

# Cemento Portland Compuesto con ceniza de cáscara de arroz: oportunidad para el ahorro energético y disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de elaboración de cementos de nuestro país

**Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale (Responsable)**

Arq. Iliana Rodríguez Viacava

Msc. Arq. Daniel Godoy Machado



**Fondo Sectorial de Energía (ANII)**  
**FSE\_1\_2011\_1\_6476**

## ÍNDICE:

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas Ternarias

Viabilidad Ambiental

### 4. CONCLUSIONES



# INTRODUCCIÓN

La **industria cementera** es una de las industrias que produce altas emisiones de gases dañinos a la capa de ozono.



- ✓ Es responsable del 7% de las emisiones mundiales de  $\text{CO}_2$
- ✓ Por cada tonelada de cemento producido se emite a la atmósfera 1 ton de  $\text{CO}_2$

# INTRODUCCIÓN

Los **Cementos Portland Compuestos (CPC)** brindan uno de los métodos para reducir estas emisiones, y han probado ser una importante herramienta para el desarrollo sostenible de la industria cementera

En Uruguay, existen proyectos en desarrollo que generan energía a partir de biomasa, **generando grandes cantidades de ceniza como residuo**.

Ejemplo de ello es la **ceniza de cáscara de arroz residual uruguayo (CCARU)**, que tiene una producción de 100.000ton/año.





## INTRODUCCIÓN

## Tipos de cementos (UNIT 20 :2003)

Tipos de cemento		Composición (g/100g)				
		Componentes principales				Componentes minoritarios
		Clinker	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento portland normal	CPN	100-95				0-5
Cemento portland con filler clacáreo	CPF	94-80			6-20	0-5
Cemento portland puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento portland con escoria	CPE	94-65		6-35		0-5
Cemento portland compuesto	CPC	94-65	dos o tres componentes con P + F + E entre 10 y 35%			0-5



En el Proyecto:

**CPC = clinker + FILLER + PUZOLANA**


Sustituciones entre 10 y 35 %

# INTRODUCCIÓN

CPC = clinker + Filler calcáreo + Puzolana (CCA)

Sustituciones entre 10 y 35 %

**Tema 1:** Transformaciones a realizar a la ceniza de cáscara de arroz residual uruguaya (CCARU) para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99).

CCARU obtenidas industrialmente:

- ✓ CCARU1: uso de la cáscara de arroz como combustible para generar vapor en el proceso de parboilizado del arroz
- ✓ CCARU2: uso de la cáscara de arroz como biomasa para generación de energía eléctrica



# INTRODUCCIÓN

CPC = clinker + Filler calcáreo + Puzolana (CCA)

Sustituciones entre 10 y 35 %

**Tema 1:** Transformaciones a realizar a la ceniza de cáscara de arroz residual uruguaya (CCARU) para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99).

CCARU obtenidas industrialmente:

- ✓ CCARU1: uso de la cáscara de arroz como combustible para generar vapor en el proceso de parboilizado del arroz
- ✓ CCARU2: uso de la cáscara de arroz como biomasa para generación de energía eléctrica

**Tema 2:** Mezclas Ternarias

- ✓ Cumplimiento de requisitos normativos para CPC: UNIT 20:2003
- ✓ RAS para identificar posibles efectos adversos de la CCA con los álcalis del cemento
- ✓ Viabilidad Ambiental en la producción de CPC: Método IPCC

## ÍNDICE:

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas Ternarias

Viabilidad Ambiental

### 4. CONCLUSIONES





# MATERIALES Y MÉTODOS

## MATERIALES

- ✓ **Cemento Portland Normal (CPN)**
- ✓ **Ceniza de Cáscara de Arroz residual uruguaya** obtenidas industrialmente (CCARU1 y CCARU2)
- ✓ **Filler calcáreo:** cumple requisitos UNIT 1014:96
- ✓ Agua destilada
- ✓ Arena normalizada (para fabricación de morteros)



Cáscara de Arroz



CCARU1

CCARU2

# MATERIALES Y MÉTODOS

## MÉTODOS

### 1. MEJORAMIENTO DE CENIZAS:

- a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99).
- b) Determinación del Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:98)

# MATERIALES Y MÉTODOS

## MÉTODOS

### 1. MEJORAMIENTO DE CENIZAS:

- a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99).
- b) Determinación del Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:98)

### 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES USADOS:

CPN, CCARU1 y CCARU2 mejoradas, filler calcáreo



# MATERIALES Y MÉTODOS

## MÉTODOS

### 1. MEJORAMIENTO DE CENIZAS:

- a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99).
- b) Determinación del Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:98)

### 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES USADOS:

CPN, CCARU1 y CCARU2 mejoradas, filler calcáreo

### 3. UTILIZACIÓN DE MEZCLAS TERNARIAS

clinker + filler calcáreo + CCARU mejorada

Sustituciones entre 10% y 35%  
(UNIT 20:2003)

#### a) Cumplimiento de requisitos normativos:

- ✓ Propiedades químicas
- ✓ Propiedades mecánicas
- ✓ Propiedades físicas

UNIT 20:2003

#### b) RAS (álcalis del cemento Vs. sílice de las CCARU)

IRAM 1674:1997

#### c) Viabilidad Ambiental

Método IPCC

## MEJORAMIENTO DE CENIZAS

### a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99):

- ✓ secado (humedad  $\leq 3\%$ )
- ✓ tamizado (tamiz: 1,18mm)
- ✓ molienda (TMP  $< 10\mu\text{m}$  para uso de CCA en cementos u hormigones \*)

*\* Mehta 1994; Malhotra and  
Mehta 1996; Rego 2004;  
Fernández Pouey 2006*



# MEJORAMIENTO DE CENIZAS

## a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99):

- ✓ secado (humedad  $\leq 3\%$ )
- ✓ tamizado (tamiz: 1,18mm)
- ✓ molienda (TMP  $< 10\mu\text{m}$  para uso de CCA en cementos u hormigones \*)

\* Mehta 1994; Malhotra and Mehta 1996; Rego 2004; Fernández Pouey 2006

## b) Evaluación del mejoramiento de las CCARU: Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:1998)

	Antes de las transformaciones				Después de transformaciones			
	Fc (MPa)	Desvío (MPa)	CV (%)	IAP	Fc (MPa)	Desvío (MPa)	CV (%)	IAP
REF (sin CCA)	47,31	1,71	3,62	-				-
CCARU1	4,84	0,15	3,07	0,10	42,38	1,83	4,32	0,90
CCARU2	3,42	0,072	2,11	0,072	39,80	0,90	2,25	0,84

**Material Puzolánico:**

$$\text{IAP} \geq 0,75$$



# MEJORAMIENTO DE CENIZAS

## a) Transformaciones a realizar a CCARUs para su empleo como material puzolánico (UNIT 1047:99):

- ✓ secado (humedad  $\leq 3\%$ )
- ✓ tamizado (tamiz: 1,18mm)
- ✓ molienda (TMP  $< 10\mu\text{m}$  para uso de CCA en cementos u hormigones \*)

\* Mehta 1994; Malhotra and Mehta 1996; Rego 2004; Fernández Pouey 2006

## b) Evaluación del mejoramiento de las CCARU: Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:1998)

		Antes de las transformaciones				Después de transformaciones			
		Fc (MPa)	Desvío (MPa)	CV (%)	IAP	Fc (MPa)	Desvío (MPa)	CV (%)	IAP
Material Puzolánico: IAP $\geq 0,75$	REF (sin CCA)	47,31	1,71	3,62	-				-
	CCARU1	4,84	0,15	3,07	0,10	42,38	1,83	4,32	0,90
	CCARU2	3,42	0,072	2,11	0,072	39,80	0,90	2,25	0,84
		IAP $< 0,75$				IAP $> 0,75$			
Demuestra la eficiencia de las Transformaciones realizadas						Ambas CCARU adquirieron características de <b>material puzolánico</b>			



# CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

**CCARUs:** Composición química muy similar

Compuestas principalmente por  $\text{SiO}_2$

Características físicas	CPN	CCA mejorada		Filler Calcáreo
		CCARU1	CCARU2	
Densidad absoluta ( $\text{g/cm}^3$ )	3,14	2,08	2,16	2,74
Tamaño medio de partículas (mm)	20,76	7,53	4,12	6,35
Demanda de agua	0,332	0,763	0,052	0,35
Sensibilidad de la pasta	0,031	0,880	0,060	0,06
Análisis químico (%)	CPN	CCA mejorada		Filler Calcáreo
		CCARU1	CCARU2	
Óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ )	20	83	83	-
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4,34	2	< 2	< 2
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,62	0,096	0,24	1,2
Óxido de calcio Total ( $\text{CaO}$ )	61,5	0,30	0,29	40
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )	2,81	0,10	0,13	2,1
Óxido de manganeso ( $\text{MnO}$ )	-	0,12	0,25	-
Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,29	-	-	-
Óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,08	0,7	2	< 2
Óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ )	1,79	< 0,02	0,0208	0,0396
Óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	-	0,62	0,78	< 0,2
Óxido de calcio libre ( $\text{CaO}$ )	1,10	-	-	-
Sulfuros ( $\text{S}^2$ )	0,01	0,66	0,43	-
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	0,01	0,03	0,12	0,20
Pérdida por calcinación	0,01	13,15	12,01	35
Residuo insoluble	2,97	36	49,9	16,8
Alcalinos totales ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{ K}_2\text{O}$ )	0,98	0,461	1,32	< 1,32

Fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF) y análisis tradicional (AT).

Características físicas	CPN	CCA mejorada		Filler Calcáreo
		CCARU1	CCARU2	
Densidad absoluta ( $\text{g/cm}^3$ )	3,14	2,08	2,16	2,74
Tamaño medio de partículas (mm)	20,76	7,53	4,12	6,35
Demanda de agua	0,332	0,763	0,052	0,35
Sensibilidad de la pasta	0,031	0,880	0,060	0,06

Análisis químico (%)	CPN	CCA mejorada		Filler Calcáreo
		CCARU1	CCARU2	
Óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ )	20	83	83	-
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4,34	2	< 2	< 2
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,62	0,096	0,24	1,2
Óxido de calcio Total ( $\text{CaO}$ )	61,5	0,30	0,29	40
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )	2,81	0,10	0,13	2,1
Óxido de manganeso ( $\text{MnO}$ )	-	0,12	0,25	-
Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,29	-	-	-
Óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,08	0,7	2	< 2
Óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ )	1,79	< 0,02	0,0208	0,0396
Óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	-	0,62	0,78	< 0,2
Óxido de calcio libre ( $\text{CaO}$ )	1,10	-	-	-
Sulfuros ( $\text{S}^2$ )	0,01	0,66	0,43	-
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	0,01	0,03	0,12	0,20
Pérdida por calcinación	0,01	13,15	12,01	35
Residuo insoluble	2,97	36	49,9	10,8
Alcalinos totales ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{ K}_2\text{O}$ )	0,98	0,461	1,32	< 1,32

## CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

**CCARUs:** Composición química muy similar

Compuestas principalmente por  $\text{SiO}_2$

**Para uso en CP se verifica:**

- ✓ óxido de sílice, de aluminio y férrico  $\geq 34\%$
- ✓ anhídrido sulfúrico  $< 5\%$
- ✓ Cloruros en CP  $< 0,10\%$ :  
CCARU2: debe controlarse el % a usar s/comp. CP
- ✓ alcalinos totales  $< 1,5\%$

Fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF) y análisis tradicional (AT).

## MEZCLAS TERNARIAS

clinker + filler calcáreo + CCARU mejorada

Sustituciones entre 10% y 35%  
(UNIT 20:2003)

Sustit. (%)	CPN	CCARU mejorada	Filler calcáreo
10	90	5	5
15	85	10	5
		5	10
20	80	15	5
		5	15
		10	10
25	75	20	5
		15	10
		10	15
		5	20
30	70	25	5
		20	10
		15	15
		10	20
		5	25
35	65	30	5
		25	10
		20	15
		15	20
		10	25
		5	30





## MEZCLAS TERNARIAS

## a) Cumplimiento de requisitos normativos:

**UNIT**  
**20:2003**

## Requisitos químicos

Químicos	Método de ensayo	Requisito
Trióxido de azufre	UNIT-NM 16:12	Máximo 3,5
Cloruros	UNIT 1013:97	Máximo 0,10 g/100 g
Sulfuros	UNIT-NM 19 :12	Máximo 0,50 g/100 g

## Requisitos mecánicos

Clase	Resistencia a la compresión (MPa)				Método de ensayo
	2 días	7 días	28 días		
CP 30	---	≥ 16	≥ 30	≤ 50	UNIT-ISO 679:09
CP 40	≥ 10	---	≥ 40	≤ 60	
CP 50	≥ 20	---	≥ 50	---	

## Requisitos físicos

Físicos	Método de ensayo	Requisito
Finura: Superficie Específica BLAINE	UNIT-NM 76:98	Mínimo 250 m <sup>2</sup> /kg
Constancia de vol.: Expans. en autoclave	UNIT 514:09	Máximo 0,90%
Tiempo de fraguado: Inicial Final	UNIT-NM 65:04	Mínimo 45 min Máximo 10 hrs.

## MEZCLAS TERNARIAS

### b) Reacción álcali-sílice (RAS)

Álcalis del cemento Vs. sílice de la CCA

#### Requisitos :

- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $< 0,10\%$  → **comportamiento inocuo**
- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $0,10-0,20\%$  → **potencialmente reactivo**

**IRAM**  
**1674:1997**

## MEZCLAS TERNARIAS

b) **Reacción álcali-sílice (RAS)**

Álcalis del cemento Vs. sílice de la CCA

**Requisitos :**

- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $< 0,10\%$  → **comportamiento inocuo**
- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $0,10-0,20\%$  → **potencialmente reactivo**

**IRAM**  
**1674:1997**

c) **Viabilidad Ambiental de la producción de CPC**

Considerando las emisiones resultantes del proceso de:

- Calcinación del filler calcáreo ( $E_{cal}$ )
- Quema de combustibles fósiles ( $E_{com}$ )
- Adición de puzolanas en cemento ( $E_{poz}$ )

$$E_{total} = E_{cal} + E_{com} + E_{poz}$$



(Emisiones evaluadas por cada tonelada de cemento producido)

## ÍNDICE:

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas Ternarias  
Viabilidad Ambiental

### 4. CONCLUSIONES



## MEZCLAS TERNARIAS

clinker + filler calcáreo + CCARU mejorada



Sustituciones entre 10% y 35%  
(UNIT 20:2003)

**a) Cumplimiento de requisitos normativos:**

- ✓ Propiedades químicas
- ✓ Propiedades mecánicas
- ✓ Propiedades físicas

**UNIT 20:2003**

**b) RAS (álcalis del cemento Vs. sílice de las CCARU)**

**IRAM 1674:1997**

**c) Viabilidad Ambiental**

**Método IPCC**





Sustit. (%)	CPN	CCA	Filler	Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )		Sulfuros (S <sup>2</sup> )		Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	
				CCARU1	CCARU2	CCARU1	CCARU2	CCARU1	CCARU2
10	90	5	5	1,61	1,61	0,04	0,03	0,02	0,03
15	85	10	5	1,53	1,53	0,07	0,05	0,02	0,03
		5	10	1,53	1,53	0,04	0,03	0,03	0,03
20	80	15	5	1,44	1,44	0,11	0,07	0,02	0,04
		5	15	1,44	1,44	0,04	0,03	0,04	0,04
		10	10	1,44	1,44	0,07	0,05	0,03	0,04
25	75	20	5	1,35	1,35	0,14	0,09	0,02	0,04
		15	10	1,35	1,35	0,11	0,07	0,03	0,05
		10	15	1,35	1,35	0,07	0,05	0,04	0,05
		5	20	1,35	1,35	0,04	0,03	0,05	0,05
30	70	25	5	1,26	1,26	0,17	0,11	0,02	0,05
		20	10	1,26	1,26	0,14	0,09	0,03	0,05
		15	15	1,26	1,26	0,11	0,07	0,04	0,06
		10	20	1,26	1,26	0,07	0,05	0,05	0,06
		5	25	1,26	1,26	0,04	0,03	0,06	0,06
35	65	30	5	1,17	1,17	0,20	0,14	0,03	0,05
		25	10	1,17	1,17	0,17	0,11	0,03	0,06
		20	15	1,17	1,17	0,14	0,09	0,04	0,06
		15	20	1,17	1,17	0,11	0,07	0,05	0,06
		10	25	1,18	1,18	0,07	0,05	0,06	0,07
		5	30	1,18	1,18	0,04	0,03	0,07	0,07

Requisito UNIT 20:2003

Máximo  
3,5%Máximo  
0,50 g/100 gMáximo  
0,10 g/100 g

# MEZCLAS TERNARIAS

Propiedades  
Químicas



# MEZCLAS TERNARIAS

Propiedades  
Mecánicas

CCARU 1

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	
10	90	5	5	4,03	16,81	6,11	28,56	7,59	45,64	CPC 40
15	85	10	5	3,31	14,02	5,80	27,50	7,38	41,03	CPC 40
		5	10	3,64	14,56	5,60	27,11	7,44	38,13	CPC 30
20	80	15	5	3,38	12,65	5,45	28,96	8,46	38,45	CPC 30
		5	15	3,36	13,27	5,31	25,44	6,74	38,95	CPC 30
		10	10	3,51	14,67	5,68	27,66	7,03	36,57	CPC 30
25	75	20	5	3,06	12,63	5,15	26,04	8,26	39,50	CPC 30
		15	10	3,02	12,09	5,05	28,00	7,49	39,05	CPC 30
		10	15	3,06	12,14	4,46	22,55	6,83	35,26	CPC 30
		5	20	2,97	12,06	4,95	26,98	6,47	31,49	CPC 30
30	70	25	5	2,49	10,59	5,37	28,06	8,29	38,54	CPC 30
		20	10	2,43	9,84	5,31	26,91	7,87	38,45	CPC 30
		15	15	2,68	11,11	5,01	25,21	7,61	33,05	CPC 30
		10	20	2,42	10,40	4,20	20,47	6,42	30,85	CPC 30
		5	25	2,64	11,39	4,04	19,99	6,37	31,63	CPC 30
35	65	30	5	2,13	9,89	4,38	18,67	8,57	36,92	CPC 30
		25	10	2,12	9,53	4,15	19,71	7,88	34,55	CPC 30
		20	15	1,25	6,01	4,17	18,90	8,03	32,43	CPC 30
		15	20	1,15	6,01	3,91	19,74	7,74	31,21	CPC 30
		10	25	1,15	5,45	3,47	17,40	6,47	26,81	No
		5	30	1,49	6,08	3,62	17,21	5,50	23,52	No



# MEZCLAS TERNARIAS

Propiedades  
Mecánicas

CCARU 1

Se obtienen los  
mejores resultados  
con los porcentajes  
mayores de CCARU1



Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	
10	90	5	5	4,03	16,81	6,11	28,56	7,59	45,64	CPC 40
15	85	10	5	3,31	14,02	5,80	27,50	7,38	41,03	CPC 40
		5	10	3,64	14,56	5,60	27,11	7,44	38,13	CPC 30
20	80	15	5	3,38	12,65	5,45	28,96	8,46	38,45	CPC 30
		5	15	3,36	13,27	5,31	25,44	6,74	38,95	CPC 30
		10	10	3,51	14,67	5,68	27,66	7,03	36,57	CPC 30
25	75	20	5	3,06	12,63	5,15	26,04	8,26	39,50	CPC 30
		15	10	3,02	12,09	5,05	28,00	7,49	39,05	CPC 30
		10	15	3,06	12,14	4,46	22,55	6,83	35,26	CPC 30
		5	20	2,97	12,06	4,95	26,98	6,47	31,49	CPC 30
30	70	25	5	2,49	10,59	5,37	28,06	8,29	38,54	CPC 30
		20	10	2,43	9,84	5,31	26,91	7,87	38,45	CPC 30
		15	15	2,68	11,11	5,01	25,21	7,61	33,05	CPC 30
		10	20	2,42	10,40	4,20	20,47	6,42	30,85	CPC 30
		5	25	2,64	11,39	4,04	19,99	6,37	31,63	CPC 30
35	65	30	5	2,13	9,89	4,38	18,67	8,57	36,92	CPC 30
		25	10	2,12	9,53	4,15	19,71	7,88	34,55	CPC 30
		20	15	1,25	6,01	4,17	18,90	8,03	32,43	CPC 30
		15	20	1,15	6,01	3,91	19,74	7,74	31,21	CPC 30
		10	25	1,15	5,45	3,47	17,40	6,47	26,81	No
		5	30	1,49	6,08	3,62	17,21	5,50	23,52	No

# MEZCLAS TERNARIAS

Propiedades  
Mecánicas

CCARU 2

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	
10	90	5	5	2,39	10,06	5,65	25,49	7,67	39,00	CPC 30
15	85	10	5	2,25	9,62	4,83	23,92	7,71	39,48	CPC 30
		5	10	2,16	8,70	5,60	22,56	6,63	34,15	CPC 30
20	80	15	5	2,30	9,17	4,88	21,99	7,95	38,70	CPC 30
		5	15	1,96	7,93	4,57	20,71	6,64	31,33	CPC 30
		10	10	1,93	7,87	4,66	20,65	6,95	31,66	CPC 30
25	75	20	5	2,00	8,32	4,60	20,20	7,43	33,80	CPC 30
		15	10	2,11	8,00	4,92	24,99	7,11	33,44	CPC 30
		10	15	2,16	7,90	4,95	22,57	6,47	27,61	No
		5	20	1,88	6,88	4,44	21,05	6,26	28,12	No
30	70	25	5	1,87	7,50	4,75	21,22	8,71	35,74	CPC 30
		20	10	1,93	7,08	4,72	22,76	7,76	33,51	CPC 30
		15	15	1,73	6,57	4,23	21,92	7,45	30,35	CPC 30
		10	20	2,05	7,37	3,97	17,93	7,19	27,91	No
		5	25	1,73	5,83	3,72	18,63	6,09	27,28	No
35	65	30	5	1,63	5,56	3,87	16,75	8,12	34,62	CPC 30
		25	10	1,90	6,30	3,49	16,56	7,92	32,81	CPC 30
		20	15	1,70	5,39	3,42	15,39	-	-	No
		15	20	1,88	5,97	3,42	15,26	-	-	No
		10	25	1,52	5,01	3,32	14,56	-	-	No
		5	30	1,46	5,17	3,17	13,49	-	-	No



# MEZCLAS TERNARIAS

Propiedades  
Mecánicas

## CCARU 2

Se obtienen los  
mejores resultados  
con los porcentajes  
mayores de CCARU2



Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	Filler (%)	2 días (MPa)		7 días (MPa)		28 días (MPa)		Cumple requisitos UNIT 20
				$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	$R_f$	$R_c$	
10	90	5	5	2,39	10,06	5,65	25,49	7,67	39,00	CPC 30
15	85	10	5	2,25	9,62	4,83	23,92	7,71	39,48	CPC 30
		5	10	2,16	8,70	5,60	22,56	6,63	34,15	CPC 30
20	80	15	5	2,30	9,17	4,88	21,99	7,95	38,70	CPC 30
		5	15	1,96	7,93	4,57	20,71	6,64	31,33	CPC 30
		10	10	1,93	7,87	4,66	20,65	6,95	31,66	CPC 30
25	75	20	5	2,00	8,32	4,60	20,20	7,43	33,80	CPC 30
		15	10	2,11	8,00	4,92	24,99	7,11	33,44	CPC 30
		10	15	2,16	7,90	4,95	22,57	6,47	27,61	No
		5	20	1,88	6,88	4,44	21,05	6,26	28,12	No
30	70	25	5	1,87	7,50	4,75	21,22	8,71	35,74	CPC 30
		20	10	1,93	7,08	4,72	22,76	7,76	33,51	CPC 30
		15	15	1,73	6,57	4,23	21,92	7,45	30,35	CPC 30
		10	20	2,05	7,37	3,97	17,93	7,19	27,91	No
		5	25	1,73	5,83	3,72	18,63	6,09	27,28	No
35	65	30	5	1,63	5,56	3,87	16,75	8,12	34,62	CPC 30
		25	10	1,90	6,30	3,49	16,56	7,92	32,81	CPC 30
		20	15	1,70	5,39	3,42	15,39	-	-	No
		15	20	1,88	5,97	3,42	15,26	-	-	No
		10	25	1,52	5,01	3,32	14,56	-	-	No
		5	30	1,46	5,17	3,17	13,49	-	-	No



## MEZCLAS TERNARIAS / Propiedades Físicas

### Selección de mezclas estudiadas:

clinker + (5% filler) + (5-10-15-20-25-30% CCARU)

- ✓ mejores resultados en prop. mecánicas
- ✓ mayores beneficios medioambientales

# MEZCLAS TERNARIAS / Propiedades Físicas

## Selección de mezclas estudiadas:

clinker + (5% filler) + (5-10-15-20-25-30% CCARU)

- ✓ mejores resultados en prop. mecánicas
- ✓ mayores beneficios medioambientales

- **Expansión Autoclave**
- Superficie Específica
- Tiempo Fraguado

## Expansión en autoclave (%)

Sust.(%)	CPN(%)	CCA(%)	F(%)	CCARU1	CCARU2	Cumple requisito
0	100	0	0	0,096	0,096	Si
10	90	5	5	0,113	0,195	Si
15	85	10	5	0,128	0,321	Si
20	80	15	5	0,095	0,293	Si
25	75	20	5	-0,013	0,101	Si
30	70	25	5	-0,025	-0,028	Si
35	65	30	5	-0,031	-0,030	Si

**Requisito UNIT 20:2003**

**Máximo  
0,90%**



## MEZCLAS TERNARIAS / Propiedades Físicas

### Superficie Específica – BLAINE:

Todas las mezclas presentan superficie específica mayor que  $250\text{m}^2/\text{kg}$  (UNIT 20:2003)



- Expansión Autoclave
- **Superficie Específica**
- Tiempo Fraguado

# MEZCLAS TERNARIAS / Propiedades Físicas

## Superficie Específica – BLAINE:

Todas las mezclas presentan superficie específica mayor que 250m<sup>2</sup>/kg (UNIT 20:2003)



- Expansión Autoclave
- Superficie Específica
- **Tiempo Fraguado**

## Tiempos de fraguado:

Sustit. (%)	CPN (%)	CCA (%)	F (%)	CCARU1		CCARU2		Cumple requisitos UNIT 20
				$T_i$	$T_f$	$T_i$	$T_f$	
0	100	0	0	3h40min	4h30min	3h40min	4h30min	Si
10	90	5	5	3h40min	4h30min	3h45min	5h00min	Si
15	85	10	5	3h25min	4h30min	4h15min	5h10min	Si
20	80	15	5	3h00min	4h20min	4h20min	5h35min	Si
25	75	20	5	2h55min	4h20min	4h30min	5h45min	Si
30	70	25	5	2h50min	4h15min	4h45min	6h00min	Si
35	65	30	5	2h35min	4h05min	5h15min	6h00min	Si

Referencia

Requisito UNIT 20:2003

Inicial: Mínimo 45min  
Final: Máximo 10hrs



- ✓ CCARU1: ↓ tiempos de fraguado directamente proporcional al % de CCA
- ✓ CCARU2: ↑ tiempos de fraguado directamente proporcional al % de CCA

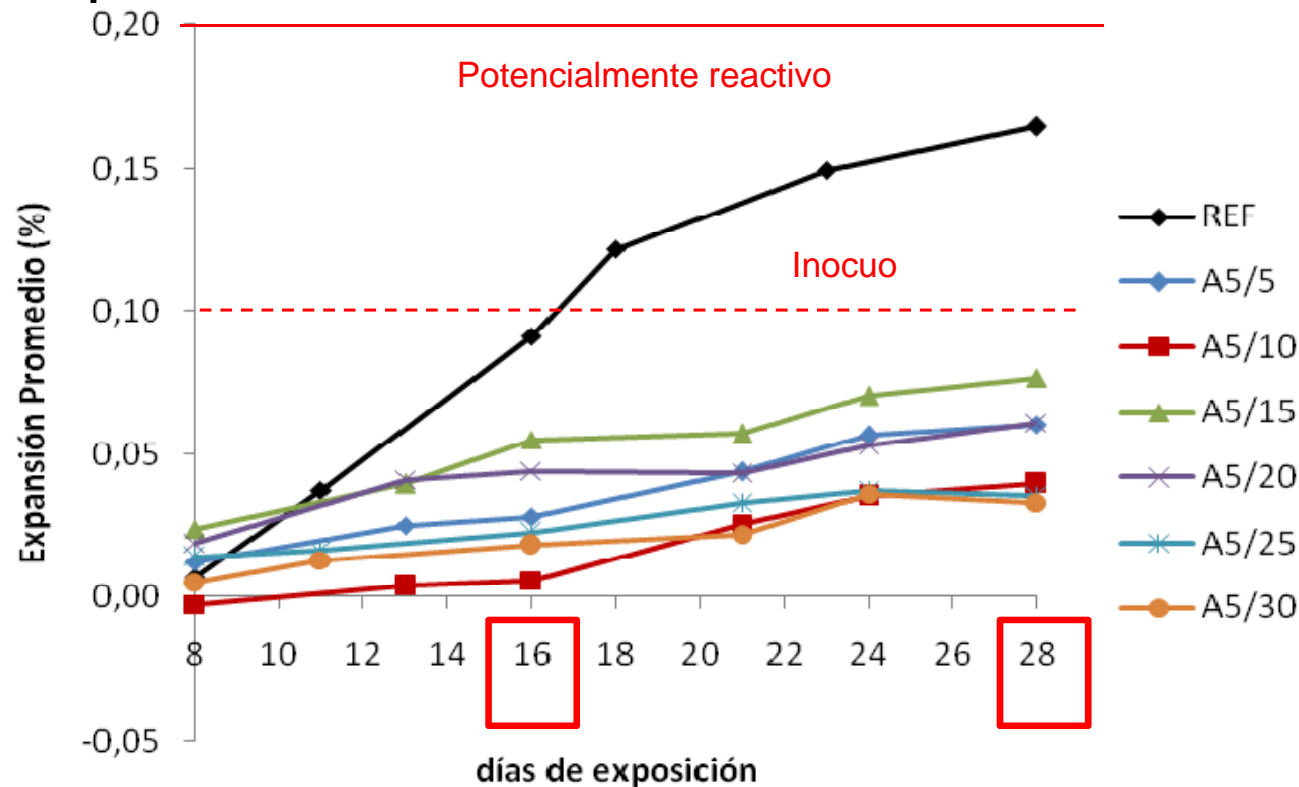
# REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

## Parámetros IRAM 1674:1997

- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $< 0,10\%$  → **comportamiento inocuo**
- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $0,10-0,20\%$  → **potencialmente reactivo**



**Observación:** El ensayo fue llevado a cabo hasta los 28 días.



## Observación:

La CCARU1 disminuye las expansiones en relación a probetas de referencia realizadas con 100% CP.

Combinaciones de Filler + CCARU1 / REF (sólo cemento)



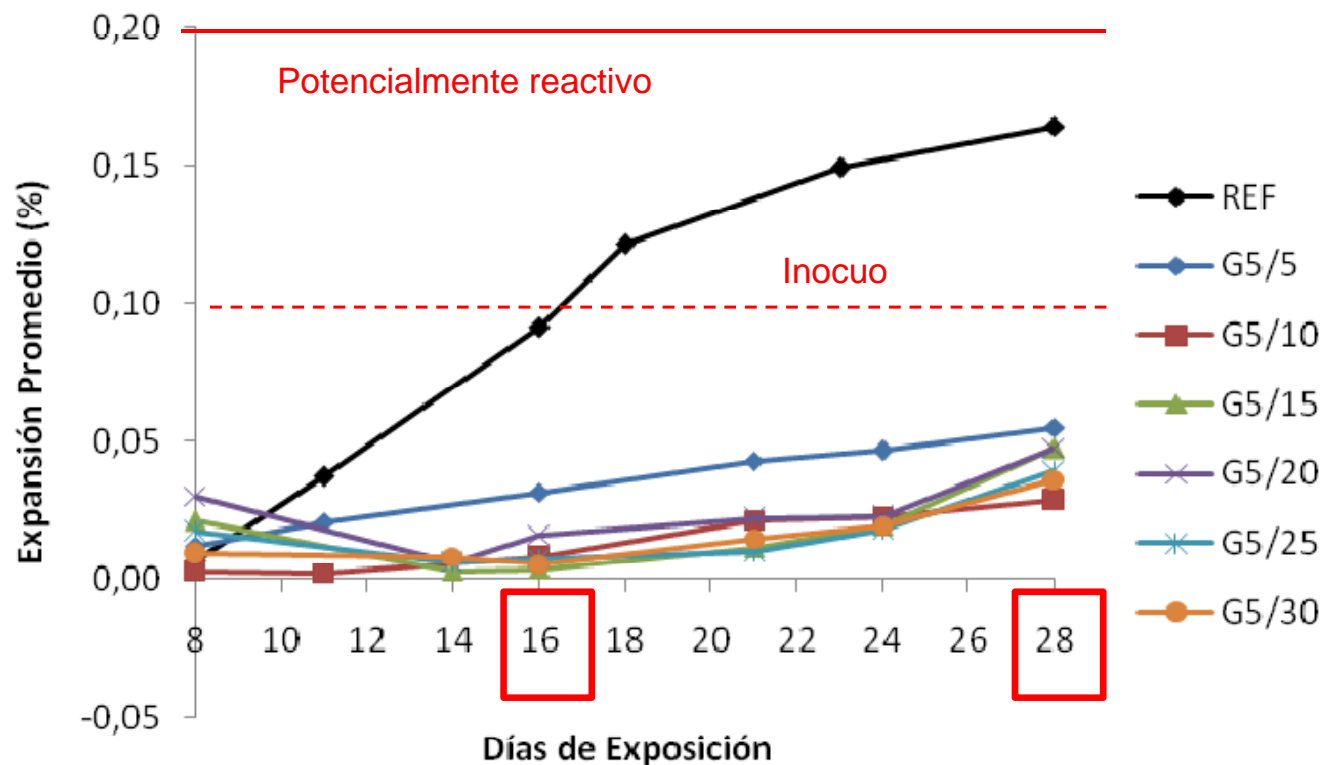
# REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

## Parámetros IRAM 1674:1997

- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $< 0,10\%$  → **comportamiento inocuo**
- ✓ Si la expansión a los 16 días es  $0,10-0,20\%$  → **potencialmente reactivo**



**Observación:** El ensayo fue llevado a cabo hasta los 28 días.



## Observación:

La CCARU2 disminuye las expansiones en relación a probetas de referencia realizadas con 100% CP.

Combinaciones de Filler + CCARU2 / REF (sólo cemento)



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



Fondo Sectorial de Energía (ANII)

FSE\_1\_2011\_1\_6476

## VIABILIDAD AMBIENTAL

Emisiones Totales y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

Método IPCC

Sust. (ton)	CPN (ton)	CCA (ton)	Filler (ton)	E <sub>cal</sub> (ton/año)	E <sub>com</sub> (ton/año)	E <sub>poz</sub> (ton/año)	E <sub>total</sub> (ton/año)	Reducción (%)
0	1	0	0	123627	110297	0	233924	
CCARU1								
0.10	0.9	0.05	0.05	111264	99267	6013	216544	7.43
0.15	0.85	0.10	0.05	105083	93752	12026	210861	9.86
0.20	0.80	0.15	0.05	98902	88237	18039	205178	12.29
0.25	0.75	0.20	0.05	92720	82723	24052	199495	14.72
0.30	0.70	0.25	0.05	86539	77208	30065	193812	17.15
0.35	0.65	0.30	0.05	80358	71693	36078	188129	19.58
CCARU 2								
0.10	0.9	0.05	0.05	111264	99267	6013	216544	7.43
0.15	0.85	0.10	0.05	105083	93752	9968	208803	10.74
0.20	0.80	0.15	0.05	98902	88237	14951	202090	13.61
0.25	0.75	0.20	0.05	92720	82723	22427	197870	15.41
0.30	0.70	0.25	0.05	86539	77208	27411	191158	18.28
0.35	0.65	0.30	0.05	80358	71693	32394	184445	21.15

Las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> varían entre 7% y 21%



## ÍNDICE:

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas Ternarias

Viabilidad Ambiental

### 4. CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

- ✓ Ambas cenizas estudiadas tienen **un alto porcentaje de dióxido de sílice**. **Eficiencia de Transformaciones** realizadas (secado, tamizado y molienda), confirmando su actividad puzolánica (IAP).
- ✓ Todas las mezclas alcanzaron los **requisitos químicos y físicos** especificados por la normativa.
- ✓ En relación a los **requerimientos mecánicos** para CPC, la mayoría de las mezclas estudiadas lo cumplen para ambas cenizas. Se obtuvieron **mejores resultados con CCARU1** que c/CCARU2
- ✓ **RAS**: Ambas CCA tienen un **comportamiento inócuo** en relación a la reacción que pudiera ocurrir entre los álcalis del cemento y la sílice contenida en las cenizas.
- ✓ Las **emisiones de CO<sub>2</sub>** provenientes de los procesos industriales asociados a la producción de CPC con CCA son reducidas en relación CPN, obteniéndose mayores reducciones cuanto mayor es el porcentaje de clinker sustituido.

**ES VIABLE la utilización de la CCARU como adición mineral activa en conjunto con filler calcáreo, sustituyendo parcialmente al cemento.**



# Gracias!

**Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale (Responsable)**

Mail: [gemma@fing.edu.uy](mailto:gemma@fing.edu.uy) / [gerobasensale@gmail.com](mailto:gerobasensale@gmail.com)

Arq. Iliana Rodríguez Viacava

Msc. Arq. Daniel Godoy Machado



**Fondo Sectorial de Energía (ANII)**

**FSE\_1\_2011\_1\_6476**