

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**“CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO ADITIVO  
SUPERPLASTIFICANTE, MICROSILICE Y NANOSILICE CON CEMENTO  
PORTLAND TIPO I”**

## **TESIS**

**Para optar el título profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**EDHER HUINCHO SALVATIERRA**

**LIMA – PERÚ**

**2011**

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	7
<b>LISTA DE CUADROS</b>	8
<b>LISTA DE TABLAS</b>	9
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b>	9
<b>INTRODUCCIÓN</b>	10
<b>CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN</b>	11
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 APLICACIONES	12
1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	13
<b>CAPÍTULO 2: MATERIALES</b>	14
2.1 AGREGADOS	14
2.1.1 Propiedades físicas del agregado	14
2.2 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	23
2.2.1 Definición	23
2.2.2 Características y propiedades del aditivo usado	23
2.3 MICROSÍLICE	24
2.3.1 Definición	24
2.3.2 Características y propiedades de la microsíllice usada	25
2.4 NANOSÍLICE	26
2.4.1 Definición	26
2.4.2 Características y propiedades de la nanosíllice usada	27
2.5 CEMENTO	28
2.5.1 Cemento usado	28
<b>CAPÍTULO 3: PREPARACIÓN DEL CONCRETO</b>	29
3.1 DISEÑO DEL CONCRETO PATRÓN – CPO	29
3.1.1 Peso unitario compactado de la combinación de los agregados	29
3.2 DISEÑO DEL CONCRETO CON ADITIVO - CPA	30
3.3 DISEÑO DEL CONCRETO CON ADITIVO MÁS MICROSÍLICE – SF10, SF15 Y SF20	30

3.4 DISEÑO DEL CONCRETO CON ADITIVO MÁS NANOSÍLICE – NS1.0, NS1.5 Y NS2.0	31
3.5 DISEÑO DEL CONCRETO CON ADITIVO MÁS MICROSÍLICE/ NANOSÍLICE – M5.0N0.5, M7.5N1.0 Y M10N1.5	31
<b>CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS</b>	33
4.1 ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS	33
4.1.1 Propiedades del concreto en estado fresco	33
4.1.2 Propiedades del concreto en estado endurecido	39
4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	44
4.2.1 Generalidades	44
4.2.2 Agregados	44
4.2.3 Propiedades del concreto en estado fresco	44
4.2.4 Propiedades del concreto en estado endurecido	46
4.3 ANÁLISIS DE COSTOS	47
<b>CONCLUSIONES</b>	53
<b>RECOMENDACIONES</b>	54
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	55
<b>ANEXOS</b>	56

## RESUMEN

La presente investigación estudia los concretos de alta resistencia preparados con microsílíce (SIKA FUME), nanosílíce (SIKA STABILIZER 100) y superplastificante (VISCOCRETE 20HE) usando cemento Portland tipo I, relaciones agua-cementante menores a 0.25, usando por primera vez agregado grueso HUSO 89. Los asentamientos obtenidos son del orden de 8 a 10 pulgadas y una extensibilidad entre 56 y 70 centímetros, considerándose concretos de alta resistencia y a la vez autocompactantes. El diseño se basa en el Peso Unitario Compactado Máximo de la combinación de los agregados y un bajo contenido de cemento ( $560 \text{ kg/m}^3$ ). La más alta resistencia a la compresión obtenida fue de  $1423 \text{ kg/cm}^2$  a la edad de 90 días.

Se desarrolla un concreto Patrón (CPO) con relación agua-cementante igual 0.40 y se comparan sus propiedades con cada una de las mezclas diseñadas. A la mezcla patrón se le adicionó 3% de aditivo superplastificante (CPA), luego 10, 15 y 20% de microsílíce en peso del cemento SF10, SF15 y SF20 respectivamente; se usó nanosílíce en dosis de 1.0, 1.5 y 2.0% en peso del cemento NS1.0, NS1.5 y NS2.0 respectivamente; también se usó microsílíce y nanosílíce a la vez en dosis de 5% de microsílíce más 0.5% de nanosílíce, 7.5% de microsílíce más 1.0% de nanosílíce y 10% de microsílíce más 1.5% de nanosílíce. Se presentan también el diseño de los diferentes tipos de mezcla y la determinación de sus propiedades al estado fresco y endurecido, así como también un análisis de resultados. Finalmente se realiza un análisis de costos de estos tipos de concretos que incluyen los insumos.



## INTRODUCCIÓN

Los concretos de hoy requieren en su composición la incorporación de aditivos y adiciones con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. En este sentido el trabajo de investigación ha experimentado incorporando microsílíce, nanosílíce y superplastificante a la mezcla de concreto para obtener concretos de alta resistencia para lo cual se ha comparado en base a un concreto patrón. El avance acelerado en la tecnología de nuevas materias primas en la elaboración de aditivos y adiciones hace posible la producción de concretos de alta resistencia, hace unos años se hablaba de la microsílíce como componente indispensable para lograr concretos de alta resistencia, la microsílíce es un polvo muy fino que posee propiedades físicas y químicas increíbles, resumidas en su alta reactividad puzolánica, pero su uso tiene impacto en el medio ambiente. Es así que en la actualidad se ha desarrollado un material mil veces más pequeño, la nanosílíce que se presenta en estado líquido y se supone posee mejores propiedades que la microsílíce, teniendo un impacto nulo en el medio ambiente debido a su estado. Es así que la nanosílíce tiene grandes posibilidades de reemplazar el uso de microsílíce o actuar conjuntamente para lograr concretos de alta resistencia y también concretos de alta performance.

La microsílíce sigue siendo uno de los productos más utilizados del mundo en el concreto. Sus propiedades permiten concretos de alta resistencia a la compresión, concretos resistentes al agua y a los agentes químicos, además forman parte de muchos edificios de concreto que vemos hoy en día.

La presente investigación tiene los siguientes objetivos:

- Determinar cualitativamente y cuantitativamente la mejora que produce en la resistencia a la compresión, el uso de micro sílice y nano sílice en el concreto.
- Determinar la dosificación adecuada de microsílíce y nanosílíce para obtener concretos de alta resistencia.
- Analizar y comparar los costos de concretos elaborados con microsílíce y nanosílíce.

## CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

La búsqueda incansable por nuevos materiales para la elaboración del concreto, ha motivado la presente investigación "CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, MICROSILICE Y NANOSILICE CON CEMENTO PORTLAND TIPO I", la utilización de tecnología de punta para lograr las más altas resistencias a la compresión, con aditivos reductores de agua y adiciones minerales como la microsílíce y nanosílíce.

La presente investigación experimental se ha dividido en cinco capítulos:

Capítulo 1; trata sobre los antecedentes revisados para el inicio de la investigación, asimismo de sus aplicaciones y desventajas del uso de un concreto de alta resistencia.

Capítulo 2; trata sobre los materiales usados en la investigación y sus propiedades, entre ellos tenemos a los agregados, el cemento, el aditivo superplastificante, microsílíce y nanosílíce usados para lograr un concreto de alta resistencia.

Capítulo 3; presenta los diseños de mezclas de concretos preparados, es decir:

- Diseño del concreto patrón,
- Diseño del concreto con aditivo,
- Diseño del concreto con aditivo más microsílíce,
- Diseño del concreto con aditivo más nanosílíce,
- Diseño del concreto con aditivo más microsílíce - nanosílíce.

Capítulo 4; trata sobre los ensayos realizados en la investigación y el logro de los resultados obtenidos, también se desarrolla un análisis de costo de los diseños de mezcla de concreto tomando en cuenta los materiales para su producción.

Finalmente, espero aportar con esta investigación a lograr mejores concretos y la satisfacción de las personas involucradas en el proceso.

## 1.1 ANTECEDENTES

El uso de la microsílíce como reemplazo o adición al concreto se inició en los años 80. En la actualidad el concreto necesita microsílíce como componente para lograr altas resistencias, pero la microsílíce al ser un polvo muy fino dificulta su manipulación y a la vez se han reportado problemas de salud al estar expuesto a este polvo. La solución a estos problemas fue sintetizar un material en estado líquido y a la vez que sea estable, es decir la nanosílíce, su estado era líquido (coloidal) y esta vez sus partículas eran mil veces más pequeñas que las de la microsílíce. La nanosílíce ofrece características físicas y químicas superiores a la microsílíce, pero de su desempeño en el concreto se sabe poco, es así que Wan Jo, en el 2007, desarrolla una investigación sobre morteros con nanosílíce. Al final concluye que el uso de la nanosílíce es más beneficioso que la microsílíce en ganar resistencia a la compresión. En la tesis: "Obtención del Concreto de Alta Resistencia", Vilca Aranda Patricia, en el 2008 utiliza microsílíce para obtener concretos de alta resistencia, obteniendo  $1400 \text{ kg/cm}^2$  a los 180 días con un asentamiento de 3.8".

## 1.2 APLICACIONES

Este tipo de concretos exhibe características mecánicas especiales y de duración, su principal aplicación es:

- Para colocar concreto en servicio a una edad mucho menor, por ejemplo dar tráfico a pavimentos a 3 días de su colocación.
- Para construir edificios altos reduciendo la sección de las columnas e incrementando el espacio disponible.
- Para construir superestructuras de puentes de grandes luces y para mejorar la durabilidad de sus elementos.
- Para elaborar Pavimentos de alto tránsito.
- Para construir Estructuras que requieran alta durabilidad.

Para satisfacer necesidades específicas de ciertas aplicaciones especiales como por ejemplo relacionadas con el módulo de elasticidad y resistencia a la flexión. Entre algunas de dichas aplicaciones se incluye la

construcción de presas, cimentaciones marinas y pisos industriales de tráfico pesado.

### 1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los concretos de alta resistencia poseen las ventajas técnicas y económicas siguientes:

- Gran resistencia a compresión por unidad de peso, volumen o costo; importante para la construcción de pilares y columnas en edificios de altura.
- Excelente comportamiento frente al impacto y perforación; esencial en trabajos de fortificación.
- Gran resistencia a tracción, apropiada en la construcción de vigas pretensadas.
- Importante módulo de elasticidad, permitiendo una gran estabilidad y que las flechas en las vigas, para iguales valores de carga, sean reducidas.
- Escurrecimiento plástico mucho menor que los concretos tradicionales, con lo que la pérdida de tensión en los cables de pretensado es mucho más reducida.
- Mayor durabilidad, especialmente en estructuras expuestas a la acción del mar.
- Mayor aptitud para su transporte por bombas para las mismas distancias que los concretos tradicionales.

Las desventajas de estos concretos pueden ser:

- Necesidad de materiales y componentes de alta calidad.
- Control de calidad muy exigente.
- Curado muy cuidadoso al poseer relaciones agua cemento muy bajas.
- Rotura frágil.

## **CAPÍTULO 2: MATERIALES**

### **2.1 Agregados**

Los agregados utilizados en la investigación constituyen en promedio 65% del volumen total de una mezcla de concreto y muchas de las propiedades principalmente mecánicas dependen directamente de los agregados, es decir, de sus propiedades físicas y químicas.

El agregado fino proviene de la cantera de Jicamarca y el agregado grueso proviene de la cantera La Gloria; cumplen con la NTP 400.037 y la Norma ASTM C 33.

#### **2.1.1 Propiedades físicas de los agregados**

Conocer las propiedades físicas de los agregados es muy importante para conocer el comportamiento del concreto elaborado con estos agregados, además de tener en cuenta un control de calidad estricto tanto en cantera como en laboratorio, ya que el concreto de alta resistencia es altamente susceptible de los cambios en su constitución. Los ensayos para determinar las propiedades físicas de los agregados se realizaron para tres muestras (M-1, M-2 y M-3) de agregado fino y grueso respectivamente, tomándose los valores promedios de las tres muestras como representativos. La metodología utilizada para determinar las propiedades físicas de los agregados está de acuerdo a las Normas Técnicas Peruanas vigentes y las Normas ASTM.

- **Peso unitario de los agregados**

Se denomina peso unitario del agregado al peso que alcanza un determinado volumen unitario. Este valor es requerido cuando se trata de clasificar agregados ligeros o pesados y en el caso de realizar proporciones de mezcla de concreto por volumen. El peso unitario del agregado varía de acuerdo a condiciones intrínsecas, como la forma, granulometría y tamaño máximo. Asimismo, depende de factores externos como la relación de tamaño máximo con el volumen del recipiente utilizado para realizar el ensayo, la consolidación impuesta, la forma de colocación, etc. De acuerdo al tipo de consolidación hay dos tipos de peso unitario: suelto y compactado. Los pesos unitarios para el

agregado fino y grueso utilizados fueron determinados según la NTP 400.017 y los valores obtenidos se muestran en los Cuadros 2.1 y 2.2 respectivamente.

**Cuadro 2.1:** Determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado fino

	M-1	M-2	M-3	unidades
Peso del recipiente	1.7			Kg
Volumen del recipiente (1/10 pie <sup>3</sup> )	0.00283			m <sup>3</sup>
Peso del material + tara sin compactar	6.27	6.24	6.23	kg
Peso del material suelto	4.57	4.54	4.53	kg
Peso del material + tara compactado	6.84	6.85	6.85	kg
Peso del material compactado	5.14	5.15	5.15	kg
<b>Peso unitario suelto</b>	<b>1607</b>			<b>kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Peso unitario compactado</b>	<b>1819</b>			<b>kg/m<sup>3</sup></b>

**Cuadro 2.2:** Determinación del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso

	M-1	M-2	M-3	unidades
Peso del recipiente	1.7			Kg
Volumen del recipiente (1/10 pie <sup>3</sup> )	0.00283			m <sup>3</sup>
Peso del material + tara sin compactar	5.97	5.92	5.97	kg
Peso del material suelto	4.27	4.22	4.27	kg
Peso del material + tara compactado	6.49	6.48	6.50	kg
Peso del material compactado	4.79	4.78	4.80	kg
<b>Peso unitario suelto</b>	<b>1503</b>			<b>kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Peso unitario compactado</b>	<b>1693</b>			<b>kg/m<sup>3</sup></b>

- **Peso Específico**

El peso específico de los agregados adquiere importancia en la construcción, cuando se requiere que el concreto tenga un peso límite, sea máximo o mínimo. Además, el peso específico es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que el peso específico bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en el que es recomendable realizar pruebas adicionales.

Los pesos específicos para el agregado fino y grueso utilizados en la investigación fueron determinados según la NTP 400.022 y los valores obtenidos se muestran en los Cuadros 2.3 y 2.4 respectivamente.

- **Absorción**

La capacidad que tiene los agregados de atrapar las moléculas de agua en sus poros, producido por la capilaridad, es la absorción. Su influencia radica en el aporte de agua al concreto haciendo variar propiedades importantes como la resistencia y la trabajabilidad. La absorción de los agregados fino y grueso utilizados en la investigación fueron determinados según la NTP 400.022 y los valores obtenidos se muestran se detallan en los Cuadros 2.3 y 2.4 respectivamente.

- **Contenido de humedad**

La cantidad de agua retenida por las partículas del agregado es el contenido de humedad, esta propiedad varía en función del tiempo y condiciones ambientales, es por esto que para la investigación el contenido de humedad fue determinado para cada diseño de mezcla según la NTP 400.016.

**Cuadro 2.3:** Determinación del peso específico del agregado fino

	M-1	M-2	M-3	unidades
Peso de la muestra S.S.S.	500.00			g
Peso del balón seco	159.80			g
Peso S.S.S. + balón	659.80			g
Peso S.S.S. + balón + agua	973.00	970.60	969.10	g
Peso del agua	313.20	310.80	309.30	g
Peso de la tara	160.90	160.90	160.90	g
Peso de la tara + muestra seca	652.10	651.90	653.40	g
Peso de la muestra seca	491.20	491.00	492.50	g
Volumen del balón	500.00			cm <sup>3</sup>
<b>Peso Específico (PE)</b>				<b>2.60</b>
<b>Peso Específico Saturado Superficialmente Seco (PESSS)</b>				<b>2.65</b>
<b>Absorción (Abs)</b>				<b>1.70 %</b>



**Cuadro 2.4:** Determinación del peso específico del agregado grueso

	M-1	M-2	M-3	unidades
Peso de la muestra S.S.S.	2870.20	3158.80	2602.20	g
Peso de la canastilla en el agua	813.20			g
Peso de la muestra S.S.S. + la canastilla en agua	2631.30	2816.10	2462.10	g
Peso de la muestra S.S.S. en agua	1818.10	2002.90	1648.90	g
Peso de la tara	178.40	190.00	190.00	g
Peso de la tara + muestra seca	3011.80	3310.40	2757.20	g
Peso de la muestra seca	2833.40	3120.40	2567.20	g
<b>Peso Específico (PE)</b>	<b>2.70</b>			
<b>Peso Específico Saturado Superficialmente Seco (PESSS)</b>	<b>2.73</b>			
<b>Absorción (Abs)</b>	<b>1.30</b>			<b>%</b>

- **Granulometría de los agregados**

La distribución de los tamaños del agregado, la granulometría está directamente relacionada con las características de manejabilidad del concreto en estado fresco, la demanda de agua, la compactación y la resistencia mecánica del concreto en estado endurecido. Los límites granulométricos que recomienda la NTP 400.037 para el agregado fino se muestra en la Tabla 2.1 y para el agregado grueso en la Tabla 2.2. Resultados del análisis granulométrico de los agregados se presentan en los Cuadros 2.5 y 2.6, y las curvas granulométricas de los agregados se encuentran en los Gráficos 2.1 y 2.2.

**Tabla 2.1:** Límites granulométricos para el agregado fino

Tamiz estándar (apertura cuadrada)	Porcentaje que pasa
3/8" (9.51 mm)	100
N° 4 (4.75 mm)	95 a 100
N° 8 (2.38 mm)	80 a 100
N° 16 (1.19 mm)	50 a 85
N° 30 (0.595 mm)	25 a 60
N° 50 (0.297 mm)	5 a 30
N° 100 (0.148 mm)	0 a 10

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037



**Cuadro 2.5:** Granulometría del agregado fino usado

Malla	Peso retenido (g)				RET. PROM. (%)	RET. ACUM. (%)	ACUM. PASA (%)
	M-1	M-2	M-3	Prom.			
3/8"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	55.80	62.90	72.00	63.57	5.16	5.16	94.84
N° 8	214.90	249.20	255.60	239.90	19.48	24.64	75.36
N° 16	204.50	231.30	240.60	225.47	18.31	42.95	57.05
N° 30	195.20	227.40	243.90	222.17	18.04	60.99	39.01
N° 50	200.90	200.70	248.60	216.73	17.60	78.59	21.41
N° 100	150.70	176.00	172.00	166.23	13.50	92.09	7.91
N° 200	94.90	95.70	101.80	97.47	7.91	100.00	0.00
Total	1116.90	1243.20	1334.50	1231.53	100.00		

**Cuadro 2.6:** Granulometría del agregado grueso usado

Malla	Peso retenido (g)				RET. PROM. (%)	RET. ACUM. (%)	ACUM. PASA (%)
	M-1	M-2	M-3	Prom.			
1/2"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	7.80	9.50	6.10	7.80	0.15	0.15	99.85
N° 4	3663.50	3638.50	4224.10	3842.03	71.68	71.82	28.18
N° 8	603.58	703.39	712.84	673.27	12.56	84.39	15.61
N° 16	322.41	375.73	380.78	359.64	6.71	91.09	8.91
N° 30	107.73	125.55	127.23	120.17	2.24	93.34	6.66
N° 50	135.88	158.35	160.47	151.56	2.83	96.16	3.84
Fondo	184.31	214.78	217.67	205.59	3.84	100.00	0.00
Total	5025.20	5225.80	5829.20	5360.07	100.00		

**Tabla 2.2:** Límites granulométricos para el agregado grueso

HUSO	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	PORCENTAJE QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS													
		100 mm (4 pulg.)	90 mm (3 1/2 pulg.)	75 mm (3 pulg.)	63 mm (2 1/2 pulg.)	50 mm (2 pulg.)	37,5 mm (1 1/2 pulg.)	25,0 mm (1 pulg.)	19,0 mm (3/4 pulg.)	12,5 mm (1/2 pulg.)	9,5 mm (3/8 pulg.)	4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	4,75 µm (No. 50)
1	90 mm a 37,5 mm (3 1/2 a 1 1/2 pulg.)	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 15	---	---	---	---	---	
2	63 mm a 37,5 mm (2 1/2 a 1 1/2 pulg.)	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	
3	50 mm a 25,0 mm (2 a 1 pulg.)	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	
357	50 mm a 4,75 mm (2 pulg. a No. 4)	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	0 a 30	---	0 a 5	---	---	
4	37,5 mm a 19,0 mm (1 1/2 a 3/4 pulg.)	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 5	---	0 a 5	---	---	---	
467	37,5 mm a 4,75 mm (1 1/2 pulg. a No. 4)	---	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---	
5	25,0 mm a 12,5 mm (1 a 1/2 pulg.)	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---	---	
56	25,0 mm a 9,5 mm (1 a 3/8 pulg.)	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---	
57	25,0 mm a 4,75 mm (1 pulg. a No. 4)	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---	
6	19,0 mm a 9,5 mm (3/4 a 3/8 pulg.)	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---	
67	19,0 mm a 4,75 mm (3/4 pulg. a No. 4)	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	
7	12,5 mm a 4,75 mm (1/2 pulg. a No. 4)	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---	
8	9,5 mm a 2,36 mm (3/8 pulg. a No. 8)	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	9,5 mm a 1,18 mm (3/8 pulg. a No. 16)	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 35	5 a 30	0 a 10	
9	4,75 mm a 1,18 mm (No. 4 a No. 16)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037

Gráfico 2.1: Curva granulométrica del agregado fino

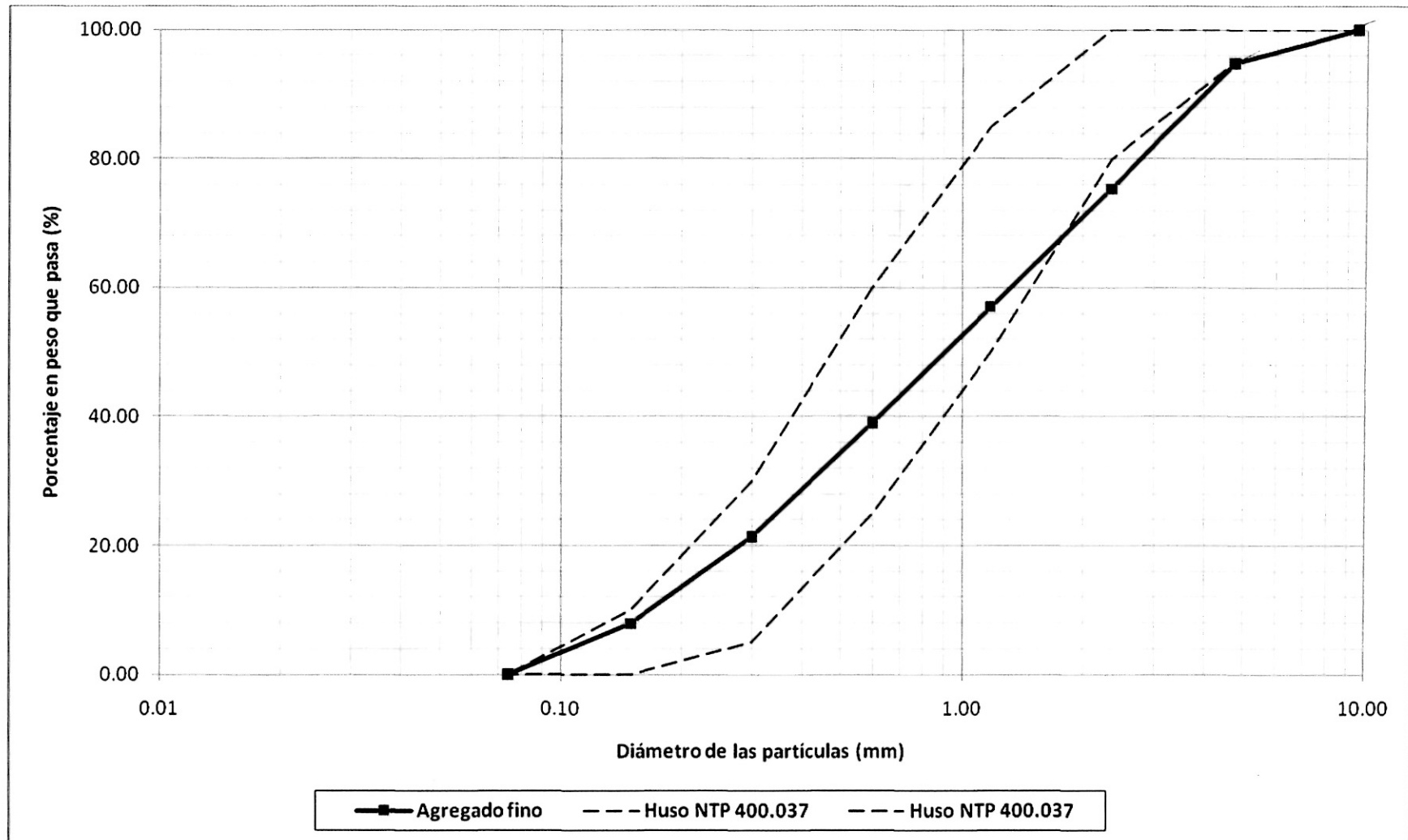
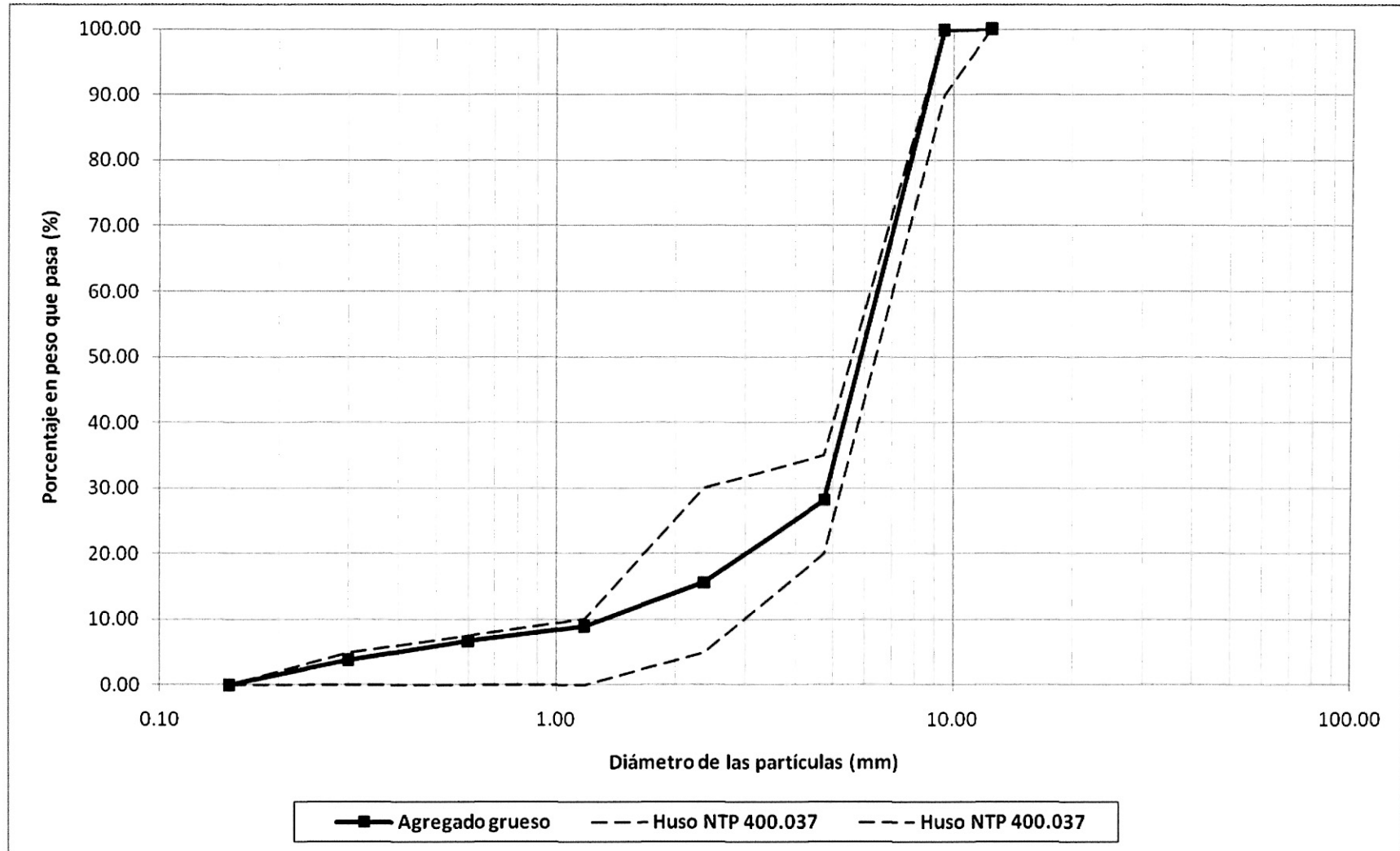


Gráfico 2.2: Curva granulométrica del agregado grueso huso 89



- **Módulo de finura de los agregados**

El módulo de finura de los agregados se determina a partir de los resultados del ensayo granulométrico, siendo de 3.04 para el agregado fino determinado a partir del Cuadro 2.7 y el módulo de finura para el agregado grueso es de 5.37 determinado a partir del Cuadro 2.8. El módulo de finura se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados de acuerdo a la siguiente expresión:

$$MF = \sum \frac{\text{Porcentajes retenidos acumulados}}{100} \left( 3+1 \frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{3}{8} + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100 \right)$$

- **Materiales más finos que pasan la malla N°200 (75 µm)**

El material muy fino, constituido por arcilla y limo, se presenta recubriendo al agregado grueso, o mezclado con la arena. En el primer caso, afecta la adherencia del agregado y la pasta; en el segundo, incrementa los requerimientos de agua para la mezcla. En principio, un moderado porcentaje de finos menores a 75 µm puede favorecer la trabajabilidad, pero su incremento afecta la resistencia a la compresión del concreto. El agregado fino usado presenta un 3.6% de finos que pasan la malla N°200 y el agregado grueso un 0.6% se determinaron según la NTP 400.018 y su valor se muestra en el Cuadro 2.7 a continuación.

**Cuadro 2.7:** Resumen de las propiedades de los agregados

Descripción	Agregado fino	Agregado grueso	unidades
<b>Cantera</b>	Jicamarca	Gloria	
<b>Absorción</b>	1.7	1.3	%
<b>Peso específico</b>	2.60	2.70	
<b>Peso unitario suelto</b>	1607	1503	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Peso unitario compactado</b>	1819	1693	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de finura</b>	3.04	5.37	
<b>Finos que pasan la malla N°200</b>	3.60	0.60	%
<b>Tamaño máximo</b>	---	1/2	Pulgada
<b>Tamaño máximo nominal</b>	---	3/8	Pulgada

## 2.2 Aditivo Superplastificante

### 2.2.1 Definición

También son conocidos como aditivos reductores de agua de alto rango, los cuales tiene por finalidad reducir en forma importante el contenido de agua del concreto manteniendo una consistencia dada y sin producir efectos indeseables sobre el fraguado. Igualmente se emplean para incrementar el asentamiento sin necesidad de aumentar el contenido de agua en la mezcla de concreto.

### 2.2.2 Características y propiedades del aditivo usado

El aditivo usado es el VISCOCRETE 20HE, proporcionado por la empresa Sika Perú S.A; desarrollado a base de policarboxilatos y se presenta en forma líquida, según la NTP 334.088 y su equivalente ASTM C-494 se clasifica como tipo "F" Reductores de Agua de Alto Rango. La hoja técnica del aditivo se muestra en el Anexo A.

#### A) Descripción

Sika Viscocrete 20 HE es un aditivo superplastificante de tercera generación para concreto y mortero a base de policarboxilatos.

#### B) Usos

Sika Viscocrete 20 HE esta especialmente diseñado para la producción de concreto que requiere de un rápido desarrollo de resistencia inicial, alta reducción de agua y excelente trabajabilidad. Sika Viscocrete 20 HE es usado para los siguientes tipos de concreto:

- Concreto prefabricado y pretensado.
- Concreto de rápida puesta en servicio.
- Concretos que requieran un rápido desmolde.
- Concreto autocompactante sin necesidad de vibración.

#### C) Ventajas

Sika Viscocrete 20 HE actúa por diferentes mecanismos. Mediante su absorción superficial y el efecto de separación espacial de las

partículas de cemento en paralelo al proceso de hidratación, se obtienen las siguientes propiedades:

- Extremadamente alta reducción de agua, generando una alta resistencia, densidad e impermeabilidad del concreto.
- Excelente fluidez, reduciendo al mínimo el trabajo en la colocación y compactación.
- Incremento del desarrollo de resistencia inicial.
- Reduce el gasto de energía en elementos prefabricados curados al vapor.
- Es altamente apropiado para la producción de concreto autocompactante, sin necesidad de vibración.
- Mejoramiento del comportamiento en fluencia y retracción.
- Reducida velocidad de carbonatación del concreto.

Sika Viscocrete 20 HE no contiene cloruros u otro ingrediente promotor de la corrosión por lo que puede ser utilizado sin restricciones en concreto armado y pretensado.

D) Modo de empleo

Dosis recomendada: 0.2 a 2% del peso del cemento.

*Adición:* El aditivo debe agregarse diluido en el agua de amasado al momento del mezclado o agregado simultáneamente con el agua al interior del mezclador. Para un óptimo comportamiento, mezclar energicamente durante un mínimo de 1 minuto.

E) Datos técnicos

Apariencia: líquido marrón claro.

Densidad: 1.08 kg/cm<sup>3</sup>.

## **2.3 Microsilice**

### **2.3.1 Definición**

Según El Comité 116 del ACI "American Concrete Institute", define a la microsilice como: "Una sílice no cristalina muy fina producida por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la fabricación de silicio metálico o ferro silicio".

### 2.3.2 Características y propiedades de la microsílíce usada

La microsílíce usada fue SIKA FUME, proporcionado por la empresa Sika Perú S.A. se presenta en polvo fino de color gris, y cumple con la Norma ASTM C-1240. El análisis químico de la microsílíce usada se presentan en el Cuadro 2.8, en donde se observa que un 93% de la composición es óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ).

#### A) Descripción

Es un aditivo en polvo compuesto por microsílíce (Sílica Fume) de alta calidad y que acondicionado a la mezcla de concreto o mortero, disminuye el lavado del cemento en el vaciado de la mezcla bajo agua. Sika Fume no contiene cloruros y puede utilizarse en concretos y morteros en conjunto con un superplastificante para obtener la fluidez necesaria para la colocación del concreto.

#### B) Usos

- En el concreto bajo agua en puertos, puentes, presas, reparaciones, rellenos, entre otros.
- En concretos de alta impermeabilidad y durabilidad.
- En concretos de alta resistencia (mayor a  $500 \text{ kg/cm}^2$ ).
- En concretos bombeados y proyectados.
- En morteros y lechadas de inyección.

#### C) Ventajas

- Disminuye la pérdida de cemento y elementos finos.
- Aumenta la resistencia mecánica.
- Aumenta la impermeabilidad.
- Aumenta la resistencia química.
- Aumenta la adherencia al acero.
- Permite utilizar mezclas altamente fluidas con alta cohesión.
- Aumenta la cohesión y disminuye la exudación de la mezcla fresca.
- Aumenta la durabilidad frente a agentes agresivos.
- Aumenta la resistencia a abrasión.

#### D) Modo de empleo

Dosis recomendada: 10% del peso del cemento.



Adición: Sika Fume se adiciona a la mezcladora junto con el cemento o la arena.

E) Datos técnicos

Apariencia: polvo gris.

Gravedad específica: 2.20.

Superficie específica (Blaine): 18 000 – 22 000 m<sup>2</sup>/kg

Partícula: Amorfa de forma esférica.

Finura (diámetro promedio): 0.1 - 0.2 μm.

Porcentaje que pasa 45 μm : 95 - 100%.

**Cuadro 2.8:** Análisis químico de la microsílíce Sika fume

SiO <sub>2</sub>	93.0 % mínimo
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8 % máximo
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4 % máximo
CaO	0.6 % máximo
MgO	0.6 % máximo
Na <sub>2</sub> O	0.2 % máximo
K <sub>2</sub> O	1.2 % máximo
C (libre)	2.0 % máximo
SO <sub>3</sub>	0.4 % máximo
Pérdida por ignición	3.5 % máximo

Fuente: Información proporcionada por el fabricante.

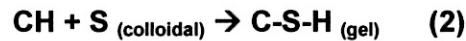
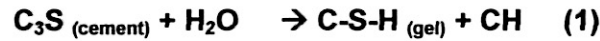
## 2.4 Nanosílíce

### 2.4.1 Definición

Nanosílíce es una sílice coloidal que consiste en partículas micro-finas de dióxido de silicio amorfo (SiO<sub>2</sub>), dispersas en el agua. La superficie de las partículas de SiO<sub>2</sub> es cargada por los iones hidroxilo formados por la pérdida de protones de las moléculas de agua en los espacios entre los átomos de oxígeno de la estructura del SiO<sub>2</sub>.

Teóricamente las nanopartículas de sílice coloidal reaccionan con los iones de calcio producidos durante las etapas de la hidratación del cemento (1), formando un gel de silicato de calcio (CSH) (2). En otras palabras, el mecanismo

químico es similar a la reacción puzolánica, pero con un componente de alta pureza con una superficie específica muy alta (alrededor de 50 000 m<sup>2</sup>/kg) y activa como se muestran en las expresiones a continuación.



#### 2.4.2 Características y propiedades de la nanosílice usada

La nanosílice usada es SIKA STABILIZER 100, proporcionado por la empresa Sika Perú S.A. y se presenta en forma líquida.

##### A) Descripción

Sika stabilizer 100 es un líquido transparente basado en sílica coloidal.

##### B) Usos

Sika stabilizer 100 es usado cuando se requiere controlar la estabilidad, la segregación y la pérdida de agua del concreto haciéndolo más cohesivo resistente al ataque por sulfatos.

##### C) Ventajas

Sika stabilizer 100 incrementa la resistencia a edades tempranas y también mejora las resistencias finales. Disminuye la permeabilidad. Ideal para la fabricación de concretos durables específicamente resistentes al ataque por sulfatos. Mejora la cohesividad de concretos autocompactantes. Disminuye el rebote en concretos proyectados.

##### D) Modo de empleo

Dosis recomendada: 0.1% y 1.5% del peso del cemento, exceso en las dosificaciones puede afectar la manejabilidad.

Adición: Sika stabilizer 100 puede ser adicionado al concreto con el agua de mezclado, se recomienda el empleo de dosificadores por peso o volumen para una adecuada dosificación. Se recomienda mezclar entre 90 y 180 segundos dependiendo del tipo de mezclador.

Utilizar acompañado de aditivos reductores de agua de alto poder.

El efecto puede variar dependiendo del tipo de cemento usado. Se deben hacer evaluaciones con los materiales y bajo las condiciones de la obra para determinar la dosis ideal.

E) Datos técnicos

Apariencia: Indoloro y transparente liquido

Densidad: 1.10 kg/cm<sup>3</sup>

## 2.5 Cemento

### 2.5.1 Cemento usado

El cemento usado es el Cemento Portland Tipo I Sol, en presentación de bolsas de 42.5 kg, de la Fábrica de Cementos Lima. Cumple con NTP 334.009 y ASTM C-150. Las características físicas del cemento usado se presentan en el Cuadro 2.9 a continuación.

**Cuadro 2.9:** Características físicas del Cemento Portland Tipo I – Sol

Característica física	Tipo I - Sol	Requisito ASTM C-150 NTP 334.002
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	3.15	---
Fineza Malta 100 (%)	0.04	---
Fineza Malta 200 (%)	4.14	---
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)	3480	Mínimo 2800
Contenido de aire (%)	9.99	Máximo 12
Expansión autoclave (%)	0.18	Máximo 0.8
Fraguado inicial Vicat (hr.min)	1.49	Mínimo 0.45
Fraguado final Vicat (hr.min)	3.29	Máximo 6.15
f'c a 3 días (kg/cm <sup>2</sup> )	254	124 (12.4 Mpa)
f'c a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	301	193 (19.3 Mpa)
f'c a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	357	276 (27.6 Mpa)*
Calor de hidratación 7 días (cal/gr)	70.6	---
Calor de hidratación 28 días (cal/gr)	84.3	---

Fuente: Información proporcionada por el fabricante.

(\*) Requisito opcional.

## CAPÍTULO 3: PREPARACIÓN DEL CONCRETO

### 3.1 Diseño del concreto patrón – CPO

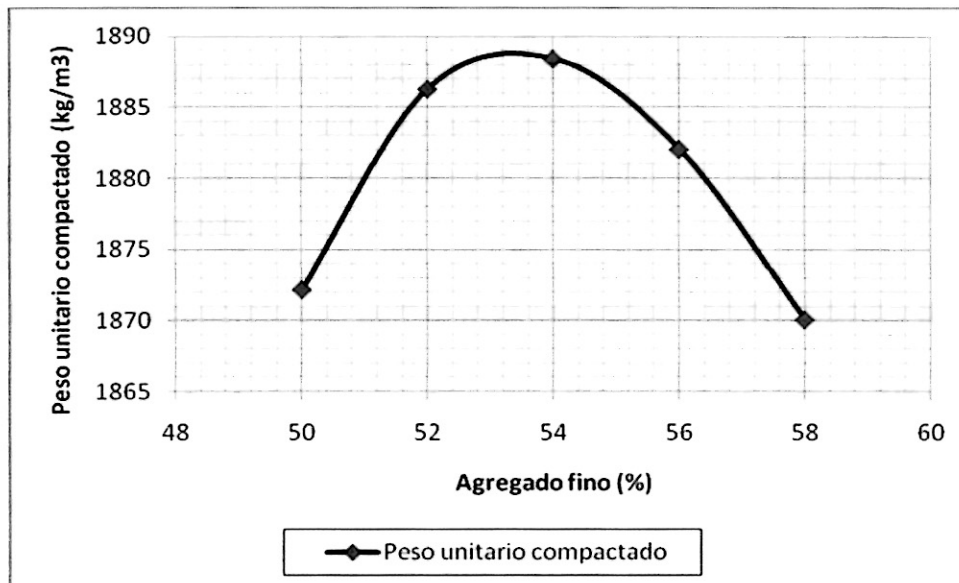
Para el diseño del concreto patrón se usó el Método del Peso Unitario Compactado Máximo, de donde se obtuvo la relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, se empleó un contenido de cemento igual a 560 kg por metro cúbico de mezcal de concreto y una relación agua-cemento de 0.40 para obtener un asentamiento de 3 a 4 pulgadas. Este diseño no posee en su composición ningún aditivo ni adición.

#### 3.1.1 Peso unitario compactado de la combinación de los agregados

Esta metodología empírica ayuda a obtener las cantidades en porcentajes de agregado fino y grueso que nos dan el mejor acomodamiento de las partículas de agregado en la mezcla. El peso unitario compactado de la combinación de los agregados se determina combinando diferentes porcentajes de arena y piedra para luego obtener su peso unitario compactado. Los resultados para determinar el peso unitario compactado de la combinación de los agregados se muestra en el Cuadro 3.1 y Gráfico 3.1.

**Cuadro 3.1:** Valores del peso unitario compactado de la combinación de los agregados

Peso unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	Proporción de agregados	
	Agregado fino (%)	Agregado grueso (%)
1872	50	50
1886	52	48
1888	54	46
1882	56	44
1870	58	42

**Gráfico 3.1:** Peso unitario compactado de la combinación de los agregados

### 3.2 Diseño del concreto con aditivo – CPA

Para el diseño del concreto con aditivo (CPA) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, con un contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , una relación agua-cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  de Viscocrete 20HE (Superplastificante) por kilogramo de cemento.

### 3.3 Diseño del concreto con aditivo más microsílíce – SF10, SF15 y SF20

Para el diseño del concreto con aditivo más microsílíce (SF10) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsílíce igual a  $56 \text{ kg/m}^3$  (10% del peso del cemento), una relación agua-cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más microsílíce (SF15) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsílíce igual a  $84 \text{ kg/m}^3$  (15% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más microsílíce (SF20) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsílíce igual a  $112 \text{ kg/m}^3$  (20% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

#### **3.4 Diseño del concreto con aditivo más nanosílíce – NS1.0, NS1.5 y NS2.0**

Para el diseño del concreto con aditivo más nanosílíce (NS1.0) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de nanosílíce igual a  $5.6 \text{ kg/m}^3$  (1% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más nanosílíce (NS1.5) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de nanosílíce igual a  $8.4 \text{ kg/m}^3$  (1.5% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más nanosílíce (NS2.0) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de nanosílíce igual a  $11.2 \text{ kg/m}^3$  (2.0% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

#### **3.5 Diseño del concreto con aditivo más microsílíce/nanosílíce – M5.0N0.5, M7.5N1.0 y M10N1.5**

Para el diseño del concreto con aditivo más microsílíce/nanosílíce (M5.0N0.5) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsílíce igual a  $28 \text{ kg/m}^3$  (5% del peso del cemento), contenido de nanosílíce

igual a  $2.8 \text{ kg/m}^3$  (0.5% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $27.78 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más microsilíce/nanosilíce (M7.5N1.0) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsilíce igual a  $42 \text{ kg/m}^3$  (7.5% del peso del cemento), contenido de nanosilíce igual a  $5.6 \text{ kg/m}^3$  (1% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $25.84 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

Para el diseño del concreto con aditivo más microsilíce/nanosilíce (M10N1.5) se mantuvo la misma relación agregado fino/agregado grueso = 53/47, contenido de cemento constante e igual a  $560 \text{ kg/m}^3$ , contenido de microsilíce igual a  $56 \text{ kg/m}^3$  (10% del peso del cemento), contenido de nanosilíce igual a  $8.4 \text{ kg/m}^3$  (1.5% del peso del cemento), una relación agua cemento de 0.25 y una dosis de  $25.25 \text{ cm}^3$  (3% del peso del cemento) de superplastificante por kilogramo de cemento.

**Cuadro 3.2:** Resumen de los diseños de mezcla finales

Mezcla	a/c	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Super-plastificante (kg)	Micro-silíce (kg)	Nano-silíce (kg)
CPO	0.40	828.24	730.65	---	---	---
CPA	0.25	908.68	801.61	16.80	---	---
SF10	0.25	872.91	770.06	16.80	56.00	---
SF15	0.25	855.02	754.28	16.80	84.00	---
SF20	0.25	837.14	738.51	16.80	112.00	---
NS1.0	0.25	901.52	795.30	16.80	---	5.60
NS1.5	0.25	897.95	792.15	16.80	---	8.40
NS2.0	0.25	894.37	788.99	16.80	---	11.20
M5.0N0.5	0.25	887.22	782.68	16.80	28.00	2.80
M7.5N1.0	0.25	874.70	771.64	16.80	42.00	5.60
M10.0N1.5	0.25	862.18	760.59	16.80	56.00	8.40



## CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS

### 4.1 Ensayos y resultados obtenidos

#### 4.1.1 Propiedades del concreto en estado fresco

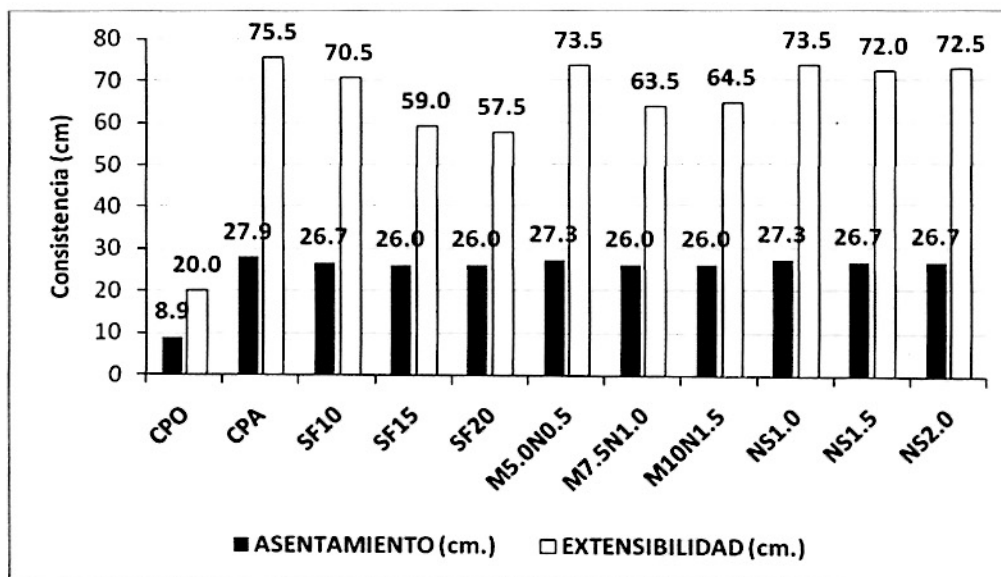
##### 4.1.1.1 Consistencia

Se determinó el asentamiento de las mezclas de concreto según la NTP 339.035, así como también la extensibilidad de las mezclas según la NTP 339.219. Los valores de consistencia de las mezclas de concreto se muestran en el cuadro 4.1 y gráfico 4.1.

Cuadro 4.1: Valores de consistencia

MEZCLA	Asentamiento (cm.)	Asentamiento (pulg.)	Extensibilidad (cm.)
CPO	8.8	3 1/2	20.0
CPA	27.9	11	75.5
SF10	26.6	10 1/2	70.5
SF15	26.0	10 1/4	59.0
SF20	26.0	10 1/4	57.5
NS1.0	27.3	10 3/4	73.5
NS1.5	26.6	10 1/2	72.0
NS2.0	26.6	10 1/2	72.5
M5.0N0.5	27.3	10 3/4	73.5
M7.5N1.0	26.0	10 1/4	63.5
M10N1.5	26.0	10 1/4	64.5

Gráfico 4.1: Asentamiento y extensibilidad de las mezclas de concreto





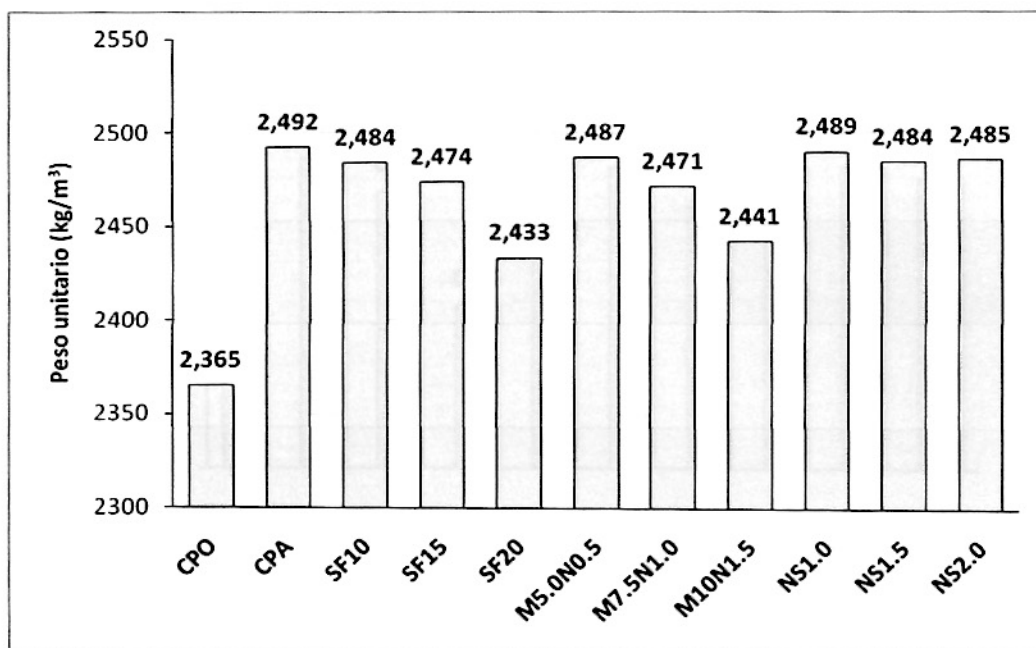
#### 4.1.1.2 Peso unitario

Se determinó el peso unitario de las mezclas de concreto según la NTP 339.046. Los valores del peso unitario varían entre 2365 y 2492 kg/m<sup>3</sup>, clasificándose como concretos de peso normal (1700 – 2500 kg/m<sup>3</sup>). Resultados del ensayo de peso unitario para los diferentes tipos de mezcla se encuentran en el cuadro 4.2 y Gráfico 4.2.

**Cuadro 4.2:** Valores de peso unitario para el concreto fresco

MEZCLA	PESO UNITARIO (kg/m <sup>3</sup> )
CPO	2365
CPA	2492
SF10	2483
SF15	2473
SF20	2432
M5.0N0.5	2486
M7.5N1.0	2470
M10N1.5	2441
NS1.0	2489
NS1.5	2483
NS2.0	2485

**Gráfico 4.2:** Peso unitario para cada tipo de mezcla de concreto



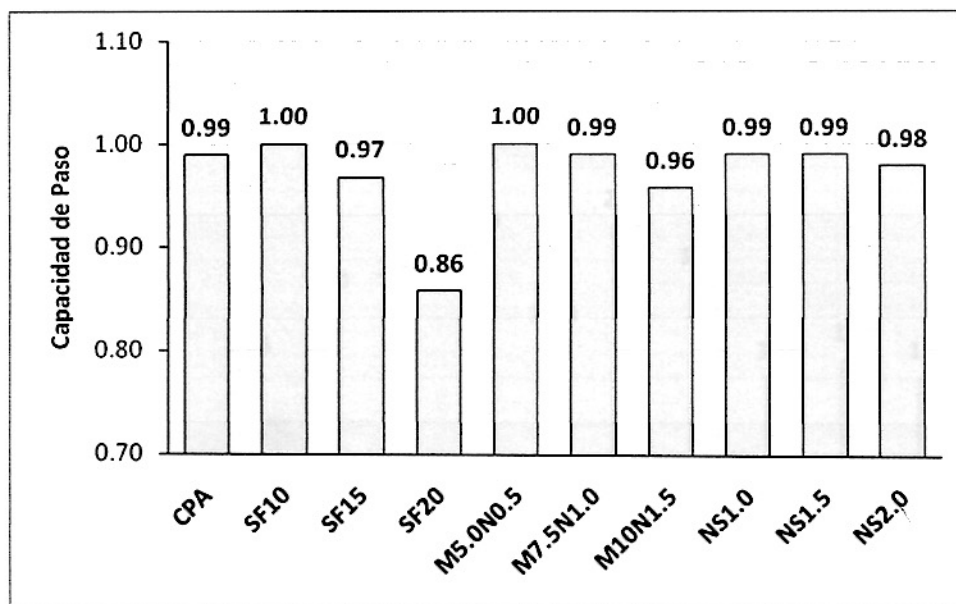
### 4.1.1.3 Capacidad de paso

La capacidad de paso describe la capacidad de la mezcla fresca de fluir a través de espacios confinados y aperturas estrechas así como zonas densamente armadas, sin segregación, pérdida de uniformidad o bloqueo. En la definición de la capacidad de paso, es necesario considerar la geometría y la densidad de las armaduras, el flujo-capacidad de relleno y el tamaño máximo de los agregados. El ensayo para determinar la capacidad de paso se realiza en la caja L, el procedimiento detallado se encuentra en el anexo B.

**Cuadro 4.3:** Valores de la capacidad paso, para cada tipo de mezcla de concreto

MEZCLA	h1 (mm)	h2 (mm)	Capacidad de paso h2/h1
CPA	91	90	0.99
SF10	89	89	1.00
SF15	92	89	0.97
SF20	98	84	0.86
M5.0N0.5	91	91	1.00
M7.5N1.0	92	91	0.99
M10N1.5	93	89	0.96
NS1.0	90	89	0.99
NS1.5	91	90	0.99
NS2.0	91	89	0.98

**Gráfico 4.3:** Capacidad de paso, para cada tipo de mezcla de concreto



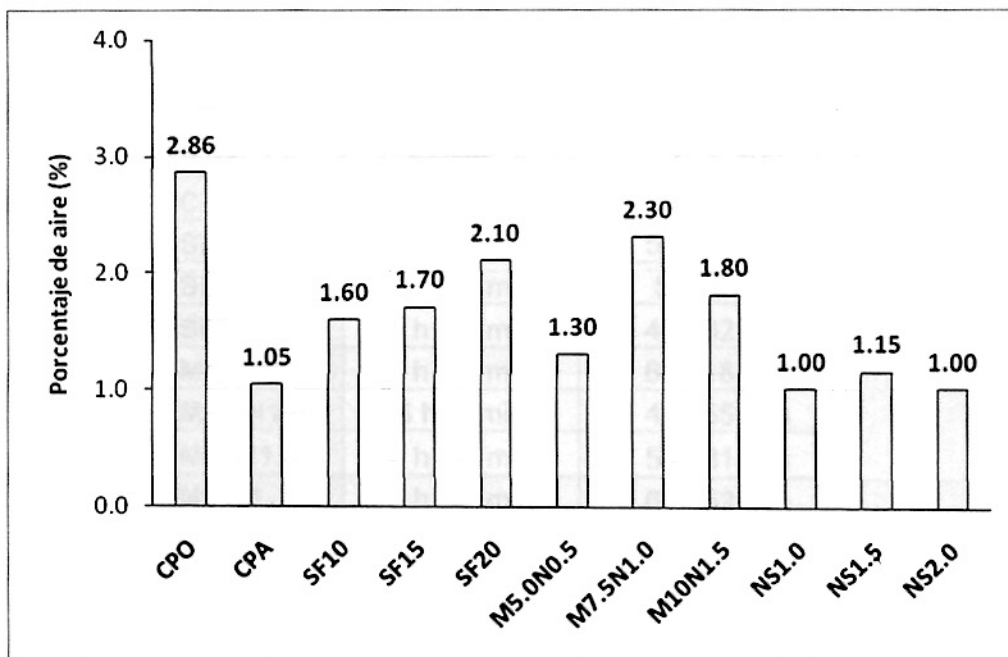
#### 4.1.1.4 Contenido de aire

Se determinó el contenido de aire de las mezclas de concreto según la NTP 339.083. Este ensayo determina el contenido de aire en mezclas de concreto fresco excluyendo el aire contenido dentro de los poros del agregado. Los valores del contenido de aire para los diferentes tipos de mezcla se encuentran en el cuadro 4.4 y grafica 4.4.

**Cuadro 4.4:** Valores de porcentaje de aire

MEZCLA	% DE AIRE
CPO	2.86
CPA	1.05
SF10	1.60
SF15	1.70
SF20	2.10
M5.0N0.5	1.30
M7.5N1.0	2.30
M10N1.5	1.80
NS1.0	1.00
NS1.5	1.15
NS2.0	1.00

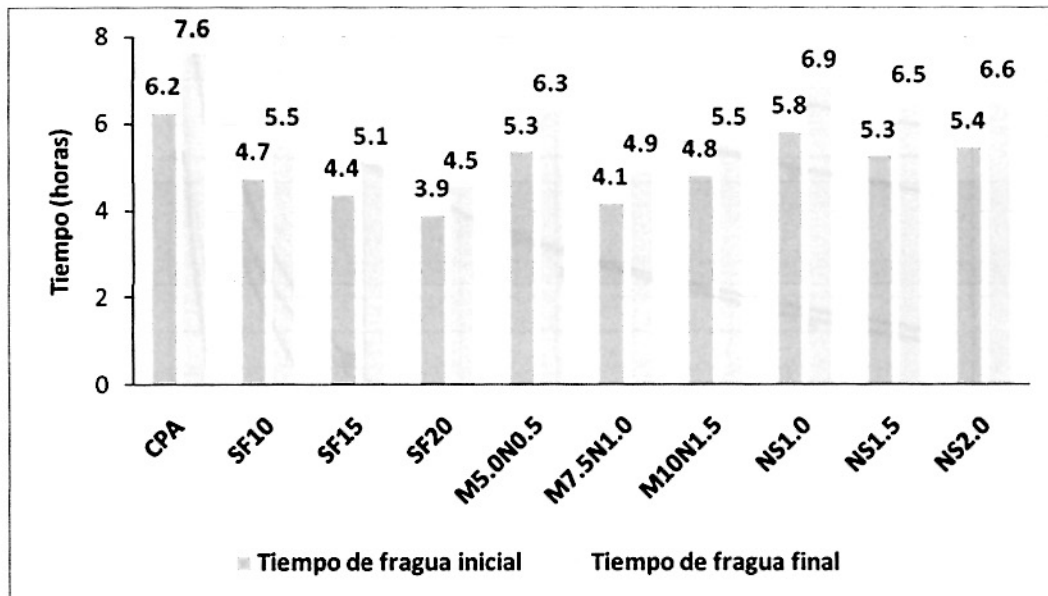
**Gráfico 4.4:** Contenido de aire, para cada mezcla de concreto



#### 4.1.1.5 Tiempo de fraguado

Las reacciones entre el cemento y el agua son la causa principal del fraguado del concreto. La fragua inicial y final del concreto indican la velocidad de solidificación de la mezcla fresca en el sistema agua-cemento. El tiempo de fragua inicial y final del concreto está definido arbitrariamente mediante un método de ensayo denominado *método de resistencia a la penetración* (NTP 339.082). Los valores de fragua del concreto en estado fresco se determinaron según la NTP 339.082 y se muestran en el Cuadro 4.5, Gráfico 4.5 y 4.6.

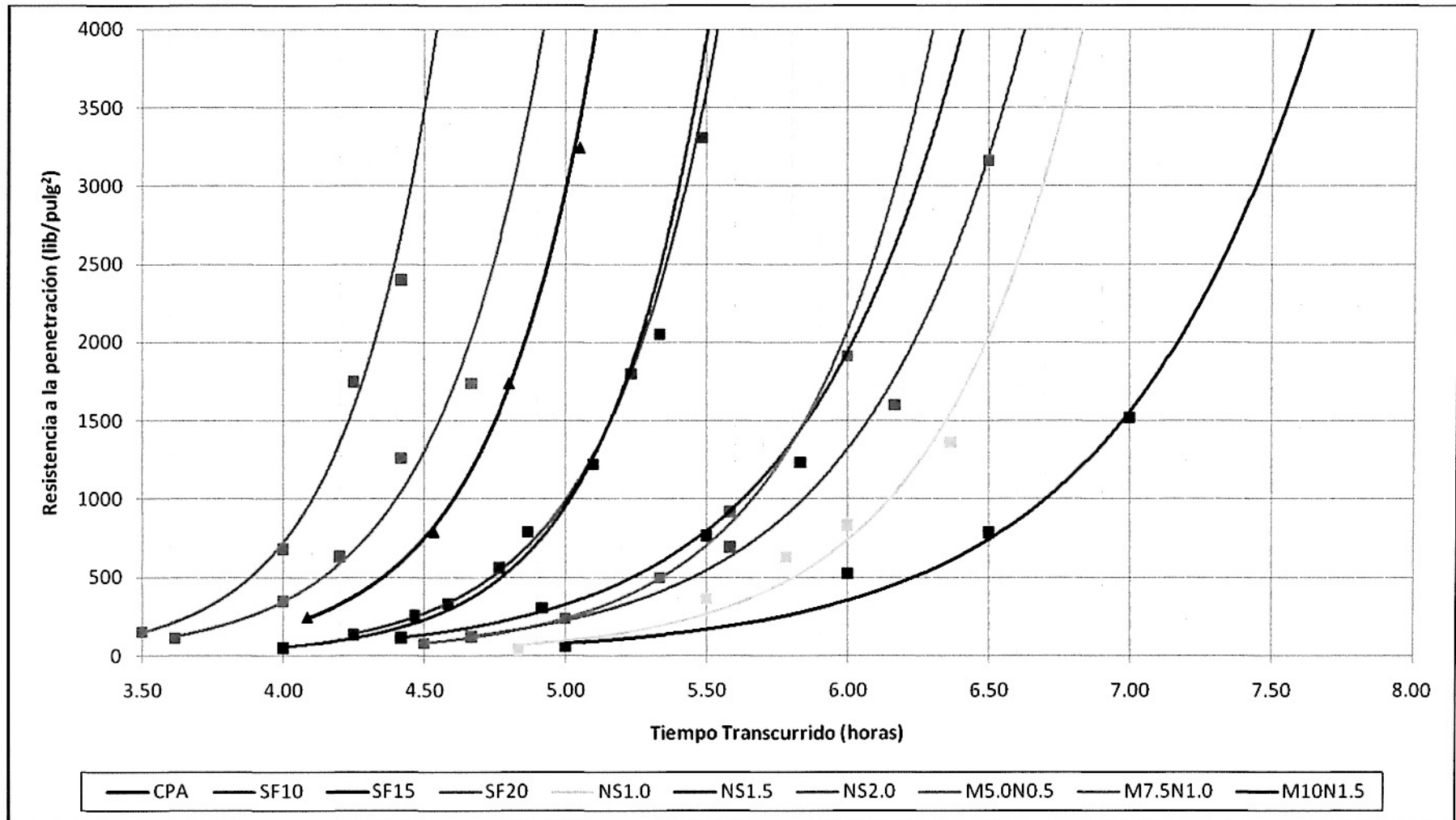
**Gráfico 4.5:** Tiempos de fragua inicial y final para los diferentes tipos de mezcla



**Cuadro 4.5:** Resumen de tiempos de fragua inicial y final

MEZCLA	T. F. INICIAL	T. F. FINAL
CPA	6 h 14 min	7 h 38 min
SF10	4 h 43 min	5 h 32 min
SF15	4 h 21 min	5 h 6 min
SF20	3 h 53 min	4 h 32 min
M5.0N0.5	5 h 20 min	6 h 18 min
M7.5N1.0	4 h 8 min	4 h 55 min
M10N1.5	4 h 47 min	5 h 31 min
NS1.0	5 h 47 min	6 h 52 min
NS1.5	5 h 15 min	6 h 29 min
NS2.0	5 h 26 min	6 h 37 min

**Gráfico 4.6:** Curvas de fragua para los diferentes tipos de mezcla



## 4.1.2 Propiedades del concreto en estado endurecido

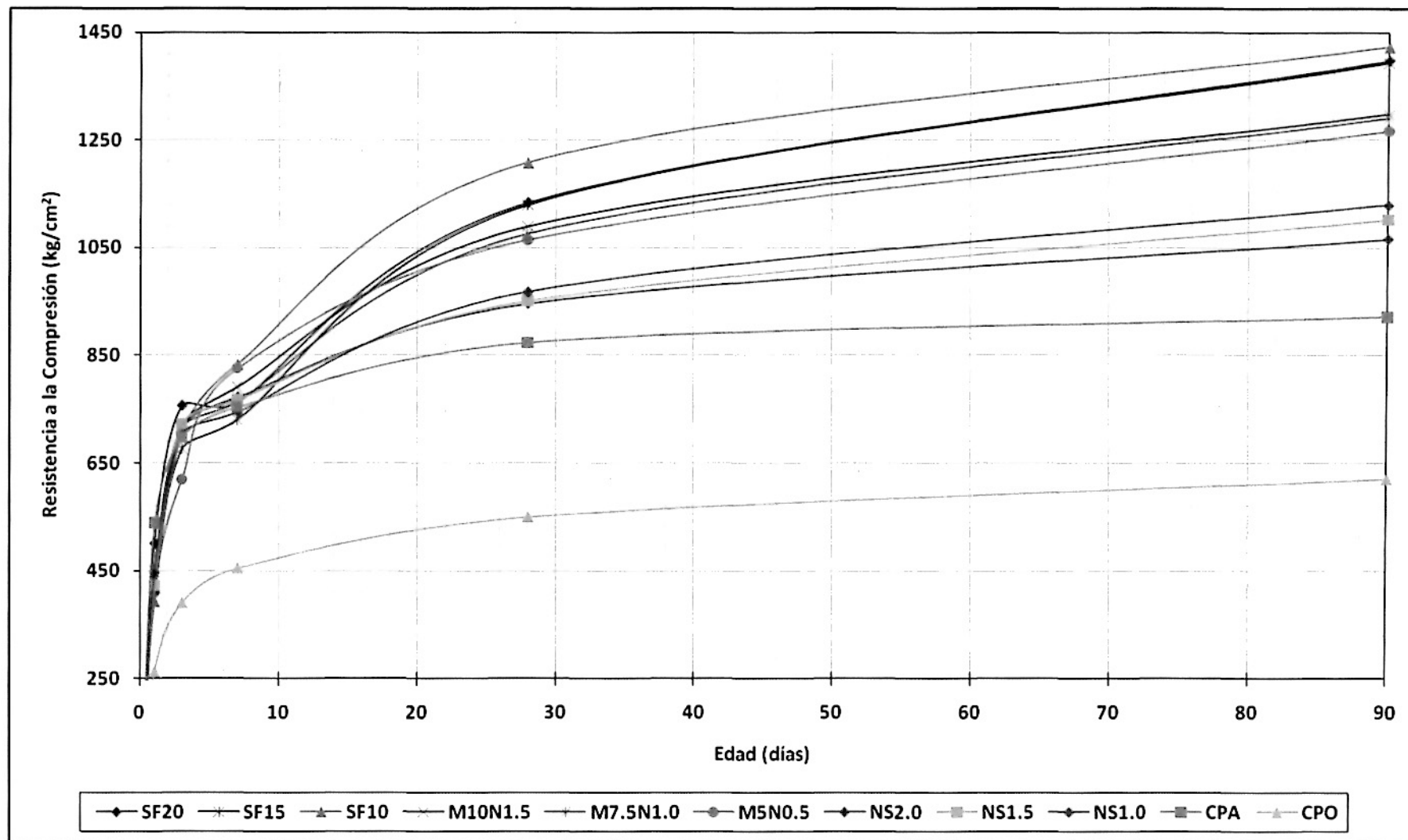
### 4.1.2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es la mediana más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. En la mayoría de los casos los requerimientos de resistencia a la compresión se alcanzan a los 28 días y en el caso de los concretos de alta resistencia a la edad de los 90 días o posterior. La resistencia a la compresión del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir su fractura entre el área promedio de su sección transversal. Los ensayos a compresión se realizaron en especímenes cilíndricos de 4x8 pulgadas (100x200 mm) curados bajo agua y se ensayaron a las edades de 1, 3, 7, 28 y 90 días. Para los ensayos se usaron pads de neopreno. Los resultados de los ensayos a compresión se muestran en el Cuadro 4.6 y Gráfico 4.7.

**Cuadro 4.6:** Valores de resistencia a la compresión según edad

MEZCLA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )				
	EDAD (días)				
	1	3	7	28	90
CPO	262	390	455	550	621
CPA	539	698	754	874	922
SF20	501	757	764	1134	1398
SF15	419	676	731	1129	1393
SF10	393	704	833	1208	1423
M10N1.5	448	719	791	1089	1298
M7.5N1.0	448	715	764	1076	1291
M5N0.5	409	620	826	1065	1267
NS2.0	410	712	772	946	1066
NS1.5	423	722	768	952	1103
NS1.0	445	702	744	968	1130

Gráfico 4.7: Resistencia a la compresión para diferentes diseños de mezcla



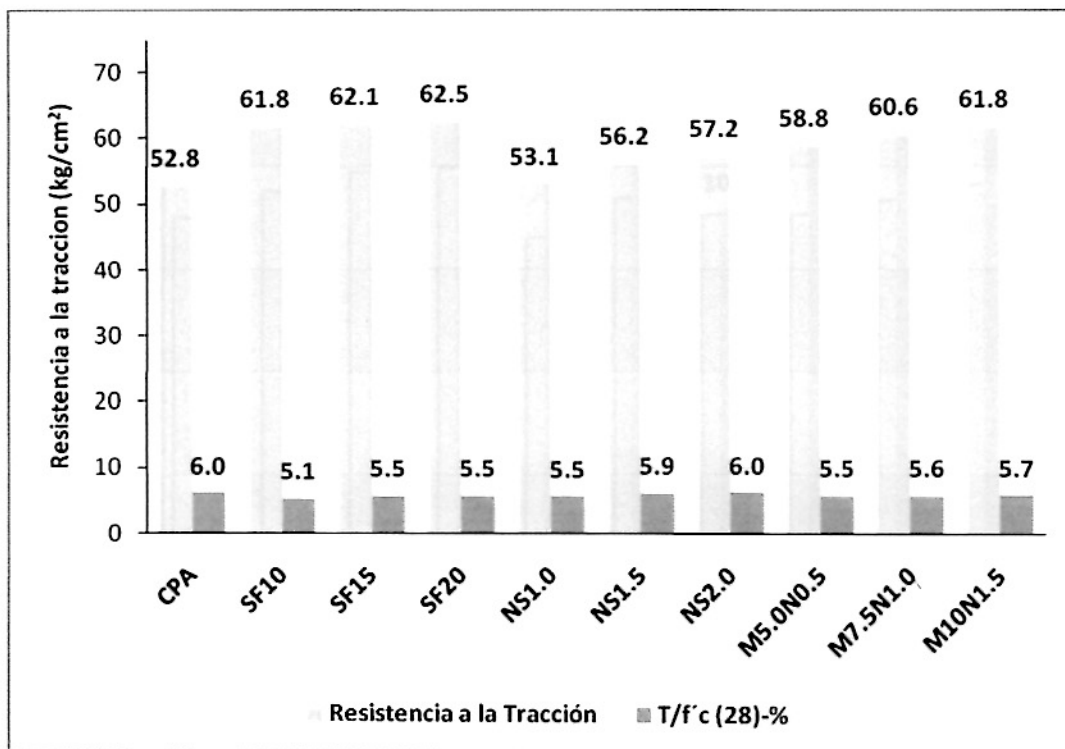
#### 4.1.2.2 Resistencia a la Tracción por compresión diametral

La resistencia a la compresión se midió indirectamente a través de la compresión diametral de especímenes cilíndricos de 6"x12" y fueron ensayados a los 28 días de edad. Los valores de tracción en kg/cm<sup>2</sup> se muestran en el Cuadro 4.7 y en el Gráfico 4.10.

**Cuadro 4.7:** Valores de Tracción por compresión diametral

MEZCLA	T-28 días	T/f'c (28)-%
CPA	52.83	6.04
SF10	61.78	5.11
SF15	62.13	5.50
SF20	62.53	5.51
NS1.0	53.10	5.49
NS1.5	56.19	5.90
NS2.0	57.23	6.05
M5.0N0.5	58.78	5.52
M7.5N1.0	60.59	5.63
M10N1.5	61.84	5.68

**Gráfico 4.8:** Resistencia a la tracción por compresión diametral





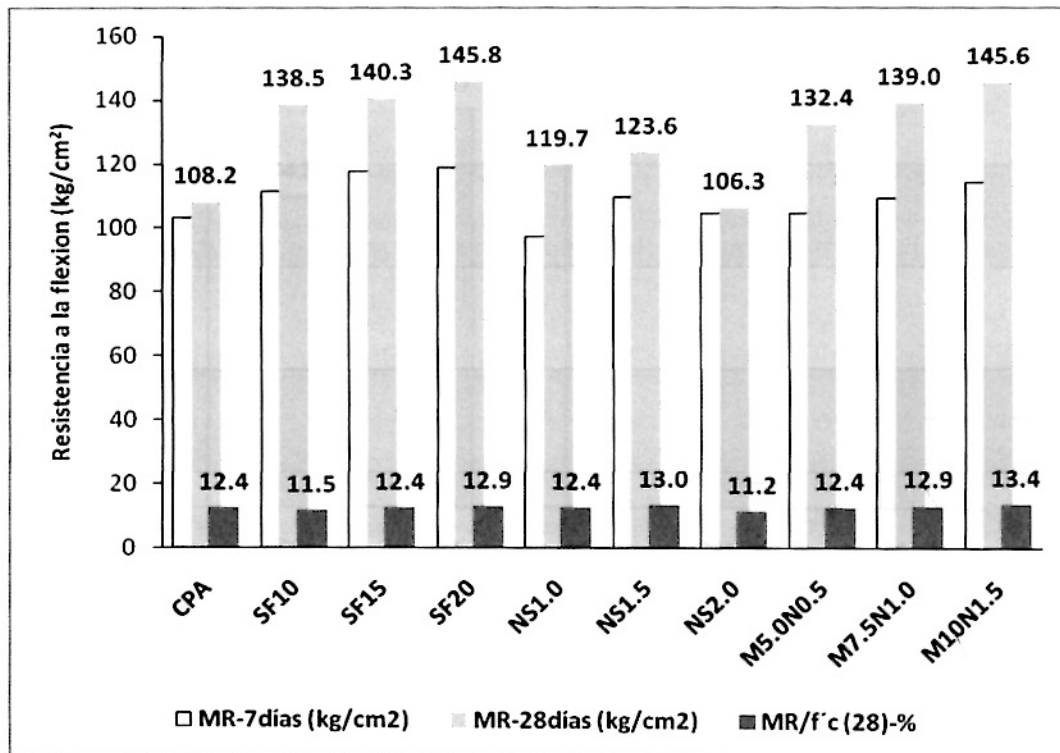
### 4.1.2.3 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión se midió a través del módulo de rotura de especímenes prismáticos de sección cuadrada de 10 cm de lado y 50 cm de largo, la aplicación de la carga se realizó a los tercios de la luz, se ensayaron a las edades de 7 y 28 días. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.8 y Gráfico 4.11.

**Cuadro 4.8:** Valores de modulo de rotura para las edades de 7 y 28 días

MEZCLA	MR-7 días	MR-28 días	MR/f'c (28)-%
CPA	103.10	108.20	12.38
SF10	111.20	138.50	11.47
SF15	117.60	140.30	12.43
SF20	118.80	145.80	12.86
NS1.0	97.10	119.70	12.37
NS1.5	109.50	123.60	12.98
NS2.0	104.50	106.30	11.24
M5.0N0.5	104.40	132.40	12.43
M7.5N1.0	109.20	139.00	12.92
M10N1.5	114.00	145.60	13.37

**Gráfico 4.9:** Módulo de rotura para las edades de 7 y 28 días



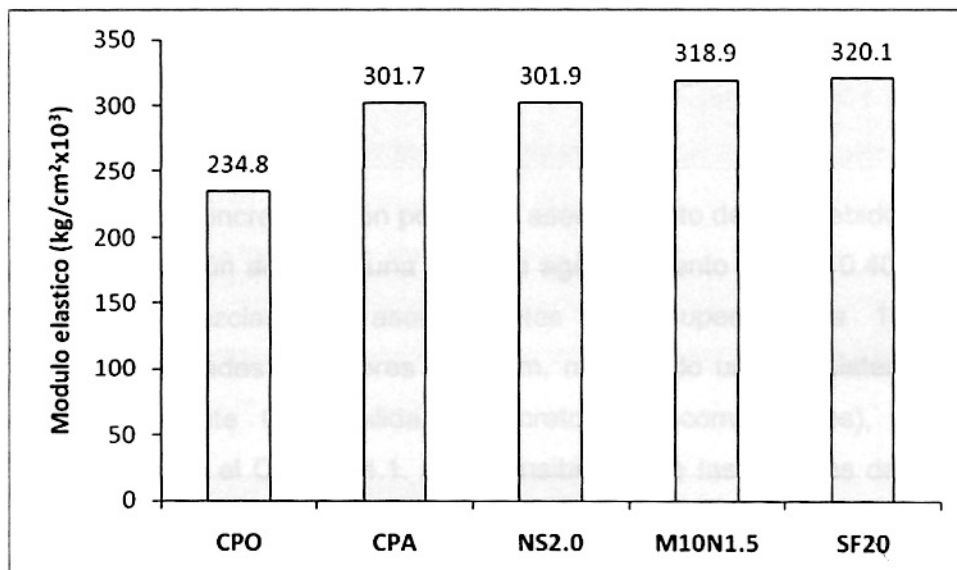
#### 4.1.2.4 Módulo Elástico

El módulo elástico fue determinado a la edad de 56 días, el ensayo fue realizado según la Norma ASTM C-469 en especímenes cilíndricos de 6"x12". Las mezclas ensayadas fueron la CPA, SF20, M10N1.5, CPO y NS2.0. Los resultados de los ensayos de Módulo Elástico se muestran en el Cuadro 4.9

**Cuadro 4.9:** Valores del módulo elástico para cada tipo de mezcla

MEZCLA	E (kg/cm <sup>2</sup> )
CPO	234803
CPA	301651
NS2.0	301861
M10N1.5	318863
SF20	320053

**Gráfico 4.10:** Módulo de elasticidad



## 4.2 Interpretación de Resultados

### 4.2.1 Generalidades

Los resultados obtenidos a nivel general son muy alentadores, ya que por primera vez se han utilizado agregados de tamaño máximo nominal de 3/8", también el uso de un aditivo superplastificante de tercera generación, el Viscocrete 20HE y adiciones minerales como la microsilíce y nanosilíce que han hecho posible producir concretos autocompactados y de alta resistencia. Todas estas propiedades nos acercan a un concreto de alta performance.

### 4.2.2 Agregados

El agregado fino proveniente de la cantera Jicamarca cumple la norma ASTM su porcentaje de finos es menor al 10% como se muestra en el Cuadro 2.9. El agregado grueso cumple el huso granulométrico 89 de la NTP 400.037 como se muestra en el Gráfico 2.2. El agregado fino también cumple los requerimientos de la NTP 400.037 como se muestra en el Gráfico 2.1, posee un módulo de finura igual a 3.04, valor mostrado en el Cuadro 2.9, según el ACI 363R un valor de módulo de finura para el agregado fino alrededor de 3 y un tamaño máximo del agregado grueso de 1/2", garantizan la obtención de un concreto de alta resistencia.

### 4.2.3 Propiedades del concreto en estado fresco

#### 4.2.3.1 Consistencia

El concreto patrón posee un asentamiento de 3.5" debido a que no posee ningún aditivo y una relación agua-cemento igual a 0.40, para las demás mezclas los asentamientos son superiores a 10" y las extensibilidades superiores a 56 cm, mostrando una consistencia fluida de excelente trabajabilidad (concretos autocompactados), como se muestra en el Cuadro 4.1. La extensibilidad de las mezclas de concreto con adición de microsilíce varía inversamente a la cantidad de microsilíce adicionada en un rango de 57.5 cm a 70.5 cm, en el caso de los concretos con adición de nanosilíce la consistencia no presenta variaciones significativas encontrándose extensibilidades entre 72.0 y 73.5 cm como se muestra en el Cuadro 4.1. La adición de nanosilíce a la

mezcla de concreto mayor cohesión, aumentando su resistencia a la segregación.

#### **4.2.3.2 Peso unitario**

Las mezclas de concreto con adición de microsilíce y/o nanosilíce poseen un peso unitario superior al concreto patrón en todos los casos. El peso unitario de los concretos con adición de microsilíce varía inversamente a la cantidad de microsilíce adicionada como se muestra en el Gráfico 4.2.

#### **4.2.3.3 Capacidad de paso**

Los concretos investigados presentan valores de 0.86 a 1.0 (excepto el concreto patrón), por lo anterior los concretos preparados con el aditivo superplastificante Sika Viscocrete 20HE son concretos autocompactados. Esta capacidad disminuye en función del porcentaje de adición de microsilíce. Los concretos preparados con adición nanosilíce presentan mayor capacidad de paso que los concretos preparados con adición de microsilíce, como se aprecia en el Gráfico 4.3.

#### **4.2.3.4 Contenido de aire**

Los concretos investigados presentan valores de 1.00 a 2.30 (excepto el concreto patrón que tiene un valor de 2.86), lo que concuerda con el ACI 211 para agregados de TMN igual a 3/8" un contenido de 3% de aire. Esto indica que los concretos preparados con superplastificante, microsilíce y nanosilíce hacen del concreto más compacto por lo que se aprecia un menor contenido de aire atrapado. Los valores de contenido de aire aparecen en el Gráfico 4.4.

#### **4.2.3.5 Tiempo de fraguado**

Los tiempos de fraguado inicial y final de los concretos con adición de microsilíce disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de adición de la misma. En el caso de los concretos preparados con adición

de nanosílice los tiempos de fraguado no presentan mayores diferencias entre sí, tal como se aprecia en el Gráfico 4.5.

#### **4.2.4 Propiedades del concreto en estado endurecido**

##### **4.2.4.1 Resistencia a la compresión**

Las mezclas con microsílice y nanosílice presentan resistencias a la compresión superiores a las mezclas de concreto que tiene superplastificante (CPA), la resistencia a la compresión de las mezclas con nanosílice disminuyen en función del incremento de su dosis. La máxima resistencia a la compresión es de 1423 kg/cm<sup>2</sup> a la edad de 90 días, se obtuvo con la adición de microsílice al 10% en peso del cemento, la ganancia de resistencia de este tipo de concreto es muy importante ya que a las 24 horas alcanza los 400 kg/cm<sup>2</sup>, a los 3 días alcanza los 700 kg/cm<sup>2</sup>, a los 7 días alcanza los 830 kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días llega a los 1200 kg/cm<sup>2</sup>, tal como se muestra en el Cuadro 4.6.

##### **4.2.4.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral**

La resistencia a la tracción por compresión diametral se ve incrementada en función del incremento de porcentaje de nanosílice, del mismo modo para con los concretos preparados con microsílice. La mezcla SF20 (20% de microsílice) muestra un 18.4% de incremento con respecto a la mezcla CPA, la mezcla NS2.0 (2% de nanosílice) tiene un incremento de 8.3% con respecto a la mezcla CPA y la mezcla M10N1.5 (10% de microsílice más 1.5% de nanosílice) presenta un incremento de 17.1% con respecto a la mezcla CPA. Estos resultados se muestran en el Gráfico 4.8.

##### **4.2.4.3 Resistencia a la flexión**

Las mezclas SF20 y M10N1.5 tienen un incremento de 35% con respecto a la mezcla CPA, ambas mezclas presentan similar módulo de rotura a la edad de 28 días, la dosis óptima de nanosílice es de 1.5% en peso del cemento ya que a una dosis de 2.0% el módulo de rotura disminuye, como se puede apreciar en el Cuadro 4.8.

#### 4.2.4.4 Módulo Elástico

Para el caso del concreto con aditivo superplastificante (CPA) este muestra un incremento significativo del 28% con respecto al concreto patrón (CPO), el concreto con nanosílice (NS2.0) presenta valor de modulo elástico muy similar al concreto con aditivo superplastificante (CPA). Mientras que el concreto con microsílice (SF20) obtiene el valor más alto de modulo elástico (36% mayor que el concreto patrón), cuyo valor difiere en tan solo 1% con respecto al concreto elaborado usando microsílice y nanosílice (M10N1.5), tal como se muestra en el Cuadro 4.9. Estructuralmente un modulo elástico elevado significa que para un mismo nivel de cargas la deformación es menor en aquel que posee mayor modulo elástico. Considerando una viga simplemente apoyada la flechas producidas por iguales cargas son inversamente proporcionales a los módulos elásticos, por ejemplo la mezcla CPO posee un  $E=234803 \text{ kg/cm}^2$  y la mezcla SF20 posee un  $E=320053 \text{ kg/cm}^2$  entonces si la viga preparada con CPO se deforma 10 mm, la viga preparada con SF20 se deformará 7.3 mm.

#### 4.3 Análisis de costos

El análisis de los diseños de mezcla, se realizó para  $1 \text{ m}^3$  de concreto, teniendo en cuenta el costo de insumos sin IGV, teniendo en cuenta los siguientes materiales empleados para cada diseño de mezcla:

- Agregado fino de la cantera "Jicamarca"
- Agregado grueso de la cantera "La Gloria"
- Cemento Sol tipo I
- Aditivo superplastificante: Sika Viscocrete 20HE
- Microsílice: Sika fume
- Nanosílice: Sika stabilizer 100

El análisis de los diseños de mezcla, se realizó para  $1 \text{ m}^3$  de concreto, teniendo en cuenta el costo de insumos sin IGV.

**Cuadro 4.10: Costo del concreto patrón**

Descripción	Und.	Cantidad	P. U. (S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
AGUA POTABLE	M3	0.22	5.52	1.24
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>227.21</b>

**Cuadro 4.11: Costo del concreto con aditivo**

Descripción	Und.	Cantidad	P. U. (S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.07	3,467.20	229.47
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>456.21</b>

**Cuadro 4.12: Costo del concreto con aditivo más 10% de microsilíce**

Descripción	Und.	Cantidad	P. U. (S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	2.80	102.86	288.01
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>779.52</b>

**Cuadro 4.13: Costo del concreto con aditivo más 15% de microsilíce**

Descripción	Und.	Cantidad	P. U. (S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	4.20	102.86	432.01
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>923.53</b>

**Cuadro 4.14:** Costo del concreto con aditivo más 20% de microsílíce

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	5.60	102.86	576.02
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>1,067.53</b>

**Cuadro 4.15:** Costo del concreto con aditivo más 1% de nanosílíce

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
NANOSÍLICE	KG	5.60	8.55	47.88
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>539.40</b>

**Cuadro 4.16:** Costo del concreto con aditivo más 1.5% de nanosílíce

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
NANOSÍLICE	KG	8.40	8.55	71.82
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>563.34</b>



**Cuadro 4.17:** Costo del concreto con aditivo más 2% de nanosílice

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
NANOSÍLICE	KG	11.20	8.55	95.76
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>587.28</b>

**Cuadro 4.18:** Costo del concreto con aditivo más 5% de microsíllice/0.5% de nanosílice

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	1.40	102.86	144.00
NANOSÍLICE	KG	2.80	8.55	23.94
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>659.46</b>

**Cuadro 4.19:** Costo del concreto con aditivo más 7.5% de microsíllice/1% de nanosílice

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	2.10	102.86	216.01
NANOSÍLICE	KG	5.60	8.55	47.88
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>755.40</b>

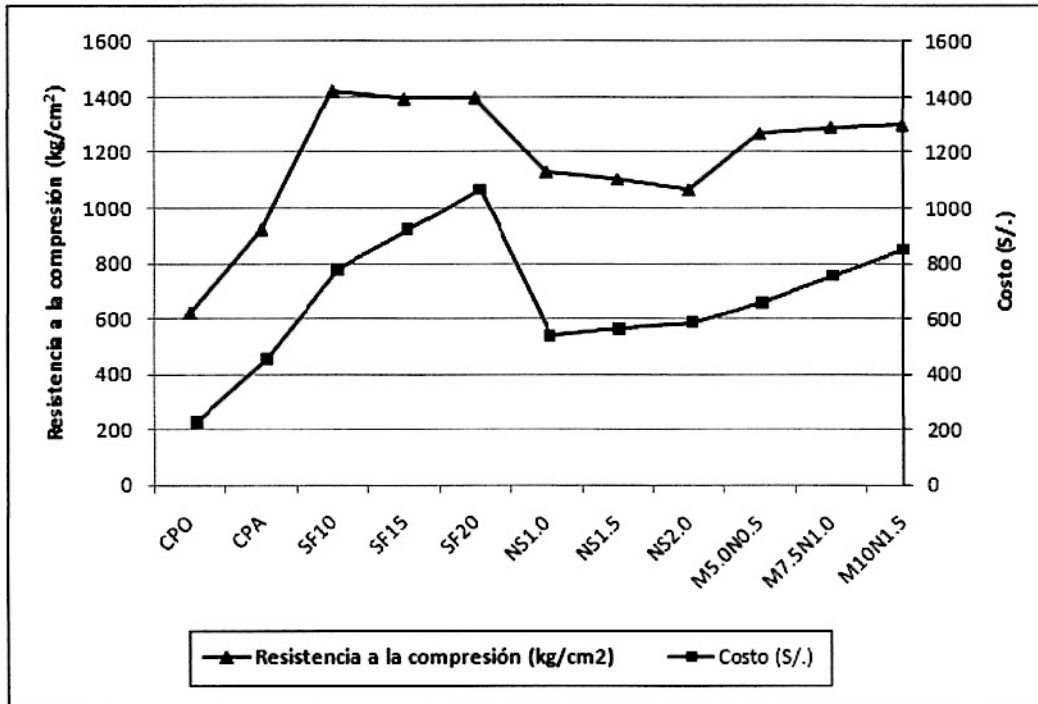
**Cuadro 4.20:** Costo del concreto con aditivo más 10% de microsíllice/1.5% de nanosíllice

Descripción	Und.	Cantidad	P. U.(S/.)	Parcial
CEMENTO	BLS	13.18	13.80	181.84
MICROSÍLICE	BLS	2.80	102.86	288.01
NANOSÍLICE	KG	8.40	8.55	71.82
AGUA POTABLE	M3	0.14	5.52	0.77
ARENA	M3	0.52	42.98	22.49
PIEDRA CHANCADA HUSO 89	M3	0.49	43.98	21.65
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	CIL	0.08	3,467.20	264.77
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>851.34</b>

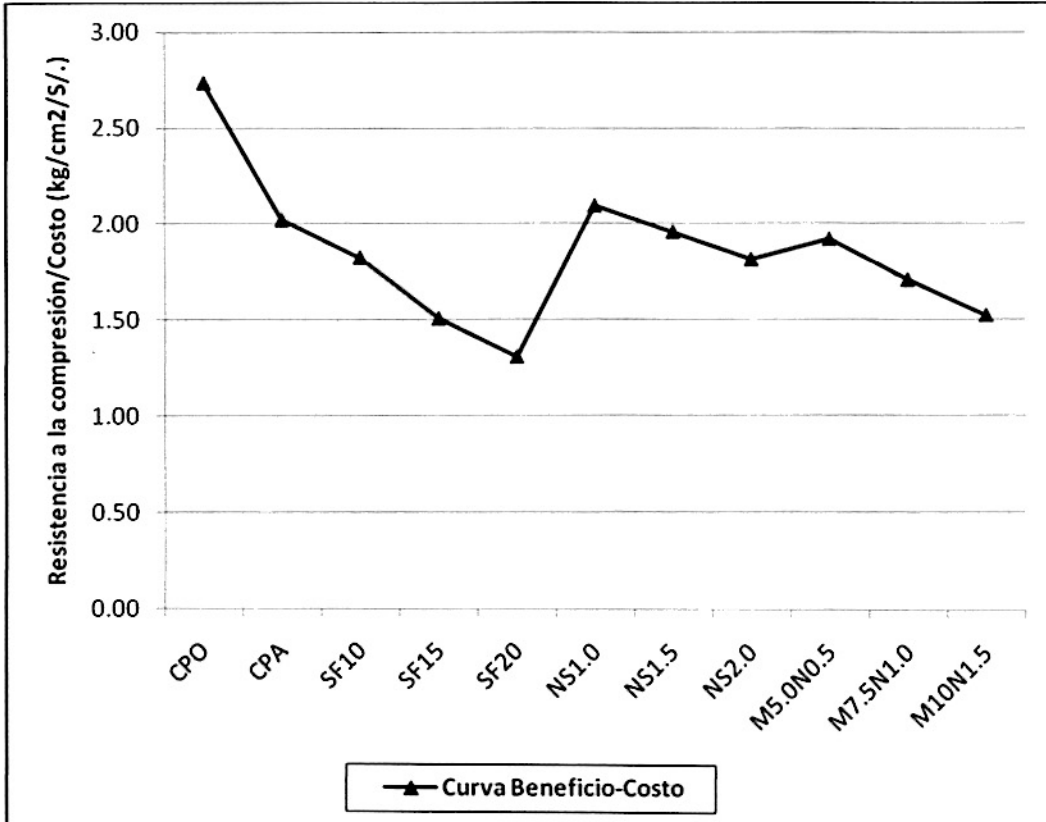
**Cuadro 4.21:** Comparación de costos del concreto

MEZCLA	COSTO (S/.)	f <sub>c</sub> (90) kg/cm <sup>2</sup>	(kg/cm <sup>2</sup> )/S/.
CPO	227.21	621	2.73
CPA	456.21	922	2.02
SF10	779.52	1423	1.83
SF15	923.53	1393	1.51
SF20	1067.53	1398	1.31
NS1.0	539.4	1130	2.09
NS1.5	563.34	1103	1.96
NS2.0	587.28	1066	1.82
M5.0N0.5	659.46	1267	1.92
M7.5N1.0	755.4	1291	1.71
M10N1.5	851.34	1298	1.52

**Gráfico 4.11** Costo y Resistencia a la compresión a la edad de 90 días, para concretos de alta resistencia



**Gráfico 4.12** Beneficio-costo para concretos de alta resistencia obtenidos



## CONCLUSIONES

- Se ha logrado obtener un concreto de alta resistencia a la compresión, con un valor de  $1423 \text{ kg/cm}^2$  a la edad de los 90 días y que además tiene la propiedad de ser un concreto autocompactado.
- La dosis óptima de microsilíce encontrada es de 10% con la cual se obtiene la máxima resistencia a la compresión de  $1420 \text{ kg/cm}^2$ , para el caso de la nanosilíce es 1% ( $968 \text{ kg/cm}^2$ ) y para el caso de la combinación de microsilíce y nanosilíce es de 5% de microsilíce más 0.5% de nanosilíce ( $1065 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Los concretos con adiciones de microsilíce (10, 15, 20%) reportan resistencias a la compresión superiores a los concretos con adición de nanosilíce (1.0, 1.5 y 2.0%), sin embargo la adición de nanosilíce incrementa también la resistencia a la compresión del concreto pero no en la misma magnitud que la microsilíce, su ventaja es su estado líquido y también su uso en bajas dosis (menor al 1%).
- La nanosilíce mejora las características tanto en estado fresco como endurecido del concreto en comparación al patrón, esto es beneficioso ya que al encontrarse en estado líquido su impacto ambiental es nulo.
- Todos los materiales usados como los agregados, cemento, aditivos y agua son convencionales, es decir se encuentran en la zona lo que le da mayor aplicabilidad a estos concretos de alta resistencia.
- El aditivo superplastificante en una dosis del 3.0 % en peso del cemento reduce la cantidad de agua en más del 40%.
- En cuanto al beneficio (resistencia a la compresión) - costo el uso de la nanosilíce en 1% es más beneficioso que el uso de microsilíce al 10%, sin embargo la más alta resistencia es obtenido con el 10% de microsilíce ( $1423 \text{ kg/cm}^2$  a la edad de 90 días).

## RECOMENDACIONES

- La elaboración de estos tipos de concretos debe ser estrictamente controlada tanto en la temperatura del ambiente y la humedad relativa, además de las temperaturas de todos los materiales utilizados.
- Mantener el curado bajo agua a una misma temperatura hasta la fecha de ensayo, los concretos de alta resistencia son muy susceptibles a los cambios de temperatura.
- Realizar investigaciones con reemplazo de microsílíce y nanosílíce. En el caso de la microsílíce con porcentajes de reemplazo menores al 10% y para el caso de la nanosílíce menores al 1%.
- Tener en cuenta el acabado superficial de los especímenes cilíndricos a ser ensayados, investigar a cerca de diferentes tipos de capping.
- Investigar el comportamiento de concretos de alta resistencia utilizando aditivos retardantes.
- Investigar la performance de los concretos de alta resistencia elaborados con polvo de cuarzo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Michael A. Caldarone  
"High-Strength Concrete: A Practical Guide"  
Taylor y Francis  
New York - 2009
2. Collepardi; M., Ogoumah Olagot; J. J., Troli; R., Simonelli; F., Collepardi; F.  
"Combination Silica Fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes"  
Enco Engineering Concrete  
Italia - 2004
3. Malhotra; V. M., Head, and Carrette; G. G.  
"Materials Engineer and Construction Materials", Department of Energy,  
Mines and Resources,  
Canada - 1982
4. Holland Terence C.  
"Silica Fume User's Manual"  
Silica Fume Association  
EE. UU. - 2005
5. E. Lino Vargas Calle  
"Incorporación del Aditivo Micro-Silice F-100T Dry Emsac y el Superplastificante PSP-N2 Protex Para la Obtención de Concretos de Alta Resistencia"  
Tesis de grado FIC Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima - 1995
6. Patricia Vilca Aranda  
"Obtención del Concreto de Alta Resistencia"  
Tesis de grado FIC Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima - 2008
7. Enrique Rivva López  
"Concreto de Alta Resistencia"  
ICG  
Lima - 2004
8. Wan Jo, Chang Hyun Kim, and Jae Hoon Lim  
"Investigations on the Development of Powder Concrete with Nano-SiO<sub>2</sub> Particles"  
KSCE Journal of Civil Engineering  
EE.UU. - 2007