





### **Universidad Tecnológica Nacional**

Rector: Ing. Rubén SORO

Secretario de Ciencia y Tecnología: Ing. Omar DEL GENER

Secretaria Académica y Posgrado: Mg. Ing. Liliana Raquel CUENCA PLETSCH

### **Facultad Regional Concordia**

Decano: Ing. José Jorge PENCO

Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado: Dra. Natalia TESÓN

Secretario Académico: Ing. Fabián Andrés AVID

### **GIICMA**

Director: Prof. Jorge Daniel SOTA

DIRECCIÓN DE LA REVISTA: Salta 277 - Concordia, Entre Ríos, República Argentina

**Director:** Prof. Jorge D. Sota

**Secretario General:** Ing. Exequiel H. N. Caseres

**Secretaria Académica:** Ing. Luis P. Traversa

**Comité Académico:** Ing. Fabián A. Avid, Arq. María A. Bruno, Ing. Alejandro C. García, Ing. Gustavo Larenze, Ing. Oscar D. Rico, Ing. Darío O. Vercesi, Dra. Natalia Teson, Ing. Rosana Marcossi, Ing. Carlos Blanc, Dra. Eugenia Garat, Ing. Carlos Pasquet, Ing. Juan José Jaunarena, Arq. Ángela Barrios Padula.

Los artículos son publicados con la sola responsabilidad de los autores. La Dirección no se solidariza con las opiniones vertidas en los mismos. Los artículos pueden reproducirse total o parcialmente citando la fuente. Registro Nacional de la Propiedad Intelectual N° 249.362

Imagen de tapa: Sistema de piletas de sedimentación y decantación de sólidos de agua de lavado de camiones mixers. Fuente: Trabajo "Empleo de agua proveniente del lavado de camiones mixers en la producción de hormigones sustentables: Evaluación de la trabajabilidad y resistencia".

# Sumario

*Caracterización de suelos arcillosos de Entre Ríos a partir de ensayos triaxiales escalonados, correlaciones con ensayos de campo.*

O. Rico, A. García, M. E. Medina, M. Bassini, A. Colicelli (Grupo de Geotecnia)

XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica - 24, 25 y 26 de noviembre de 2021 - Misiones, Argentina.

06

*Empleo de agua proveniente del lavado de camiones mixers en la producción de hormigones sustentables: Evaluación de la trabajabilidad y resistencia.*

C.G. Caballero, A.J. Palacio, A. Alzogaray, F.A. Avid, J.D. Sota

XVI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIII de Control de Calidad en la Construcción - 19, 20 y 21 de octubre de 2021 - Brasil.

17



## Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente

El **GRUPO GIICMA** fue reconocido el 26 de agosto de 2010 como Grupo UTN mediante Resolución N°794 del Consejo Superior de la Universidad Tecnológica Nacional.

Desde sus orígenes como Grupo de Investigación de la Facultad Regional Concordia, las actividades estuvieron focalizadas en aspectos vinculados con la durabilidad del hormigón, contando para su desarrollo con la infraestructura del Laboratorio de Tecnología del Hormigón de la mencionada Institución.

En este contexto, las líneas de investigación donde inicialmente se ha desarrollado la mayor capacitación es la caracterización de los agregados pétreos regionales para la elaboración de hormigones. Los materiales comprenden, tanto los agregados aluvionales constituidos por gravas y arenas de las cuencas de los ríos Paraná, Uruguay y Gualaguay como los triturados basálticos de las provincias mesopotámicas.

El equipamiento actualizado y la precisión interlaboratorio lograda han permitido a este Laboratorio posicionarse como centro regional de consulta para la realización de los ensayos de reactividad álcali-agregado mediante el método acelerado de la barra de mortero, Norma IRAM N° 1674. El equipamiento adquirido y el continuo entrenamiento del personal y becarios del laboratorio permitieron incorporar las metodologías de ensayo correspondientes a la variante Australiana RTA363 del ensayo acelerado de la barra de mortero y el ensayo del prisma de hormigón correspondiente al procedimiento RILEM TC 191-ARP-03, incorporado como anexo de la Norma IRAM 1700.

A los fines de verificar el desempeño del Laboratorio de Tecnología del Hormigón de la Facultad Regional Concordia, se efectuaron estudios interlaboratorio conjuntamente con el LEMIT, ICPA y el INTI, con el objetivo principal de asegurar la calidad de los resultados obtenidos. Como objetivo secundario de esta metodología se logró ajustar los protocolos de operación, manejo, registro y análisis de muestras con un interés futuro en la acreditación del ensayo acelerado de la barra de mortero Norma IRAM 1674, estando en este momento con el ejercicio de la documentación.

Por otra parte, se han ampliado los estudios de hormigones reciclados elaborados con canto rodado y basalto, para evaluar su aprovechamiento y establecer relaciones con la corrosión de armaduras y la durabilidad frente a la RAS contando en este momento con metodología y resultados como para usar estos hormigones reciclados como agregados en pavimentos.

En los últimos años, se iniciaron trabajos en líneas de investigación para el desarrollo de equipamientos de madurez en el hormigón para determinar su resistencia y medida de la presión de las expansiones dentro del hormigón. El objetivo principal de los proyectos desarrollados y en curso, abarcan determinar su reactividad potencial álcali-sílice, medir la madurez del hormigón, medir la presión interna de expansión de los hormigones por reacciones químicas o físicas en su masa.

Se han ampliado los estudios en el último año en las áreas de Hidrología, Geología Aplicada y Suelos, contando con la infraestructura del Laboratorio de Geotecnia de la Facultad. En el caso particular de suelos, se han sumado estudios de suelos viales modificados para su caracterización.

En el área de estructuras, se realizaron algunas experiencias trabajando en temas específicos como el punzonado de placas con la transferencia académica del tema, y el uso de fibras sintéticas en el desarrollo de piezas premoldeadas.

Se consolidó en el grupo el área de Química Analítica, con el laboratorio de análisis de agua para uso en hormigones y determinación de cal útil vial en la corrección de suelos viales.

Con el Proyecto "Análisis de la infiltración de agua de lluvia en hormigones porosos" para el control en origen de inundaciones el grupo de Hidráulica integra una nueva área en el grupo GIICMA.

Se incorporaron como Áreas del GIICMA el grupo de Tránsito y Transporte de la Facultad y el grupo de las Cátedras Tecnología de los Materiales y Vías de Comunicación, Áreas Tránsito y Transporte y Área Materiales Asfálticos.

En el caso del Área Tránsito y Transporte participó con un trabajo original internacional y se incorporó al Organismo Universitario Latinoamericano.

El área de Patrimonio del GIICMA, desarrolló actividades relacionadas con los convenios con la Municipalidad de

Concordia: 1) Circuito Turístico que incluya Patrimonio Histórico y Cultural, 2) Relevamiento catastral a editar en cuadernos de difusión, lo que hizo posible la participación en Congresos Internacionales y la publicación de dos catálogos de patrimonio: uno de Patrimonio Moderno y el otro de Patrimonio Histórico de Concordia.

Con la presentación del trabajo "Alkali-aggregate reaction in recycled concrete with aggregates qualified as reactivos by the ASTM C 1260 method" en el Congreso ICCAR 2017 en San Paulo, el GIICMA se colocó como referente nacional del estudio de la reacción álcali sílice.

En el año 2016 se consolidó la publicación de la Revista on-line del grupo GIICMA: CITI (Grupo Investigación Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente; Ciencia, Investigación, Tecnología e Innovación) conteniendo los trabajos de investigación del grupo publicado en los congresos internacionales en los que participaron sus integrantes, aguarda ya el número quince, estando completo en su contenido.

El nombre de la Revista se ve consolidado por las actividades del grupo en su interdisciplina y en lo producido, que se manifiesta por el tipo y contenido de los trabajos publicados.

El avance nos obliga a mayor compromiso sabiendo que contamos con el apoyo de la Gestión del Rectorado y de la Facultad Regional como así también de organismos Nacionales con los que mantenemos convenios muy fructíferos y los locales que siempre estuvieron presentes.

**Prof. Jorge Daniel Sota**

**DIRECTOR**

# Caracterización de suelos arcillosos de Entre Ríos a partir de ensayos triaxiales escalonados, correlaciones con ensayos de campo

Oscar Rico<sup>1</sup>, Alejandro García<sup>1</sup>, M. Emilia Medina<sup>1</sup>, María Bassini<sup>1</sup>, Alexis Colicelli<sup>1</sup>, Grupo de Geotecnia

(<sup>1</sup>) Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Concordia - Salta 277 (3200), Concordia, Entre Ríos, Argentina

Contacto: labsuelo@frcon.utn.edu.ar

## Resumen

En la región suelen utilizarse para los suelos arcillosos, correlaciones internacionalmente difundidas entre parámetros de corte como la cohesión no drenada  $C_u$  y el número  $N$  obtenido mediante el ensayo estándar de penetración (SPT). Sin embargo, los autores de tales relaciones, solicitan "prudencia" respecto al uso de sus expresiones y recomiendan validaciones para cada zona particular.

Este trabajo pretende ser un aporte hacia el avance en el conocimiento de las variables que permiten definir la capacidad de carga de los suelos arcillosos, en general de alta plasticidad, distribuidos en gran parte de la región centro y norte de la Provincia de Entre Ríos.

Se exponen resultados de diferentes ensayos triaxiales ejecutados en forma escalonada, no consolidada ni drenada (UU), a humedad natural; los cuales permitieron la obtención de curvas tensión-deformación y parámetros de resistencia al corte  $\phi$  y  $C_u$ . Adicionalmente se indaga sobre la validez para estas arcillas, de las expresiones más conocidas en función de  $N$ , índice liquidez, humedad natural, plasticidad, etc.

Se presentan relaciones obtenidas entre parámetros de resistencia no drenados y el número de golpes de ensayo de campo SPT.

**Palabras clave:** arcillas, SPT, parámetros no drenados.

## Abstract

Internationally disseminated correlations between shear parameters such as the undrained cohesion  $C_u$  and the number  $N$  obtained by means of the standard penetration test (SPT) are often used in the region for clayey soils. However, the authors of such relationships request "prudence" regarding the use of their expressions and recommend validations for each particular zone.

This work aims to be a contribution towards the advancement in the knowledge of the variables that allow defining the load capacity of clayey soils, generally of high plasticity, distributed in a large part of the central and northern region of the Province of E. Ríos.

Results of different triaxial tests carried out in a staggered manner, unconsolidated and undrained (UU), at natural humidity are presented; which allowed obtaining stress-strain curves and shear strength parameters  $\phi$  and  $C_u$ . Additionally, the validity for these clays of the best known expressions in terms of  $N$ , liquidity index, natural humidity, plasticity, etc. is investigated.

Relationships obtained between undrained strength parameters and the number of SPT field test blows are presented.

**Keywords:** clays, SPT, undrained parameters.

## Introducción y objetivos

### Antecedentes

Para las arcillas plásticas normalmente consolidadas o con bajo grado de preconsolidación, existen internacionales numerosas correlaciones entre los parámetros de resistencia, la plasticidad y los coeficientes elásticos, obtenidos en condiciones no drenadas.

Varios autores sugieren que la estimación de Parámetros Resistentes y Elásticos ( $q_u$ ,  $C_u$  y  $E_s$ ) de suelos arcillosos versus la resistencia a penetración registrada en campo (NSPT), sólo es factible sobre la base de una experiencia regional adecuadamente contrastada y en depósitos geotécnicamente bien caracterizados. Sin embargo, aparecen varias fórmulas de carácter general entre NSPT, los parámetros de resistencia al corte y la plasticidad de las arcillas.

Fundamentalmente se han publicado relaciones entre la resistencia no drenada ( $C_u$ ) determinada en especímenes de ensayos Triaxiales UU, con el NSPT de campo o bien relacionado con el  $N_{60}$  y en función del Índice de Plasticidad (IP) o el Índice de Liquidez (IL).

### Contexto regional

La provincia de Entre Ríos presenta vastas regiones en las que superficialmente y hasta profundidades de interés en obras de ingeniería civil, se alumbran suelos netamente arcillosos y de alta plasticidad, en general con pasante por la malla N°200 superior a 75% u 80% y límite líquido mayor a 50%. Se observa que la corteza u horizonte superior presenta características físicas razonablemente uniformes en una considerable superficie de la provincia, básicamente en las zonas centro y centro norte.

### Objetivos específicos

Siendo el ensayo SPT el sondeo más comúnmente utilizado en las investigaciones geotécnicas regionales, incluso usualmente requerido por reparticiones públicas, resulta prudente avanzar con un trabajo de investigación académica tendiente a cotejar la aplicabilidad de algunas correlaciones internacionales utilizadas, que aparecen en la bibliografía Geotécnica y/o encontrar nuevas relaciones de interés estrictamente regional, basadas principalmente en relaciones con el número  $N$  o  $N_{60}$ .

## Materiales y métodos

### Criterios de selección de las muestras

La obtención de muestras para el proyecto se realizó en territorio de la Provincia de Entre Ríos, particularmente en las Localidades de Federal, La Criolla, S.J. de Feliciano, Jubileo, Chajarí, San Pedro, entre otros.

### Obtención e identificación de muestras, ensayos de campo

Se obtuvieron muestras de Ensayos de Penetración Estándar (SPT) (Norma IRAM 10517, Ref. [1]). A partir de convenio firmado entre la Facultad y una Empresa Geotécnica de la zona, ésta cede al grupo de investigación planillas de campo y "testigos" obtenidos en terreno mediante la ejecución de ensayos SPT con Saca testigos de Zapatos Intercambiables (SZI).

Resumidamente el suelo se obtuvo del interior de un sacamuestras que penetró el terreno a profundidades variables, a partir de la hincada dinámica con una energía teórica normalizada de 4900 kgcm por impacto, registrándose el número de golpes para lograr una penetración de 30 cm del sacamuestras, así se procesaron más de 110 muestras contenidas en tubos de PVC herméticamente sellados y rotulados, las dimensiones de los testigos fueron en general de 46 mm de diámetro y 150 mm de altura. El número de golpes  $N$  obtenido en campo fue corregido por el tipo de sacamuestras utilizado, según la relación aproximada  $NSPT = 0,8 NSZI$ .

En las localidades de Federal, La Criolla y Feliciano, predios donde previamente se habían ejecutado los sondeos mediante la técnica del SPT, se realizaron Ensayos de Cono Dinámico (DCP, Norma ASTM D 6951-03) Ref. [2], mediante hincada dinámica de un cono de 19 mm de diámetro con una energía por golpe de 460 kgcm, registrándose la cantidad de golpes y la penetración en mm, el método no incluye obtención de muestras; así se hicieron varios DCP hasta profundidades cercanas a 4 m, ubicados próximo a los puntos donde se habían realizado los sondeos con obtención de muestras (SPT).

Sin bien el DCP es un ensayo de penetración que fue desarrollado en la técnica vial y para escasa profundidad, permitiendo correlacionar el índice de penetración con el valor soporte relativo del suelo (CBR). Siendo un sondeo ágil, versátil y económico, puede resultar factible su uso para cuantificar de manera indirecta las características estructurales de suelos finos, en terrenos donde a priori se tenga conocimiento de la existencia de mantos de suelos "aceptablemente" homogéneos, situación típica en la región alcanzada por la presente investigación.

En la Localidad de Federal, donde la Empresa había realizado ensayos y obtención de muestras mediante SPT, se ejecutó calicata procediendo a "tallar" una muestra inalterada de suelo a 0,75 m de profundidad aproximadamente, para la caracterización de parámetros del suelo "indisturbado". En cercanías al punto de extracción se realizaron ensayos DCP para ampliar la información del suelo del sector. Complementariamente se realizó un ensayo de Densidad In Situ (Norma IRAM 10536 Ref. [1]) para determinar el peso unitario seco del suelo en condiciones naturales.

### Caracterización física

Con todas las muestras obtenidas a partir de los ensayos SPT y con las probetas testigo inalteradas de Federal, se realizó la determinación de las características físicas:

Humedad Natural (%): (Norma IRAM 10519 Ref. [1]).

Límite Líquido (%): (Norma IRAM 10501 Ref. [1]).

Límite Plástico (%): (Norma IRAM 10501 Ref. [1]).

La determinación de la Plasticidad se realizó previa molienda y tamizado por malla N°40, se hidrató el suelo hasta comportamiento como líquido quedando en maceración, luego se amasó en superficie plana (mármol) para mediante cascador de Casagrande determinar el Límite líquido. Con el material sobre el mármol se determinó el Límite Plástico.

Contenido de partículas finas o pasante por la malla N° 200 por vía húmeda (Norma IRAM 10507 Ref. [1]).

### Ensayos de resistencia al corte - Triaxiales

Luego de caracterizado el material, partiendo de los lineamientos generales de la Norma IRAM 10529 Ref. [1], se realizaron Ensayos Triaxiales Escalonados a humedad natural UU, No Consolidado No Drenado, Ref. [1], para lo cual se utilizaron las muestras obtenidas del SPT y las talladas a partir de muestra indisturbada. En total, se procesaron más de un centenar de muestras obtenidas mediante la ejecución del Ensayo SPT.

Para su ejecución en la presente investigación se le aplicó

una presión de confinamiento isotrópica ( $\sigma_3$ ), partiendo de  $\sigma_3 = 0,1$  MPa, se somete luego la probeta a esfuerzo axial hasta plastificación incipiente (cambio de pendiente en la gráfica), se incrementa el confinamiento haciendo  $\sigma_3 = 0,2$  MPa y posteriormente hasta  $\sigma_3 = 0,3$  MPa, así se completan tres escalones de carga alcanzando finalmente la tensión desviante de rotura.

Se registraron los valores de esfuerzos y deformación alcanzada, confeccionando los clásicos gráficos tensión-deformación ( $\sigma - \epsilon$ ). Luego se graficaron los círculos de rotura según Mohr con el esfuerzo desviante ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) alcanzado al momento de la falla, trazándose la Curva de Resistencia Intrínseca o envolvente de rotura, obtenien-

Sector 1 San José de Feliciano								
Lect. Inicial: 4960								
N° Golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración e/lecturas (mm)	Penetración por golpe (mm)	Factor del Mazo	Índice DCP (mm/gol)	Promedio Índice DCP	N (SPT)	N60
0	0	0	0	0	0	31	4	6
3	15	15	5	1	5			
3	193	178	59	1	59			
6	345	152	25	1	25			
6	550	205	34	1	34			
9	702	152	17	1	17	13	10	14
12	848	146	12	1	12			
12	984	136	11	1	11			
15	1168	184	12	1	12			
15	1369	201	13	1	13			
15	1559	190	13	1	13	13	9	13
15	1731	172	11	1	11			
15	1951	220	15	1	15			
15	2140	189	13	1	13			
15	2340	200	13	1	13			
15	2535	195	13	1	13	15	6	10
15	2752	217	14	1	14			
12	2940	188	16	1	16			
3	2994	54	18	1	18			
15	3231	237	16	1	16			
15	3448	217	14	1	14	12	14	20
15	3638	190	13	1	13			
15	3828	190	13	1	13			
15	4003	175	12	1	12			

Tabla 1. Planilla modelo de procesamiento de datos.

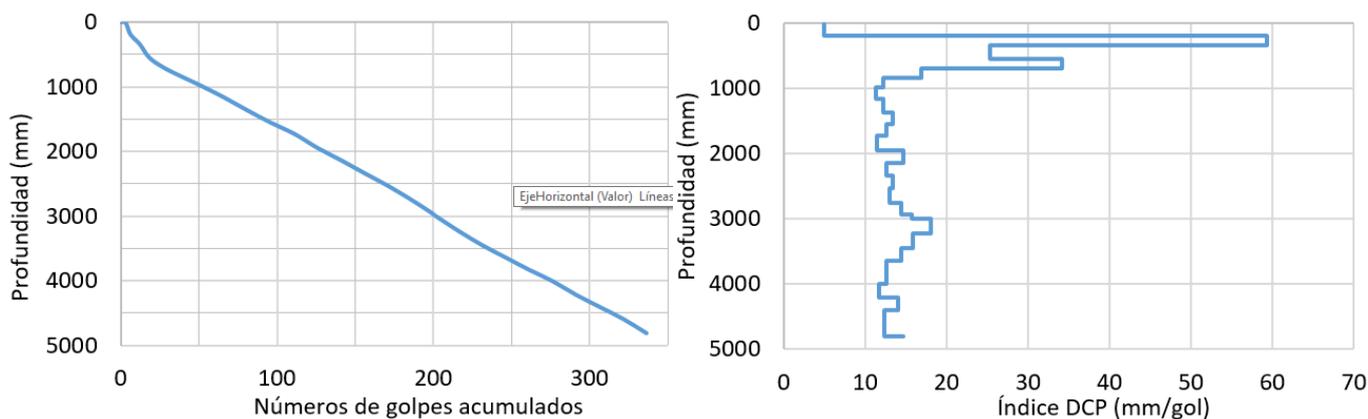


Figura 1. Representación gráfica del Ensayo DCP.

do finalmente los parámetros de resistencia al corte  $\Phi_u$  (ángulo de fricción interna no drenado) y  $C_u$  (cohesión no drenada).

### Ensayos de penetración DCP vs NSPT, $N_{60}$

Los datos de campo relevados mediante más de una docena de ensayos DCP, se procesaron y relacionaron al N y  $N_{60}$  de un mismo sitio de auscultación.

En planilla y gráficos anteriores (ver Tabla 1 y Fig. 1) se indica el modelo de ordenamiento de datos y su representación gráfica.

## Resultados obtenidos

### Parámetros de caracterización física y estructural

Se procesaron en total más de 110 probetas, a las que se realizaron los ensayos de humedad, plasticidad, peso unitario húmedo, lavado por malla N° 200, Triaxial escalonado, Módulo Elasticidad Secante al 50% para el primer escalón de carga.

Se presenta extracto de planilla modelo, utilizada en el procesamiento de datos y resultados:

DATOS		N°	PROM.	PROM.	PESO	Wnat	DENSIDAD	L.L.	I.P.	I.L.	P#200
TESTIGO	ORIGEN	$N_{SPT}$	$\Phi$ (cm)	h (cm)	gr	W (%)	$\gamma_{sec}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	%	%		%
M1-17	CHARRÚAS	9	4,65	11,48	339	38,62	1,257	62	25	0,06	99
M3-17	CHAJARÍ	9	4,55	12,03	390	22,28	1,633	56	37	0,09	81
M4-17	CHAJARÍ	10	4,60	11,51	375	25,97	1,559	56	35	0,14	85
M5-17	CHAJARÍ	12	4,53	10,93	362	22,13	1,684	49	31	0,13	79
M6-17	CHAJARÍ	17	4,58	12,31	422	18,08	1,765	46	32	0,13	70
M8-17	CHAJARÍ	13	4,54	11,34	368	23,56	1,623	49	29	0,12	76
M9-17	CHAJARÍ	8	4,51	11,31	372	17,42	1,756	51	38	0,12	67
M10-17	CHAJARÍ	21	4,56	10,55	374	11,45	1,949	23	12	0,04	38
M11-17	CHAJARÍ	21	4,59	11,38	411	14,09	1,915	24	12	0,17	44
M12-17	CHAJARÍ	16	4,54	11,20	392	14,71	1,887	40	25	0,00	59
M13-17	CHAÑAR	9	4,63	10,75	372	22,61	1,673	60	30	0,00	89
M14-17	CHAÑAR	11	4,61	10,40	317	32,86	1,375	61	32	0,12	93
M17-17	CHAJARÍ	7	4,53	11,26	357	23,06	1,596	50	34	0,21	72
M22-17	CHAJARÍ	19	4,58	10,96	384	15,57	1,842	44	30	0,05	69
M23-17	CHAJARÍ	15	4,57	11,04	392	16,14	1,860	44	30	0,07	69

Tabla 2. Planilla modelo de procesamiento de datos. Propiedades físicas.

DATOS		N°	$C_u$	$\Phi_u$	SUCS	$E_{50}$
TESTIGO	ORIGEN	$N_{SPT}$	kPa	°		MPa
M1-17	CHARRÚAS	9	26,48	8	MH	6,76
M3-17	CHAJARÍ	9	66,69	14	CH	14,78
M4-17	CHAJARÍ	10	41,19	12	CH	5,64
M5-17	CHAJARÍ	12	89,24	3	CL	7,84
M6-17	CHAJARÍ	17	69,63	8	CL	10,71
M8-17	CHAJARÍ	13	65,71	9	CL	9,88
M9-17	CHAJARÍ	8	173,58	11	CH	14,18
M10-17	CHAJARÍ	21	57,86	23	SC	10,89
M11-17	CHAJARÍ	21	51,00	18	SC	12,17
M12-17	CHAJARÍ	16	190,26	4	CL	11,98
M13-17	CHAÑAR	9	62,76	12	CH	9,81
M14-17	CHAÑAR	11	49,04	8	CH	6,20
M17-17	CHAJARÍ	7	51,98	5	CH	7,94
M22-17	CHAJARÍ	19	164,76	11	CL	12,42
M23-17	CHAJARÍ	15	132,39	7	CL	7,12

Tabla 3. Planilla modelo de procesamiento de datos. Características Resistentes.

En las siguientes figuras se indican curvas tensión-deformación para un testigo y determinación de los parámetros de resistencia al corte, cohesión no drenada y ángulo de fricción interna no drenado ( $C_u$ - $\Phi_u$ ).

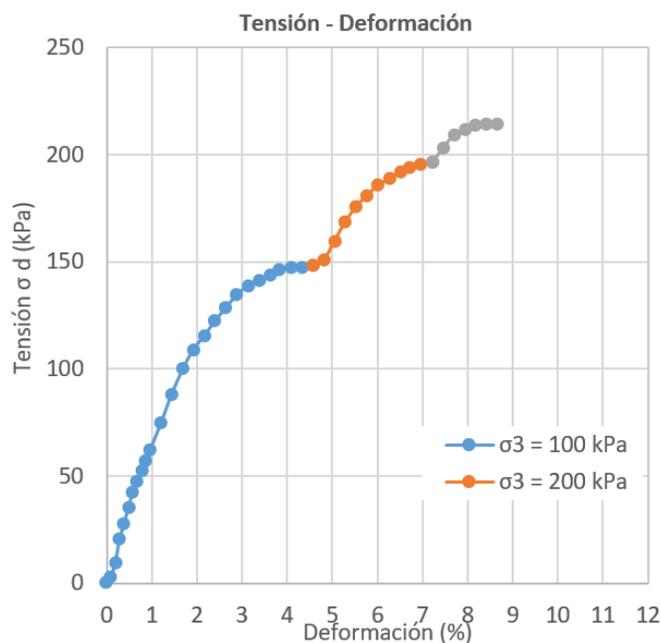


Figura 2. Curva tensión – deformación.

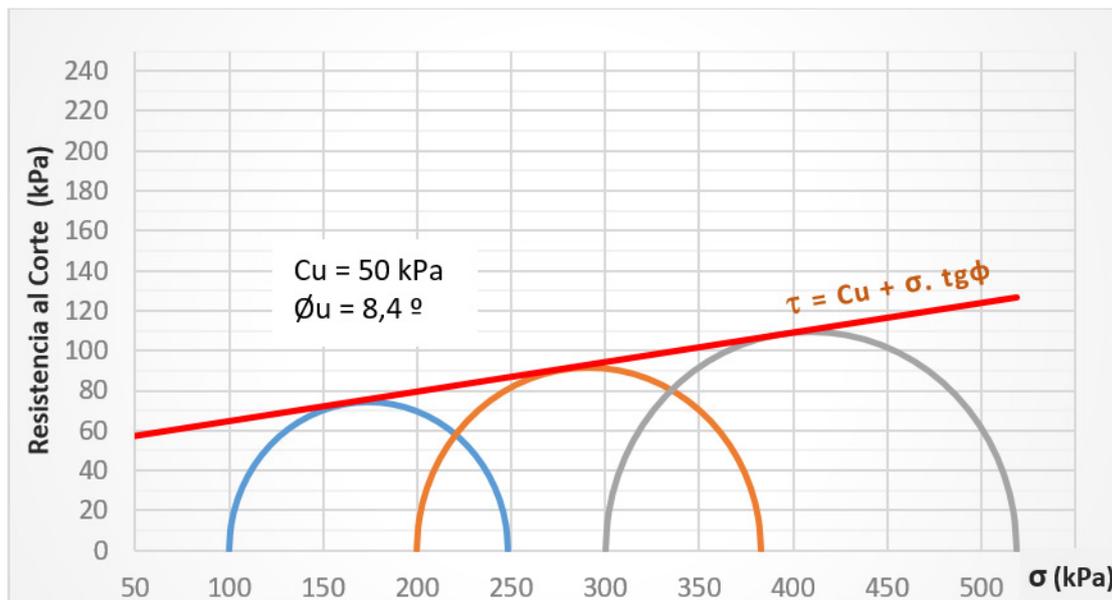


Figura 3. Curva de Resistencia Intrínseca.

### Análisis de correlaciones

Con la familia de datos obtenidos, se analizaron patrones de comportamiento separándolos según valores de Humedad Natural, Pasante por Malla N° 200, Índice de Liquidez e Índice de Plasticidad, buscando líneas de tendencia similares.

Se indagó sobre las relaciones entre datos de campo: número de golpes N del SPT, corregido por tipo de sacamuestras utilizado, versus Índice de Penetración según el DCP (ver Fig.4).

Se examinaron relaciones lineales y funciones exponenciales o asintóticas, que se representaron gráficamente sobre ejes cartesianos, a escala decimal o semi-logarítmica, cotejándolas con relaciones desarrolladas por diferentes autores, dando prioridad a la información de uso habitual en Argentina.

En los apartados siguientes se presentan algunas de las curvas de tendencia obtenidas.

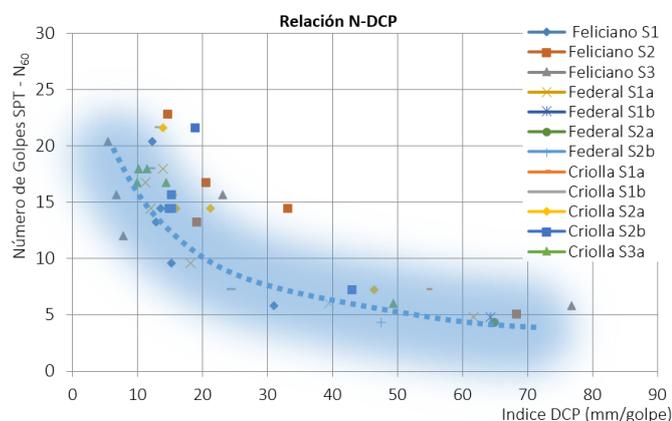


Figura 4. Curva  $N_{60}$ -DCP.

### RELACIÓN $N_{SPT}$ vs. $I_{(DCP)}$

Se obtuvo con cierta fiabilidad, una tendencia que permite interrelacionar los resultados de dos ensayos dinámicos de campo, el número de golpes  $N_{60}$  del SPT versus

el índice de penetración en mm/golpes del DCP. A partir de allí, también se puede analizar una relación entre el índice DCP y la cohesión no drenada  $C_u$ . En fig. 4 se representan los valores obtenidos para diferentes localidades.

### RELACIÓN $C_u$ vs. $N$ y $C_u$ vs. $N_{60}$

La literatura técnica contiene numerosas correlaciones entre el NSPT y la resistencia cortante no drenada de arcillas  $C_u$ , cotejadas con base a resultados de ensayos triaxiales no drenados para arcillas en general no sensitivas, saturadas o con elevado contenido de humedad. De la revisión estas documentaciones internacionalmente de mayor difusión; las relaciones de tipo lineales son las que mejor aproximan al comportamiento de los suelos estudiados en la región, sobre todo de aquellos de alta plasticidad (CH).

Por ejemplo, haciendo las correspondientes transformaciones de energía de penetración y de unidades; Stroud (1974-1989) Ref. [3] - Ref. [4], sugiere una relación del tipo:

$$C_u = f \cdot (N_{60}); \quad (1)$$

Siendo  $f$  una constante que varía entre 3,5 a 6,5 kPa, según el IP, con un promedio de 4,4 kPa y  $N_{60}$  es el número de penetración estándar obtenido en campo, corregido por la eficiencia de energía.

En tanto que si consideramos las diferentes consistencias y tomamos los valores medio de los entornos recomendados por Terzaghi y Peck (1967) Ref. [5], muy difundidos en la bibliografía; esa constante asume un valor promedio aproximado de 6,4 kPa.

En la presente investigación se han conseguido relaciones similares, para suelos de tipo CH y algunos MH, pero con valor promedio de la constante  $f$ , referida siempre a  $N_{60}$  del orden de 4,7 kPa. Conservadoramente incluso puede tomarse como límite inferior aproximado, un valor para la constante  $f$  de aproximadamente 2,4 kPa.

En las figuras siguientes se presentan las relaciones obtenidas.

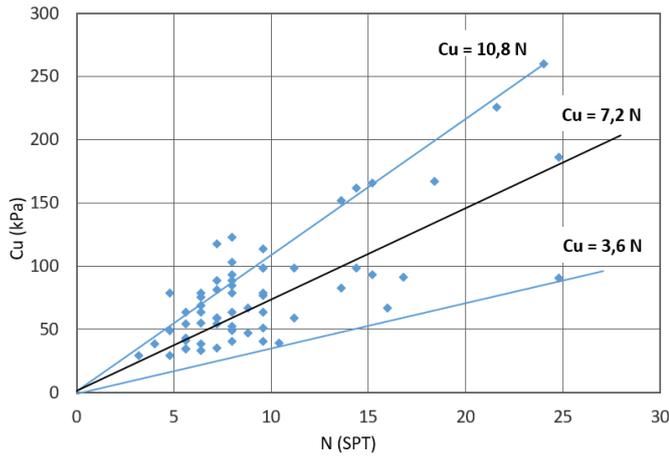


Figura 5. Relaciones  $N$  (SPT) –  $Cu$ .

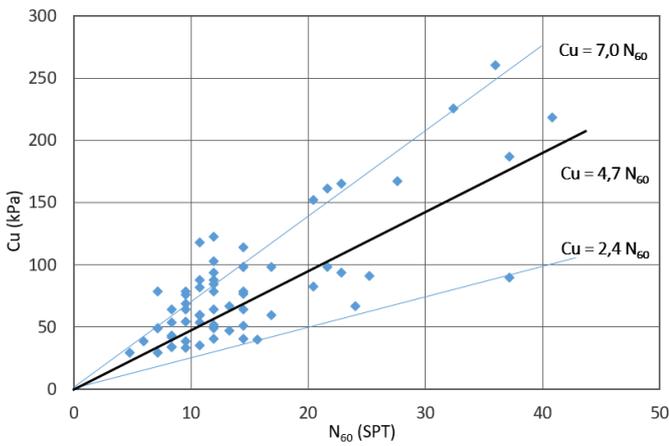


Figura 6. Relaciones  $N_{60}$  –  $Cu$ .

Obteniéndose así una correlación lineal con aceptable dispersión, entre la cohesión no drenada de las arcillas de alta plasticidad y el número de golpes NSPT.

$$Cu = f_1 \cdot N \quad (2) \quad \text{Siendo } f_1 \sim 7,2 \pm 3,6 \text{ [kPa/Golpe]}$$

O bien mediante los correspondientes ajustes por la energía de penetración,

$$Cu = f \cdot N_{60} \quad (3) \quad \text{Siendo } f \sim 4,7 \pm 2,3 \text{ [kPa/Golpe]}$$

Consiguiendo así, lograr una curva conservadora o del lado seguro, de ecuación:

$$Cu \geq 2,4 N_{60} \quad [kPa] \quad (4)$$

Expresiones que resultan comparables a las presentadas por diferentes autores e internacionalmente muy difundidas.

Al momento para los suelos estudiados, no se consiguió la convalidación de otras relaciones fuera de las lineales, entre la cohesión no drenada y el número de golpes del SPT, como por ejemplo aquellas presentadas por Hara et al (1971) Ref. [6] o Kulhawy y Mayne (1990) Ref. [7], del tipo:

$$Cu = Cte. x N_{60}^{0,72} \quad (5)$$

#### RELACIONES ENTRE E vs N, E vs Cu y E vs IL

En los suelos cohesivos la estimación del módulo elástico E en condiciones no drenadas es usualmente obtenida a partir de relaciones empíricas con la resistencia al corte sin drenaje  $S_u$ . De acuerdo a Duncan y Buchignani (1976) Ref. [8]; la dependencia entre ambos parámetros es aproximadamente constante, en función de la relación de preconsolidación OCR y de la plasticidad, entre otros factores.

Partiendo de la proporcionalidad precedentemente examinada entre N y Cu, resulta factible analizar ahora alguna correlación E vs N.

Definido el Módulo Elástico Secante  $E_{50}$  como el correspondiente al 50% del esfuerzo desviante de falla, para presiones de confinamiento de 0,1 MPa, se pudo lograr en los suelos de alta plasticidad una tendencia lineal, con valor medio de ecuación:

$$E_{50} \approx N \quad [MPa] \quad (6)$$

O aplicando los ajustes correspondientes a la energía de penetración,

$$E_{50} \sim 0,7 \cdot N_{60} \quad [MPa] \quad (7)$$

En la siguiente figura se muestra la relación obtenida.

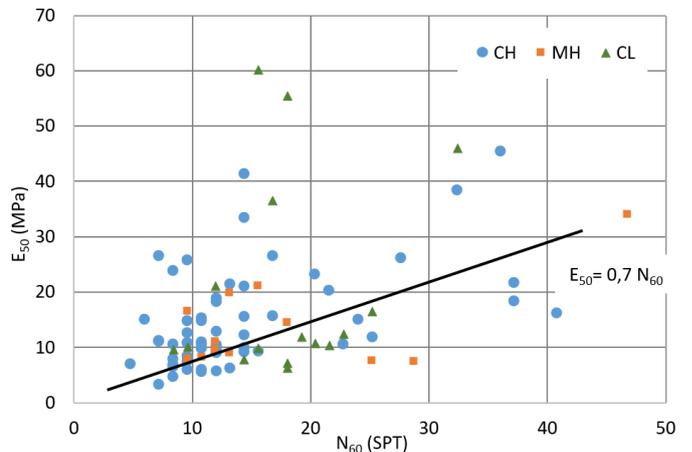


Figura 7. Relación  $E_{50}$  vs  $N_{60}$

Adicionalmente se observa una rápida tendencia a la disminución tanto de  $E_{50}$  como de Cu, con el incremento de la humedad natural, tal se aprecia en las siguientes figuras.

En fig. 8 se presenta la curva  $E_{50}$  [MPa] vs. Humedad Nat [%] para CH, MH, y en fig. 9 la curva Cu [kPa] vs. Humedad Nat [%]:

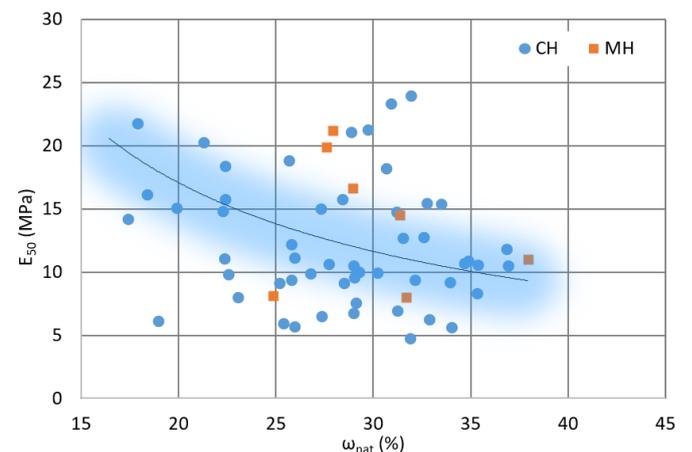
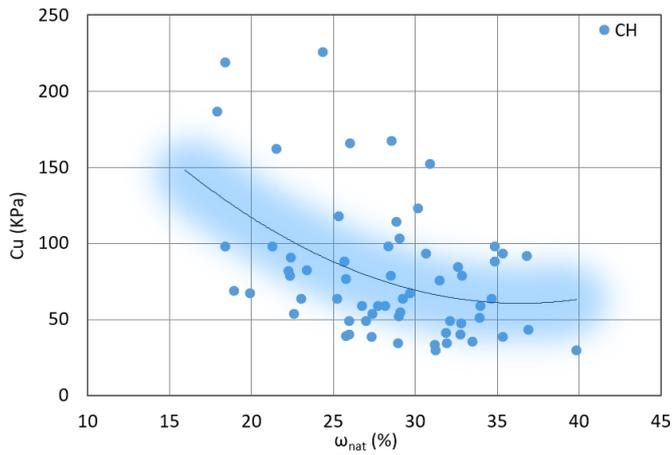
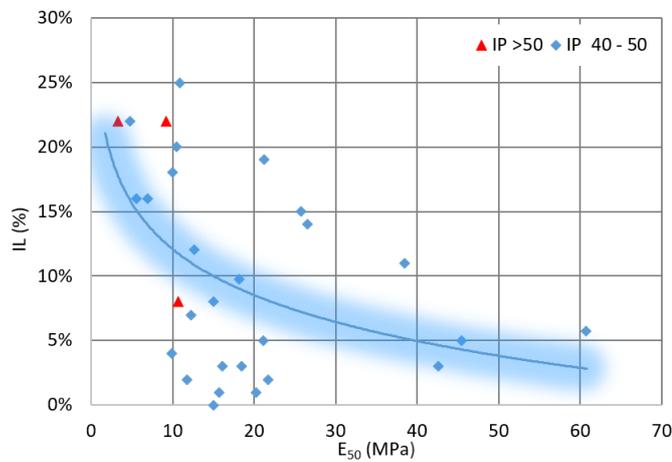


Figura 8. Relación  $E_{50}$  vs  $\omega_{nat}$



**Figura 9.** Relación  $C_u$  vs  $\omega_{nat}$ .

En la siguiente figura se observa el incremento en el Módulo Elástico para valores apreciablemente reducidos del Índice de Liquidez (IL).



**Figura 10.** Relación  $IL$  vs  $E_{50}$ .

## Conclusiones

- Se logró corroborar la tendencia general de una relación aproximadamente lineal entre la Cohesión No Drenada  $C_u$  de las Arcillas Plásticas CH, presentes en la región versus el Número de Golpes  $N_{SPT}$  obtenido mediante Ensayo de Penetración Normal. Se obtuvo un valor constante de proporcionalidad considerado como de mínima o seguro y un valor medio, dentro de una dispersión aceptable.
- Se verificó un incremento en el Módulo Elástico del suelo con el aumento de  $N$  de campo y una apreciable reducción de dicho Módulo en suelos con elevada humedad natural.
- Las correlaciones logradas mediante la obtención de valores de resistencia a la penetración  $NSPT$ , en ausencia de pruebas de resistencia al corte de laboratorio o ensayos triaxiales, pueden ser consideradas para informes geotécnicos preliminares, estudios de factibilidad y/o en obras menores con bajo compromiso estructural y previo a la ejecución de ensayos de laboratorio que corroboren los datos logrados in situ; siempre dentro del acotado contexto de los suelos plásticos regionales y asumiendo un criterio de curva inferior o conservadora.
- Los resultados logrados, si bien muestran tendencias, deben nutrirse de una mayor cantidad de datos que permitan incrementar la certidumbre.

## Registro fotográfico

A continuación, se presentan fotografías de los trabajos realizados durante la investigación.



**Figura 11.** Calicata, excavación y tallado.



**Figura 12.** Obtención Muestra Inalterada.



*Figura 13. Ensayo DCP.*



*Figura 14. Densidad In Situ.*



*Figura 15. Ensayo SPT.*



*Figura 16. Extracción de Testigo de porta muestras.*



*Figura 17. Tallado base de apoyo.*



*Figura 18. Tallado de muestra "indisturbada".*



*Figura 19. Cámara Triaxial, Prensa de Ensayo y Muestra en Rotura.*



*Figura 20. Becarios UTN FRCon.*

## Referencias Bibliográficas

1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM): IRAM 10517- Geotecnia. "Ensayo normalizado de penetración (SPT)", abril de 2015; IRAM 10536- Mecánica de suelos. "Determinación en campaña de la densidad a granel\* mediante arena seleccionada (\*" peso unitario" o "densidad aparente")", septiembre de 1993; IRAM 10519- Mecánica de suelos. "Método de laboratorio para la determinación de humedad", junio de 1970; IRAM 10501- Geotecnia. "Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad", octubre de 2007; IRAM 10507- Mecánica de suelos. "Método de determinación de la granulometría mediante tamizado por vía húmeda", 1986; IRAM 10529- Mecánica de suelos. "Método de ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas ni drenadas", 1985.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), Designation: D 6951-03 "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications", West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2003, 7p.
3. Stroud, M. A., "The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks Proceedings", European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, 1974, pp. 367-375.
4. Stroud, M. A., "The Standard Penetration Test – Its Application and Interpretation. Proceedings", Geotechnology Conference on Penetration Testing in the UK, Thomas Telford, 1989.
5. Terzaghi, K., Peck, R. B., "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Incorporated, New York, USA, 1967, pp. 729.
6. Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S., and Banno, T., "Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soil", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soil and Foundations, Vol. 14, No. 3, 1974, pp. 1-12.
7. Kulhawy y Mayne, "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design", Electric Power Research Institute, Cornell University, Ithaca, New York, USA. August 1990. pp 3-8-3-10, 4-53-4-56.
8. Duncan, J. M. & Buchignani, A. L., "An Engineering Manual for Settlement Studies", Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, USA, 1976, pp. 22-71.
9. Bowles, J. "Foundation Analysis and Design", Fifth Edition, Mc. Graw-Hill Companies, USA, 1996, pp: 94-127; 154-166; 313-317.
10. Clayton, C. R. I., "The Standard Penetration Test (SPT): Methods and Use". Construction Industry Research and Information Association Report 143. CIRIA, London, 1995, 143 pp.
11. Das, B.M. and N. Sivakugan, N. "Principles of Foundation Engineering". 9th Edition, Cengage Learning, Boston, Massachusetts, USA, 2020, pp. 86-87, 337-338.
12. Décourt, L., "The Standard Penetration Test: State-of-the-Art-Report", vol. 179. Norwegian Geotechnical Institute Publication; Oslo, Norway, Part II, 1990, pp. 1-12.
13. Leoni, A. J., Capítulo 7, "Parametrización de suelos", Apuntes UNLP Facultad de Ingeniería, La Plata, págs. 18 a 22, 45 a 48.
14. Reinert, H. y Otros, "Correspondencia entre ensayo SPT y capacidad de carga de suelos tropicales de Misiones, Argentina", XXIV Seminario de Iniciación Científica, Unjuí, Panambi Brasil, 2016, 6 págs.
15. Sivrikaya, O. and Togrol, E., "Determination of undrained shear strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey", Engineering Geology, Turkey, 2006, pp. 52-69.

**RUS**



*Org.*  
*"El Galpón"*  
**RIO URUGUAY  
SEGUROS®**



## LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO MULTIDISCIPLINARIO PARA LA INVESTIGACION TECNOLÓGICA

### **TECNOLOGIA DEL HORMIGON**

- Estudio de materiales y componentes del hormigón armado
- Estudio de hormigones convencionales y especiales
- Durabilidad de agregados y de hormigones en distintos ambientes
- Métodos no destructivos
- Elaboración de especificaciones técnicas para obras civiles
- Evaluación de estructuras construidas afectadas por patologías
- Corrosión de armaduras



***Investigación y desarrollos tecnológicos***

***Capacitación RRHH***

***Servicios Tecnológicos a terceros***

**52 e/121 y 122 - La Plata - Buenos Aires - Argentina**  
**Tel.: (0221) 4831141/44**

**[www.lemmit.gov.ar](http://www.lemmit.gov.ar)**

# Empleo de agua proveniente del lavado de camiones mixers en la producción de hormigones sustentables: Evaluación de la trabajabilidad y resistencia

C.G. Caballero<sup>1</sup>, A.J. Palacio<sup>1</sup>, A. Alzogaray<sup>1</sup>, F.A. Avid<sup>1</sup>, J.D. Sota<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>) Grupo GIICMA, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia, Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Contacto: jdsota@gmail.com

## Resumen

En muchos países, las plantas elaboradoras de hormigón emplean camiones moto hormigoneros para su producción y en el proceso usan gran cantidad de agua potable. Este consumo se da en la producción de hormigón, pero además se debe considerar el agua utilizada para lavar los camiones mixers, ya que esto también genera una cantidad considerable de agua residual que no se puede eliminar sin un tratamiento previo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es estudiar el empleo de agua reciclada, producto del lavado de camiones mixers en la producción de hormigón, reduciendo el consumo de agua potable. Se desarrollan tres dosificaciones, una de referencia producida con agua potable, una dosificación con 25% de remplazo por agua residual y una tercera con un 35% de reemplazo. Para el análisis de los hormigones, se comprobaron sus propiedades en estado fresco y endurecido, evaluando la trabajabilidad mediante el ensayo de asentamiento y su resistencia a la compresión a los 7, 28 y 56 días. Los resultados mostraron que el hormigón producido con estos porcentajes de reemplazo presentó la misma resistencia a la compresión que el hormigón patrón, y en estado fresco se observa un incremento de la fluidez con el aumento del porcentaje de reemplazo.

**Palabras clave:** Agua reciclada; hormigón sustentable; producción de hormigón; reúso; materiales eco-eficientes.

## Abstract

In many countries, concrete plants use concrete mixer trucks for their production and this process consumes a large quantity of drinking water. In addition to the production of concrete, the water used to wash the mixer trucks should also be considered, since this also generates a considerable amount of residual water that cannot be disposed of without prior treatment. Therefore, the objective of this study is to reuse the waste water generated by the washing of mixer trucks in the production of concrete, thus avoiding the consumption of drinking water. Three compositions were developed, a reference composition produced with drinking water, a composition with 25% replacement by waste water and a composition with a 35% replacement. For the analysis of the concretes, its properties were checked in the fresh and hardened state, assessing the workability by means of the settlement test and their resistance to compression at 7, 28 and 56 days. The results show that the operation produced with these replacement percentages presented the same resistance to compression as the standard concrete, and in the fresh state an increase in fluidity is observed with the increase in the replacement percentage.

**Keywords:** Recycled Water; Sustainable concrete; Concrete production; Reuse; eco-efficient materials.

## Introducción

En la Argentina y en las regiones industriales ubicadas en general en las provincias tales como Entre Ríos, Santa Fe, Buenos Aires, Córdoba, es claro y evidente la necesidad de diseñar e implementar sistemas de tratamiento de las aguas residuales en la industria del hormigón elaborado. Esto es así debido a la falta de aplicación de los mismos o, en algunos casos, el tratamiento precario para las operaciones de lavado de planta y camiones mixers luego del transporte de material. Es por esto que las aplicaciones de sistemas de tratamientos de aguas residuales constituyen una alternativa válida para la reducción del impacto ambiental y la optimización de los recursos naturales utilizados en la producción de hormigón.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que las propiedades de las aguas residuales industriales y específicamente las de la industria del hormigón, dependen en su mayoría de la composición química, factor que resulta importante a la hora de tomar decisiones respecto a su potencial reutilización. También es importante tener en cuenta que las aguas residuales y los agregados que puedan recuperarse en los diferentes pasos del procesamiento de un sistema de tratamiento varían en sus características físico-químicas (Ricardo de Matos et.al., 2020). Por lo tanto, no solo se necesita una base de datos actualizada respecto a los resultados y valores admisibles de los análisis cuantitativos y cualitativos de las aguas residuales, sino también la elaboración de manuales y reglamentaciones que regulen las prácticas actuales de eliminación de los desechos en dicha industria (Balzamo et.al., 2012). Tal es así que se requieren más investigaciones para encontrar un sistema de tratamiento que genere una fuente estable y confiable de agua reutilizable, con una variabilidad de composición físico-química mínima para una utilización óptima. Por consiguiente, el tratamiento y la reutilización del agua de desecho conforma hoy en día objeto de varias investigaciones, convirtiéndose en una problemática ambiental a resolver y estudiar muy importante.

En la industria de la construcción a pesar del notable avance y desarrollo de nuevos materiales, tecnologías y metodologías de construcción, el hormigón continúa siendo el material más utilizado, especialmente en lo que respecta a la construcción de viviendas, con el fin de responder a la demanda de la población creciente. Pero el alto consumo de agua y la generación de aguas residuales sumado a la gestión de estos factores en la industria del hormigón elaborado, se han convertido en cuestiones ambientales muy importantes a resolver y tratar.

En Argentina, un índice indicativo de las cantidades de hormigón que se producen, como así también de la actividad del sector, es el consumo de cemento, registrándose en el año 2019 (último año completo disponible), un consumo total de 11.003.359 toneladas de cemento, o su equivalente valor per-cápita de 245 kilogramos de cemento por habitante (AFCP, 2019). Alrededor de 5.436.186 de metros cúbicos de hormigón se producen anualmente en plantas elaboradoras (Figura 1), de las cuales tan solo un 8% cumplen con certificación de gestión de calidad ISO 9001:2015 y un 21% elaboran bajo estándares de calidad y servicio aceptables, el 71% restante no cumplen y no califican con los estándares de calidad en la producción y el ambiente, lo que da una idea de la gestión actual de los residuos de la industria (Segeger, 2020).

Se estima que, al final de cada jornada, queda un residuo de aproximadamente 300 kg de hormigón plástico en cada camión mezclador (Sandrolini y Franzoni, 2001). Dicho sobrante si bien puede reutilizarse mediante el empleo de aditivos estabilizadores de hidratación, lo habitual es que sea lavado, debido a los costos que conllevan los aditivos mencionados, "a priori" más costosos en comparación con el uso de agua. Cabe mencionar además que, en las plantas elaboradoras locales, dichos lavados se realizan sin reservas ni regulación alguna en lo que respecta al consumo, vertido y/o devolución al ambiente del agua interviniente.

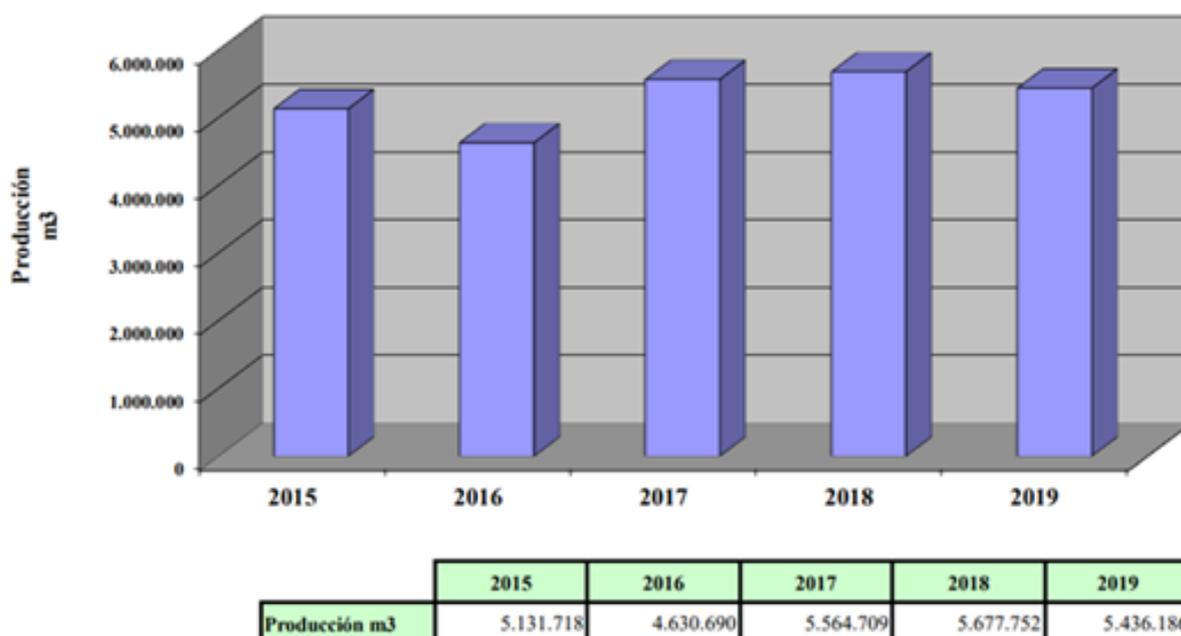


Figura 1. Producción anual de empresas elaboradoras de hormigón asociadas a la AAHE (AAHE, 2019).

Designación			Composición (g/100 g)				
Tipo de Cemento	Nomenclatura	Clase Resistente	Clinker + sulfato de calcio	Puzolana o ceniza volante silicea (P o CV)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)	Compuestos minoritarios
Cemento Portland Compuesto	CPC	50	94 - 65	Dos o más, con $6 \leq (P+E+F) \leq 35$ y $F \leq 35$			0 - 5

Tabla 1. Tipo de cemento y composición según Norma IRAM 50000.

## Materiales y procedimiento

Como parte de una primera etapa de investigación, con la colaboración de una empresa local de la ciudad de Concordia en la provincia de Entre Ríos, Argentina, se procedió a elaborar pastones de prueba. Para los mismos se contó con los materiales de acopio tales como agregados gruesos y finos, cemento y aditivos, como así también con la dosificación de un hormigón de línea de la empresa. De esta manera se buscó evaluar, en una primera instancia, todas aquellas variaciones que puedan encontrarse respecto al hormigón de referencia, para posteriormente definir el correcto marco teórico de aplicación del agua reciclada.

### Cemento

Para este trabajo se utilizó un cemento portland compuesto (CPC 50) según Norma IRAM 50000 – “Cementos de uso general”, el cual fue extraído de silos de acopio de planta elaboradora. Este tipo de cemento es el de uso comercial habitual en el país, especialmente en la Región Centro y Mesopotamia. Su composición es presentada en la Tabla 1.

### Agregado grueso

Se utilizó un agregado natural silíceo tipo canto rodado, el cual es extraído de canteras ubicadas en la región Mesopotámica de la Argentina, específicamente en la provincia de Entre Ríos y Corrientes, con un tamaño máximo nominal de agregado 6 a 20 mm, módulo de finura de 6,73 y una curva de distribución granulométrica indicada en la Figura 2, de acuerdo con los límites de la Norma IRAM 1627 para agregados gruesos.

### Agregado fino

Se utilizó una arena natural gruesa tipo silíceo de lavado, la cual es extraída de canteras ubicadas en las márgenes del Río Uruguay, en la provincia de Entre Ríos, módulo de finura de 2,61 y una distribución granulométrica indicada en la Figura 3, de acuerdo a los límites de la Norma IRAM 1627 para agregados finos.

### Aditivo químico

En este caso se utilizó un aditivo plastificante y superfluidificante de medio rango, de uso comercial en la Argentina, cuya composición química se indica en la Tabla 2.

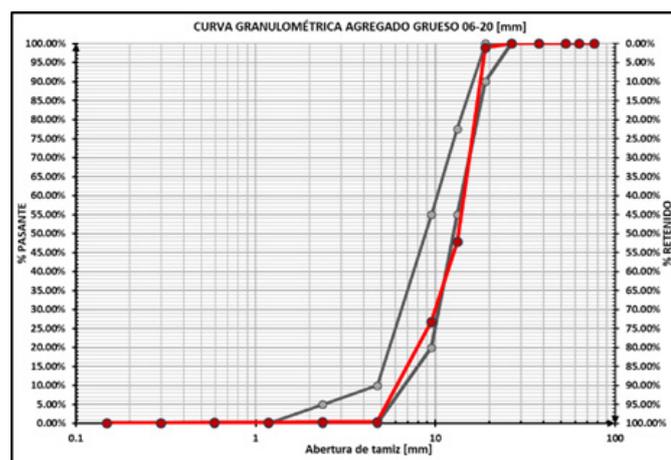


Figura 2. Granulometría “canto rodado” 06-20 [mm].

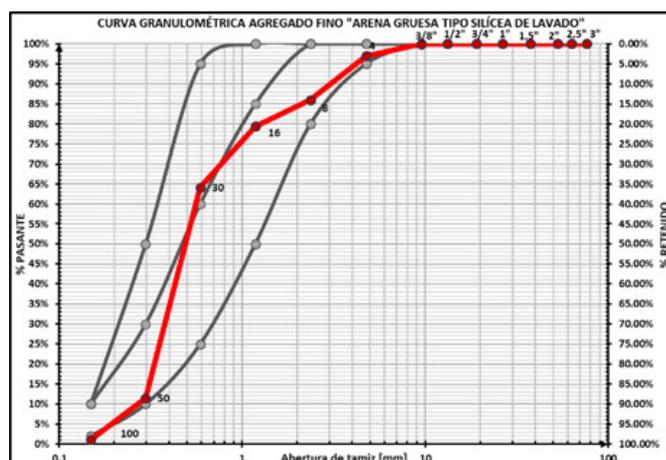


Figura 3. Granulometría “arena gruesa silicea”.

Nombre químico	Concentración (%)
Naphtalensulfonic acid-formaldehyde condensate sodium salt	$\geq 5$ - $< 10$
1,2-bencisotiazol-3(2H)-ona	$\geq 0,1$ - $< 1$

Tabla 2. Composición química aditivo plastificante y superfluidificante.



Figura 4. Sistema de piletas de sedimentación y decantación de sólidos de agua de lavado de camiones mixers.

### Agua reciclada

El agua reciclada se obtuvo de la misma empresa, la cual cuenta con un sistema de piletas de sedimentación y decantación, mediante el cual se realiza el lavado diario de los camiones mixers. De estas piletas se extrajeron diferentes muestras de agua, las que luego fueron utilizadas para la elaboración de los pastones de prueba. El sistema de tratamiento consta de un total de 5 piletas continuas en las que el intercambio se realiza mediante el trasvase por gravedad. Puntualmente se extrajeron muestras de las piletas N°1 y N°4 del sistema, correspondiendo la primera a la piletta donde se vuelcan directamente los residuos del camión y de lavado, y la segunda mencionada corresponde a la piletta final del sistema, previo al almacenamiento y filtrado. En la Figura 4 se puede observar la disposición de las piletas y el sentido del escurrimiento del agua de lavado.

Se recolectaron 60 litros de agua proveniente del lavado de los camiones, la cual fue almacenada en bidones y botellas para el desarrollo de las pruebas de laboratorio.

El agua recogida presenta cierto grado de turbidez por las partículas sólidas en suspensión.

De las muestras extraídas de las piletas 1 y 4 se realizó la evaluación de temperatura, nivel de pH, conductividad y contenido de sales disueltas, utilizando un medidor multiparamétrico. En las Figuras 5 y 6 obtenidas a partir del análisis de los datos de las muestras de agua, se observa una significativa alcalinidad del agua de la Piletta N°1 (la cual recibe de manera directa la descarga del agua reciclada, mezclada con los sobrantes de hormigón). Esta presenta, a su vez, un valor promedio de pH de 11,58 y el contenido total de sales disueltas o TDS posee un valor promedio de 3010,83 ppm. En cambio, los valores promedios de la Piletta N°4 (la cual se encuentra al final del sistema de piletas, ver Figura 4) son respectivamente 10,78 para el pH y 744,33 ppm para el TDS. Claramente se demuestra la mayor concentración de sales disueltas y la alta alcalinidad que posee el agua de reciclado de los camiones mixers sin tratamiento previo. Incluso si solo se la somete a una decantación o sedimentación, se reducen considerablemente dichos valores.

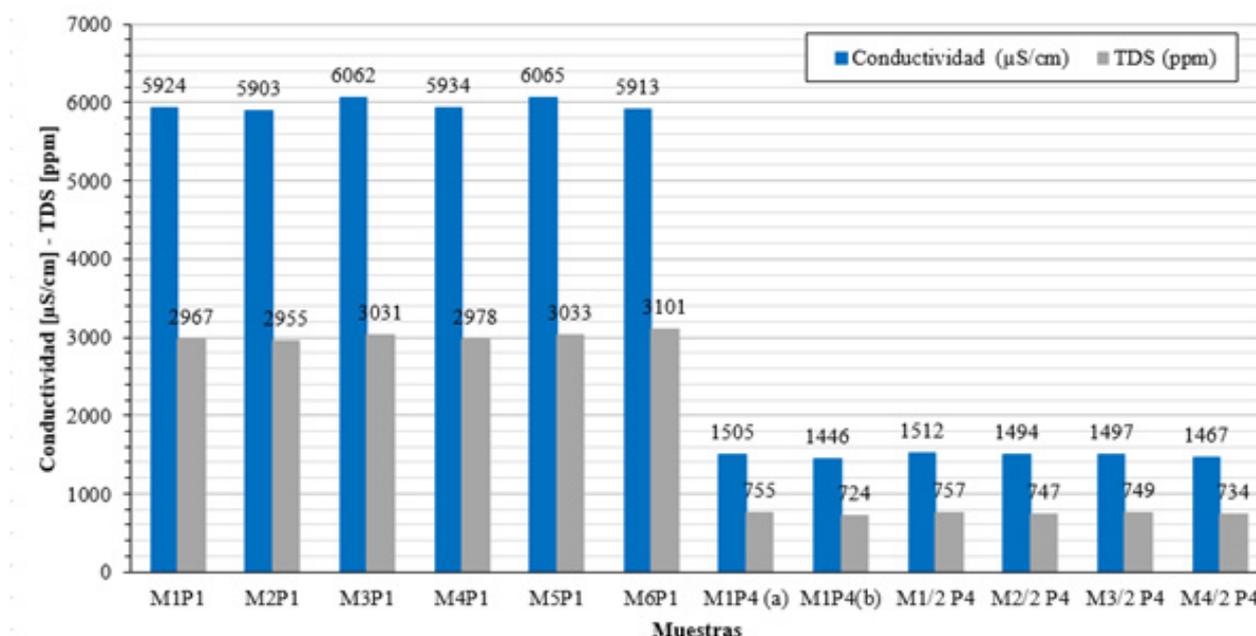


Figura 5. Conductividad y Total de Sales Disueltas. Pileta 1 vs Pileta 4.

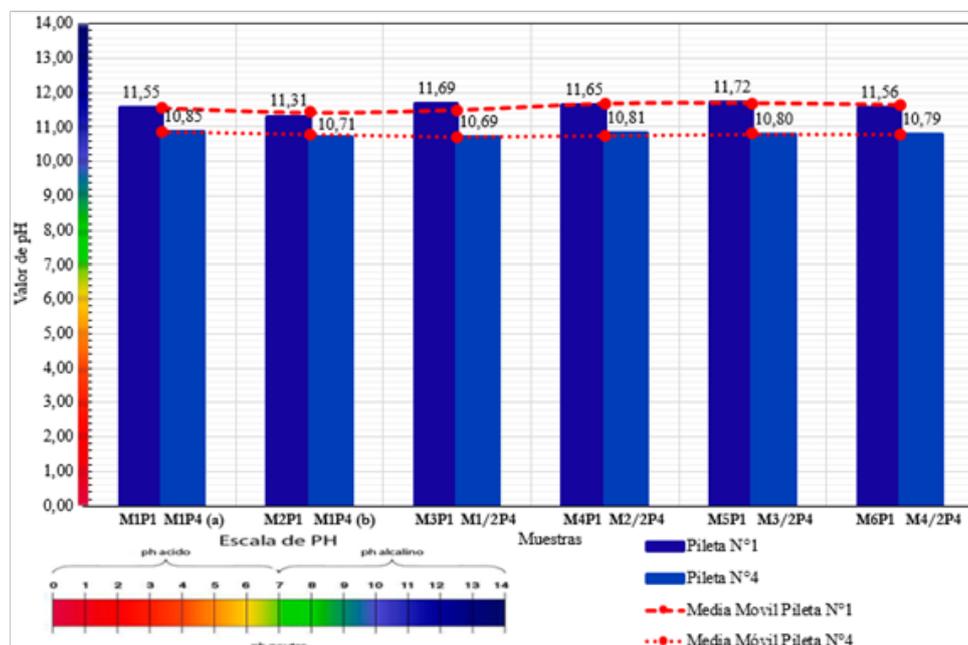


Figura 6. Valores de pH agua reciclada Pileta 1 vs Pileta 4.

A partir de dichos resultados, se decidió elaborar los pastones de prueba utilizando el agua reciclada de la Pileta N°4, considerando las significativas variaciones en los valores representativos de pH y sales disueltas respecto a los valores límites de 4 para pH y de 50000 mg/l para TDS, según Norma IRAM 1601 (IRAM 1601, 2012).

### Dosificación

El diseño de la mezcla fue seleccionado en base a una dosificación tradicional de la empresa elaboradora. En este caso se optó por un hormigón clase H30 (INTI-CIR-SOC, 2005) el cual es de producción habitual. En la Tabla 3 se puede observar esta dosificación, la cual correspon-

Material	Densidad Kg/dm <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>		Pastón de prueba:		65 dm <sup>3</sup>	
		Peso Kg	Volumen dm <sup>3</sup>	Absorción %	Humedad %	Peso SSS Kg	Peso Hum. Kg
Cemento CPC50	3,12	365,00	116,99			23,72	23,72
Agua Potable	1,00	170,00	170,00			11,05	10,50
Agua Reciclada	1,00	0,00	0,00			0,000	0,000
Arena Fina	2,60	699,80	269,15	0,36	2,07	45,49	46,26
Canto Rodado 06-20 mm	2,63	1123,06	426,69	0,71	0,40	73,00	72,77
Aditivo Plast. y Superfluidificante	1,18	2,56	2,17			0,17	0,17
Aire	0,0012	0,02	15,00			0,001	0,001

Tabla 3. Dosificación pastón de prueba N°01 – 0 % Agua Reciclada.

Material	Densidad Kg/dm <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>		Pastón de prueba:		65 dm <sup>3</sup>	
		Peso Kg	Volumen dm <sup>3</sup>	Absorción %	Humedad %	Peso SSS Kg	Peso Hum. Kg
Cemento CPC50	3,12	365,00	116,99			23,72	23,72
Agua Potable	1,00	127,50	127,50			8,30	7,87
Agua Reciclada	1,00	42,50	42,50			2,76	2,76
Arena Fina	2,60	699,80	269,15	0,36	2,07	45,49	46,26
Canto Rodado 06-20 mm	2,63	1123,06	426,69	0,71	0,40	73,00	72,77
Aditivo Plast. y Superfluidificante	1,18	2,56	2,17			0,20	0,17
Aire	0,0012	0,02	15,00			0,001	0,001

Tabla 4. Dosificación pastón de prueba N°02 – 25% Agua Reciclada.

Material	Densidad Kg/dm <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>		Pastón de prueba:		65 dm <sup>3</sup>	
		Peso Kg	Volumen dm <sup>3</sup>	Absorción %	Humedad %	Peso SSS Kg	Peso Hum. Kg
Cemento CPC50	3,12	365,00	116,99			23,70	23,72
Agua Potable	1,00	110,50	110,50			7,20	6,82
Agua Reciclada	1,00	59,50	59,50			3,87	3,87
Arena Fina	2,60	699,80	269,15	0,36	2,07	45,49	46,26
Canto Rodado 06-20 mm	2,63	1123,06	426,69	0,71	0,40	73,00	72,77
Aditivo Plast. y Superfluidificante	1,18	2,56	2,17			0,20	0,17
Aire	0,0012	0,02	15,00			0,001	0,001

**Tabla 5.** Dosificación pastón de prueba N°03 – 35% Agua Reciclada.

de al pastón de referencia o base. Esta dosificación se replicó, pero con el correspondiente reemplazo parcial del 25 % y 35 % del agua potable por agua proveniente del lavado de los camiones mixers (Tabla 4 y Tabla 5).

### Elaboración del hormigón

Como se mencionó, el diseño de las mezclas se estableció de acuerdo con las proporciones empleadas por la empresa elaboradora con excepción del reemplazo parcial del agua potable por el agua de lavado en estudio. Por lo tanto, se elaboraron tres dosificaciones con igual cantidad de materiales, pero variando el porcentaje de agua reciclada a incorporar en el orden de 0 %, 25 % y 35 % respecto al contenido de agua total de la dosificación patrón. En total se elaboraron y evaluaron nueve pastones de 65 dm<sup>3</sup> de volumen cada uno (Tablas 3, 4 y 5). Se replicó tres veces la elaboración para cada porcentaje de reemplazo con el fin de evaluar desvíos o patrones en el comportamiento de la dosificación, para luego enfocar el estudio en los mismos.

Inicialmente, el primer pastón contenía sólo agua potable, recolectada directamente del laboratorio, siendo nombrado como el pastón de referencia. En esta etapa, se agregaron los materiales a la hormigonera y se mantuvieron en el proceso de mezclado durante aproximadamente 5 minutos hasta que la mezcla fuese homogénea. Se procedió al volcado sobre una superficie metálica

e inmediatamente se realiza la medición de la temperatura inicial del pastón. Poco después, se llevó a cabo una prueba de asentamiento mediante el tronco cono de Abrams (según Norma IRAM 1536), la determinación de la densidad aparente o peso unitario volumétrico (PUV) y la medición del contenido de aire mediante el aparato de Washington (según Norma IRAM 1602). También se realizó la toma de muestra para la determinación del tiempo de comienzo de fragüe del mortero de hormigón mediante penetrómetro ligero tipo resorte (basado en ASTM C403). De manera simultánea se realizó el moldeo de probetas para los ensayos de resistencia a compresión (según Norma IRAM 1524). Posteriormente, el procedimiento la elaboración de los pastones siguió las mismas condiciones y proporciones que el pastón de referencia, pero con el reemplazo parcial del agua de mezclado por el agua en estudio.

Para la determinación del tiempo de fragüe del mortero de cada pastón se obtuvieron muestras de mortero de cemento, el cual fue tamizado utilizando tamiz de abertura 4,75 mm, para luego moldear sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 100 mm de alto, las que se dejaron en cámara de curado para mantener constantes las condiciones de temperatura y humedad de las muestras. Para las mediciones de resistencia a la penetración se empleó un penetrómetro de hormigón ligero tipo resorte, basado en ASTM C403, mediante el

Agua Reciclada (RW)	Prueba N°	Asentamiento [cm]		Temperatura H° [°C]		Contenido de Aire [%]		PUV [Kg/m <sup>3</sup> ]	
		Valor	Prom.	Valor	Prom.	Valor	Prom.	Valor	Prom.
RW 0%	1	12,51	15,34	29,00	25,50	2,80	2,37	2354,0	2372,00
	2	18,00		25,20		1,80		2388,0	
	3	15,50		22,30		2,50		2374,0	
RW 25%	1	17,00	18,33	28,70	25,43	2,20	2,33	2365,0	2264,00
	2	20,00		24,60		2,30		2219,0	
	3	18,00		23,00		2,50		2208,0	
RW 35%	1	18,50	21,37	29,10	25,97	2,30	2,17	2388,0	2374,33
	2	24,50		24,50		1,90		2376,0	
	3	21,10		24,30		2,30		2359,0	

**Tabla 6.** Valores de parámetros característicos del hormigón en estado fresco.

cual se considera que el fraguado inicial se da con un valor de penetración de aproximadamente 35 kg/cm<sup>2</sup>.

Las probetas cilíndricas de ensayo se moldearon por triplicado y luego se almacenaron en cámara de curado para la determinación de la resistencia a la compresión a las edades de 7, 28 y 65 días. En total, se moldearon 27 probetas, 9 para cada dosificación divididas en las tres edades diferentes. Las muestras se sometieron a al ensayo de compresión estandarizada (según Norma IRAM 1546).

## Resultados

### Hormigón fresco

Como se mencionó, los parámetros característicos del hormigón en estado fresco evaluados fueron la consistencia mediante el ensayo del tronco cono de Abrams, temperatura inicial del pastón, PUV y contenido de aire mediante aparato de Washington, Estos resultados se presentan en la Tabla 6.

La consistencia normal o promedio del pastón realizado mediante la dosificación patrón, es decir sin incorporación de agua reciclada, es del orden de los 15cm, de acuerdo a los registros informados por la empresa con un desvío del orden de  $\pm 3,00$  cm, observamos en la Tabla 6 que para todos los casos se obtuvo dicha variación en el asentamiento medido mediante cono de Abrams, con un valor promedio de 15,34cm.

Luego para la incorporación de un 25 % de agua reciclada respecto al agua total de la dosificación, se observa que los valores de asentamientos obtenidos varían ligeramente respecto a los obtenidos con la dosificación patrón, en el orden de +3 puntos de asentamiento, con un valor promedio de 18,33cm.

Para el caso de la incorporación de un 35 % de agua reciclada respecto al agua total de la dosificación, se ob-

serva un significativo aumento de la consistencia de los pastones, con un valor promedio de 21,37 cm respecto a los 15,34 cm de la dosificación patrón, es decir el doble de variación (+ 6 puntos de asentamiento medido) en comparación con la incorporación de un 25 % de agua reciclada. Se observaron pastones de aspecto fluido, homogéneos y uniformes, con una leve exudación y presencia de burbujas de aire. Sin embargo, de acuerdo a los valores obtenidos de aire incorporado no se observaron significativas variaciones, al igual que con la temperatura inicial de elaboración, con un valor promedio del orden de los 25,63 °C. El peso unitario volumétrico de los pastones fue del orden de los 2336,78 kg/m<sup>3</sup>.

Para la determinación del tiempo de comienzo de fragüe se empleó un penetrómetro de hormigón ligero tipo resorte, basado en ASTM C403. Como se observa en la Figura 7, para la dosificación patrón, el comienzo de fragüe se da de manera acelerada pasados los 240 minutos desde el primer contacto de las partículas de cemento con el agua, alcanzando resistencias superficiales significativas al cabo de los 270 minutos desde el mezclado, comportamiento habitual para este tipo de dosificación. Si se comparan los tiempos de fragüe de los hormigones con incorporación de agua reciclada se observa un patrón de comportamiento para este ensayo, en el cual el endurecimiento de la superficie se produce de manera paulatina y más lenta, alcanzando el comienzo de fragüe al cabo de 330 minutos en adelante.

A partir de estos resultados podemos concluir que, a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo de agua reciclada, los hormigones presentaron una variación de la consistencia de plástica a fluida evidenciado por el aumento del asentamiento, y un aumento del tiempo de comienzo de fragüe, en referencia a la dosificación base y para los mismos tiempos de prueba.

Cabe aclarar que, en base a la bibliografía consultada,

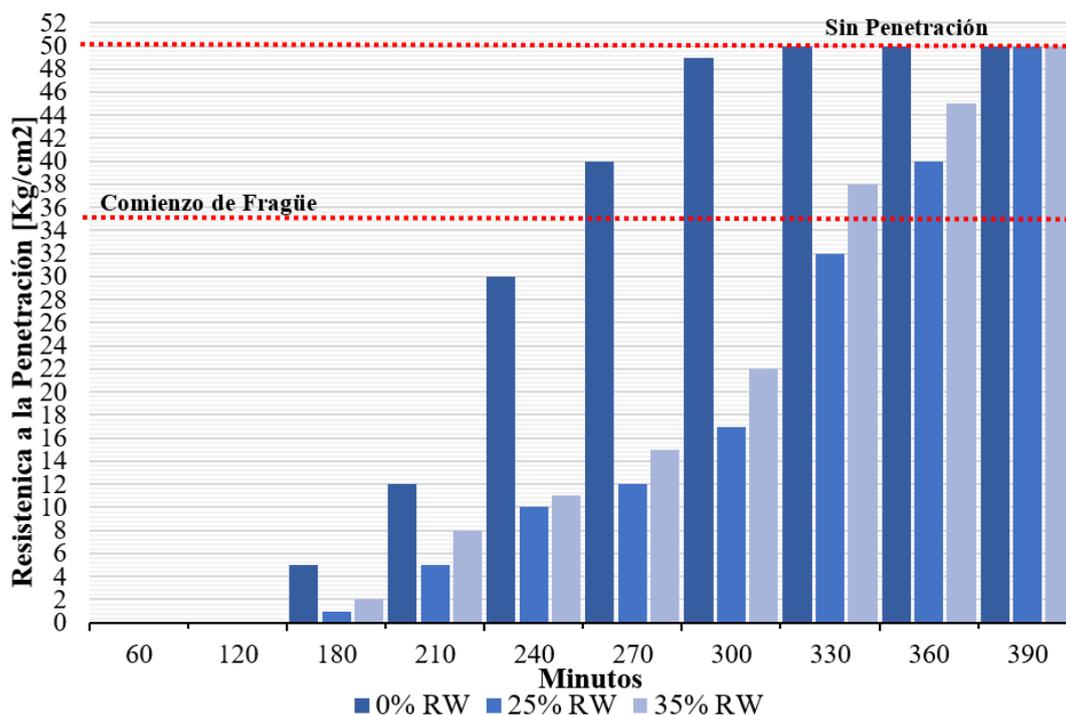


Figura 7. Tiempo de fragüe del hormigón según porcentaje de variación de agua reciclada.

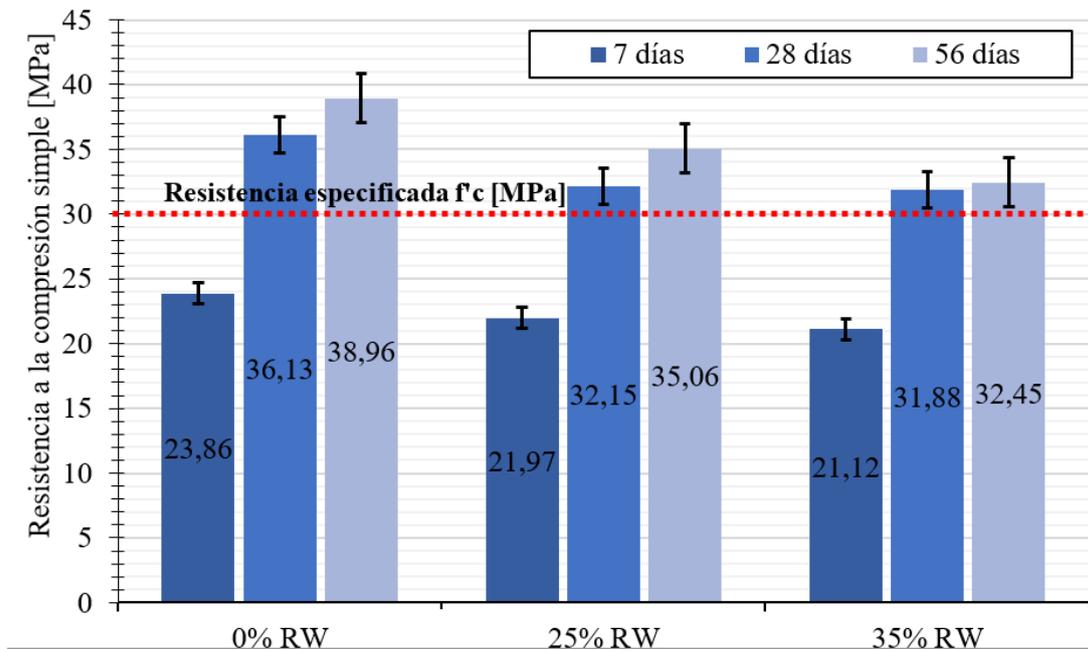


Figura 8. Variación de la resistencia a la compresión simple según porcentaje de agua reciclada por edades.

el efecto del incremento de agua reciclada debe ser una reducción de la fluidez debido a la presencia de las partículas sólidas y alta alcalinidad. Esta última genera una influencia en las propiedades eléctricas en la superficie de las partículas de cemento. Debido a esto, los resultados obtenidos se podrían justificar con el empleo del aditivo superplastificante, cuya molécula permite el recubrimiento total de las partículas de cemento incorporándoles cargas de signo negativo que neutralizan las fuerzas de atracción electrostáticas existentes entre dichas partículas y dificultan el citado fenómeno de floculación.

### Hormigón en estado endurecido

En la Figura 8 se presentan los valores de la resistencia a la compresión simple de los hormigones con 0 %, 25 % y 35 % de agua reciclada, para las edades de 7, 28 y 56 días. Para el hormigón patrón se obtuvieron valores del orden a los informados por la planta elaboradora, y se observa que para la edad temprana de 7 días las resistencias de los pastones elaborados con agua reciclada también presentan un comportamiento similar. Sin embargo, para edades mayores tales como 28 y 56 días, conforme aumenta el porcentaje de agua reciclada, los valores de resistencia a la compresión simple presentaron una tendencia a la disminución del orden del 10 al 11 %.

Al analizar los datos, si bien todas las muestras cumplen con la resistencia especificada, se aprecia la tendencia a una disminución de la resistencia a medida que se incrementa el porcentaje de agua residual.

En principio se puede concluir que, para estas dosis, el agua residual de la empresa se puede utilizar en la elaboración de este tipo de mezclas comerciales, ya que no tiene un comportamiento que impacte negativamente de manera significativa.

### Consideraciones finales

El presente trabajo es la primera parte de un proyecto

de investigación y desarrollo de tres años de duración. Con él se buscó evaluar el comportamiento de una dosificación patrón o comercial, analizando la variación de sus parámetros característicos en estado fresco y endurecido, ante la incorporación de porcentajes relativos de agua reciclada producto del lavado de camiones mixers. Basado en los resultados obtenidos, se establecieron las siguientes consideraciones finales:

El incremento del contenido de agua reciclada aumentó progresivamente el asentamiento (es decir, aumentó la fluidez de la mezcla) pasando de una consistencia plástica a muy plástica y fluida. Esto se puede deber al elevado pH que modifica la reología de las mezclas.

El endurecimiento de la superficie se produce de manera más lenta en comparación con la dosificación base. Es decir, el comienzo de fragüe se registra a mayores tiempos a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo de agua reciclada. En principio habría una incidencia de la alta alcalinidad del agua en el retraso del comienzo del fraguado, pero se deben realizar más estudios al respecto.

Las resistencias de los pastones elaborados con agua reciclada presentan un comportamiento similar a la del pastón de referencia para la edad temprana de 7 días. Sin embargo, conforme aumenta el porcentaje de agua reciclada, los valores de resistencia a la compresión simple presentaron una tendencia a la disminución. No obstante, los hormigones que contienen agua reciclada presentaron resistencias a la compresión compatibles con la dosificación de referencia, alcanzando el 88% para 32% de reemplazo de agua reciclada y cumpliendo con los requerimientos de la resistencia de diseño.

En conjunto, fue posible producir hormigones con sustitución parcial de agua potable por reciclada, sin deterioros significativos en propiedades frescas y endurecidas. Sin embargo, cabe aclarar que estos son los primeros resultados de la investigación con los agregados y cemento de la zona, y se continuará evaluando el efecto

del reemplazo sin el empleo de aditivos químicos en las mezclas con el fin de identificar su influencia en los resultados. Por otro lado, también se buscará evaluar los parámetros de durabilidad de los hormigones.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Concordia, al Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente (GI-ICMA) por el apoyo a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado. Agradecemos la colaboración de los alumnos becarios Santiago Hernández Solís, Cristian Gómez, Mariano Urribarri y Alejandro Yoly así como al encargado de Laboratorio de Tecnología del Hormigón de la UTN-Concordia. Agradecemos también a la Dra. Natalia Tesón por su colaboración y asistencia en las pruebas de análisis de las muestras de agua. Finalmente agradecemos a la empresa Vecchio SRL por proporcionar las dosificaciones y los materiales necesarios para la elaboración de las mezclas de prueba utilizados en esta investigación.

## Referencias bibliográficas

1. Asociación de Fabricantes de Cemento Portland AFCP. (2019). "Anuario. Datos estadísticos año 2019". <http://afcp.info/Anuarios/Anuario-2019.pdf>
2. Asociación Argentina de Hormigón Elaborado AAHE. (2019). "Estadísticas de la Producción de Hormigón Elaborado 2015 al 2019". <https://hormigonelaborado.com/wp-content/uploads/2020/06/Produccion-C3%B3n-2019.pdf>
3. Balzamo, H., Cabrera, O., & et.al. (2012). "Ese material llamado hormigón". Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-21660-5-2.
4. INTI-CIRSOC. (2005). "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón". (INTI, Ed.) Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación. Argentina.
5. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (2012). Norma IRAM 1601: Agua para morteros y hormigones de cemento portland. Buenos Aires. Argentina.
6. Ms. Ing. Maximiliano Segerer. (2020). "Nueva Norma IRAM de Hormigón Elaborado". Seminario Online de la Industria del Hormigón Elaborado. Asociación Argentina del Hormigón Elaborado (AATH). Buenos Aires, Argentina, pp. 37-39.
7. Sandrolini, F., & Franzoni, E. (2001). "Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants". *Cement and Concrete Research*, 31(3), pp. 485-489. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00468-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00468-3)
8. Paulo Ricardo de Matos, Luiz Roberto Prudêncio Jr., Ronaldo Pilar, Philippe Jean Paul Gleize, Fernando Pelisser. (2020). "Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties". *Construction and Building Materials*, 230. doi: ISSN 0950-0618.



Ministerio de Educación

**\*UTN**

**UNIVERSIDAD  
TECNOLOGICA  
NACIONAL**

Facultad Regional Concordia

**Giicma**

Salta 277 - Concordia (ER-ARG) - C.P. E3200EKE  
Tel/Fax: (0345) 421-4590 / 422-6614  
giicma@frcon.utn.edu.ar  
[www.frcon.utn.edu.ar](http://www.frcon.utn.edu.ar)