



Bases estabilizadas con cemento

Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes

Ing. Mario Arce

I. Conceptos básicos

En teoría, se logra la estabilización de un material cuando al adicionar el cemento, el agua y la energía de compactación dicho material aumenta sus propiedades de resistencia mecánica, de plasticidad, y es estable ante los procesos de meteorización bajo las condiciones de clima a que está expuesto en el pavimento. Obviamente las cargas del tránsito inducirán un proceso de falla acorde con las leyes de fatiga que rigen estos materiales.

El cemento se puede incorporar al material de base para mejorar propiedades como: la resistencia mecánica, la resistencia a las condiciones del clima (especialmente ante altos índices de saturación), los indicadores de plasticidad o la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados; además permite el reciclado de pavimentos existentes severamente deteriorados, así como el uso de materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para base granular. Esto es especialmente importante en zonas donde no se cuenta con buenas fuentes de agregados.

Comité editorial del boletín



2011

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.
Coordinador General PITRA, LanammeUCR

Licda. Irene Matamoros Kikut
Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica, PITRA

Daniela Alpízar Gutiérrez
Diseñador Gráfico. Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica,
PITRA

Para su correcta aplicación se debe determinar en laboratorio la óptima combinación del agregado, el agua, el cemento y la energía de compactación. Los cuatro parámetros son de mucha importancia para garantizar el mínimo costo y un exitoso desempeño de la base estabilizada y del pavimento, lo que conlleva también la disminución del potencial de agrietamiento. Adicionalmente los procedimientos constructivos y de control de calidad son elementos fundamentales para lograr dichos objetivos.

Específicamente, el incremento en la energía de compactación permite usar menor cantidad de cemento para alcanzar una resistencia determinada, con la consecuente disminución del índice de contracción y un menor costo del aditivo. Por lo tanto es muy apropiado estudiar con mayor profundidad la compactabilidad de los agregados.

Precisamente dicha compactabilidad depende de la textura, forma, dureza y graduación de los agregados. Al analizar en laboratorio la razón de variación de la densidad en función de la energía, se puede determinar comparativamente la "facilidad de compactación" de distintos materiales (gravas, tobas, suelos arenosos, pavimentos triturados), usando como humedad de compactación la envolvente de los óptimos de las curvas Próctor. Precisamente el poder aplicar una alta energía de compactación permite construir bases estabilizadas de alta resistencia, usando porcentajes relativamente bajos de cemento. Físicamente, el límite de la energía óptima de compactación lo definen la dureza de los agregados y la capacidad real de los equipos en el campo.

El porcentaje óptimo de agua es aquel con el cual se logra la máxima resistencia y no necesariamente coincide con la cantidad de agua que se requiere para alcanzar la máxima densidad Proctor. Como regla general se ha observado que en las gravas de baja plasticidad, para alcanzar la máxima resistencia se requiere un contenido de agua ligeramente superior al del óptimo de compactación, y para materiales de valores altos de IP sucede lo contrario. Esta regla no se puede aplicar a ciegas y se requiere hacer los estudios de laboratorio en cada caso.

En Costa Rica hay una amplia experiencia acumulada en este campo, y adicionalmente se incursionó en el uso de la cal para la construcción de capas de base que se denominaron como toba-cal, sin dejar de lado importantes experiencias en la estabilización de suelos con cal.

Las gravas de buena calidad, no plásticas (NP), requieren bajos porcentajes de cemento para alcanzar las resistencias especificadas, esto hace menos fácil lograr un proceso constructivo homogéneo; y en caso de aumentar el cemento para lograr una mezcla más homogénea, los valores de resistencia se incrementan con el consecuente

problema de agrietamiento. Se logran mejores resultados con materiales que presentan valores moderados de plasticidad.

A escala de laboratorio también se han logrado interesantes resultados utilizando simultáneamente cemento y cal (50% de cada uno), con lo que se logra más bajos índices de contracción de fraguado (menor agrietamiento del pavimento) y mejor desempeño de materiales con altos índices de plasticidad. Hace falta la experimentación en el campo para determinar la viabilidad técnica y económica de esta alternativa.

La incorporación de fibras sintéticas tiende a disminuir el efecto de agrietamiento pero encarece su construcción y la podría hacer menos competitiva. En un tramo del proyecto San Ramón-Barranca (1999), se aplicó esta técnica. Los resultados de laboratorio resultaron favorables al uso de la fibra; desconozco si se hizo alguna evaluación del desempeño en la carretera.

La gama de posibilidades de uso de la técnica de estabilización con cemento es muy amplia, por ejemplo:

- 1- Para mejorar los índices de plasticidad y la capacidad de soporte (CBR) de los materiales (suelos y agregados). En el rango de valores altos de plasticidad la cal suele ser más efectiva. Algunas recomendaciones para aplicar la alternativa del cemento son:
 - a- Que el IP sea menor que 30 para suelos arenosos.
 - b- Que el IP sea menor a 20 y el LL menor a 40 para suelos de grano fino (más limosos).
 - c- Para agregados tipo gravas que el porcentaje que pasa la malla 4 sea mayor a 45, y que adicionalmente $IP \leq 20 + (0.25)(50 - \%pas.No.4)$.
 - d- Para materiales que contengan menos de un 35% pas.No.200, y que el IP sea menor a 20.
 - e- En el caso de los suelos tipo A-4, A-5, A-6, y A-7 (clasificación AASHTO), suele ser más conveniente estabilizarlos con cal.
- 2- Para incorporar en el pavimento agregados que no cumplen especificaciones para base granular.
- 3- Permite construir capas de base de alta resistencia y altos valores de módulo, brindando un importante aporte estructural al pavimento. Inclusive se puede colocar una capa asfáltica de rodamiento de poco espesor sometida a esfuerzos de compresión, con el consecuente incremento en la capacidad a fatiga del paquete estructural.

Los valores de resistencia a compresión a 7 días pueden oscilar entre 20 kg/cm² a más de 100 kg/cm². Los valores de módulo retrocalculados suelen oscilar en un rango de 5000 kg/cm² (bases agrietadas) a más de 70000 kg/cm² (bases muy rígidas).

- 4- Permite utilizar materiales degradables (meteorizables). Esta técnica se ha usado en Costa Rica, pero conviene mejorar los ensayos y especificaciones para garantizar la estabilización en el largo plazo. Sobre esto ya hay investigación adelantada en el Lanamme.
- 5- Especialmente en climas lluviosos aportan una alta resistencia a la socavación en bordes y esquinas en las losas de los pavimentos de concreto, lo cual sumado a los altos módulos de estas bases permiten diseñar losas de concreto de menor espesor, superando con mucho el desempeño que en este caso (climas lluviosos) presentan las bases granulares. Precisamente esta circunstancia explica la falla tan prematura que se presentó en el tramo de concreto Tres Ríos-Cartago, construido con base granular y diseñado originalmente con base de grava-cemento.
- 6- En condiciones de alta saturación la resistencia de la base tiende a aumentar, lo que la hace muy apropiada en zonas de alto nivel freático o de alta precipitación.
- 7- Estas bases no presentan los problemas de deformación permanente, típicos de las bases granulares. Estructuralmente tiene una respuesta elástica ante las cargas del tránsito, diferente a la respuesta no lineal de las capas granulares (módulo dependiente del nivel de esfuerzos).

El CR-77 recogía un buen pliego de especificaciones para estabilizaciones con cemento y con cal, a mi juicio muy superior a lo que definieron posteriormente los FP de USA; al menos así lo pude comprobar tanto en estudios de laboratorio como en proyectos viales dentro y fuera del país. Esto se explica en virtud de que las especificaciones CR-77, en materia de bases estabilizadas, contó con experimentación realizada con los materiales propios de nuestro país, o sea se hizo un trabajo de adaptación de especificaciones a las condiciones nacionales.

En consecuencia, la actualización de esta normativa debe partir de la experiencia nacional, que es muy basta, teniendo como uno de sus referentes el CR-77, tanto para el cemento como para la cal.

Entre muchos, estos son algunos proyectos que han aplicado esta tecnología:

- Pozón-Caldera
- Río Naranjo-Bijagua-Canalete

- Nicoya-Sámara
- Parrita-Quepos
- Taras-La Georgina (en los tramos más deteriorados)
- San Ramón-Barranca
- Parrita-Quepos
- Tárcoles-Jacó-Loma (estabilización de agregados degradables)
- Río Convento-Buenos-Aires
- Ciudad Colón-Puriscal
- San Gerardo-Copey
- San Josecito-Atenas (toba-cal)
- Alajuela Carrizal (toba-cal)
- Sardinal-Santa Elena
- Frailes-Tarbaca (estabilización de agregados degradables)
- Etc.

También se ha aplicado mucho esta técnica en calles de urbanizaciones y patios de estacionamiento.

II. El agrietamiento en bases estabilizadas con cemento

El agrietamiento por contracción ha sido una de las grandes preocupaciones en torno a esta tecnología. Con agregados de buena calidad se obtienen fácilmente altos valores de resistencia y de módulo aun utilizando bajos porcentajes de cemento, ambos parámetros están directamente ligados con el fenómeno del agrietamiento, pero no son los únicos. Dependiendo del espesor y ancho de la capa, las grietas transversales suelen presentarse en espaciamientos que oscilan entre 3 y 7 metros.

En función de la resistencia a compresión a 7 días se puede estimar cualitativamente, el agrietamiento de las bases estabilizadas con cemento según el siguiente criterio:

$R_{c7} \leq 20 \text{ kg/cm}^2$: Agrietamiento muy leve o imperceptible

$20 \text{ kg/cm}^2 \leq R_{c7} \leq 30 \text{ kg/cm}^2$: Agrietamiento de muy leve a leve

$30 \text{ kg/cm}^2 \leq R_{c7} \leq 40 \text{ kg/cm}^2$: Agrietamiento de leve a moderado

$40 \text{ kg/cm}^2 \leq R_{c7} \leq 55 \text{ kg/cm}^2$: Agrietamiento de moderado a alto

$R_{c7} \geq 60 \text{ kg/cm}^2$: Agrietamiento de alto a severo

Conviene comentar que el agrietamiento de la base estabilizada, especialmente a un nivel igual o inferior al que aquí se señala como moderado, no afecta negativamente, ni la vida útil ni el desempeño a largo plazo de la estructura del pavimento, siempre y cuando el diseño en laboratorio así como el proceso constructivo y de control de calidad de la base se haya ejecutado correctamente. Desde luego se supone que el diseño estructural y el mantenimiento del pavimento se realizan de forma adecuada. Sobre este tópico conviene ampliar la investigación con el propósito de lograr un mejor aprovechamiento de las bases estabilizadas de alta resistencia. Adelante se presentan algunos comentarios y sugerencias de cara a lograr una adecuada ejecución de la base estabilizada. Si por el contrario se descuida el proceso constructivo y de diseño en laboratorio de la estabilización, se pone en riesgo la vida útil del pavimento.

Cuando se aumenta la energía de compactación y se controla la dosificación del agua alrededor del punto de máxima resistencia (no necesariamente coincide con el de máxima densidad), dicho potencial de agrietamiento disminuye.

Si se construye la base con valores de resistencia a 7 días mayores a 45 kg/cm^2 , puede optarse por la alternativa de hacer un ranurado similar al de las losas de hormigón. De esta forma se logra un patrón de grietas uniforme y además las esquinas serán siempre en ángulo recto, evitando fallas de esquina y de bordes en la base estabilizada agrietada.

Además de lo indicado sobre la energía de compactación y dosificación del agua, otras recomendaciones para lograr un control adecuado del agrietamiento son las siguientes:

- Garantizar un proceso constructivo de calidad uniforme. Para esto se requiere el mezclado en planta y la colocación con máquina extendedora. La calidad, costo, aporte estructural y garantía de desempeño a largo plazo de la base estabilizada con cemento justifican perfectamente esta exigencia.
- El diseño en laboratorio de la estabilización debe cumplir con una normativa que garantice la óptima calidad de la estabilización, en función de las propiedades de los materiales a estabilizar.
- Una vez construida la base se debe sellar de inmediato para garantizar un buen curado. No se debe curar haciendo riegos con agua.
- Posterior al sellado se inicia el proceso de fraguado y por lo tanto no se debe abrir al tránsito vehicular (incluido la maquinaria del proyecto). Para definir el día de apertura al tránsito hay que hacer el cálculo estructural en función del incremento diario de resistencia, de modo que los camiones no provoquen una falla estructural de la capa. Un acelerador

de fraguado podría adelantar la apertura al tránsito.

- Si se coloca la capa asfáltica después de los 30 días de construida la base, al colocar el riego de liga se sella también cualquier grieta de contracción que se halla formado, esto disminuye la posibilidad de que las grietas se reflejen a la capa de rodamiento.

- Conviene colocar una primera capa asfáltica de rodamiento delgada, y antes de los 5 o 6 años, colocar una segunda capa de rodamiento. La colocación de sucesivos riegos de liga y de capas de rodamiento expuestas solamente a esfuerzos de compresión disminuye el reflejo de las grietas por contracción de fraguado. Evidentemente este proceso de construcción por etapas debe estar debidamente contemplado en el análisis estructural del pavimento. El tramo Ciudad Colón-Puriscal es un claro ejemplo de la eficacia de una sobrecapa asfáltica colocada sobre un pavimento con base estabilizada severamente agrietada.

III. Otros aspectos relevantes

- 1- El QC de la resistencia en el campo debe hacerse moldeando cilindros. Aun cuando hayan pasado más de 28 días, al extraer núcleos con broca de diamante se podría alterar la muestra en virtud de la vibración que se presenta al cortar con la broca las partículas duras del agregado. Este fenómeno es más significativo en la bases de menor resistencia y con agregado de mayor dureza.
- 2- Colocar la base con niveladora no es una técnica recomendable. El producto final es más heterogéneo en cuanto a resistencia y espesor. Además hay que tener en cuenta que la extracción de núcleos para determinar si el promedio de resistencia y su dispersión es o no aceptable (criterio de aceptación o rechazo) puede presentar importantes limitaciones.
- 3- En el momento que inicia el fraguado la base debe estar sellada, por lo tanto no da tiempo para corregir espesores con la motoniveladora. Esta es otra razón por la cual se debe colocar el material con extendedora; definitivamente se logra un “producto final” de mejor calidad y hay más certeza de cumplir las especificaciones técnicas del proyecto.
- 4- El control de humedad en el material a estabilizar es un aspecto muy importante. La dosificación correcta del agua solo se puede controlar haciendo la mezcla en planta. En el laboratorio se debe determinar el porcentaje de agua con el que se logra la máxima resistencia.
- 5- El equipo de compactación debe ser capaz de compactar de forma homogénea todo el espesor de la

capa. Se han encontrado bases estabilizadas que solo fueron compactadas suficientemente en los primeros 12 cm de su espesor. Para esto se requiere, previo a iniciar su construcción, poner a punto un tramo de prueba de compactación.

- 6- Para el diseño estructural del pavimento se presentan modelos de predicción de falla por fatiga que muestran gran dispersión. Por tanto conviene calibrar un modelo propio que tome en consideración las características de los materiales y las condiciones propias del país.
- 7- Para lograr lo anterior se requieren estudios de campo o en pista de ensayo a escala natural. En el laboratorio se hace difícil moldear especímenes tipo vigas para hacer estudios de fatiga.
- 8- También se hace difícil determinar en el laboratorio el índice de contracción de estos materiales, especialmente por la dificultad de moldear los especímenes para tal fin. De modo que los estudios sobre el agrietamiento de estas bases se debe fundamentar, al menos por ahora, en estudios de campo; aunque hay investigadores que están tratando de estudiar dicho fenómeno en el laboratorio.
- 9- Cuando se tritura un pavimento para convertirlo en una base estabilizada con cemento, lo propio es llevar el material a una planta mezcladora y proceder a su construcción como de la misma forma que una base estabilizada convencional. Es muy entendible la premura de abrir el paso a los vehículos tan pronto como sea posible, así como el impacto en los costos que ello implica, pero no se puede obviar la pérdida de calidad y de vida útil del pavimento cuando no se siguen los procedimientos idóneos.
- 10- Si se transporta el material triturado a la planta mezcladora se puede compactar y conformar la superficie sobre la cual se apoyará la nueva base a colocar. Esto permite una mejor compactación de la parte inferior de la base estabilizada, de lo contrario se compactaría contra una superficie escarificada y relativamente suelta. Esto explica las deficiencias de compactación que suelen detectarse en la parte inferior de estas capas cuando se estabilizan in situ, especialmente si el espesor sobrepasa los 25 cm.
- 11- Adicional a lo señalado en el punto anterior, en la interfase entre la superficie escarificada y la base estabilizada a colocar se puede presentar exceso de agua libre (alto nivel freático, subdrenajes inexistentes o en mal estado, subbases con alta plasticidad en periodo de lluvias), con el consecuente efecto nocivo en la compactación y la resistencia de la base estabilizada (especialmente en la parte inferior

de la capa). En general, cuando la estabilización del pavimento triturado se hace in situ, se torna más difícil lograr el control de la dosificación del agua que establece el diseño hecho en el laboratorio, así como la uniformidad de los demás parámetros de calidad.

- 12- Cuando se realiza la trituración de un pavimento asfáltico deteriorado, normalmente se hace difícil cumplir con la especificación del porcentaje de finos pasando la malla No.4 (en algunos casos también el tamaño máximo de partícula). Este parámetro depende de aspectos como: espesor y rigidez de la capa asfáltica, granulometría de la base (si es granular), diseño del rotor de trituración (número, tamaño y espaciado de los dientes de trituración), velocidad de rotación y de avance de la trituradora, número de pasadas del triturador (aunque normalmente después de la tercera pasada muy poco se logra modificar la granulometría. Esto pone en evidencia la importancia de hacer un adecuado diseño de la estabilización previo a iniciar los trabajos de construcción definitivos.
- 12- En nuestro medio se han observado algunos problemas de compactación de pavimentos triturados y estabilizados in situ, sobre todo en la parte inferior de la capa. Ya se hizo un comentario sobre las causas principales de este fenómeno.
- 13- En algunos países (Francia por ejemplo) se ha experimentado con capas estabilizadas con cemento al nivel de la subbase, esto con el fin de aprovechar su alta rigidez dentro del paquete estructural, procurando de esta forma resolver el problema del agrietamiento. Parece interesante conocer sobre los resultados obtenidos, y si es del caso, construir tramos experimentales.

IV. Bases mejorados con cemento

Para realizar el trabajo de mejoramiento de una base con cemento se requieren los siguientes insumos: agregados, agua, cemento y energía de compactación, precisamente los mismos que se requieren para una base estabilizada. Si se controla correctamente el agua y la compactación, con un porcentaje de cemento relativamente bajo es posible construir una base estabilizada con excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad a largo plazo. En cuyo caso el incremento del costo justifica holgadamente la opción de la base estabilizada.

Si se agregan bajos porcentajes de cemento (por ejemplo menos del 3%), para hacer el trabajo de mejoramiento de la base, es muy difícil lograr “un producto” homogéneo, con el consecuente perjuicio en la calidad de la base, y pérdida

de eficiencia de la inversión realizada, consecuencia del uso ineficiente de los insumos y de la tecnología.

Desde el punto de vista del desempeño del pavimento es muy importante la calidad de la base, por lo tanto no se debe construir esta capa si no se define de previo un marco de especificaciones que se fundamente en estudios técnicos que garanticen cuál será el desempeño a largo plazo de los materiales, y cuáles son sus parámetros fisicomecánicos, condición que sí cumplen por ejemplo las bases granulares o estabilizadas. En consecuencia tampoco es posible hacer el análisis estructural que se requiere para diseñar la intervención a realizar; lo cual es absolutamente necesario para elegir la mejor alternativa de proyecto y con ello garantizar al país el uso eficiente de los recursos. Este es un compromiso absolutamente inherente a la Ingeniería.

Para la contratación de un ítem de obra es muy importante definir sus especificaciones técnicas, así como los criterios de aceptación o rechazo, estos son aspectos fundamentales de la contratación de obras así como del control y aseguramiento de la calidad. Suele suceder que el trabajo de “mejorar” una base tiene un fundamento empírico o intuitivo, y no permite actuar con rigurosidad en asuntos tan importantes con el control y aseguramiento de la calidad, pues no cuenta con parámetros técnicos y objetivos para determinar el cumplimiento de las especificaciones que se deben cumplir

Es propio de la Ingeniería desarrollar y aplicar tecnologías bien fundamentadas que garanticen el uso eficiente de los recursos, en el caso de las bases mejoradas esa premisa es cuestionable.

Particularmente desconozco el fundamento técnico-científico que sustenta la tecnología de las bases mejoradas, y por el contrario me surgen muy serias dudas con respecto al uso de esa tecnología.

V. Comentarios finales

- 1- Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales en las distintas zonas del país, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la aplicación de esta tecnología.
- 2- Con esta tecnología se pueden construir capas de base de alta capacidad estructural, pero además muy competitivas en cuanto a durabilidad y estabilidad volumétrica a largo plazo.

- 3- Estas bases son las más resistentes ante la deformación permanente que inducen los camiones, especialmente cuando se colocan capas asfálticas de rodadura de poco espesor; lo cual implica una alternativa de construcción por etapas, opción válida ante los limitados presupuestos disponibles.
- 4- El uso de una adecuada técnica constructiva y la combinación óptima del agua, el cemento y la energía de compactación son fundamentales para lograr bases de alta calidad y excelente desempeño, minimizando de esta forma el agrietamiento por contracción de fraguado.
- 5- El control y aseguramiento de la calidad en este tipo de bases tiene características muy específicas, por lo tanto el pliego de especificaciones debe tener en cuenta esta circunstancia.
- 6- Conviene ampliar la investigación en cuanto al uso de fibras para controlar el agrietamiento, así como la experiencia en el uso de esta técnica de estabilización para tratar agregados degradables, ambas alternativas ya fueron usadas en diferentes proyectos en Costa Rica.
- 7- El estado del arte de esta tecnología en nuestro medio permite visualizar importantes espacios en los cuales se puede avanzar con esta técnica, por ejemplo en tópicos como: métodos constructivos, control y aseguramiento de la calidad y pago de obra, reconstrucción de pavimentos existentes, actualización y adaptación de especificaciones técnicas, estudio de los modelos de deterioro, criterios técnicos para minimizar el efecto del agrietamiento, formulación de criterios técnicos para el diseño estructural, análisis comparativo de costos y desempeño, evaluación del uso simultáneo de cemento y cal en las bases estabilizadas, etc.
- 8- Conviene evaluar con detalle el tema de las bases mejoradas con cemento, sometiéndolo a un proceso de análisis técnico-científico de ingeniería, para derivar las recomendaciones y decisiones que corresponda.
- 9- Resulta conveniente procurar siempre adaptar la tecnología y las especificaciones técnicas a la realidad del contexto nacional. Las condiciones propias de costos, características de las materias primas, tecnologías disponibles, características del tránsito, condiciones de clima, etc., han mostrado la pertinencia de esta vía para el desarrollo de la tecnología vial.

Este documento recoge las impresiones y comentarios del Ing. Mario Arce Jiménez en el tema de bases estabilizadas con cemento. El Ing. Arce Jiménez fundó el Programa de Infraestructura del Transporte en 1997, y trabajó en su desarrollo hasta el año 2007 cuando se retiró. Además de contar con amplia experiencia en diseño y construcción de vías, fue director de la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR y catedrático (tenure) de dicha universidad, con muchísimas investigaciones en campos diversos de la ingeniería de pavimentos y materiales.

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Coordinador General:

Ing. Luis Guillermo Loría, PhD.

Subcoordinador:

Ing. Fabián Elizondo, MBA.

Unidades:

Unidad de Auditoría Técnica

Coordinadora: Ing. Jenny Chaverri, MScE.

Unidad de Investigación

Coordinador: Ing. Fabián Elizondo, MBA.

Unidad de Evaluación de la Red Vial

Coordinador: Ing. Roy Barrantes

Unidad de Gestión Municipal

Coordinador: Ing. Jaime Allen, MSc.

Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica

Coordinadora: Licda. Irene Matamoros

Unidad de Desarrollo de Especificaciones Técnicas

Coordinador: Ing. Jorge Arturo Castro

Unidad de Puentes

Coordinador: Ing. Rolando Castillo, PhD.

Ing. Guillermo Santana, PhD.