calor.

**CEMENTO:** Es un material que tiene la capacidad de unir fragmentos minerales para formar una unidad compacta y resistente, esto debido a las propiedades tanto adhesivas como cohesivas que tiene el cemento como material de construcción, pudiendo citar que los componentes que lo forman son :

Aluminato Tricálcico  
Silicato Tricálcico  
Silicato Dicálcico  
Ferroaluminato Tricálcico

En México se fabrican cinco clases o tipos de cemento de acuerdo con la norma NMX-C-1-1980.

TIPO I : Normal, destinado a usos generales de estructuras, pavimentos, bloques, tubos, etc.

TIPO II : Modificado, adecuado en general para obras hidráulicas, por su calor de hidratación moderado y su regular resistencia a los sulfatos.

TIPO III : Rápida Resistencia, recomendado para usarse en obras de emergencia o en obras en las que se requiere ganar elevadas resistencias a tempranas edades.

TIPO IV : De Bajo Calor, adecuado para la construcción de concreto en masa, ya que su calor de hidratación es muy reducido.

TIPO V : De Alta Resistencia a los Sulfatos, usado en los casos en los que se requiere de grandes resistencias a los sulfatos.

En México se producen también los siguientes tipo de cemento:

**TIPO IP :** Este tipo de cemento se constituye de una mezcla de cemento portland y puzolana muy fina en la que el contenido de la puzolana oscila entre el 20% y 40% del peso total del cemento, presenta una resistencia moderada a la acción de los sulfatos, así como un calor de hidratación moderado.

**TIPO IS :** Consiste en una mezcla uniforme de cemento portland y escorias finas de altos hornos, las escorias constituyen entre el 25% y 70% del peso de la mezcla.

Es un cemento de bajo calor de hidratación y de gran resistencia al ataque de aguas agresivas.

**CEMENTO BLANCO :** Es un cemento de características semejantes al TIPO I, su color es debido a la carencia de Hierro, es usado cuando lo demandan razones arquitectónicas.

**CEMENTO DE ALBAÑILERÍA :** Se deriva de la mezcla de calizas, clinker y yeso, en ocasiones de ciertos materiales puzolánicos, su tiempo de fraguado es menor y se logran mayores resistencias que con un mortero elaborado con cualquier otro tipo de cemento.

**AGUA :** Este elemento bien conocido por todos juega un papel importante para la fabricación de concreto, puesto que esta tiene como

funciones primordiales darle a la mezcla una consistencia y homogeneidad adecuadas, asimismo nos producirá la hidratación del cemento con la cual se obtienen las características particulares del concreto como los son la resistencia, impermeabilidad, durabilidad, etc.

LOS ELEMENTOS INERTES ( AGREGADOS ) : son materiales granulares como la grava, la arena, piedra triturada o escoria de altos hornos, cuyo papel fundamental es formar el "esqueleto" del concreto, ocupando gran parte del producto final.

Las proporciones en que se mezclan los distintos componentes varían de acuerdo con la granulometría de los agregados y con la Resistencia final deseada.

ADITIVOS : Los aditivos pueden generar grandes beneficios si su uso es el adecuado, pues estos en general los empleamos para acelerar o retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, reducir la cantidad de agua requerida en la mezcla, incrementar la resistencia o alterar otras propiedades del concreto.

No obstante, el hacer un mal empleo de los aditivos nos produce como consecuencia, el alterar las características de un concreto contrario a lo deseado.



## **CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO**

**RESISTENCIA** : Es una característica importante del concreto, pues nos indica la capacidad que tiene un concreto para soportar esfuerzos de tensión o compresión, siendo las fuerzas de compresión las que más resiste.

**IMPERMEABILIDAD** : Se refiere a la oposición que presenta el concreto al paso de un fluido a través de si mismo.

**DENSIDAD** : Esta característica se vincula a la granulometría y peso de los agregados usados.

**DURABILIDAD** : Es el período de vida en el cual el concreto trabaja bajo ciertas condiciones ambientales.

**CONSISTENCIA** : Es la humedad de la mezcla de concreto, se mide en términos de revenimiento, es decir cuando más elevado sea el revenimiento, más agua contiene la mezcla.

**ELASTICIDAD** : Es la capacidad de deformación que tiene el concreto cuando este se somete a un cierto esfuerzo.

## **I.2.- DIFERENTES CLASES DE CONCRETO**

Para la fabricación del concreto podemos hacer uso de diferentes clases de materiales; obteniendo así diversos tipos de concreto con características muy diversas de acuerdo a nuestros requerimientos y a las condiciones de trabajo.

Entre esos tipos de concreto podemos mencionar los siguientes:

**CONCRETO CONVENCIONAL:** Podemos llamar concreto convencional a aquel que esta constituido de agregados pétreos y de un a pasta de agua y cemento, eventualmente contiene una proporción de aire y aditivos, su peso es aproximadamente de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

**CONCRETO LIGERO :** Se denomina concreto ligero a aquel que posee una densidad inferior a 1900 kg/m<sup>3</sup>. Este tipo de concreto tiene un amplio campo de uso en los casos en que se desea obtener aislación térmica y secuencialmente acústica y también para rebajar el peso muerto actuante sobre los elementos estructurales resistentes.

Tiene como principal limitación su baja resistencia y su alta contracción, aspectos que deben ser debidamente considerados al contemplar su uso.

**CONCRETO PESADO** : Son concretos que tienen una densidad superior a  $3200 \text{ kg/m}^3$ , la cual es mucho mayor que la de un concreto convencional.

Este tipo de concreto ha alcanzado un amplio uso como protección contra las radiaciones producidas en las plantas en base a energía nuclear.

La obtención de este tipo de concreto queda condicionada al empleo de agregados de alto peso específico, para lo cual se les obtiene normalmente de rocas mineralizadas ( Barita, Magnetita y Limonita ) o bien, aunque con menor frecuencia, se recurre a agregados constituidos por trozos metálicos.

**CONCRETO LANZADO** : El concreto lanzado queda sometido a los mismos conceptos generales que se han aplicado para el concreto convencional, sin embargo, el proceso para su colocación le confiere ciertas características particulares que deben tenerse en consideración para su adecuado empleo.

La colocación del concreto lanzado se realiza mediante un sistema de disparo contra la superficie que se desea cubrir.

Este tipo de concreto se ha adaptado a la construcción de secciones delgadas y ligeramente reforzadas, así como a la reparación de sobrecapas muy delgadas.

**CONCRETO ARQUITECTÓNICO** : Es un concreto convencional con la diferencia que se manejan una amplia variedad de colores, texturas y acabados, al hablar de concretos arquitectónicos, no sólo se trata de referir a la forma, sino también a la apariencia. Un concreto aparente puede o no tener una función estructural, pero cualquiera que sea la función, hay que tomar en cuenta que el concreto va a quedar expuesto directamente a los agentes externos, por lo cual el este debe cumplir con las normas que rigen la calidad del concreto.

### **I.3.- DEFINICIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

La industria de la construcción afectada por el difícil panorama económico que cursa el país, ha investigado e implantado nuevos sistemas y procedimientos constructivos que permiten la ejecución de grandes obras de una manera eficaz, segura y económica. Sin que se vean disminuidas con ello las características mínimas de calidad solicitadas.

Dado lo anterior una de las técnicas que empieza a tener éxito es el llamado CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO ( CCR ).

EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO ( CCR ), se define como la mezcla integrada con agregados gruesos, agregados finos, cemento y agua, en la cual se tiene un revenimiento igual a cero, presenta un bajo contenido de cemento, debido a su consistencia rígida, se puede someter a compactación con equipo vibratorio en capas del orden de 15 centímetros. Para su consolidación efectiva debe ser lo suficientemente seco como para soportar el peso del equipo vibratorio, pero a su vez con la humedad adecuada para permitir la correcta distribución de la pasta cementante en toda su masa durante las etapas de mezcla y vibración. Al endurecer, adquiere aspecto y propiedades físicas semejantes a las del concreto convencional.

El utilizar este tipo de concreto puede proporcionar un ahorro significativo en tiempo y costo de construcción, cuando se le compara con el concreto convencional. La relación agua/cemento que se obtiene para

este tipo de concreto es generalmente entre el orden de 0.30-0.40

Dependiendo del tipo de obra, el concreto compactado con rodillo proporcionará diferentes ventajas, entre las que podemos mencionar: el empleo de agregados locales, mínimo consumo de cemento, no se requiere cimbra, no se utiliza acero de refuerzo ni pasajuntas, no se requieren juntas de expansión o contracción, se requieren pequeñas cuadrillas de obra de mano, se utiliza el equipo convencional para movimiento de tierras, se tiene un programa de construcción corto.

La técnica del concreto compactado con rodillo por sus ventajas constructivas y sus menores costos respecto al concreto convencional, está llamada a convertirse en una solución de uso generalizado. Además, tiene a su favor una combinación de ventajas que hacen que su introducción en el medio sea relativamente fácil.

#### **I.4.- DESARROLLO HISTÓRICO**

La idea de compactar concreto con rodillos, surgió lentamente al ir acumulando experiencias con la construcción de base tratadas con cemento, tales como el suelo-cemento y las bases de concreto pobre. El concreto compactado con rodillo, ha sido el resultado de grandes esfuerzos en la búsqueda de reducir los tiempos y costos de construcción.

Probablemente el concreto compactado con rodillo pudo haber tenido su origen en el otoño de 1923, en el camino de Sheridan, en Chicago, Estados Unidos, donde se construyó una losa de concreto de 17 a 20 centímetros de espesor, construida en ese entonces con una técnica conocida como pavimento de concreto comprimido "Armorplated". Dicho método de construcción se definía de la siguiente manera:

"El pavimento de concreto comprimido Armorplated se construye bajo un proceso mejorado que se deriva del método vibrolítico de comprimir el aire y el exceso de agua de un concreto plástico, utilizando la combinación de fuerzas de vibración y presiones aplicadas simultáneamente, con lo cual se obtiene una losa con la relación agua/cemento lo más baja posible, produciendo con esto un pavimento de resistencia y densidad máxima."

La densidad y resistencia se lograba incrustando una cantidad específica de pedazos de roca triturada, por medio de una plataforma de madera con hule, sobre la cual circulaban rodillos vibratorios. Lo anterior, que se puede considerar como un gran adelanto en la tecnología de

pavimentos quedó relativamente olvidado por algunos años.

Algunos reportes nos indican que al terminar los años cincuentas, el uso de concretos pobres y bases estabilizadas empezaron a declinar posiblemente a dos razones:

1.- El desarrollo de la pavimentadora deslizable para concreto.

2.- El uso extensivo de materiales asfálticos para la construcción de caminos.

En los años setentas empieza un nuevo auge en la utilización de concreto compactado con rodillo, en el año de 1970 fue dictada una conferencia por Jerome M. Raphael, en dicha conferencia titulada "La presa de gravedad óptima" se hacía énfasis de la importancia de mejorar la calidad de los materiales de relleno para disminuir las secciones de la presa.

En el año de 1974 se utilizó un concreto hecho con grava de banco en bruto ( sin cribar ni lavar ) y muy poco cemento, colado en forma continua mediante métodos de terraplén, durante la construcción de la presa Tarbela, Pakistán, en un colado de 400,000 metros cúbicos.

Entre los años de 1978 y 1980, el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos utilizó el concreto compactado con rodillo en la construcción de un canal fluvial en el proyecto del río Cherna en Alaska



y en la casa de máquinas de la presa Bonneville en Washington.

En el año de 1975 fue emitida una especificación general de construcción para concreto compactado con rodillo por parte de la autoridad del Valle de Tennessee, esta especificación controlaba la producción y el colado del concreto sin revenimiento, mediante métodos de construcción relacionados normalmente con la colocación de enrocamientos compactados con rodillo.

Durante el transcurso del año de 1976 fueron realizados diversos trabajos con el concreto compactado en Columbia Británica, Canadá, obteniéndose excelentes resultados al utilizarse en patios de contenedores de muelles, patios de selección de troncos de árbol y en pavimentos de uso pesado en áreas de estacionamiento de muelles de carga, estos concretos experimentaron ciclos de congelación-deshielo y cargas en exceso de varias toneladas sin presentar problema alguno en el comportamiento del mismo concreto.

Uno de los usos efectivos del concreto compactado con rodillo en los Estados Unidos fue en el año de 1976, en la planta nuclear de Bellefonte, en la cual se colocaron 6,200 metros cúbicos para aumentar la base-soporte de la turbina, construida con un espesor aproximado de 3 metros. Basados en diversas investigaciones y pruebas, el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, diseñó un concreto compactado con rodillo alternativo para la construcción de la Presa Zintel Canyon cerca de Kennewich, Washington; aunque esta presa no fue construida debido a la

falta de fondos económicos, muchos de los conceptos fueron llevados a la construcción de la presa Willow Creek, Oregon, la cual al ser concluida en el año de 1982 llegó a ser la primera presa en el mundo construida en su totalidad con concreto compactado con rodillo. Los 52 metros de altura de esta presa, confirmaron la teoría de la rapidez y economía en la construcción al utilizar el concreto compactado con rodillo.

En Japón las investigaciones sobre concreto compactado con rodillo fueron iniciadas en el año de 1974, bajo el resultado de estas investigaciones se utilizó el concreto compactado con rodillo en diferentes cuerpos de la Presa Shimajigawa en el año de 1978, y en la presa Ohkawa en el año de 1979, obteniéndose en ambos casos excelentes resultados.

Desde los primeros proyectos con concreto compactado con rodillo, este ha ganado una rápida popularidad y ha sido utilizado en muchas estructuras en Brasil, Venezuela, Francia, Australia, Sudáfrica, así como en los Estados Unidos, Canadá y Japón.

En cuanto a México, en el período de 1985-1987 se construyeron dos obras de concreto compactado con rodillo.

La primera obra se encuentra ubicada en el estado de Chiapas, y es un relleno de la obra de desvío del proyecto hidroeléctrico Peñitas de la Comisión Federal de Electricidad, el volumen de concreto que se compactó fue de 50,000 metros cúbicos. La segunda obra se encuentra localizada en el estado de Guanajuato, y es la presa La Manzanilla de la Secretaría

de Agricultura y Recursos Hidráulicos, con un volumen compactado de 50,000 metros cúbicos y una altura de 36 metros.

En el período de 1987-1988 se construyeron las Presas Trigomil situada en el estado de Jalisco, con un volumen compactado de concreto de 340,000 metros cúbicos y una altura de 100 metros, la Presa Peña Colorada ubicada en el estado de Colima, con un volumen compactado de concreto de 500,000 metros cúbicos y una altura de 50 metros, asimismo se construyeron diversos tramos de prueba utilizando el concreto compactado con rodillo como pavimento, en la Autopista México-Cuernavaca, en puertos marítimos, patios y calles urbanas en Temixco y Cuautitlán Izcalli, en el estado de Morelos y en el Estado de México respectivamente.

Dado todo lo anterior, se encontró que el concreto compactado con rodillo resulta más rápido de construir, y con ahorros potenciales hasta de un cuarto a un tercio del costo del concreto convencional, además, la transición entre la pavimentación asfáltica y la pavimentación con concreto compactado con rodillo ha sido relativamente simple, ya que se puede utilizar el mismo equipo con un reducido grupo de personas.

De este modo se han construido diferentes estructuras en diversos lugares del mundo, con unas condiciones ambientales muy diferentes entre sí, lo que ha permitido sacar conclusiones importantes para depurar la técnica, encontrándose que una de las condiciones fundamentales para el éxito de esta técnica reside en la facilidad de ejecución, lo cual implica rapidez y reducción de costos; por eso todos los elementos y etapas constructivas que perjudiquen, deben ser estudiadas y simplificadas de forma tal que encontremos el material más adecuado a las condiciones requeridas y solicitadas.

## **I.5.- PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y EN ESTADO ENDURECIDO.**

Debido al proceso continuo de hidratación del cemento, el concreto tiende a aumentar su resistencia y en general, a mejorar sus características con la edad, las propiedades del concreto endurecido, dependen generalmente de las condiciones de curado a través del tiempo, asimismo las características del concreto fresco requieren de atención especial, ya que de ellas dependerán las características que se puedan presentar en el concreto endurecido, existiendo diversos factores que afectarán las características del material como se vera más adelante.

### **I.5.1.- PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO**

De las propiedades que el concreto compactado con rodillo presenta en estado fresco se pueden mencionar las siguientes:

**CONSISTENCIA** : El concreto compactado con rodillo posee una consistencia seca y una relación entre los agregados, el cemento y el agua que permite la circulación de los equipos vibratorios de compactación antes de que empiece a endurecer la mezcla.

La consistencia, se refiere al número de segundos que se requiere para compactar un cierto volumen de concreto.

El revenimiento es nulo en las mezclas de concreto compactado con rodillo, lo cual no sucede de ninguna manera con las mezclas de concreto convencional.

**PESO VOLUMÉTRICO :** Para el concreto compactado con rodillo el peso volumétrico dependerá del grado de compactación que este posea. El peso volumétrico para este concreto oscilará entre 2100 kg/m<sup>3</sup> y 2220 kg/m<sup>3</sup>. Es muy importante mencionar que el cálculo del peso volumétrico debe ser inmediato, de lo contrario el concreto adquiere su resistencia inicial no permitiendo corregir alguna deficiencia que se haya presentado en la dosificación o en la compactación.

**CONTENIDO DE HUMEDAD :** Se refiere al contenido de agua relacionado con el peso del cemento más el de los agregados saturados y superficialmente secos en la mezcla. La figura 1 nos muestra la relación entre el contenido de humedad y la densidad del concreto compactado con rodillo.

La humedad óptima para la obtención de la densidad máxima es superior a la que se necesita para la hidratación del cemento que es del orden de un 3% a un 4%, mientras que dicha humedad óptima suele estar comprendida entre un 4% y un 7%. El contenido de agua se determina con base en consideraciones de manejabilidad, compactabilidad y la necesidad de obtener la máxima densidad. La determinación de la humedad se realiza con el objeto de conseguir la mezcla que permita obtener la máxima densidad con una energía de compactación dada. Cabe mencionar que uno

de los inconvenientes del concreto compactado con rodillo es su sensibilidad frente a variaciones de humedad y a la compactación obtenidas. Un exceso o falta de agua, así como una densidad insuficiente, disminuyen notablemente las resistencias mecánicas. Por otra parte una falta de humedad lleva consigo riesgos de segregación y de aparición de zonas con defectos de fraguado, así como dificultades de compactación; mientras que un exceso de agua se traduce en una regularidad superficial defectuosa.

### **I.5.2.- PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO**

Las propiedades más significativas en el concreto endurecido, son esencialmente las mismas que se tienen para un concreto convencional y si bien se reconoce que la resistencia a la compresión es la característica más representativa del concreto, existen otras muy importantes como el módulo de elasticidad, la resistencia al corte, la permeabilidad, la durabilidad, etc. De las cuales haremos referencia a continuación.

**RESISTENCIA AL CORTANTE :** Las pruebas de resistencia al cortante, no revelan diferencias significativas entre las propiedades de cortante del concreto compactado con rodillo y las propiedades al cortante que nos muestra el concreto convencional.

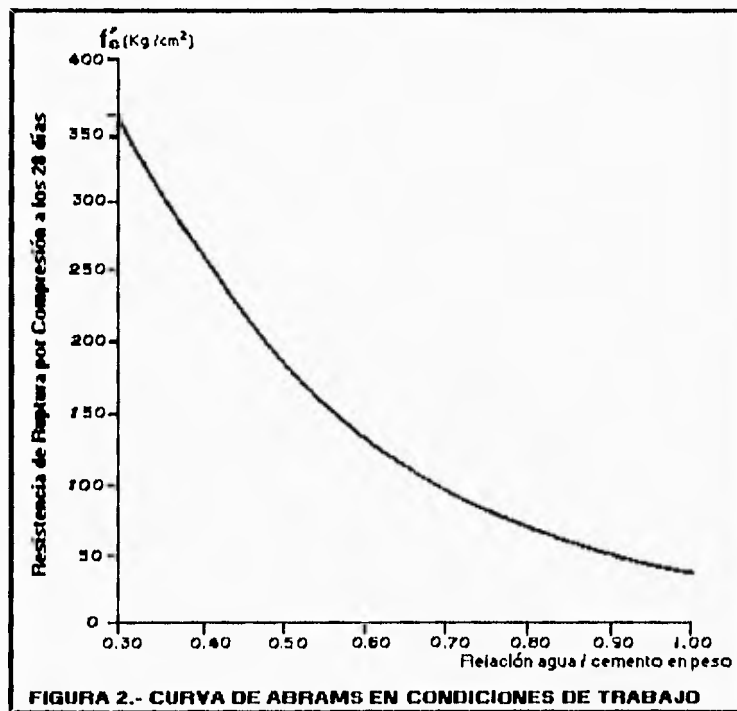
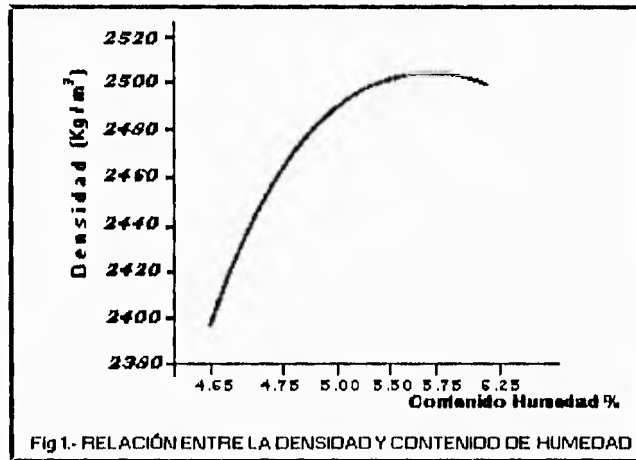
La resistencia al cortante es un problema que deberá requerir un tratamiento especial en las juntas de construcción. Por lo general, sin ser una norma, la resistencia al cortante varía entre un 20% y un 25% de la resistencia a la compresión.

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN :** Debido a las bajas relaciones agua/cemento de los concretos compactados con rodillo, se alcanzan altas resistencias a la compresión cuando se logra la compactación adecuada.

La resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la relación agua/cemento, por lo cual no existe ningún inconveniente la obtención de resistencias para este tipo de concreto, siempre y cuando se trabaje con el agua que nos permita la hidratación continua de todo el cemento, tal como lo muestra la ley de Abrams, cuya representación esquemática se indica en la figura 2.

**RESISTENCIA A LA TENSIÓN :** Para esta característica se tiene que el concreto compactado con rodillo es más baja que para el concreto convencional, y nos representa un porcentaje de la resistencia a la compresión, el cual es del orden de 10% a 20%, dependiendo de la calidad del agregado, edad y contenido de cemento.





**RESISTENCIA A LA FLEXIÓN :** Las pruebas de resistencia a la flexión para el concreto compactado con rodillo, son recomendables realizarlas a los 90 días, esto debido a que antes de este tiempo, existirá un número menor de repeticiones que el que se puede presentar después del mismo tiempo. El concreto compactado con rodillo al igual que el concreto convencional, presentan una excelente correlación entre el modulo de rotura ( valor máximo debido a la flexión ) y la resistencia a la compresión.

**CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN :** Las deformaciones en el concreto compactado con rodillo se producen debido a cambios de volumen los cuales se inician por el secado y la contracción, así como por los ciclos congelación-deshielo del concreto.

Cuando la deformación producida por la tensión sobrepasa la capacidad de deformación del concreto, aparecerá el agrietamiento.

**CAMBIOS VOLUMÉTRICOS :** Los cambios de volumen en el concreto compactado con rodillo son inferiores a los que presenta el concreto convencional, debido al menor contenido de agua y aun mayor acomodo de agregados que restringe el movimiento.

Ya que el concreto compactado con rodillo presenta una relación agua/cemento baja, las posibilidades de cambio de volumen son muy pocas.

**MÓDULO DE ELASTICIDAD :** El módulo de elasticidad del concreto compactado con rodillo va en aumento con la edad, así pues podemos citar que los factores que afectan las propiedades elásticas de este concreto son: la edad, el tipo de agregado y la relación agua/cemento.

Con el aumento del tamaño máximo de los agregados, se verá incrementada la densidad y en consecuencia se incrementará el módulo de elasticidad. Si el volumen de pasta no es suficiente, la densidad disminuirá con el aumento de cavidades de aire. En estas condiciones, el módulo de elasticidad no sólo se verá afectado por la pérdida de densidad, sino también por la discontinuidad de la pasta en la masa de concreto y es razonablemente esperar que disminuya en proporción al aumentar el contenido de vacíos.

**PERMEABILIDAD :** La permeabilidad de una masa de concreto depende en gran medida del sistema de cavidades de aire atrapado, por lo tanto, esta casi totalmente controlada por el proporcionamiento de la mezcla y por el grado de compactación. El agrietamiento y las juntas representan los medios más frecuentes de filtración de agua a través del concreto compactado, debido a esto es importante que la pasta que cubre las juntas tenga un exceso de material cementante que selle la junta. Cuando existe un adecuado control de calidad en el mezclado y en la compactación podemos obtener un concreto relativamente impermeable.

DURABILIDAD : Para el concreto en estudio la durabilidad se puede evaluar con base en su resistencia al intemperismo, al ataque de sustancias químicas, a la erosión y al desgaste. El concreto está sujeto a descascaramiento de la superficie bajo exposición a ciclos de congelamiento-deshielo, a menos que esté protegido por una capa aislante de concreto resistente a congelamiento. La resistencia al desgaste se beneficiará al aumentar la resistencia del concreto. En relación al ataque de sustancias químicas, no se tienen aún demasiados conocimientos sobre ello, más se considera que el deterioro es semejante al del concreto convencional.

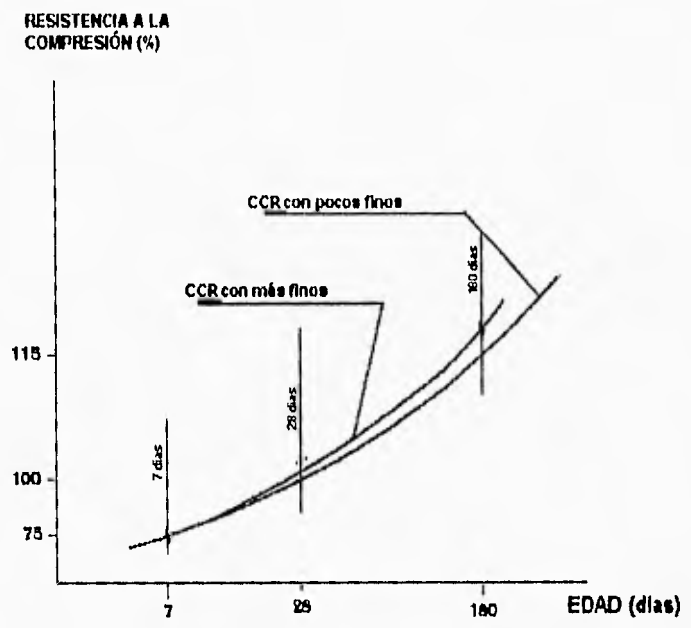
## **I.6.- COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

El comportamiento del concreto compactado con rodillo está determinado por los diferentes parámetros de diseño tales como la granulometría, el contenido de finos de los agregados, el contenido de cemento, la humedad de la mezcla, la adición de aditivos, la consistencia, etc.

Si bien es cierto, no existen grandes diferencias entre las características del concreto compactado con rodillo y el concreto convencional, algunas propiedades del primero tienen un nivel más alto, y por ende nos indican un comportamiento más adecuado en estas condiciones de trabajo. Esas diferencias se deben principalmente a las desigualdades en las proporciones de las mezclas. Por lo general hay un 40% menos de agua y un 30% menos de pasta en el concreto compactado con rodillo.

En lo que refiere a su resistencia, el concreto compactado con rodillo muestra un comportamiento superior al que se tiene en el concreto convencional, esto debido a las densidades alcanzadas durante la elaboración.

Los comportamientos debido a la resistencia por compresión nos muestra excelentes resultados en este tipo de concreto, como puede observarse en la figura 3, esta resistencia va en aumento conforme aumenta la edad del concreto.



**FIGURA 3.- EDAD-RESISTENCIA DEL CCR**

El comportamiento del concreto compactado con rodillo cuando lo referimos al cortante presenta ciertas dificultades sino se tiene un cuidado especial en las juntas de construcción. Cabe señalar que se tiene la formación de fisuras del orden de 1.5 a 3 milímetros de ancho.

El análisis del comportamiento de la permeabilidad en el concreto compactado con rodillo indica que ésta disminuye a medida que se aumenta el contenido de material cementante, mostrando que con bajos contenidos, la permeabilidad es del orden de  $10^{-4}$  m/s, mientras que para altos contenidos de cementante la permeabilidad es del orden de  $10^{-12}$  m/s.

En cuanto a su densidad, el concreto compactado con rodillo observa una gran caída en ella cuando la relación entre pasta y mortero es menor que 0.40, debido esto a que los vacíos de los agregados finos compactados oscila entre el 32% y el 40% de su volumen, por lo cual si la pasta es insuficiente, no habrá material para llenar los vacíos del agregado fino y no se alcanzará alta densidad aun cuando se use una alta energía de compactación.

Habría que mencionar que la pérdida de densidad afecta todas las propiedades en el concreto.

Ai ser sometidos a condiciones ambientales extremosos y a

condiciones de trabajo severas los concretos compactados con rodillo no presentan problemas de comportamiento alguno, el deterioro presentado ante este tipo de condiciones es mínimo, asimismo se hace incapie en encontrar las dosificaciones óptimas que maximicen la densidad y los parámetros de elasticidad y resistencia de las mezclas, con el fin de garantizar un comportamiento estructural y térmico adecuado. En cuanto a los problemas de origen térmico estos han sido mínimos durante la construcción de obras construidas con la técnica del concreto compactado con rodillo, debido al mismo sistema constructivo, en donde una capa es colocada rápidamente sobre la anterior, de manera que la evolución del calor de las capas es similar, por lo que no se presentan alargamientos y encogimientos diferenciales importantes.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que debido a la enorme superficie expuesta de cada capa extendida existe el riesgo de una desecación del concreto en las épocas calurosas, con las consiguientes contracciones; esto obliga a ser muy cuidadosos en la dosificación del agua y en la velocidad de construcción.

En general podemos citar que el comportamiento del concreto compactado con rodillo en todos los tipos de aplicaciones ha sido satisfactorio. Los fallos observados pueden atribuirse normalmente a prácticas constructivas inadecuadas, tales como una compactación defectuosa y pérdidas de humedad.



## **I.7.- COMPARACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO CON OTROS TIPOS DE CONCRETO.**

Con la aparición del concreto compactado con rodillo como procedimiento de construcción se da un enorme paso hacia el uso de tecnologías modernas en lo que se refiere a la construcción de obras de gran envergadura, biendose poco a poco desplazados otros y diferentes tipos de materiales que eran utilizados para la elaboración de éstas obras, así pues, al querer comparar el concreto compactado con rodillo con otros tipos de concreto, como los ya mencionados anteriormente podemos notar grandes diferencias en cuanto a su uso, comportamiento, dosificación y características de los materiales que lo componen, mencionando entre ellas que el mezclado, transporte y tendido de material se realiza con maquinaria de uso corriente, sin necesidad de usar cimbras, juntas de colado ni acero de refuerzo, los costos se reducen significativamente, mantenimiento mínimo, los tiempos de ejecución son sumamente menores teniéndose la posibilidad de uso inmediato. Asimismo en la figura 4 puede observarse como el concreto compactado con rodillo adquiere mayor resistencia a la compresión contra el concreto convencional conforme aumenta su edad, también como podemos observar en la figura 5 la granulometría típica del material que constituye el concreto compactado es comparada con la granulometría típica del material que es utilizado para concreto convencional, para agregados grandes las curvas se mueven hacia la izquierda y para tamaños pequeños se mueven hacia la derecha.

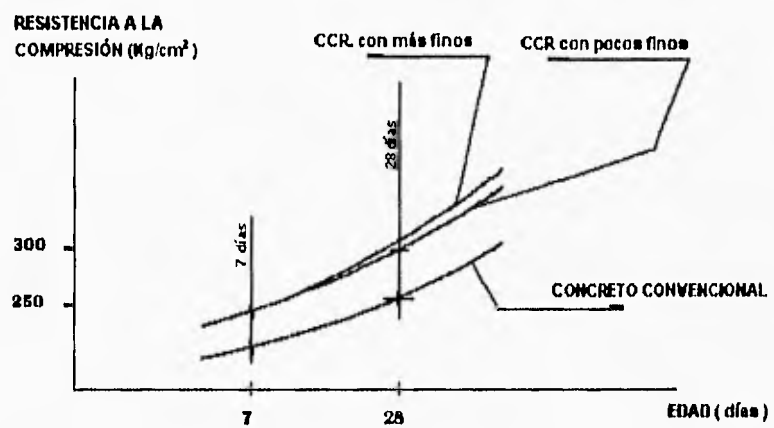


FIGURA 4.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CCR Y CONCRETO CONVENCIONAL

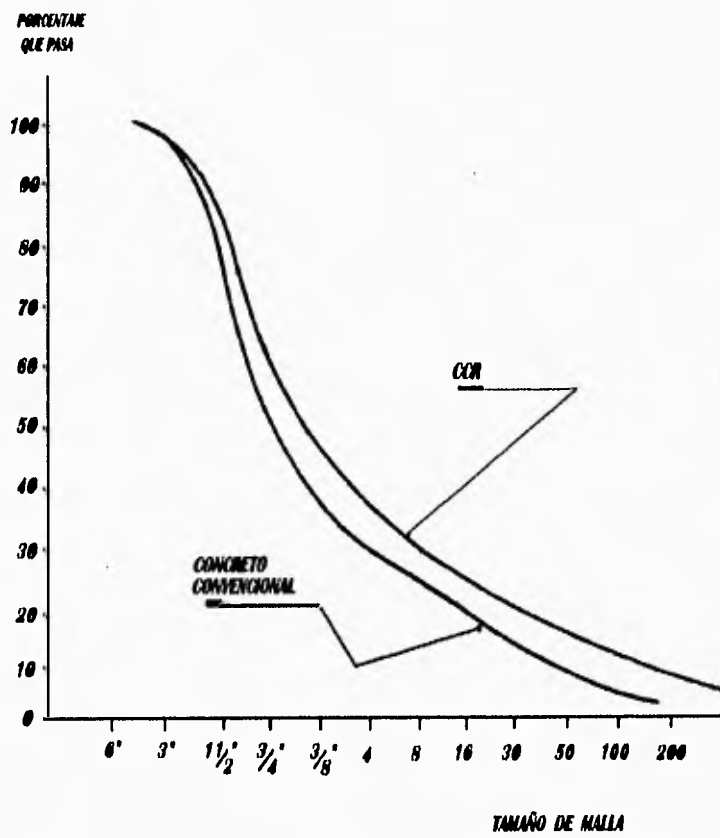


FIGURA 5.- GRANULOMETRIA TIPICA DEL CCR Y CONCRETO CONVENCIONAL

Se pueden presentar como situaciones adversas para el uso del concreto compactado con rodillo, el utilizarse en estructuras de uso habitacional ( losas, columnas, etc. ), en condiciones ambientales desfavorables ( lluvia ), etc.

No obstante y en la búsqueda de nuevas alternativas para la construcción de estructuras de concreto que cumplan determinadas requisitos de seguridad; calidad, economía y tiempo, quizás en un futuro cercano podremos hacer uso de la combinación de los concretos convencionales con el concreto compactado con rodillo, es decir, posiblemente surja una nueva tecnología que mezcle las características de los concretos ya mencionados, encontrándose un concreto ideal para el uso solicitado.

Se pueden presentar como situaciones adversas para el uso del concreto compactado con rodillo, el utilizarse en estructuras de uso habitacional ( losas, columnas, etc. ), en condiciones ambientales desfavorables ( lluvia ), etc.

No obstante y en la búsqueda de nuevas alternativas para la construcción de estructuras de concreto que cumplan determinadas requisitos de seguridad; calidad, economía y tiempo, quizás en un futuro cercano podremos hacer uso de la combinación de los concretos convencionales con el concreto compactado con rodillo; es decir, posiblemente surja una nueva tecnología que mezcle las características de los concretos ya mencionados, encontrándose un concreto ideal para el uso solicitado.

## **II.- USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

### **II.1.- USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN PRESAS**

La construcción de presas de concreto convencional en el mundo no tuvo progresos importantes durante muchos tiempo, sólo hasta fechas recientes, con la aparición del concreto compactado con rodillo se dio inicio a un cambio que marcó una nueva era en la construcción de presas de concreto.

El sistema conocido también como CCR, permite la edificación de presas en un período de tiempo más corto y con un considerable ahorro económico.

Cuando se determina la construcción de las grandes presas, las decisiones más importantes que se deben tomar en cuenta, son en torno al método más adecuado para emprender la obra y el tipo de materiales a utilizar, al elegir el tipo de cortina, se tendrán que considerar todos aquellos aspectos topográficos, hidrológicos y geotécnicos que determinarán las características y el diseño de toda la obra.

Gracias a la experiencia obtenida de la construcción convencional de cortinas, se sabe que la utilización de concreto o materiales graduados

implica, en ambos casos, ventajas y desventajas en porcentajes similares. Ahora bien, la utilización del concreto compactado con rodillo reúne las características deseables de los dos materiales antes mencionados, aumentando la eficiencia y reduciendo los costos de construcción, sin detrimento del funcionamiento y la seguridad de las presas.

En diversos países se cuenta ya con suficiente experiencia en la construcción de presas de concreto compactado con rodillo y tanto los métodos como los materiales utilizados en cada sitio pueden variar de un lugar a otro, por ejemplo; mientras que en el extranjero lo más común es utilizar en la elaboración de concreto compactado, cenizas volantes de tipo cementante sustituyendo de manera importante al cemento y reduciendo el calor de hidratación, en México se han utilizado cementos de bajo calor de hidratación y en menor escala cenizas volantes.

Las perspectivas de seguir construyendo presas de concreto compactado con rodillo son muy amplias, la construcción de estructuras mejorará con la experiencia, al mismo tiempo, podrán adecuarse las herramientas analíticas que se emplearan para el diseño clásico de presas de gravedad.

El concreto compactado con rodillo utilizado en la construcción de presas consiste como en el concreto convencional, en una mezcla adecuada de agregados pétreos, cemento, agua y aditivos. El producto

terminado alcanza una resistencia, impermeabilidad, densidad y durabilidad comparables a las del concreto convencional. El diseño del concreto compactado con rodillo está totalmente condicionado al diseño de la presa, a las formas y modos de puesta en obra e incluso aunque de forma secundaria, a los fines de la presa.

La metodología del concreto compactado con rodillo para la construcción de presas, se basa en la colocación de una extensa masa de concreto de pequeño espesor que posteriormente se compacta. El tratamiento o no de las distintas juntas horizontales que se pueden plantear, y en su caso, el modo y momento de realizarlo, es el punto crucial en este sistema constructivo. Los parámetros que intervienen en la capacidad de unión entre las capas de concreto a compactar son: dosificación, consistencia, forma de extensión de la mezcla, forma y modo de compactación, curado, tratamiento de juntas y madurez del concreto. Sin embargo, es importante aclarar que durante la construcción de las presas, han surgido básicamente tres tendencias, así :

1.- Presas de concreto compactado con rodillo con bajo contenido de cemento, denominadas de CONCRETO POBRE COMPACTADO CON RODILLO, bajo esta categoría se clasifican aquellas presas construidas con concreto cuyo contenido de cementante oscila entre 60 kilos y 100 kilos por metro cúbico.



La idea básica en el diseño de estas presas es la de obtener un concreto con bajo contenido de cemento y escasa trabajabilidad, de tal forma que se obtengan ventajas económicas y concretos de baja generación de calor.

2.- PRESAS SEUDO-MONOLÍTICAS, este procedimiento se ha desarrollado e impulsado en el Japón y en la literatura se conoce con el nombre de "ROLLER COMPACTED DAM" ( RCD ). La idea es la de lograr una presa monolítica, sin juntas horizontales, lo cual exige la colocación de capas de concreto con espesores entre 70 y 100 centímetros, compactadas con equipo muy pesado. El contenido de material cementante es de unos 130 kilos por metro cúbico, de los cuales entre el 20% y 50% son cenizas volantes.

3.- PRESAS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO CON ALTOS CONTENIDOS DE PASTA, el objetivo buscado en estas presas es el de un concreto con bajo contenido de vacíos y buena adherencia entre las capas. El contenido de material cementante es superior a los 150 kilos por metro cúbico.

Cada clase de presa según la clasificación anterior, exige unos tratamientos especiales durante la construcción para lograr un buen control de las filtraciones.

En las primeras se construye, en la cara aguas arriba de la presa una pared impermeable para proteger el interior de la presa. El material

utilizado es concreto convencional, que se coloca utilizando formaletas a la misma velocidad de construcción que el núcleo de la presa, también se han empleado prefabricados dotados de láminas de PVC que forman una membrana impermeable.

En las segundas, aun cuando se disminuye el número de juntas horizontales, y por ende la filtración; se necesita también la pared en la cara aguas arriba de la presa para lograr impermeabilizarla. En esta forma de construcción, debido a los grandes espesores de las capas colocadas, se necesitan juntas verticales.

Las últimas son impermeables debido a los escasos vacíos que quedan en el concreto, y por el alto contenido de pasta, se logra una excelente adherencia entre las capas de concreto, con lo que se eliminan las filtraciones. Según los resultados económicos de la construcción de presas con concreto compactado, se puede concluir que las más económicas son las que tienen un alto contenido de pasta, debido a las menores obras adicionales necesarias para lograr impermeabilizarlas.

Un aspecto de gran importancia en el diseño y construcción de las presas de concreto compactado, es el manejo de los movimientos térmicos generados por la hidratación del cemento que puede causar agrietamiento en el concreto. así, tenemos en el concreto compactado un material para la construcción de presas, con el cual se pueden obtener las propiedades deseadas en función de la dosificación de las materias primas.

## **II.2.- USOS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN PAVIMENTOS**

El empleo del concreto compactado con rodillo como una alternativa en la construcción de pavimentos ha tenido una gran evolución, debido a las bondades que esta técnica ofrece en los renglones de costos y durabilidad. Sin embargo, no hay que perder de vista que los procedimientos constructivos, materiales, equipos utilizados y la obra de mano son propios de cada región y que estos juegan un papel importante en el desarrollo de cualquier tecnología.

Las actividades que se generan por el movimiento de personas y bienes de consumo en un país, requieren de una infraestructura vial adecuada que permita realizar un transporte cómodo y eficiente, estas vías de comunicación dependerán de las necesidades que surjan en dichos polos de desarrollo. Por lo tanto, los estudios que se realicen en la construcción de una autopista o carretera, vista como un sistema, aplicando tecnologías de punta, son muy amplios e interdisciplinarios, basta con mencionar algunos estudios donde se requiere especial atención : selección de materiales, proporcionamiento de mezclas, diseño de espesores, selección de equipo, procedimientos constructivos, etc., desde luego los estudios previos de ingeniería de tránsito, planeación, etc.

Dado lo anterior, podemos citar que el concreto compactado con rodillo ha recibido mucha atención durante los últimos años, debido a la creciente aceptación en su empleo como concreto masivo en la

construcción de presas. Sin embargo, un avance reciente es el empleo cada vez mayor del concreto compactado con rodillo como material de pavimentación que soporta cargas pesadas, que tiene un adecuado comportamiento a condiciones ambientales desfavorables y cuyo costo es relativamente bajo.

No cabe duda que la escuela de esta tecnología, esta sustentada en las experiencias obtenidas en diferentes partes del mundo en la pavimentación con suelo-cemento y en el uso de las bases tratadas con cemento.

Una de las razones del interés a escala internacional de los pavimentos de concreto compactado con rodillo radica en el hecho de que en los países sin gran tradición en la construcción de pavimentos de concreto, las empresas constructoras no poseen la maquinaria especializada necesaria, pero suelen estar bien equipadas con equipos de movimiento de tierras y maquinaria para el extendido y compactación de la mezcla asfáltica.

En estos casos, la tecnología de los concretos compactados con rodillo permite la aplicación de la solución rígida sin tener que hacer nuevas inversiones en maquinaria. Se trata además de una solución con la que es posible obtener importantes economías de construcción respecto a otras alternativas.

El concreto compactado con rodillos que se utiliza en pavimentos, es un material seco de concreto de cemento portland, que se compacta por medio de vibración externa, éste debe ser lo bastante rígido para soportar el equipo de compactación, debe estar diseñado para tener resistencia a la abrasión por el tránsito, durabilidad en su exposición a climas severos y desgaste de superficie.

Debido a la baja relación agua/cemento y a la alta densidad, éste concreto tiene una permeabilidad muy reducida lo que lo hace ideal para condiciones de congelación-deshielo en carreteras ubicadas en climas extremos.

Los pavimentos de concreto compactado con rodillo en general tienden a presentar resistencias a la flexión más elevadas que los pavimentos de concreto convencional con el mismo contenido de cemento a los 14, 28 y 90 días. Esto puede deberse como ya se menciono anteriormente a la menor relación agua/cemento como al elevado grado de compactación.

Los principios involucrados en la preparación de la sub-base y/o la base para recibir el pavimento de concreto compactado son los mismos que los utilizados en pavimentos de concreto convencional. Cualquier área blanda en la sub-base debe ser reemplazada con material bien graduado compactado a la densidad requerida, las capas sometidas a compactación deberán ser menores de 20 centímetros.

El pavimento de concreto compactado con rodillo tiene juntas similares a las del concreto convencional, pero el tratamiento de ellas es diferente debido a la menor retracción del concreto compactado con rodillo y extendido por ende, un mayor espaciamiento entre ellas.

Como el comportamiento estructural del concreto compactado con rodillo es similar al del concreto convencional para pavimentos, los procedimientos de diseño para el primero son casi idénticos a los procedimientos utilizados para el diseño de pavimentos de concreto convencional.

### **II.3.- COMPARACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN PRESAS Y CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN PAVIMENTOS**

El uso de los diferentes tipos de concreto variara de acuerdo al destino que se de a éste. Así, no podemos utilizar una mezcla de concreto diseñada para firmes en el colado de columnas por citar un ejemplo.

Por lo tanto el concreto compactado con rodillo utilizado en presas variará del concreto compactado utilizado en pavimentos.

El concreto para pavimentos difiere significativamente del concreto para presas en que es tan sólo una forma de concreto masivo de bajo contenido de cemento. Las mezclas para pavimentos de concreto compactado tienen un contenido mucho más elevado de cemento, de pasta y agregado grueso de tamaño mucho menor. Los contenidos usuales de material aglutinante varían de 296 kg/m<sup>3</sup> a 327 kg/m<sup>3</sup> y el tamaño máximo de agregado grueso usualmente es alrededor de 3/4 de pulgada. Estos factores, junto con un enfoque diferente de diseño de la mezcla, producen una mezcla mucho más trabajable que la empleada para presas, aunque sigue siendo una mezcla sin revenimiento lo bastante rígida para soportar los rodillos vibratorios.

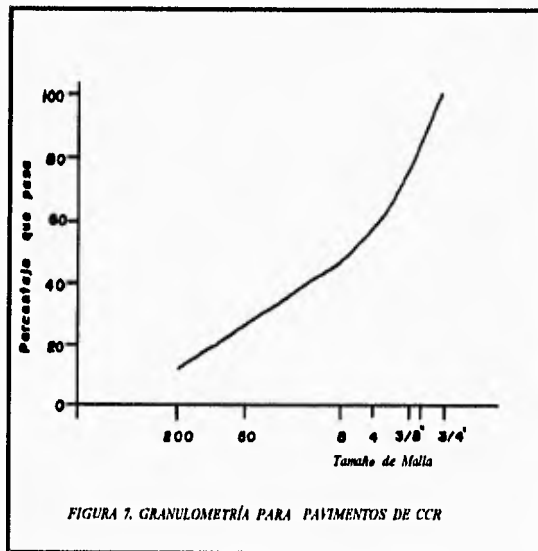
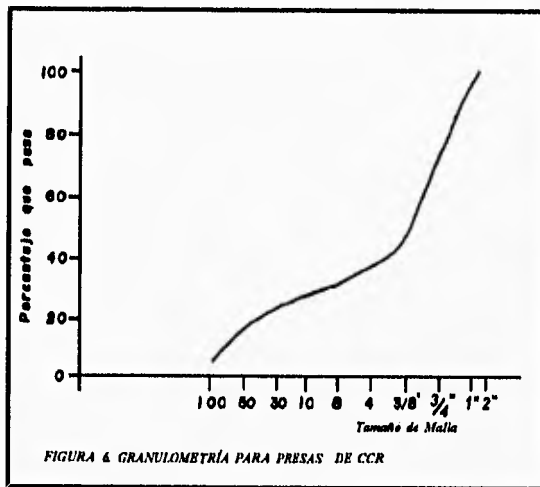
Como puede observarse en la tabla 1 los parámetros usados en el concreto compactado con rodillo para presas, y los parámetros utilizados para el concreto compactado en pavimentos difiere significativamente tanto en el tamaño máximo de agregados así como en el porcentaje que pasa por la malla número cuatro, siendo la relación agua/cemento el parámetro que presenta una menor diferencia entre ambos, también la figura 6 y la figura 7 nos muestran las granulometrías típicas tanto para presas y para pavimentos respectivamente.

**TABLA 1. COMPARACIÓN ENTRE CCR PARA PRESAS Y PAVIMENTOS.**

	<b>CCR PARA PRESAS</b>	<b>CCR PARA PAVIMENTOS</b>
TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	2 PULGADAS	3/4 PULGADA
% QUE PASA POR LA MALLA No. 4	35	56
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.35	0.39

Parámetros típicos para el CCR que se usa en Presas y CCR que se usa en pavimentos





## II.4.- APLICACIONES DIVERSAS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

Debido a las ventajas que proporciona el concreto compactado con rodillo, a sus características y propiedades, a la facilidad de colocación, a su excelente comportamiento, al ahorro tan significativo que se tiene en su ejecución, así como a la reducción de los tiempos de construcción, el implementar y generalizar su uso, es un punto de gran importancia hacia la creación de nuevas obras con destinos diferentes a los ya mencionados anteriormente, como lo son las presas y los pavimentos.

El uso de la técnica del uso compactado con rodillo y sus aplicaciones han evolucionado rápidamente, en la búsqueda permanente de nuevas técnicas eficientes y económicas como una nueva técnica, un sistema o un método, nos conducen a elegir al concreto compactado con rodillo como un elemento que nos proporcionará grandes satisfacciones a medida que implementamos el uso.

Puerto Rico es un ejemplo de los casos mencionados con rodillo ya que ante la evolución y el cambio de la carga de trabajo a la conclusión de usar este material para construir los contenedores de los contenedores.

#### **II.4.- APLICACIONES DIVERSAS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

Debido a las ventajas que proporciona el concreto compactado con rodillo, a sus características y propiedades, a la facilidad de colocación, a su excelente comportamiento, al ahorro tan significativo que se tiene en su ejecución, así como a la reducción de los tiempos de construcción; el implementar y generalizar su uso, es un punto de gran importancia hacia la creación de nuevas obras con destinos diferentes a los ya mencionados anteriormente, como lo son las presas y los pavimentos.

El uso de la técnica del uso compactado con rodillo y sus aplicaciones han evolucionado rápidamente, en la búsqueda permanente de nuevas técnicas eficientes y económicas como una nueva opción, un sistema o un método, nos conducen a elegir al concreto compactado con rodillo como un elemento que nos proporcionará grandes satisfacciones a medida que implementamos el uso.

Puertos Mexicanos es un ejemplo del uso del concreto compactado con rodillo, ya que ante la evolución y el manejo de la carga, se llegó a la conclusión de usar este material para construir los pavimentos de los patios de los contenedores.

Así bien, las aplicaciones del concreto compactado con rodillo se generalizan al utilizarlo en pistas de aeropuertos, plataformas de estacionamiento de aeronaves, en áreas de almacenamiento de terminales de carga ferroviarios y marítimos, en accesos y depósitos de la industria forestal, cimentaciones masivas para diversas estructuras, revestimientos de canales, construcción de bordos y diques, patios de contenedores, patios de remolques y en áreas de estacionamiento para tanques y otros vehículos de orugas.

## **II.5- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.**

Existen ciertas ventajas y como es lógico pensar también existen desventajas que posee el concreto compactado con rodillo al hacer uso del mismo. Entre estas ventajas y desventajas se pueden citar :

### **II.5.1.- VENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

A).- Costos totales inferiores; cuando se suman al final todos los costos, el uso de este tipo de concreto resulta más barato, esto es debido, entre otras razones, al hecho de no precisarse equipos especiales y a la posibilidad de emplear conglomerantes más económicos.

B).- Tiempos de construcción menores; se hace énfasis en que el tiempo de ejecución de las obras resueltas con concreto compactado con rodillo se reduce en casi un 50%.

C).- Mantenimiento mínimo; se requiere poco mantenimiento, en ocasiones sólo subsanar detalles de sellado de juntas.

D).- Este tipo de concreto gana resistencia con el tiempo.

E).- La colocación del concreto se puede realizar con los equipos tradicionales para movimiento de tierras.

F).- El concreto resiste sin sufrir deterioro los efectos de la intemperie ( climas extremos ).

G).- No se requiere de cimbras para su colocación.

H).- No requiere acero de refuerzo.

I).- Debido a que la resistencia exigida en el concreto compactado con rodillo es similar o más alta que la del concreto convencional y a que su relación agua/cemento es más baja, los consumos de cemento se ven sumamente reducidos.

( REFIRIÉNDOSE A SU USO EN PRESAS )

J).- Escasa posibilidad de que se produzcan fisuras por efecto térmico.

K).- La cortina puede ser rebasada sin riesgo por alguna creciente inesperada, y trabajar como vertedor de emergencia.

L).- Es factible la utilización de materiales de baja calidad, mezclados con otros de calidad aceptable.

M).- Las filtraciones se reducen a lo largo del tiempo debido a la calcificación y depósito de azolve en las juntas.

( REFIRIÉNDOSE A SU USO EN PAVIMENTOS )

N).- La posibilidad de apertura inmediata a la circulación, debido a la estabilidad que se alcanza con el propio esqueleto mineral de los agregados una vez compactado el material.

Ñ).- El concreto no se deforma en las zonas de frenado y arranque de vehículos pesados.

O).- La superficie de concreto es altamente reflejante y ahorra energía en la iluminación nocturna, puesto que los faros del vehículo iluminan perfectamente la superficie del concreto.

P).- Las juntas de contracción se producen más espaciadamente entre 15 y 18 metros.

Q).- Presenta una mejor resistencia a la transmisión de cargas de vehículos pesados.

## **II.5.2.- DESVENTAJAS DEL USO DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.**

Entre las posibles desventajas encontradas en el uso de este concreto podemos mencionar :

A).- Es difícil conseguir una buena regularidad superficial, debido a las deformaciones causadas por los rodillos en caso de que los equipos de extendido no garanticen una elevada precompactación, hay que mencionar, no obstante, que el desarrollo de estos últimos se ha traducido en notables mejoras en este aspecto.

B).- La sensibilidad a las variaciones de humedad en el mezclado y el extendido del material, así como a los defectos por compactación, que se traducen en un acusado descenso de la resistencia.

C).- No es permitido añadir agua, cemento y/o agregados a la mezcla, una vez que ésta haya salido de la mezcladora y en caso de lluvia debe suspenderse la colocación del concreto.

D).- Para tráfico pesado importantes, hay que colocar una capa de rodadura asfáltica, perdiéndose las ventajas de luminosidad.

E).- Su uso está limitado a colados masivos.



F).- Requiere un número relativamente elevado de pasadas del rodillo para lograr la compactación necesaria y bases con buena capacidad portante para que no se disipe la energía de compactación.

### **III.- DISEÑO DE MEZCLAS PARA CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

Al referirnos a el diseño de mezclas de concreto, buscamos la forma más práctica y económica de poder combinar todos los elementos disponibles para obtener un concreto que tenga las características y propiedades adecuadas de comportamiento al ser sometidas a diversas condiciones de trabajo.

Podemos hablar que para obtener un buen diseño de las mezclas de concreto debemos de seleccionar las características conforme al destino del concreto, a las condiciones de exposición, a la forma y tamaño de los elementos.

El diseño de mezclas para concreto compactado con rodillo tiene puntos importantes en lo referente al contenido de agua y en la relación entre agregados gruesos y finos, ya que se debe de obtener una estructura granular capaz de soportar los equipos de construcción y la máxima densidad posible.

El diseño de mezclas se debe orientar hacia la búsqueda del contenido de agua que permita obtener la máxima densidad, pues se ha demostrado que existe un porcentaje de humedad para el cual se obtiene la máxima densidad con una energía de compactación dada.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los contenidos iniciales de los materiales para las mezclas de concreto compactado están dados en los rangos indicados en la tabla 2.

<b>M A T E R I A L</b>	<b>RANGO EN % DEL PESO TOTAL DE MATERIALES</b>
<b>C E M E N T O</b>	12 - 15
<b>A G U A</b>	4 - 6
<b>AGREGADO GRUESO</b>	46 - 52
<b>AGREGADO FINO</b>	38 - 48
<b>RELACIÓN AGUA/CEMENTO</b>	0.30 - 0.35

**TABLA 2. RANGOS APROXIMADOS DE LA PRESENCIA DEL CEMENTO, LOS AGREGADOS Y EL AGUA EN EL CCR.**

### III.1.- DISEÑO UTILIZANDO PRUEBAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS

Podemos utilizar las pruebas de compactación de suelos para el diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo, con estas pruebas se establece una relación entre los volúmenes del agregado fino y el agregado grueso, ya sea en estado seco o bien húmedo, con el contenido del agua, así al graficar los resultados, se obtiene una curva similar a la que se muestra en la figura 8.

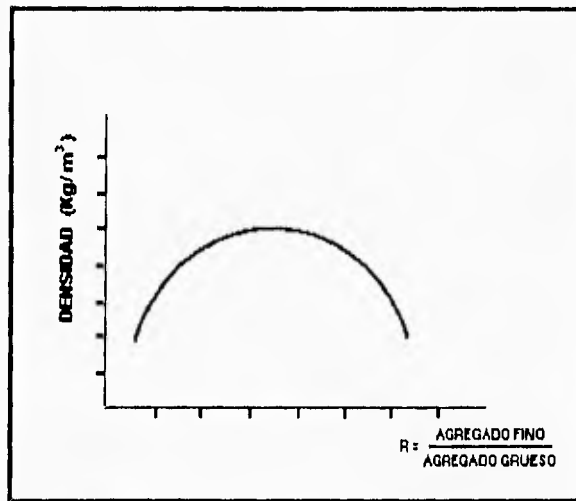


FIG 8.-CURVA TIPICA PARA DIFERENTES RELACIONES ENTRE AGREGADOS

Este procedimiento permite determinar la relación de agregados que se va a emplear durante la mezcla, la cual es aquella para la que se obtiene la máxima densidad.

La prueba significativa es la que llamamos prueba Proctor, a la cual se le realizan diversas modificaciones, así, se utilizan moldes de compactación de 6 x 12 pulgadas en lugar de los de 4 x 4.6 pulgadas para introducir agregados mayores.

El contenido óptimo de agua, necesario para ser empleado en la compactación de suelos dependerá de los agregados empleados, el contenido de material cementante y el esfuerzo de compactación que se aplique.

Se tendrá una pérdida en la resistencia si se tiene un contenido de agua por debajo del mínimo o si se está por encima del óptimo de humedad, el cual es producido por una relación alta (A/C+P).

El contenido de agua se expresa como porcentaje del peso del agregado, este cambia debido a las variaciones en las gravedades específicas de los materiales y los valores de absorción.

El contenido de cemento se determina mediante el esfuerzo de compresión en diferentes mezclas con un contenido óptimo de agua.

### **III.1.1.- DISEÑO POR LA EVALUACIÓN EN BASE A LA CONSISTENCIA DE LA MEZCLA.**

Para la determinación de la consistencia se utiliza la prueba VeBe y es aplicable a mezclas de concreto fresco con agregados de tamaños máximo nominal de 50 mm. La consistencia se mide como el tiempo requerido por una masa de concreto fresco para ser compactada por vibración en un molde cilíndrico metálico y resistente a la corrosión de 24 centímetros de diámetro interior y 20 centímetros de altura que puede ser fijado firmemente a la mesa vibratoria, la densidad de este espécimen compactado se determina dividiendo el peso del espécimen entre su volumen, previamente calculado.

El proporcionamiento del agregado grueso depende simultáneamente de los efectos combinados de los huecos o vacíos del agregado, el área de los mismos y la forma de las partículas.

Las densidades secas y el control de graduaciones dependen sobre todo del proporcionamiento, el número de tamaños que se tienen separados y la variación de la graduación dentro de cada uno de los tamaños, un incremento en el tamaño máximo del agregado incrementará la densidad seca y reducirá el contenido de vacíos.

El contenido de vacíos del agregado fino se determina mediante la medición del peso seco y generalmente varía entre 34% y 42%. El contenido de vacíos puede ser menor dependiendo de la ineficiencia de la medición, esto hace una diferencia desde una cantidad mínima de cemento, puzolana, aire y contenido de agua para asegurar un volumen sólido que debe llenar todos los huecos del agregado fino y envolver todas las partículas de agregado.

## **III.2.- MATERIALES**

Los materiales que se utilizan en la producción de un concreto deben cumplir las especificaciones y requerimientos mínimos de diseño que estipulan las normas de la región. Uno de los principios de proporcionamiento del concreto masivo es el de tener un máximo de agregados con la mínima cantidad de cemento. En general los materiales que se emplean deben ser de la localidad y en caso contrario, serán transportados de la región más económicamente factible.

### **III.2.1.- AGREGADOS**

Los agregados para una mezcla de concreto compactado con rodillo generalmente ocupan entre el 75% y el 85% del volumen del concreto, son materiales pétreos clasificados como gravas (agregado grueso), arenas ( agregado fino ) y en ocasiones puzolanas.

El tamaño máximo de agregados deseado oscila entre 20 y 40 milímetros, prefiriéndose tamaños máximos menores cercanos al límite inferior indicado, con el fin de controlar la segregación de la mezcla en estado fresco.



En cuanto a la procedencia de los agregados, estos pueden ser producto de la explotación y trituración de bancos de roca o ser extraídos de depósitos naturales de ríos, prefiriéndose los primeros debido a su menor tendencia a segregarse, aún cuando son más difíciles de compactar.

Se recomienda que al menos 2/3 partes del volumen de agregados sean triturados mecánicamente, para lograr una capacidad de soporte alta, suficiente para que los equipos de compactación inicien su labor inmediatamente después de descargar el concreto en el sitio.

Para el concreto compactado con rodillo las diferencias en el requerimiento de cemento para agregados de 38 a 76 milímetros son menores que para un concreto convencional, además se puede disminuir el contenido de cemento hasta un 15% cuando se utiliza el tamaño mayor, esto da como resultado una reducción del 15% en el calor de hidratación.

Los requerimientos de graduación de los agregados para diferentes mezclas de concreto compactado varían significativamente de una a otra, esta variación afecta la consistencia del concreto, al igual que los requerimientos de agua y cemento necesarios para llenar los espacios vacíos en el agregado y para cubrir las partículas al formar un volumen de concreto.

La granulometría de los agregados debe ser continua, estable y tal que unida al cemento presente una cantidad de finos suficientes para lograr una excelente compactación, la cantidad permitida de finos varía del 4% al 10% del peso total del agregado, siempre y cuando los finos no sean plásticos.

La figura 9, nos muestra la granulometría del agregado para concreto compactado con rodillo, la graduación del agregado fino tiene un efecto que ayuda a tener requerimientos mínimos de pasta de cemento.

Es conveniente contar con un gran porcentaje de tamaños pequeños de agregado para reducir la segregación. El proporcionamiento del agregado grueso para un requerimiento mínimo de mortero depende del porcentaje de vacíos, del área superficial y de la forma de las partículas.

Cuando las granulometrías se controlan por medio de cribado y la consecuente división de agregados en fracciones de tamaños separados, se puede controlar el contenido de vacíos dentro de ciertos límites.

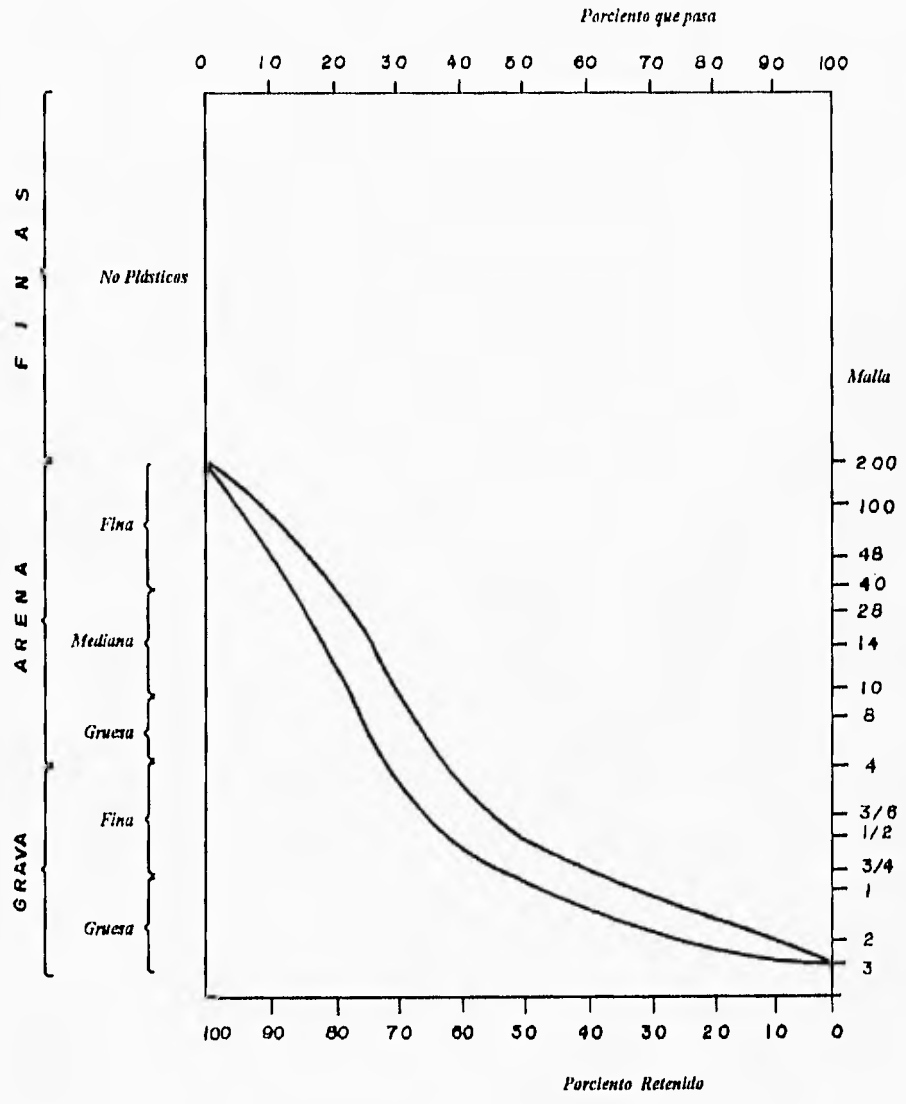


FIGURA 9. ENVOLVENTE DE LA GRANULOMETRIA TIPICA PARA CCR

### **III.2.2.- CEMENTO**

Dependiendo del tipo de cemento que se utilice para el diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo, se tendrá un menor o mayor grado de hidratación, también se verá afectada la resistencia del concreto a edades tempranas del mismo.

Los cementos más apropiados para el uso en las mezclas de concreto compactado con rodillo, serán aquellos con un bajo calor de hidratación, poca retracción y elevadas resistencias a largo plazo que contrarresten los fenómenos de fatiga.

Los tipos de cementos que mejor cumplen estas exigencias son los cementos clasificados como : TIPO III, TIPO IV y TIPO V. En general se puede decir que el contenido de cemento será del orden del 4% al 7% en el peso, porcentajes que corresponden a consumos aproximados de 85 kg/m<sup>3</sup> a 170 kg/m<sup>3</sup>, todo dependerá del tipo de agregado.

El uso de cenizas volantes, en la reducción de calor de hidratación, depende de los requisitos de resistencia y de la capacidad de las mismas para reducir la cantidad de agua solicitada así como el contenido de cemento. La cenizas volantes se deberán utilizar en un porcentaje máximo de 6 con respecto al peso de los agregados.

### **III.2.3.- AGUA**

El agua que se utiliza en la elaboración del concreto compactado con rodillo así como en el curado del mismo no debe contener materia orgánica, sólidos en suspensión, ni parecer contaminada por desechos industriales u otras sustancias que puedan afectar la resistencia final del concreto.

La forma de determinar si un agua específica se puede utilizar consiste en elaborar probetas con ellas y con otra de reconocida calidad para fallarlas a compresión y si las resistencias obtenidas no varían en más del 10%, se puede aceptar la fuente de agua en estudio.

El contenido de agua en el concreto compactado con rodillo debe estar entre el 4% y 7% aproximadamente, el cual supera la humedad necesaria para la hidratación del cemento.

### **III.3.- PRODUCCIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

El concreto compactado con rodillo se puede producir en las plantas premezcladoras convencionales, pero debido a la sensibilidad de la mezcla, a las variaciones en la humedad y en el contenido de cemento, se prefieren aquellas que estén dotadas de básculas para dosificación de cemento y del agua.

En los almacenamientos y manipulación de agregados deberán observarse las precauciones necesarias para impedir la segregación, contaminación o mezclas mal proporcionadas. Para garantizar la homogeneidad del material puesto en obra, antes de iniciarse la producción deberá estar almacenado al menos 50% del agregado necesario para la totalidad del concreto previsto.

La producción de agregados tiene una importancia capital dado el alto ritmo de colocación que se obtiene durante los trabajos de concreto compactado con rodillo cuando la producción entra en régimen. Es recomendable contar con por lo menos la mitad de la cantidad total de agregados que se utilizarán antes de comenzar con la producción del concreto, como ya se mencionó anteriormente. La producción de agregados y del concreto continúa a la par ya que la producción de este último supera la capacidad de producción de las plantas de trituración y

clasificación de agregados, consumiéndose al finalizar los trabajos la totalidad de lo almacenado. Además, ventajas técnicas justifican esta necesidad; la producción de agregados durante temperaturas invernales, permiten mantener a éstos fríos, reduciendo la temperatura que se origina por la hidratación del cemento.

La proporción en que se dosifica cada elemento será conforme a los resultados y especificaciones de diseño de la mezcla.

El ritmo de construcción lo estiman con anticipación los contratistas de acuerdo a un programa de obra, de tal forma que deberá existir una sincronización entre la producción y la colocación del concreto compactado con rodillo que permita un avance ( en volumen de obra ) suficiente para concluir la obra a tiempo. De acuerdo a este programa se sabrán los volúmenes requeridos por día, y por lo tanto, la clase y cantidad de equipo a emplear en la producción.

Los volúmenes de concreto que se llegan a colocar en obra pueden alcanzar los 2000 metros cúbicos, estos rendimientos dependen de varios factores como lo son entre otros, el tipo de obra y las condiciones climatológicas.

### **III.4.- RELACIÓN AGUA/CEMENTO**

En el concreto convencional es bien conocida la incidencia de la relación agua/cemento en las propiedades finales, especialmente en, la resistencia a la compresión, lo cual simplifica bastante el diseño de las mezclas, para una relación agua/cemento y unos agregados específicos, se obtiene una resistencia a la compresión dada, tal como lo establece la ley de Abrams.

Por el contrario, para el concreto compactado con rodillo el diseño de la mezcla es un poco más complicado, debido a la influencia que la relación entre la pasta y el mortero tienen sobre las propiedades del concreto y a que en ocasiones se dispone de un cuarto ingrediente para producir el concreto; las adiciones, que pueden ser las cenizas volantes, puzolanas o escorias siderúrgicas.

El diseño de mezclas de concreto compactado no depende directamente de determinar las relaciones agua/cemento apropiadas para obtener la resistencia y la trabajabilidad requerida, ni tampoco las relaciones grava-arena como ocurre para el caso del concreto convencional.

La cantidad de agua requerida para la compactación depende de las características de los agregados, el contenido de cemento y de las



condiciones de campo, y debe utilizarse independientemente de la relación agua/cemento, es decir la relación agua/cemento no es un parámetro importante para diseñar mezclas de concreto compactado con rodillo, ya que se debe de hacer énfasis en la utilización del contenido óptimo de agua para la compactación con el contenido mínimo de cemento y lograr así la resistencia mínima necesaria.

Al querer obtener relaciones agua/cemento bajas en las mezclas de concreto compactado con rodillo, y al tratar de lograr esto al disminuir la cantidad de agua, se tendrán consecuencias diversas como compactación inadecuada, la permeabilidad se verá incrementada y el peso volumétrico disminuirá, asimismo si se intenta aumentar el contenido de cemento se estará incrementando tanto los costos, la contracción y el agrietamiento en el concreto.

La cantidad de agua requerida para la compactación depende de las características de los agregados, el contenido de cemento y no necesariamente a los cambios en la relación agua/cemento.

### III.5.- ADITIVOS

El uso de aditivos está orientado hacia los retardadores de fraguado para prolongar y garantizar que se dispondrá de tiempo suficiente para lograr la compactación exigida, es decir aumentan el plazo de trabajabilidad del material, entendiéndose por trabajabilidad de un concreto compactado con rodillo su facultad de conservar en un período de tiempo su aptitud para la compactación. A medida que se desarrolla el fraguado del material, el concreto compactado pierde progresivamente su trabajabilidad.

El agua libre se combina con el conglomerante, perdiendo su papel de lubricante; mientras que los enlaces conglomerante-agregado que empiezan a desarrollarse rigidizan de forma paulatina el material.

El plazo de trabajabilidad en el intervalo, contado a partir de la mezcla de los componentes, durante el cual, al no haber comenzado o ser muy débil el fraguado del conglomerado, se puede proceder al extendido y compactación del material.

Pueden utilizarse aditivos que mejoren ciertas características de la mezcla, así mediante el empleo de plastificantes es posible conseguir las densidades requeridas con menos contenido de agua, lo cual se traduce en un aumento de las resistencias.

La incorporación de Humo de Sílice, proporciones oscilando normalmente entre 10 kg/m<sup>3</sup> y 20 kg/m<sup>3</sup>, permiten igualmente incrementar de forma notable las resistencias.

### **III.6.- EQUIPO DE MEZCLADO**

#### **III.6.1.- MEZCLADO EN PLANTAS PORTÁTILES**

El concreto compactado con rodillo se puede elaborar en mezcladoras continuas destinadas para concreto pobre o muy seco. Estas mezcladoras se caracterizan por tener ejes horizontales que rotan dentro de un tambor fijo y tienen adherida a ellos unas espas o paletas que agitan la mezcla; estas mezcladoras se conocen con el nombre de "PUGMILLS". En este tipo de plantas mezcladoras, los agregados gruesos y finos se incorporan al recipiente principal por medio de compuertas controladas, que dosifican las cantidades de estos, dependiendo del diseño de la mezcla. El cemento a su vez, se descarga desde el silo de almacenamiento sobre los agregados por medio de un mecanismo que incorpora la cantidad precisa, de acuerdo al diseño de la mezcla.

Para controlar en forma adecuada la cantidad de cemento necesaria en la mezcla, se colocan unos tanques entre el silo de almacenamiento y el mecanismo de alimentación del cemento, los cuales tienen una capacidad de 200 kilogramos a 350 kilogramos para mantener una presión de cemento constante que asegure un flujo de carga uniforme.

Estas plantas se consideran portátiles ya que sus componentes pueden ser montados y transportados en una sola unidad de remoque y ensamblarse para su traslado en menos de 4 horas.

### **III.6.2.- MEZCLADO EN PLANTAS DE BACHA CONVENCIONALES**

Dadas unas condiciones específicas, es factible el uso de plantas estacionarias convencionales de mezclado.

Una de estas condiciones pueden ser la existencia de una planta mezcladora de concreto cerca al sitio de la obra, que garantice un buen sistema de control y que pueda mantener una calidad aceptable en todo momento.

Debido a que el concreto compactado con rodillo es un material extremadamente seco y de baja densidad cuando no está compactado, las mezcladoras convencionales sólo pueden llenarse con tres cuartas partes del peso normal para el cual están diseñadas, asegurando así una mezcla más homogénea; además los tiempos de mezclado y de descarga deben ser más largos.

Todo esto resulta en una disminución de una tercera parte de la capacidad normal que se tiene para la producción del concreto convencional.

Dado que cualquier cambio en la cantidad de agua en la mezcla de concreto compactado con rodillo, produce cambios drásticos en sus propiedades no se debe alternar la fabricación de éste con concretos de otro tipo.

### **III.6.3.- TAMBORES Y CAMIONES MEZCLADORES**

El uso de tambores mezcladores en la planta o en los camiones transportadores, ha resultado exitoso para mezclar el concreto en algunos casos.

Este método es aconsejable cuando se dispone de agregado relativamente limpio, al igual que de una mezcla con un contenido mínimo de finos, esto se debe a que los finos tienden a aglutinarse, formando grumos difíciles de mezclar completamente debido a la poca cantidad de agua presente en la mezcla.

Es frecuente también, cuando se usa este sistema, que se presenten problemas para la descarga de los camiones mezcladores, esto se remedia colocando el camión en una rampa inclinada  $30^\circ$  respecto a la horizontal y limpiando el interior del tambor para proporcionar una superficie suave, por lo cual se puede deslizar fácilmente el concreto.

## **IV.- COMPACTACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

### **IV.1.- TRANSPORTE**

En los movimientos de tierra como de concreto, se hace aconsejable considerar un análisis detallado que nos ayude a obtener el método y el equipo de transporte más adecuado, evitando con esto la posible generación de problemas. La selección del equipo de transporte se debe hacer de tal manera que se garantice un suministro rápido, ágil y eficiente. Al presentar un revenimiento igual a cero y debido a su nula fluidez, el concreto compactado con rodillo requiere de un manejo especial con el fin de evitar la segregación.

El transporte tiene diferentes formas y en su elección se conjugan diferentes factores técnico-económicos; y donde una correcta organización y una eficiente coordinación de los trabajos son los elementos necesarios para obtener un mayor ritmo de colocación y una reducción de costos.

**TRANSPORTE POR MEDIO DE CAMIONES BACHA :** El concreto compactado con rodillo generalmente se transporta en camiones, siendo los más usuales los camiones de descarga trasera, aunque se pueden utilizar los camiones de descarga lateral, los cuales pueden variar en capacidad desde unos cuantos metros cúbicos hasta el uso de camiones fuera de carretera, esto se debe a la poca distancia que usualmente existe

entre la planta mezcladora y el sitio de la obra ( especialmente cuando se usan plantas portátiles ) y a lo económico y accesible que es este sistema. La selección del tamaño del equipo debe basarse en la capacidad de colocación requerida, la duración del ciclo y en el volumen a ser colocado.

La utilización de camiones, es un equipo de uso generalizado y que puede usarse en muchos otros trabajos, si bien su uso implica una mayor posibilidad de segregación en operaciones de carga y descarga, mayor daño de superficie por giros y tránsito sobre el concreto. lo cual origina un trabajo de limpieza mayor y por ende una reducción de la producción.

La utilización de estos equipos implica un control estricto de la entrada de vehículos para evitar la contaminación de la superficie.

**TRANSPORTE POR MEDIO DE BANDAS:** La colocación continua del concreto compactado con rodillo se puede lograr mediante transportadores de banda. Generalmente es necesario contar con una tolva al final de la banda transportadora principal para retención temporal a fin de evitar interrupciones por espera de los vehículos de acarreo, el material no se debe retener en la tolva de almacenamiento durante más de diez minutos.

Uno de los métodos más eficientes de transporte y colocación es a través de las bandas transportadoras, las cuales reducen la cantidad de equipo. Si bien las bandas son un dispositivo caro, complejo y no

disponible en muchas empresas, su uso implica rapidez de colocación y transporte, menos mantenimiento, eliminación del daño a la superficie, como consecuencia del no tránsito de vehículos y un mejoramiento general de la producción.

**TRANSPORTES POR MEDIO DE CAMIONES MEZCLADORES:** En algunos casos particulares, donde las condiciones de la obra y del equipo se presten, se pueden usar camiones mezcladores para el transporte del concreto de la planta a la obra.

Estos casos son muy específicos, y como ya se menciono con anterioridad, debe dársele mucha importancia a la limpieza interior del tambor para alcanzar la descarga y no incurrir en demoras innecesarias que perjudiquen el ritmo de colocación y la económica del proyecto.

Es recomendable que cuando se utilizan transportes con neumáticos, se limpien las llantas antes de entrar en contacto con la superficie previamente compactada.

Se debe evitar la pérdida de humedad durante el acarreo, especialmente si la planta queda lejos, por lo que se recomienda que el tiempo de acarreo no debe ser mayor de 10 minutos, ni la distancia mayor de 3 kilómetros.



Se deberán de colocar indicadores y señalamientos para el control y la identificación de concretos en cuanto sean mezclados y descargados en los equipos de transporte y en los sitios de colocación para extenderlos.

Para disminuir la segregación, al descargar en los camiones, como el revenimiento del concreto es cero, se formará un cono que propiciará la segregación. Este problema se corrige al colocar personas con rastrillos que eviten la formación del cono a medida que el concreto cae, así mismo la descarga de los camiones se debe realizar a partir de alturas de caída lo más pequeña posible, la experiencia indica que un concreto con un tamaño máximo de agregado de 1 1/2 de pulgada puede ser transportado y colocado con el equipo diseñado para transporte de movimiento de tierras sin que presente segregación apreciable.

También es necesario tomar medidas para evitar que las condiciones climatológicas adversas perjudiquen la mezcla; para ello puede ser necesario utilizar lonas que protejan al concreto de la lluvia y la desecación durante el transporte.

## **IV.2.- COLOCACIÓN**

El proceso de colocación del concreto compactado con rodillo forma parte integral de todo el proceso constructivo. Debido a esto debe ser siempre rápido y eficiente para mantener el ritmo de las otras etapas de la construcción.

Los procedimientos de colocación del concreto compactado con rodillo deben estudiarse para cada proyecto en particular para evitar en lo posible la formación de juntas. Inicialmente debe asegurarse que la superficie donde se va a colocar el concreto esté bien compactada y en buenas condiciones para evitar que el concreto se agriete en un futuro.

El concreto se colocará dentro de los treinta minutos siguientes al mezclado, las capas serán de diferentes espesores según el proyecto, se ha comprobado que el espesor óptimo fluctúa entre 20 y 30 centímetros. El concreto compactado con rodillo deberá ser distribuido en forma uniforme, de tal manera que requiera un mínimo de redistribución. Se deberá planear el avance de la colocación del concreto compactado, de una forma que no existan interrupciones ya sea ocasionada por el retraso de los camiones, mala maniobra de alimentación al equipo de extendido o mala coordinación en el movimiento de los camiones al aproximarse al equipo de extendido. El tiempo entre la colocación de capas sucesivas no debe exceder de tres horas.

#### **IV.2.1.- EQUIPOS**

El extendido del concreto se puede realizar mediante motoconformadoras, extendedoras o pavimentadoras usadas para concreto asfáltico o con las utilizadas tradicionalmente en la construcción de concreto convencional.

Las motoconformadora pueden usarse en zonas con geometría compleja, tienen la ventaja de disponer de gran capacidad y de permitir regar el material sobre una superficie muy extensa sin la necesidad de juntas longitudinales.

Las pavimentadoras son máquinas fáciles de conseguir y manejar. Con ellas se puede controlar tanto la pendiente como el bombeo ( en el caso de pavimentos ), y lograr superficies de mejor calidad, adicionalmente garantizan un espesor uniforme con ritmos de colocación de hasta 1.2 m/min. En ocasiones, cuando es necesario colocar el concreto en espesores mayores de 25 cm, se deben modificar los equipos de forma que se manejen volúmenes grandes de material. Para ello es recomendable el uso de extendedoras provistas de pisonos o reglas vibrantes, que produzcan una precompactación significativa que permita conseguir un buen nivel de regularidad. El extendido debe cumplir con ciertos requisitos : Homogeneizar la mezcla o en todo caso no favorecer la segregación, colocar concreto con los espesores provistos, dotar a la mezcla de una cierta precompactación, no dañar las cimbras y demás elementos constructivos.

### **IV.3.- DEFINICIÓN DE COMPACTACIÓN**

Los métodos de compactación de suelos han ido evolucionando notablemente, desde los métodos primitivos que consistían en remolcar troncos arrastrados por animales, hasta los métodos más revolucionarios como lo son el uso de equipos vibratorios de compactación.

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas ( relación esfuerzo-deformación ) por medios mecánicos, y su importancia estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico, disminuyendo sus vacíos.

Una correcta compactación da como resultado mayor estabilidad y menor permeabilidad. Los factores más importantes que influyen en la compactación son; el tipo de material, el contenido de agua y la energía específica empleada en dicho proceso (se entiende por energía específica, la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen).

Existen diversos métodos de compactación debido a los esfuerzos mecánicos empleados, estos son:

A) PRESIÓN ESTÁTICA : Este método esta basado en la aplicación de una fuerza en un área determinada, generando una presión sobre el suelo a compactar, el efecto de esta fuerza es de la capa superior hacia

las capas inferiores. Este principio tiene la desventaja de que al aplicar una presión mayor, la fuerza de fricción que se desarrolla entre las partículas de un material son mayores, esta fricción es la resistencia que oponen las partículas del suelo para deslizarse dentro de la masa del mismo.

**B) POR AMASAMIENTO:** La compactación por amasamiento se sigue por penetración, más que por efecto del bulbo de presiones generado por el efecto de amasado que se produce cuando un compactador pata de cabra, penetra en un material ejerciendo presión hacia todos lados, obligando a parte del aire a salir a la superficie.

La compactación por este método da lugar a que las capas inferiores del material se compacten primero que las capas superiores.

**C) POR IMPACTO:** Se logra haciendo caer repetidamente un peso desde cierta altura. El principio en que se basa este tipo de compactación es que, cuando un cuerpo se levanta 20 centímetros sobre una superficie y se deja caer, la presión que ejerce sobre esta, es 50 veces mayor que la presión que ejerce el mismo cuerpo estando apoyado estáticamente sobre dicha superficie.

**D) MEDIANTE ENZIMAS:** Por medio de la adición de productos enzimáticos al agua de compactación se ha pretendido obtener, en combinación con algún otro esfuerzo compactador, la densificación más rápida de los materiales.

E) POR VIBRACIÓN: Como en la compactación por presión estática, en este tipo de compactación también se aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete el material a rápidos y fuertes vibraciones, debido a las vibraciones producidas por el equipo sobre el material, la fricción interna en éste desaparece momentáneamente, propiciando el acomodo de las partículas.

La fricción interna del material permite que las fuerzas compactivas trabajen a mayor profundidad y a mayor anchura.

La densificación de un material por medio de compactación vibratoria es de abajo hacia arriba.

#### **IV.4.- EQUIPO DE COMPACTACIÓN**

La elección de los equipos de compactación, está directamente relacionado a las características propias de éstos y a las del proyecto, siendo estos dos factores fundamentales para determinar la cantidad de pasadas del equipo. Las características propias del equipo, como fuerza de compactación, tamaño de los tambores, frecuencia, amplitud y velocidad son factores a considerar y analizar; así también como la disponibilidad del equipo y la necesidad de adaptar elementos de diseño a éstos, como por ejemplo el espesor de las capas.

**RODILLO VIBRATORIO LISO:** Su peso muerto puede variar de 9 a 11 toneladas, funciona disminuyendo temporalmente la fricción interna existente entre las partículas del material a compactar. La vibración provoca un reacomodo de las partículas que resulta en un incremento del peso volumétrico.

**RODILLO ESTÁTICO LISO:** Este rodillo utiliza solamente presión con un mínimo de amasamiento en materiales plásticos. Cuando estos rodillos inician la compactación de una capa, el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de cierta profundidad. Conforme avanza la compactación el ancho del área de contacto se reduce, y por lo tanto también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie.

**COMPACTADORES NEUMÁTICOS:** Son muy eficientes y a menudo esenciales, sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante, por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Se pueden dividir en cuanto al tamaño de las llantas: de llantas pequeñas y grandes.

**PAVIMENTADORA MODIFICADA:** Cuentan con una barra apisonadora trasera con la cual se obtienen grados de compactación de 95% a 98%. Posteriormente se debe compactar el concreto con compactadores de neumáticos y/o de tambor de acero.

En ocasiones el equipo antes mencionado no puede operar en ciertas áreas durante la construcción, por ejemplo cerca de obstáculos, en los bordes, etc; es por ello que se tienen que utilizar equipos de menor tamaño entre ellos se tienen:

**RODILLOS AUTOPROPULSABLES LIGEROS NO VIBRATORIOS:** Aplanan la superficie pero no proporcionan una compactación profunda.

**RODILLOS VIBRATORIOS MANUALES:** Se pueden utilizar en mezclas pobres colocadas en capas de hasta 25 centímetros.

El equipo de vibrado debe operarse a una velocidad baja, normalmente menor de 3 km/h y funcionar con una amplitud alta y una baja frecuencia de vibración; si se cumplen estos requisitos puede asegurarse una buena compactación.



#### **IV.5.- ESPESOR DE LAS CAPAS A COMPACTAR**

Cada proyecto tiene sus características y debe ser analizado como tal; e incluso después de iniciados los trabajos, las modificaciones y ajustes son continuos. La elección del espesor de la capa y del equipo están directamente relacionado, una capa de mayor espesor tendrá para una producción dada menor cantidad de juntas, con lo cual hay menos uso de mezcla de asiento y menos limpieza, mayor posibilidad de remezclado, menor cantidad de caminos potenciales de filtración, pero que requieren un equipo de compactación de mayor potencia.

Una capa de menor espesor tiene la ventaja de recubrimiento más rápido, mejor adherencia de juntas y un equipo de compactación de menor potencia.

Cuando se utiliza concreto compactado con rodillo para pavimentos, la inclinación es a colocar capas delgadas, teniendo capas de 15 a 25 centímetros con agregados más pequeños para obtener una superficie más uniforme.

En Japón se acostumbra a compactar espesores de hasta 1 metro. las cuales constan de tres sub-capas pero se compactan en una. El hecho de colocar varias sub-capas ayuda a controlar la segregación y proporciona cierta precompactación.

Conforme a estudios recientes del cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, se han demostrado que las capas de 60 centímetros de espesor y con un tamaño máximo de agregado de 3 pulgadas pueden compactarse satisfactoriamente si el contenido de agua es poco superior al normal.

Contrariamente a la opinión general, la densidad del concreto compactado con rodillo aumenta si se aumenta el espesor de las capas. El incremento en el espesor de 30 a 60 centímetros tiene como consecuencia beneficios adicionales tales como: la eliminación de gran parte de las juntas, además de que se disminuye el tiempo de construcción.

#### **IV.6.- SECUENCIA DE COMPACTACIÓN**

Después de la colocación del concreto compactado con rodillo se debe proceder inmediatamente a la compactación. Se deberá contar con el suficiente número y tipos de rodillo para compactar la mezcla hasta alcanzar su densidad máxima, esta densidad no debe ser menor al 98% de la densidad obtenida en laboratorio. El contenido de humedad de la mezcla antes de iniciar la compactación no debe estar a menos de 1% abajo ni a más de 2% arriba de la humedad óptima.

La experiencia ha demostrado que se pueden obtener resultados aceptables con equipo de menor tamaño pero con el mayor número de pasadas. Los factores para obtener una compactación adecuada son una humedad correcta, una graduación apropiada, el control del tiempo de compactación y una frecuencia relativamente alta.

La compactación se inicia con el rodillo vibratorio, el número de pasadas dependerá del tipo de equipo, de las características y espesor de la capa. Es importante tener en cuenta que el rodillo no debe devolverse por el mismo carril, para evitar que se produzcan ahuellamientos.

El concreto debe haber alcanzado por lo menos el 98% de la densidad del Proctor y el número de pasadas, generalmente es de tres o cuatro.

Posteriormente se tendrá que pasar el equipo neumático una o dos veces para que sellen todas las fisuras que quedan en la superficie después del vibrado y para asegurar un mejor acabado y calidad.

La última etapa puede lograrse con una o dos pasadas del rodillo en forma estática, primero hacia adelante y luego hacia atrás, sobre el mismo carril, para borrar las huellas dejadas por el equipo neumático.

La figura 10 explica la secuencia de compactación, donde se observa que una de las orillas se deja sin compactar para unirse con el siguiente carril, produciéndose una junta longitudinal fresca. Así primero se compactan las orillas y luego el centro, traslapando las pasadas.

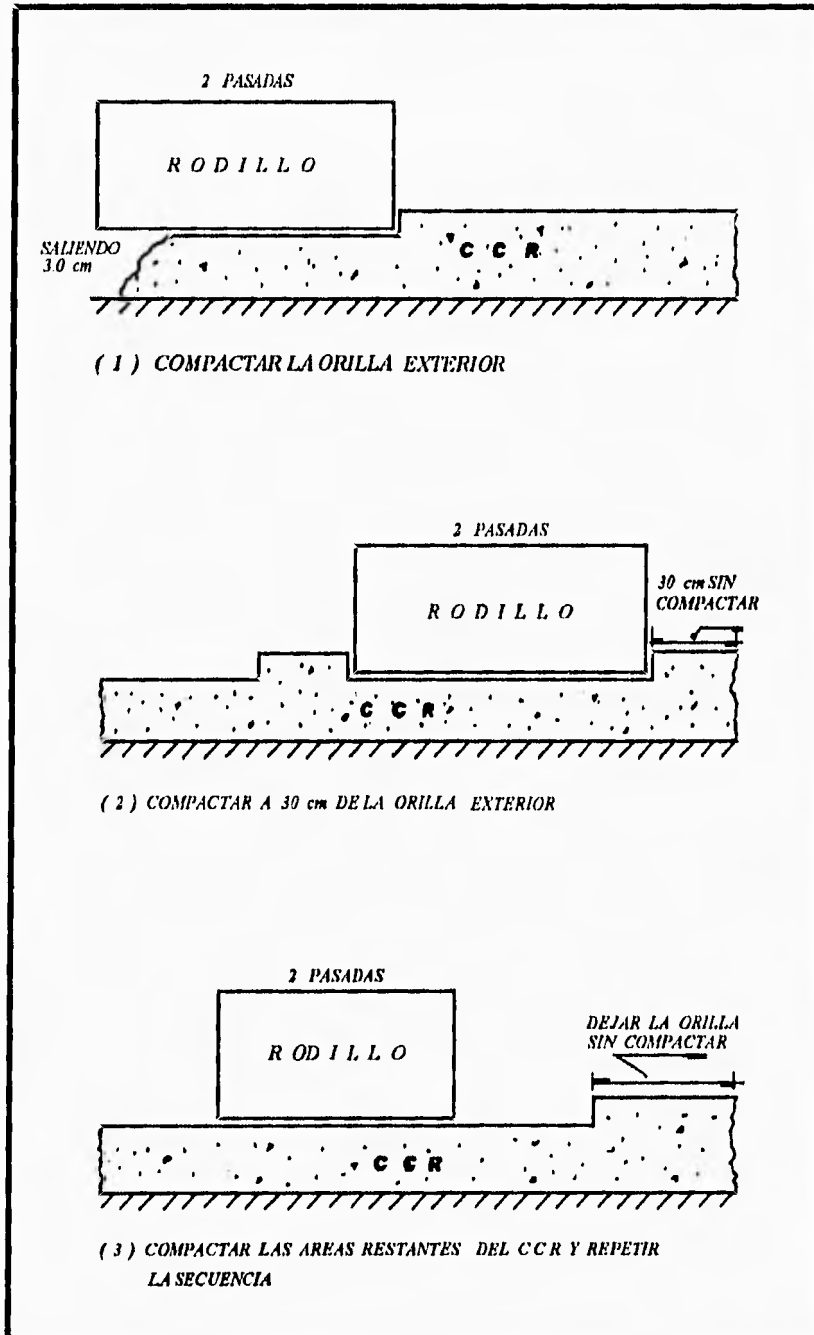


FIGURA 10

#### **IV.6.1.- JUNTAS**

Si se requiere establecer una clasificación de la distintas situaciones que pueden presentar durante la construcción de una presa de concreto compactado con rodillo, en lo que se refiere a juntas horizontales podemos distinguir entre:

**JUNTA FRÍA:** Aquella situación de junta que exija un lavado y la extensión de una mezcla de unión para un correcto tratamiento.

**JUNTA W:** Aquella situación en que la junta no exige lavado pero si una mezcla de unión para su correcto tratamiento.

**JUNTA CALIENTE:** Aquella situación en la que la capa inferior une perfectamente con la superior sin necesidad de ningún tipo de tratamiento.

En lo que se refiere a la construcción de pavimentos de concreto compactado con rodillo podemos citar la aparición de juntas tales como:

**JUNTAS TRANSVERSALES:** Tienen por objeto controlar la fisuración aleatoria como resultado de la contracción, se debe cortar en aquellos pavimentos en que se busque una buena apariencia estética y no se vaya a recubrir posteriormente con una capa de concreto asfáltico. En caso contrario se puede permitir que se formen espontáneamente.

Cuando se elaboren cortes, se deben ejecutar durante las primeras 24 horas después de compactado el concreto con un espaciamiento entre 15 y 20 metros.

**JUNTAS LONGITUDINALES:** En el caso de la pavimentación con concreto compactado con rodillo, de vías con un ancho inferior a los 10 metros, no son necesarias siempre y cuando se puedan emprender las labores de construcción a todo el ancho de la vía. En caso contrario se deben evitar las juntas frías, colocando y compactando el concreto por carriles en un período inferior a 90 minutos, dejando de compactar unas franjas de 20 centímetros a 30 centímetros de ancho en el borde de los carriles adyacentes, para luego compactar simultáneamente las 2 franjas.

**JUNTAS FRÍAS:** Pueden ser longitudinales o transversales y se deben en principio a 2 razones: la primera a la interrupción en la construcción por fallas en el suministro del concreto o por la finalización de la jornada laboral, y la segunda, a las limitaciones del equipo constructivo.

Las juntas frías deben tener un plano vertical, el cual se obtiene cortando el concreto, cuando aún se encuentra fresco, con la ayuda de la cuchilla de la motoconformadora.

Al reiniciar la construcción se descarga el concreto a lo largo de la junta fría, con el sobreespesor necesario para lograr la altura del

compactado deseado según el diseño. Este sobreespesor es bueno colocarlo también en una franja de unos 8 centímetros de ancho sobre el concreto endurecido de la junta, para antes de permitir la circulación de los equipos compactadores, empujar el concreto hacia el concreto fresco con la ayuda de un rastrillo. A continuación se hacen circular los compactadores a lo largo de la junta, con el rodillo montado 30 centímetros sobre el concreto fresco, tal como se indica en la figura 11.

OTRAS: Las juntas de expansión no son necesarias en los pavimentos de concreto compactado con rodillo, a menos que se necesite proteger estructuras que se encuentren dentro del área a pavimentar, en cuyo caso se deberán seguir las mismas recomendaciones que para los pavimentos de concreto convencional.



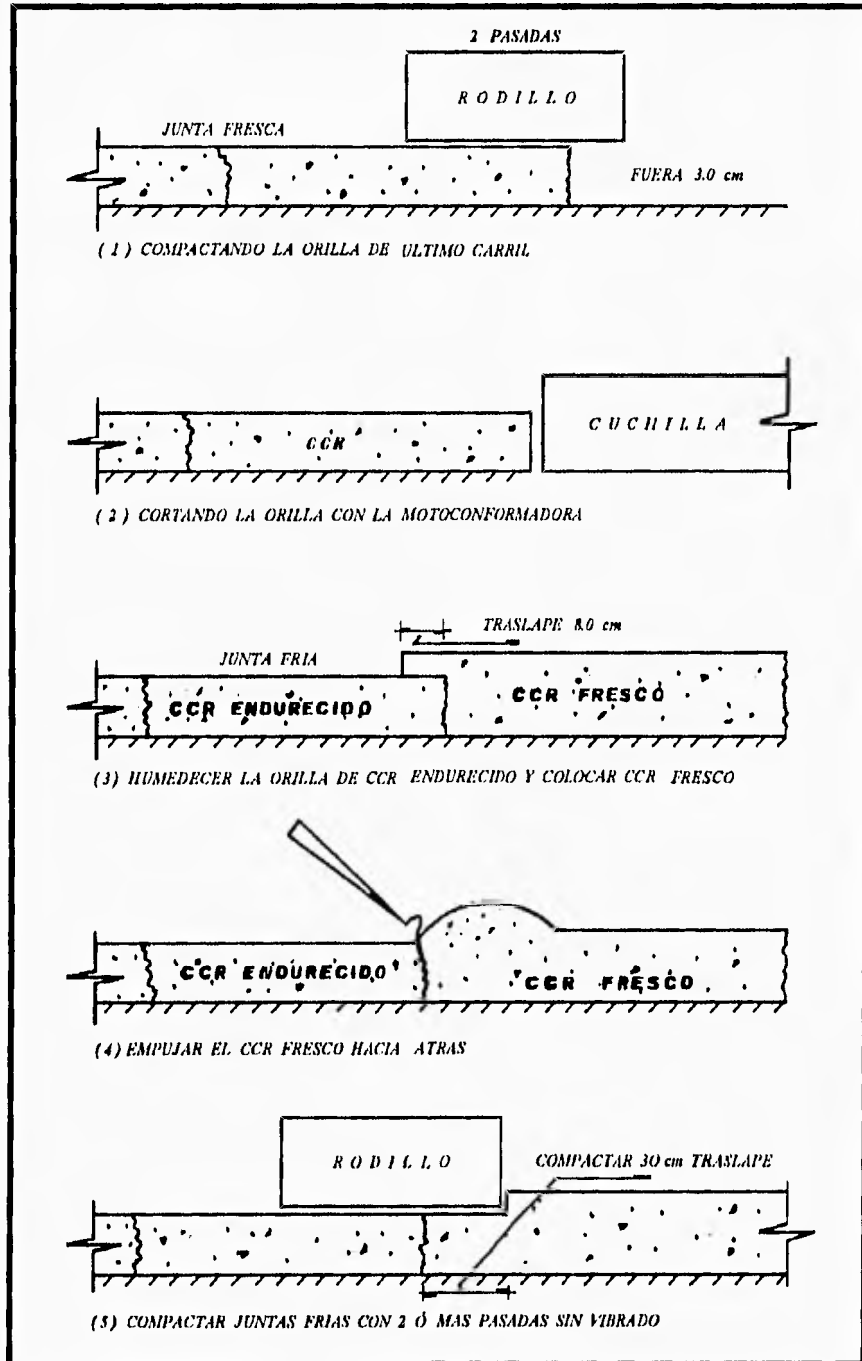


FIGURA 11.

#### **IV.7.- TIEMPO DE COMPACTACIÓN**

El concreto compactado con rodillo deberá compactarse a los treinta minutos después del mezclado, como una regla se tiene que se debe de depositar a los 10 minutos posteriores al mezclado, extenderse dentro de los 10 minutos posteriores a la descarga y compactarse dentro de los 10 minutos posteriores a su colocación. Si existe material desprendido y se recompacta dentro de los 20 minutos posteriores al daño su comportamiento a largo plazo será aceptable.

El personal casi siempre desconoce que si el concreto compactado con rodillo no se compacta inmediatamente, la humedad disponible para su compactación disminuye debido a la hidratación del cemento ya la evaporación, por lo que mientras más rápido sea compactado el concreto compactado con rodillo mejores serán los resultados.

#### **IV.8.- CURADO**

La superficie del concreto compactado con rodillo tiene que protegerse de la desecación, para ello será necesario realizar un adecuado curado.

El curado consiste en el mantenimiento de contenido de humedad y temperatura satisfactorias en el concreto durante un período definido inmediatamente después de la colocación y compactación del concreto.

Los objetivos del curado del concreto son; prevenir la pérdida de humedad del concreto y mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido. Con un curado adecuado, el concreto se volverá más impermeable y resistente a los esfuerzos, a la abrasión, congelación y deshielo. La mejora es inmediata en las edades tempranas aunque continúa dándose más lentamente durante un período indefinido

Debido al bajo contenido de agua en las mezclas de concreto compactado con rodillo, cualquier pérdida de esta durante y después de la colocación del concreto se vuelve crítica para la calidad final, es por esto, inmediatamente después de que se termine la compactación, debe empezarse el curado con agua, empleando una capa de arena húmeda, mantas de algodón, camiones regadera o sistemas de aspersión.

En la mayoría de los casos el curado se aplica por lo menos por siete días, en proporciones de 3.5 litros de agua por cada 10 metros cuadrados de concreto.

El uso de mangueras o botes en forma directa tiene como consecuencia el deslavado superficial del material, además de que no se realizará un correcto curado y por ende la calidad del concreto se verá disminuida.

Las operaciones de curado deberán realizarse antes de transcurridas 12 horas desde el final de la compactación, este plazo ha de ser reducido con condiciones de tiempo cálido o seco.

#### **IV.9.- TEXTURA FINAL**

La calidad de la textura superficial de un concreto compactado con rodillo depende del tamaño máximo del agregado grueso, así como de otras características de la mezcla.

El uso del compactador de llantas neumáticas después del de rodillos vibratorios puede ayudar a obtener una textura más cerrada, pero un exceso de compactación puede provocar grietas de arrastre.

El uso del concreto compactado con rodillo presenta el problema de no tener una superficie de rodamiento adecuada cuando se utiliza en pavimentos, ya sea baja o alta velocidad.

Para vías de alta velocidad, en ocasiones habrá que colocar un recubrimiento a base de asfalto como capa de rodamiento.

Con objeto de conseguir una textura antiderrapante, hay que dar algún tratamiento a la terminación que produce el peso de los rodillos vibratorios o de los compactadores neumáticos.

Si la regularidad superficial es buena, es suficiente un tratamiento con asfaltos rebajados, si por el contrario deja mucho que desear, habría que realizar un acabado con una capa de concreto asfáltico.

Se recomienda según experiencias, una capa de material asfáltico de 8 centímetros sobre el concreto compactado con rodillo de tráficos importantes y para tráficos menos importantes una capa de 5 centímetros.

En el caso de vías de baja velocidad (superficies portuarias, industriales, vías urbanas, urbanizaciones residenciales de baja intensidad) sin acabado de concreto asfáltico se procede como sigue:

A) después de realizada la compactación puede darse unas pasadas adicionales, previa extensión de una lechada de cemento que llene totalmente el pavimento de concreto compactado con rodillo.

B) como terminación superficial se procede a un fresado mecánico.

Este tipo de acabado es recomendable para velocidades menores de 40 Km/hr.

## **V.- ESPECIFICACIONES Y CONTROL DE CALIDAD**

En cualquier tipo de obra que vaya a construirse se deberá seguir un programa de control de calidad, con el objeto de definir los puntos vitales de la construcción y ejercer en ellos una vigilancia razonable y científica, para que las obras cumplan determinados requisitos de seguridad, calidad, economía y tiempos establecidos según las especificaciones de proyecto.

La construcción de las obras civiles de ingeniería requieren una supervisión minuciosa de los planos y especificaciones del proyecto, de una supervisión eficiente y de un control de calidad auténtico, con el fin de lograr que tales obras cumplan con su propósito.

El nivel de calidad es el conjunto de características cualitativas y cuantitativas que deben satisfacer los materiales, las instalaciones y componentes de la obra en los aspectos de resistencia a las cargas por soportar, asentamientos totales y diferenciales, deformaciones, geometría, apariencia, durabilidad, capacidad de carga, etc.

El control de la calidad debe incluir todas las operaciones inherentes al muestreo, ensaye, inspección y selección de materiales, previamente a la ejecución de la obra, a fin de asegurar que el procedimiento constructivo satisfaga las exigencias de la misma.

Las especificaciones pueden ser las generales y las complementarias o particulares del proyecto.

Las generales son normas elaboradas por instituciones o dependencias oficiales, están orientadas a la construcción de obras civiles, toman en cuenta el clima y el procedimiento de construcción.

Las especificaciones complementarias son elaboradas para obras específicas que se adaptan precisamente a casos particulares y son formuladas en función de las características específicas de los materiales de la zona de construcción, están apoyadas en el proyecto, lo cual hace que sean las más importantes. Las especificaciones generales pueden ser contractuales, constructivas y técnicas. Las especificaciones contractuales son las que relacionan al contratista con el contratante. Finalmente, podemos decir que las especificaciones constructivas y técnicas si se pueden estandarizar.

En cuanto al concreto compactado con rodillo, las especificaciones para este, se obtendrán de estudios previos y dependerán del tipo y características de la obra por ejecutar, así como de las condiciones generales del sitio donde se vaya a edificar la obra, no pudiendo generalizar dichas especificaciones para todos los concretos, ya que cada uno de ellos estará sometido a condiciones muy particulares de trabajo.



## **V.1.- PRUEBAS DE CAMPO**

Antes de construir con el concreto compactado con rodillo, se deben de realizar diversas pruebas de campo, el objetivo será verificar puntos importantes como lo son:

- Eficiencia del equipo de mezclado
- Uniformidad de la mezcla de concreto y tiempo de mezclado
- Rendimiento de la mezcla
- Segregación del material durante el transporte
- Pérdida de humedad por temperatura ambiental
- Contenido de humedad del concreto
- Espesores abundados y compactados
- Número de pasadas del equipo para lograr el porcentaje de compactación deseado

Un factor de particular peso en la calidad del concreto es la importancia de la observación visual por parte del personal que ejecuta los trabajos y la inmediata comunicación con la planta para realizar los ajustes necesarios en la mezcla. Dependiendo de la temperatura, humedad, cantidad de finos, segregación, pueden realizarse ajustes en la mezcla por observación del personal de campo sin esperar recibir resultados de ensayos que de todas formas serían tardíos dada la rapidez de colocación.

Si la mezcla está algo más húmeda se observan hundimientos de los rodillos vibratorios y material pegado es éstos; en el caso contrario, con mezclas demasiado secas se notan dificultades de distribución, segregación y compactación.

Las operaciones de colocación, distribución, limpieza de superficie y compactación, como los controles de eficiencia y calidad de mezclado de la planta deben ser supervisados permanentemente. Con respecto a esto último, siendo las mezclas de concreto compactado con rodillo pobres en cemento, el hecho que parte de él quede adherido a los mezcladores o alimentadores tiene una importancia mayor que el caso de muestras ricas en cemento, donde si una pequeña parte queda adherida no tiene una connotación tan crítica.

Por lo antes citado, una parte importante para obtener un adecuado control de calidad, será la capacitación, orientación y entrenamiento a supervisores, inspectores y todo aquel personal que tenga contacto en la construcción de elementos de concreto compactado con rodillo.

En términos generales, el control de la calidad del concreto compactado con rodillo mediante pruebas de campo consiste en ( no se considera como una norma ) : vigilar el contenido de agua durante el mezclado, verificar la consistencia durante la colocación del concreto utilizando el equipo VeBe y medir la densidad después de la colocación.

**CONTROL DE LA CONSISTENCIA :** La consistencia se determina utilizando el equipo del ensaye VeBe. Al menos un ensaye se debe realizar durante la primera media hora de iniciada la colocación de cada capa. El resultado se transmitirá a la planta mezcladora para que se realicen los ajustes necesarios en cada caso.

**CONTROL DEL CONTENIDO DE AGUA :** Un aspecto importante será el compensar el contenido de agua en función de la variación de la humedad de los agregados. La humedad de los agregados se determina y se ajustará con el contenido de agua de cada capa. A su vez el contenido de agua se ajustará en base con los resultados del ensaye VeBe, después de que se inicie la colocación.

**CONTROL DE LA DENSIDAD :** El control de la densidad se realizará con un densímetro nuclear, debiéndose realizar como mínimo dos mediciones de densidad en cada capa.

Los principios del densímetro nuclear, están basados en la emisión de radiación de una fuente encapsulada y sellada adecuadamente situada dentro del medidor, el material radiactivo usado para medir la densidad es el cesium, el cual emite rayos gama, si el material tiene una densidad baja, una cantidad mayor de radiación pasará a través y será detectada por el aparato.

## **V.2.- PRUEBAS DE LABORATORIO**

Debido al acelerado ritmo de colocación del concreto compactado con rodillo y al hecho de que varias capas pueden ser cubiertas en pocas horas, los resultados de los ensayos en laboratorio tienen más bien un valor estadísticos, no siendo sin duda un método apropiado para el control de la calidad.

Para obtener el proporcionamiento óptimo habrá que realizar diferentes mezclas de concreto compactado con rodillo en laboratorio, deberá tenerse un control estricto en lo que se refiere a los materiales a utilizar, que deberán ser similares a los que se dispongan en el sitio de la construcción, no debiendo efectuar pruebas con materiales diferentes a los que se disponen en el lugar.

Dependiendo de la importancia de la obra y de las posibles procedencias de los agregados y otros componentes, el número de estudios a realizar varía ampliamente. Se debe tener en primer lugar un control adecuado en cuanto a la calidad de los agregados, calidad del cemento, calidad del agua, etc.

Para la elaboración de probetas de ensayo se pueden considerar diversos procedimientos para su acomodo o compactación estos son: Proctor Modificada, Mesa Vibratoria y Pisón Neumático. Con estas pruebas se determinará el peso volumétrico máximo, el modulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y tensión.

La Prueba Proctor; consiste esencialmente en preparar especímenes utilizando una misma mezcla de concreto con diferentes contenidos de agua, compactandolos en cinco capas mediante pisón con 56 golpes por capa.

Prueba de la mesa vibratoria; la mesa vibratoria esta compuesta principalmente de una plataforma, vibrador y control de tablero, la mesa opera con los cilindros sujetos a ella, a una frecuencia aproximada de 3,600 RPM, produciendo un asentamiento, por lo que con esta acción el coeficiente de aire es más fácilmente reducido.

Prueba con Pisón Neumático; el procedimiento consiste en proporcionar una energía específica de compactación, con la diferencia de que el número de golpes es controlado por el tiempo de compactación de 15 a 20 segundos aproximadamente, por cada capa.

Para cada mezcla se elaborarán aproximadamente 24 especímenes para la prueba de resistencia a compresión, tensión, modulo de ruptura y de elasticidad, para ensayos a las edades de 3, 7, 14, 28, 90 y 365 días. Se realizará el curado por medio de agua, procediendo al decimbrado ( un día antes de su ensaye ) de los cilindros. Los especímenes a ensayar se hacen y se compactan en capas, en un cilindro de PVC colocado dentro de un molde metálico de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de altura.

### **V.3- EXPERIENCIAS**

Con la continua utilización del concreto compactado con rodillo como técnica de construcción en diversos países, se han ido acumulando experiencias muy valiosas que serán fuente de ayuda para futuras obras construidas con esta técnica, haciendo mención que su uso habiendo comenzado en presas, se ha extendido a canales, pavimentos, pisos industriales y sus posibilidades futuras son muy amplias y variadas.

Al menos en 11 países ( España, Canadá, Francia, Estados Unidos, Noruega, Suecia, Finlandia, Alemania, Australia, Argentina y Japón ) se han construido en cada uno de ellos diversas estructuras de concreto compactado con rodillo, mientras que en otros cinco países (Chile, Uruguay, Islandia, Sudáfrica y México) el concreto compactado con rodillo ha sido utilizado de forma más esporádica.

Los métodos de construcción, dosificación, colocación, compactación, etc., quizás cambien de un país a otro, pero en cada caso y dependiendo de la magnitud de la obra se tendrá necesariamente que ir evolucionando en cuanto al uso de la técnica del concreto compactado con rodillo, al tenerse una buena serie de experiencias que nos serán de gran utilidad para ir mejorando la técnica. Así por ejemplo al comenzar a utilizar la técnica se le dio gran importancia a la construcción de presas y al ganar experiencias se implementó su uso en pavimentos, plataforma de

aeropuertos, patios de maniobras de muelles, etc.

Los países que van a la vanguardia en cuanto a la técnica del concreto compactado con rodillo son: Estados Unidos, que han realizado patios de almacenaje en muelles, bodegas, aeropuertos, acceso para tráfico pesado. España sigue avanzando con buenos resultados en obras urbanas, autopistas, patios de áreas de almacenamiento y en el bacheo de calles, y tiene como normas El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Hormigón Compactado; otro país que ha trabajado bastante en cuanto a la técnica es Argentina, en carreteras, Autopistas, etc.

Resulta interminable enumerar las obras que se han llevado a cabo hasta estos momentos, pero lo que sí es un hecho es el avance vertiginoso que tiene el concreto compactado con rodillo por las características ya explicadas.

## **CONCLUSIONES**

Desde la construcción de las primeras estructuras de concreto compactado con rodillo, se ha avanzado mucho en el conocimiento del material, esto gracias a las experiencias que se han ido acumulando, pero será necesario continuar investigando esta técnica de construcción para lograr obtener mejores resultados que reflejen una estructura con un adecuado comportamiento según su uso y destino.

Si bien todavía existen muchos factores que necesitan una mejor y mayor investigación, ya sea en el campo del diseño, control de calidad, ensayos de laboratorio y construcción, es imprescindible que muchos conceptos derivados del uso del concreto convencional y suelos compactados sean modificados y no sea aplicados automáticamente al concreto compactado con rodillo.

Con la utilización de la técnica del concreto compactado con rodillo se destacan grandes ventajas sobre el uso del concreto convencional, la apertura al tránsito inmediato ( en el caso de pavimentos ) y la posibilidad de que la estructura sea rebasada en una avenida extraordinaria ( para el caso de presas ), son ventajas que constituyen elementos valiosos de oferta y para la toma de decisiones, sobre todo cuando al constructor se le exigen plazos cortos de entrega del trabajo. También el alto rendimiento repercute favorablemente en el costo del concreto compactado con rodillo



y en la entrega más pronta de la estructura, lo que permite, en menos tiempo, amortizar los costos y percibir los beneficios.

Con respecto a la calidad del material, debe hacerse hincapié en el control de los agregados, cemento, mezcla, colocación y compactación, siendo las variables que afectan a éstos, los factores que deben ser analizados y supervisados. Entre los más importantes mencionaremos la segregación de la mezcla, el contenido de humedad, condiciones adecuadas de transporte, supervisión de la ejecución, utilización de los equipos, compactación y curado. Por eso, no es un elemento práctico el rechazar o aceptar un concreto compactado con rodillo en función de resultados de resistencia que cuando se obtengan, ya esa capa está cubierta por otras capas; por lo tanto, habiéndose realizado en la etapa de investigación los ensayos con el material previsto y habiendo sido resultados satisfactorios, es muchos más práctico el control durante la construcción sobre la densidad y el contenido de humedad; los cuales pueden ser determinados a través de densímetro nuclear. De todas formas, como criterio general, no debe considerarse exclusivamente el resultado de un ensayo ó de la calidad del material en un solo momento, sino del resultado general, siendo imprescindible para ello una correcta supervisión y dirección de los trabajos.

La presencia de personal técnico con capacidad plena de tomar decisiones en cuanto a cambios de metodología y aun pautas de diseño

es esencial, así como el análisis de muchos factores que si son previamente estudiados, evitan retrasos durante la construcción. La existencia de alternativas a situaciones particulares y la capacidad de tomar decisiones rápidas son factores determinantes del éxito o fracaso de esa técnica.

Otro de los conceptos básicos es la posibilidad de usar para cada una de las etapas constructivas una variada gama de equipos, los cuales, en su mayoría, son utilizados por las empresas en usos viales o de movimiento de tierras. La ubicación de la planta, la cantidad y magnitud de los acopios tiene mayor importancia que en el concreto convencional en cuanto al logro de un más eficiente mezclado con un mayor rendimiento y un cuidado superior en las operaciones de carga y descarga.

La mezcla para concreto compactado con rodillo es muy sensible en cuanto a los procesos de carga, descarga y transporte, recordando que siendo en su mayoría de los casos mezclas con reducida cantidad de cemento y un tamaño máximo importante; tiene una natural tendencia a segregarse en muchos casos si no se toman las precauciones necesarias en esta etapa del trabajo.

Otro concepto básico es que gran parte de los parámetros de construcción, diseño y dosificación, son aprendidas durante la ejecución de los denominados tramos de prueba, que cuentan con la misma estructura

de la presa o pavimento, donde se ensayan los equipos y se toman valores iniciales para tiempos de mezclado, esfuerzo de compactación, contenido de humedad, segregación de la mezcla, cantidad de pasadas de los rodillos. A estos valores iniciales se le realizarán ajustes y mejoras tendientes a obtener una mezcla y metodología de construcción con el control de calidad deseado.

La reducción de los costos y los tiempos de construcción, así como el comportamiento y con los resultados obtenidos a la fecha, se pueden establecer las ventajas del empleo del concreto compactado con rodillo. En términos generales, destaca la economía derivada del consumo mucho menor de cemento para la elaboración de mezclas, así como la rapidez y la facilidad de su colocación en comparación con el concreto convencional; es por ello que esta técnica presenta un futuro amplio para la ejecución de estructuras diversas dentro del área de la construcción en la Ingeniería Civil.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1.- ACI, MANUAL OF CONCRETE PRACTICE  
PART 1 - 1994

2.- BORRAS CRUZ CARLOS  
Procedimiento constructivo de compactación  
del concreto por medio de rodillos.  
Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis Profesional

3.- BUCHAS J.  
Introducción a una nueva tecnología en la  
construcción de presas.  
Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 1989.

4.- CCR EN VÍAS, CONCRETO COMPACTADO  
Boletín ICPC, No. 68, enero-marzo 1995.

5.- CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO  
ICPC, Notas Técnicas, 4-35-807, Colombia 1988.

6.- FIGUEROA GALLO DONATO  
El concreto compactado con rodillos en las vías terrestres  
Segundo simposio nacional sobre materiales de construcción  
Mérida 1991.

7.- FIGUEROA GALLO DONATO

El concreto compactado con rodillo y su control de calidad

Reunión Nacional de Materiales de Construcción

San Luis Potosí 1987.

8.- FIGUEROA GALLO DONATO

Pavimentos de concreto compactado con rodillo

Revista IMCYC Vol. 1, No.5, octubre 1988.

9.- GARCÍA CHOWELL LUIS

Especificaciones para concreto compactado con rodillos

para su uso en pavimentos, métodos de prueba.

10.- GOMEZ DOMINGUEZ JORGE

Construcción de caminos de bajo volumen con

concreto compactado con rodillo

Revista IMCYC Vol. 1, No.5, octubre 1988.

11.- GOMEZ DOMINGUEZ JORGE

Especificaciones en alternativas de pavimentación

Revista IMCYC Vol. VIII, No.88, septiembre 1995.

12.- HERNANDEZ HERNANDEZ ALICIA

Concreto compactado rodillado

Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis profesional

13.- JUAREZ BADILLO EULADIO

Mecánica de suelos tomo I

Editorial Limusa

14.- KEIFER OSWIN JR.

Paving with roller compacted concrete

Concrete Construction, Vol. 31, No.3, marzo 1986.

15.- KRAEMER C.

Pavimentos de hormigón compactado proyecto y materiales

Seminario Internacional de Pavimentos de Concreto Hidráulico

16.- LONDOÑO CIPRIANO A.

Un vistazo a las propiedades de las presas de  
concreto compactado con rodillo

ICPC, Documentos 5-92-0963

Colombia 1992.

17.- MOSQUEDA TINOCO ANTONIO

Presas de concreto rodillado

Revista Ingeniería Hidráulica en México

Vol. I, No.11, septiembre- diciembre 1985.

18.- NIETO RODRIGUEZ J.

La tecnología del concreto compactado con rodillos

Revista IMCYC Vol.I, No. 5, octubre 1988.

19.- OROZCO SANTOYO RAÚL

El control de calidad de las obras

Revista IMCYC

20.- ORTIZ FERNANDEZ ALVARO J.

Control de Calidad del Concreto

FUNDEC A.C.

21.- PRESAS LA MANZANILLA UN EJEMPLO DE CONCRETO

Revista Ingeniería Civil, 1985

22.- SALAZAR CARLOS E.

Pavimentos de concreto seco compactado con rodillo

Memorias técnicas, Reunión del concreto

Colombia 1988.

23.- TORRES HERRERA M.

Concreto Teoría elastica

Editorial Patria.

24.- UNAM, FACULTAD DE INGENIERÍA

Apuntes de Movimientos de Tierras

FUNDEC A.C.