

CRITERIOS PARA ESTABLECER PARÁMETROS DE CONTROL EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS CON CEMENTO· EXPERIENCIA EN LA REGION AMAZONICA DE PERU

Mg, Ing. Marco Montalvo Farfán ⁽¹⁾ –Ing. María Campos Vásquez ⁽¹⁾ –Ing. Eder Melendres Chuquillanqui ⁽¹⁾ - Bach, Raúl Fernández Condeña ⁽¹⁾

RESUMEN

La presente investigación presenta los resultados experimentales obtenidos en la evaluación del comportamiento de los suelos estabilizados con cemento a partir de la utilización de materiales disponibles en la región de la Amazonía sur oriental peruana; para tal efecto, con la finalidad de determinar las tendencias que permitan identificar y optimizar las variables que influyen en el fenómeno de retracción hidráulica, se analizan las propiedades físicas, mecánicas y mineralógicas de los materiales componentes de la estabilización en su estado natural; para luego proceder a evaluar el comportamiento mecánico del suelo estabilizado a través de sus propiedades de resistencia a la compresión simple y a la tracción indirecta, según los diferentes tipos y dosificaciones del agente cementante utilizado.

Como conclusiones, con el propósito de prevenir o mitigar el efecto de retracción hidráulica del suelo estabilizado, a partir del análisis de las tendencias obtenidas en los materiales analizados, se establecen recomendaciones específicas relacionadas a los indicadores y/o parámetros de diseño a tener en cuenta en la estabilización.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la naturaleza predominantemente fina de los suelos que conforman la llanura amazónica, donde escasean los suelos granulares, la estabilización de suelos con cemento portland, debido a las condiciones del entorno, constituye una de las alternativas constructivas más ventajosas a utilizar en esta región. La adición de cemento hidráulico como agente cementante produce un incremento en las propiedades mecánicas de los suelos finos, tales como aumento de resistencia a la compresión, a la tracción, y su consiguiente módulo elástico, así como de reducción en las propiedades de contracción, permeabilidad y resistencia al desgaste; no obstante debido al proceso de contracción por secado, propio de los suelos estabilizados con cemento, es necesario, formular las medidas a adoptar para la prevención y/o mitigación de sus efectos.

1') Los autores, son miembros del Departamento de Transportes de CESEL S.A, donde desempeñan funciones relacionadas con el rubro pavimentación, en proyectos viales de envergadura nacional e internacional.

3. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES EN ESTADO NATURAL

Los materiales en estado natural, que componen las mezclas suelo cemento analizadas, clasifican como suelos A-2-4(0) según MSHTO y arenas limosas (S M) ó arenas limo arcillosas (SC-SM) según SUCS, cuyas curvas granulométricas para los siete (07) tipos de materiales analizados, muestran similar tendencia, los porcentajes de material menor a 0.075mm oscilan entre 12.4% y 31.4%, sus características de límite líquido varían entre 16.8 y 23.3%, con índices de plasticidad (IP) que fluctúan entre 2.2 hasta 6%, un caso particular no registró plasticidad (NP), y cuyos límites de contracción se encuentran entre 19.7 y 20.1 %. Estos resultados se muestran en las Figuras 1 y 2.

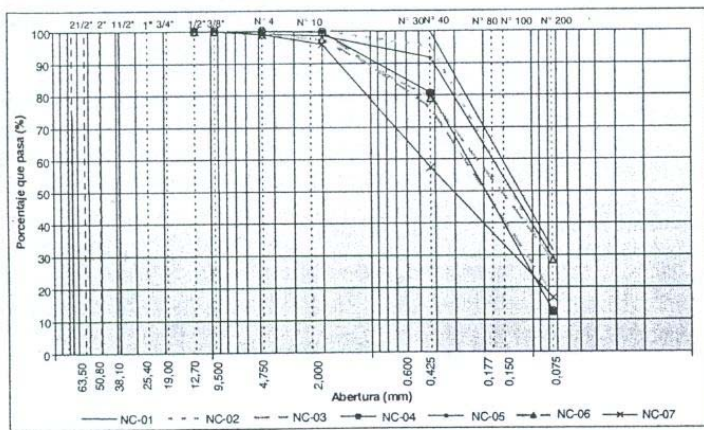


Figura 1: Características granulométricas de los materiales

De la Figura 1, una de las tendencias granulométricas que se puede apreciar en los suelos analizados es la incidencia de partículas retenidas en el tamiz N° 40, aspecto vinculado a la superficie específica de la masa de suelo y por consiguiente a la densidad máxima y humedad óptima del material, por lo tanto corresponderá especificar un rango permisible de gradación para este punto de inflexión.

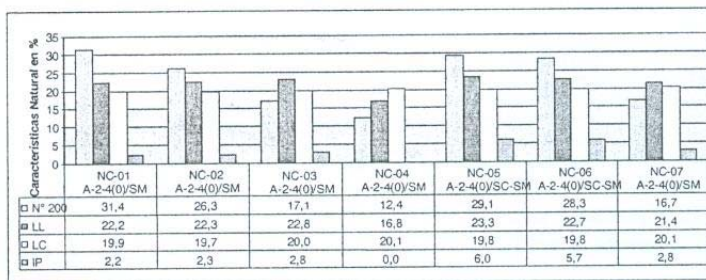


Figura 2: Límites de Consistencia de los materiales

Los resultados granulométricos y de límites de consistencia, mostrados en las Figuras 1 y 2, son contrastados con los rangos de límites establecidos para minimizar los efectos de la

retracción hidráulica, por los organismos internacionales que se describen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Requisitos Granulométricos - Normativa Internacional

El Salvador	Colombia INVIAS (2002)	Canadá Saskatchewan Highway and Transportation	Estados Unidos PCA (2003)	ACI 230	España
Pasa N°4 50-100%	Pasa N' < 40%			Pasa N°4 < 55%	+
Pasa N° 200 5-5%	Pasa N° 200 < 50%	Pasa N° 200 5-30''		Pasa N° 200 5-35%	
Tmax 50 mm (2'')	Tmax 75 mm (3'')	Tmax 63 mm (2 1/2'')	Tmax 50 mm (2'')	Tmax 50mm	+

+ Los valores dependen del tipo de Suelo-cemento y tráfico estipulado en catálogos de Secciones. Los requisitos granulométricos se encuentran en el Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de carreteras y Puentes.

Referencia: Federación Interamericana del Cemento(FICEM).

Tabla 2: Requisitos de Límites de Consistencia - Normativa Internacional

El Salvador	Colombia INVIAS (2002)	Canadá Saskatchewan Highway and Transportation (1998)	Instituto Mexicano del transporte IMT	Experiencia en Sudáfrica	España
LL < 40% +	LL < 35%		LL < 40-50%		LL < 30%
IP < 8% +	IP < 15%	IP <10%	IP < 25%	IP < 8%	IP < 15%

+ Se encuentra con experiencia de buenos resultados, en casos donde el suelo presentó LL < 55% y IP < 25%

Referencia: Federación Interamericana del Cemento (FICEM).

Todas estas referencias, coinciden en establecer rangos para los aspectos relativos a la granulometría, y plasticidad del material, así de las tendencias obtenidas en los materiales analizados, la presente investigación, propone utilizar los rangos de porcentajes granulométricos y de plasticidad que se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3: Rangos para características físicas de los materiales a estabilizar recomendados

PARÁMETRO MATERIAL EN ESTADO NATURAL	RANGOS
GRANULOMETRIA	

% Pasa N° 40	50-100
% Pasa N° 200	< 35
LIMITES DE CONSISTENCIA	
Límite Líquido	< 30
Índice Plástico	< 8
Limite de Contracción	>15

4. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS CON CEMENTO

La metodología utilizada para la estabilización de suelos con cemento, ha considerado las siguientes Normas:

- Distribución granulométrica ASTM D 422/AASHTO T-88
- Límites de consistencia ASTM D 4318
- Densidad máxima y humedad óptima - proctor modificado AASTHOT-180.
- Resistencia a la compresión no confinada Suelo Cemento - ASTM D1633,

Como agente estabilizador se ha utilizado cemento portland tipo I de acuerdo a la Norma ASTM C-150, para los materiales NC-01 al NC-07, La calidad del agua utilizada cumple con los parámetros químicos; ph entre 5.5 a 8,0 y ya su vez los sulfatos expresado en ión S04 son menores a 1 gr/l.

Los ensayos de resistencia a la compresión no confinada a los 7 días, para los materiales evaluados, con rangos de cemento de 2% a 10%, se muestran en la Figura 3.

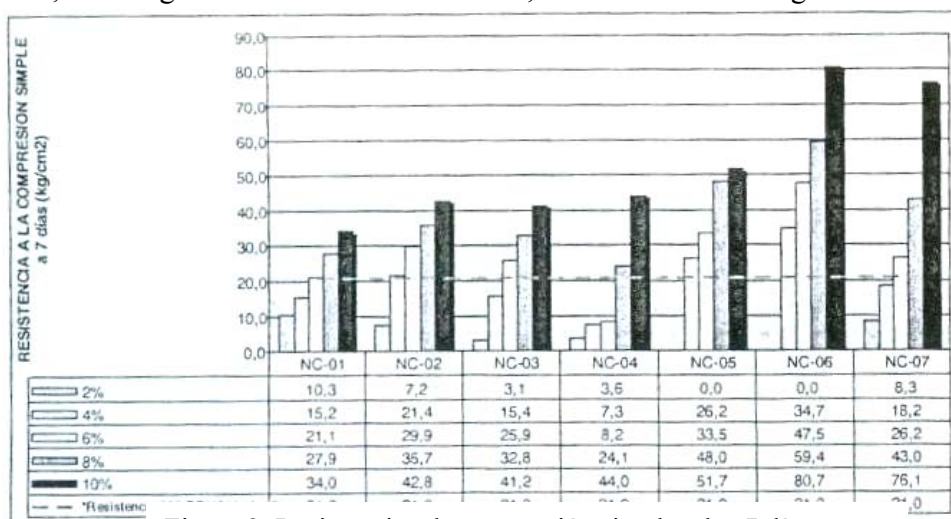


Figura 3: Resistencia a la compresión simple a los 7 días

De la Figura 3, se aprecia que el promedio del porcentaje de cemento a utilizar, para mitigar los efectos del fenómeno de retracción hidráulica según las recomendaciones de K.P. George, en el reporte *Minimizing cracking in treated material for improved performance*, Research & Development Bulletin de la Portland Cement Association, 2002:

“Para alcanzar el ancho límite de fisuras, la resistencia a la compresión no confinada a 7 días para suelos de grano fino no debe exceder 2070 KPa (300 psi)”, se encuentra en el orden de los 4 a 5%, para suelos con índice de plasticidad entre 2 a 6%; los porcentajes de cemento serán del orden del 7 a 8% para suelos no plásticos, como el material NC-04, Según esta tendencia, se infiere que el contenido de cemento a utilizar debe ser fijado a partir de la experimentación y análisis de los parámetros que influyen en el comportamiento de los materiales teniendo en consideración satisfacer el requerimiento de pérdida máxima admisible por humedecimiento y secado,

Este criterio de adopción del porcentaje de cemento, también satisface la recomendación contenida en el *paper Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements*: “Típicamente, una resistencia a la compresión simple a siete días de 300 a 400 PSI (2.1 a 2.8 MPa) proporciona buen comportamiento, durabilidad, y propiedades de contracción”.

Respecto al control del parámetro de máxima contracción por secado, recomendado por K.F George, en el reporte *Minimizing cracking in treated material for improved performance*, Research & Development Bulletin de la Portland Cement Association, siendo que este procedimiento aún no se encuentra normalizado en nuestro medio, con la finalidad de prevenir los fenómenos de contracción por secado, se optó por controlar indirectamente este indicador a partir del análisis del límite de contracción. Se efectuaron ensayos de verificación de la relación entre la humedad óptima y límite de contracción según los respectivos contenidos de cemento, según se muestra en las Figuras 4, 5 y 6,

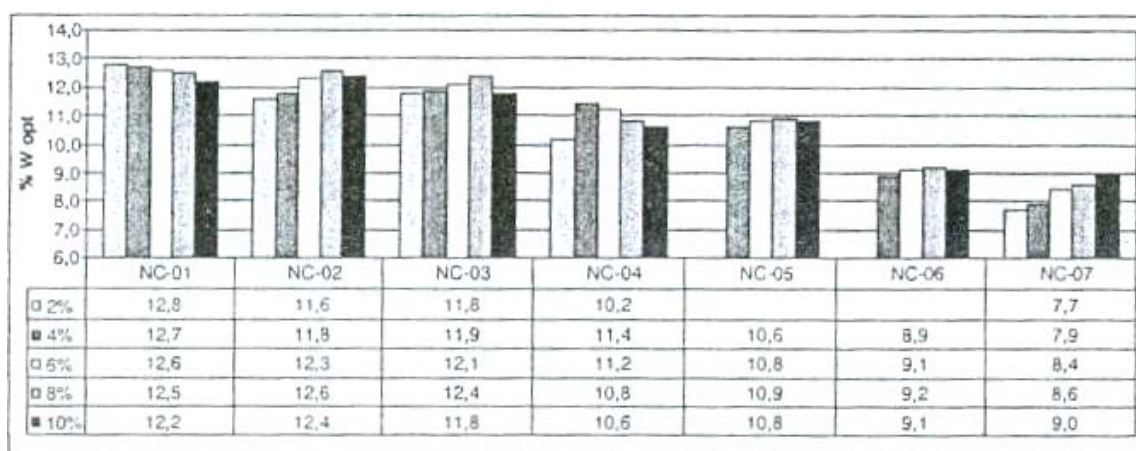


Figura 4: Relación del W óptimo vs porcentaje de cemento

El comportamiento de los suelos estabilizados con cemento, puesto que esta relacionada a la retracción hidráulica y a la hidratación del cemento, de la Figura 4 se determina que el agente estabilizador, para un mismo material, tiende a variar ligeramente el contenido de humedad óptima para diferentes porcentajes de cemento, experimentalmente se ha determinado que este aspecto y su relación con el fenómeno de retracción, puede ser minimizado mediante el control de los porcentajes de humedad, de 1 a 2% por debajo de la humedad óptima, sin que esto afecte significativamente la resistencia a la compresión.

En la Figura 5, se muestran las tendencias de límite líquido, índice plástico y límites de contracción de los materiales en función del contenido de cemento como se puede apreciar el límite líquido se mantiene prácticamente constante por consiguiente la caída de valores del índice plástico (IP) se debe al aumento del límite plástico; referente a los resultados de límite de contracción, estos se incrementan gradualmente según se adiciona mayor porcentaje de cemento, lo cual es indicativo de mejora en la estabilidad volumétrica con relación a los suelos en estado natural.

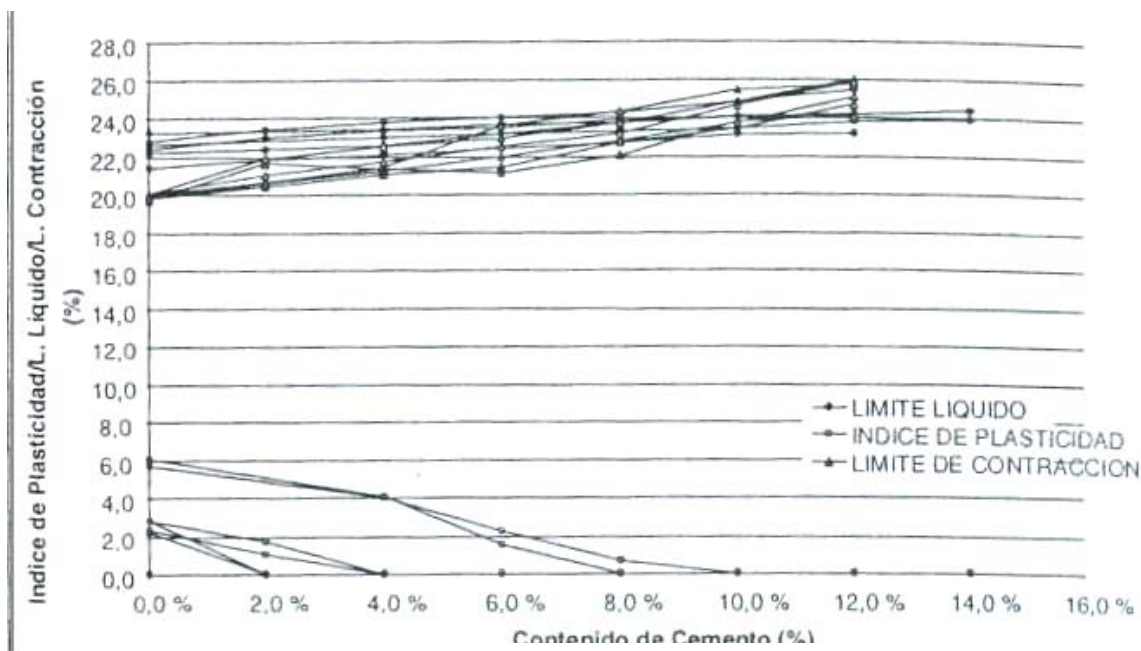


Figura 5: Influencia del contenido de Cemento en los Límites de Atterberg

Este con... amente relacionadas con los mecanismos de interacción entre la porción limo-arcillosa del suelo y el cemento; el óxido de calcio presente en el cemento reacciona químicamente con la porción arcillosa presente en los suelos, causando intercambio de cationes de calcio con cationes monovalentes y dipolos de agua, fomentando de esta manera la floculación y aglomeración de partículas.

Relación entre Resistencia a la Compresión Simple y Resistencia a la Tracción Indirecta

Complementariamente, debido a la naturaleza semi-rígida de las capas de suelo cemento las cuales son sometidas a esfuerzos de tracción a lo largo de su vida útil, es necesario evaluar la respuesta del material mediante ensayos de resistencia a la tracción indirecta con la finalidad de garantizar un adecuado desempeño de la capa estabilizada; en la Figura 6, se muestra la relación de la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la compresión simple de la mezcla suelo cemento obtenida, donde la resistencia a la tracción indirecta puede ser estimada en un 15% de la resistencia a la compresión.

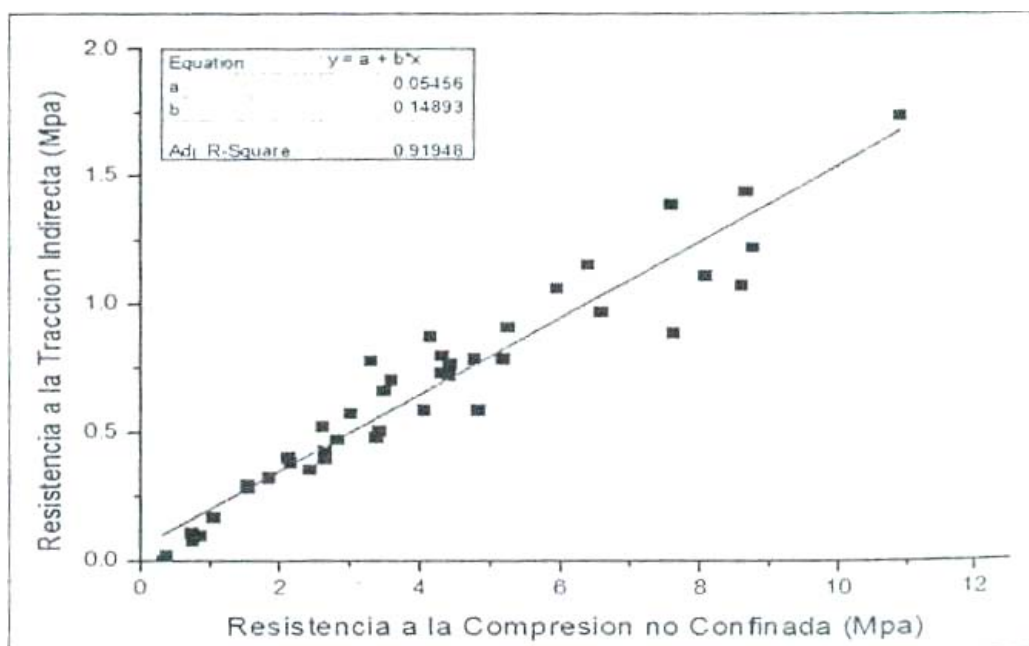


Figura 6: Relación Compresión - Tracción suelo cemento, Edad 07 días

5. ANÁLISIS COMPARATIVO, DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS SEGUN EL TIPO DE AGENTE CEMENTANTE UTILIZADO

Debido a la composición mineralógica de los suelos de la región amazónica, cuyo componente principal lo constituye la sílice (SiO_2), según se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Características Mineralógicas de los suelos analizados

Mineral Componente	Incidencia Porcentual		
	NC-01	NC-02	NC-03
Sílice (SiO_2)	95,14	97,23	94,63
Ortoclasa (K, Ba, Na) (Si, Al) ₄ O ₈	2,48	1,48	3,79
Moscovita K(Al, V)_2 (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₁₂	1,65	0,47	0,99
Clorita (Mg, Al) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₆	0,52	0,34	0,31
Hematita	0,21	0,48	0,28

Lo que indica que naturalmente estos suelos poseen propiedades puzolánicas, ha sido necesario analizar su comportamiento mecánico y su evolución en el tiempo, para dos (02) diferentes tipos de agente cementante disponibles en la región, cemento pórtland tipo I de acuerdo a la Norma ASTM C-150 y cemento pórtland tipo IP de acuerdo a la Norma ASTM C-595; los suelos evaluados corresponden al material NC -03, con porcentaje de cemento promedio de 4.5%, según se muestra en la Figura 6.

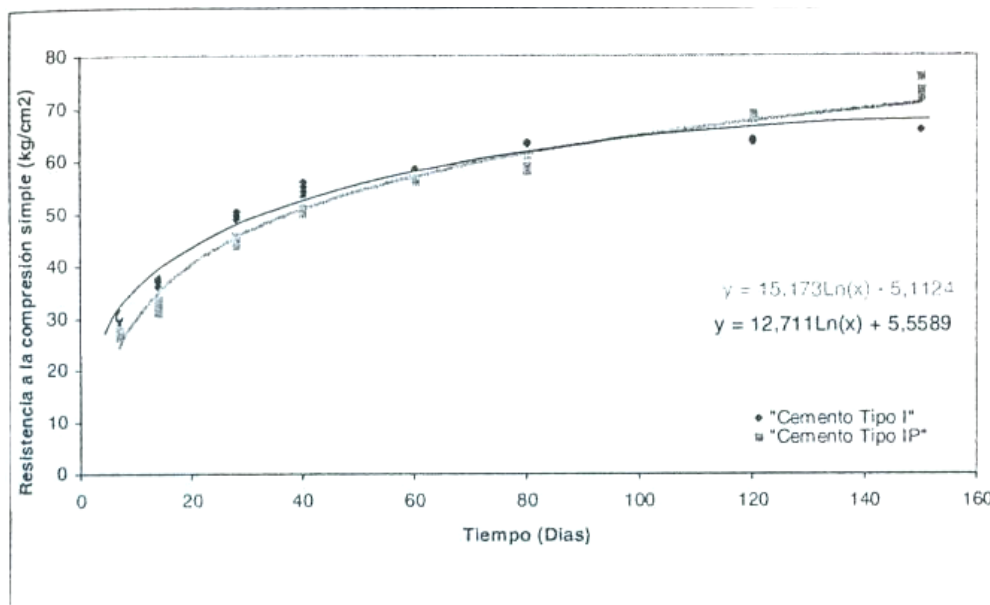


figura 6: Evolución de la resistencia a la compresión simple según los tipos de cemento I y IP

En la Figura 6, para un contenido de cemento de 4.5%, se presenta la evolución de la resistencia a diferentes edades, las mayores resistencias iniciales se obtienen para la mezcla de suelo con cemento pórtland tipo 1, cuya tendencia a partir de los 100 días aproximadamente, refleja un comportamiento asintótico, aspecto que en el caso de la mezcla de suelo con cemento pórtland tipo IP, continua en incremento. Ambas curvas se intersectan y se tornan divergentes, a los 100 días aproximados, con lo que se demuestra que si bien con el cemento tipo I se obtienen altas resistencias iniciales, a largo plazo las resistencias obtenidas muestran un comportamiento estable, por lo tanto, para los suelos analizados, se recomienda la utilización de cemento pórtland tipo 1.

La evolución de la resistencia continua y ascendente, que se observa en ambos casos para edades superiores a los 28 días, podría estar asociada a la concentración de sílice del orden del 95% la misma que estaría actuando como puzolana; es así que para minimizar los efectos de la retracción hidráulica, para este tipo de suelos, se debe incorporar el control de las propiedades mineralógicas de los materiales.

6. REVISIÓN DE LA NORMATIVA PERUANA DISPONIBLE PARA ESTABILIZACION CON CEMENTO

Referente a la estabilización de suelos con cemento, la normativa peruana establece parámetros generalizados para suelos que clasifican desde A-1 hasta A-7, según MSHTO; en tal sentido, es necesario establecer rangos de especificación particulares según las propiedades específicas de los suelos finos predominantes en la región amazónica. Según los resultados obtenidos en la presente investigación, se proponen requerimientos de

materiales en estado natural y de mezcla suelo cemento, complementarios a la normativa existente, según se muestra en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5: Rangos para características físicas de los materiales a estabilizar recomendados

PARAMETRO MATERIAL EN ESTADO NATURAL	RANGOS
GRANULOMETRIA	
% pasa N° 40	50-10
% Pasa N° 200	< 35
LIMITES DE CONSISTENCIA	
Limite Líquido	< 30
Índice Plástico	< 8
Límite de Contracción	>15

Con la finalidad de minimizar o prevenir los efectos de la retracción hidráulica, se han limitado los rangos granulométricos y de plasticidad del material a utilizar en la estabilización con cemento; referente a la distribución granulométrica, se recomienda que el porcentaje pasante de la malla N° 200 no debe superar el 35%; respecto a los límites de consistencia, es conveniente evitar los suelos de mediana a alta plasticidad, el límite líquido no debe ser superior al 30% y el índice de plasticidad no deberá ser mayor a 8%; así también se recomienda no admitir contenido alguno de materia orgánica. Se sugiere además establecer criterios de selección del tipo de cemento a utilizar en función al análisis de los componentes mineralógicos de los suelos.

Tabla 6: Rangos de propiedades mecánicas recomendadas para suelos estabilizados con cemento

PARAMETROS	RANGOS
Resistencia a la compresión simple	21 kg/cm ²

Para los parámetros que se han fijado en los materiales analizados, el requerimiento general de 18 kg/cm² establecido en la normativa peruana, debe ser ajustado a 21 kg/cm², correspondientes a una resistencia equivalente a 300 PSI, recomendada por K.P George, en el reporte Minimizing cracking in treated material for improved performance, Research & Development Bulletin de la Portland Cement Association, 2002, para prevenir y/o minimizar los efectos de retracción hidráulica por contracción del suelo cemento. El contenido de cemento requerido para alcanzar la resistencia establecida, deberá ser fijado a partir de análisis experimentales, siempre y cuando se satisfaga el requerimiento de pérdida máxima admisible por humedecimiento y secado,

Debido a que los suelos estabilizados con cemento estarán sometidos a esfuerzos de tracción, se sugiere incorporar dentro de la especificación, el requerimiento de relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción.

7. CONCLUSIONES

A partir de las tendencias obtenidas, se han determinado los factores que influyen directamente en el fenómeno de retracción hidráulica del suelo estabilizado, así finalmente, con el propósito de prevenir o mitigar su efecto, se establecen recomendaciones específicas para los suelos de la región. Se han propuesto requerimientos de materiales en estado natural y de mezcla suelo cemento.

Referente a los materiales en estado natural los rangos establecidos están relacionados a los aspectos relativos a la granulometría, plasticidad y contracción del material.

En relación a las propiedades mecánicas, para los parámetros que se han fijado en los materiales analizados, se recomienda que el requerimiento general de 18 kg/cm² establecido en la normativa peruana, sea ajustado a 21 kg/cm².

El contenido de cemento requerido para alcanzar la resistencia establecida, siempre y cuando se satisfaga el requerimiento de pérdida máxima admisible por humedecimiento y secado, deberá ser fijado a partir de análisis experimentales y no a partir de tablas referenciales.

Se ha sugerido incorporar dentro de la normativa peruana, el requerimiento de relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción. Continuar investigando el comportamiento físico, químico y mecánico de los distintos tipos de suelos disponibles en la amazonía, así como de los agentes cementantes y aditivos a utilizar en la estabilización de este tipo de suelos, el empleo de determinado tipo de aditivo deberá ser determinado a partir de la evaluación de la eficiencia de la actividad puzolánica en la respuesta mecánica del suelo silicoso estabilizado.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

K.P George. Minimizing Cracking in Cement Treated Materials for Improved Performance. Portland Cement Association. ISBN 0209-2, Illinois 2002.

Tom Scullion. Evaluating the Performance of Soil-Cement and Cement Modified Soil for Pavements, A Laboratory Investigation. Portland Cement Association. ISBN 0-89312-236-X, Illinois 2005.

Carlos A. Quintanilla. El Estado del Arte del Suelo Cemento en Estructuras de Pavimentos, Primera Edición Octubre 2007. FICEM, ISBN 978-9962-8918-1-9.

Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements, Portland Cement Association, Soil Cement Information.

Little, D. N., Fundamentals of the Stabilization of Soil With Lime, National Lime Association Bulletin 332, National Lime Association, Arlington, Virginia, 1987.

*Con autorización del autor y del Instituto de Construcción y Gerencia (ICG).
En: XVII Congreso de Ingeniería Civil. Chiclayo. 2009.*