



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo  
Integral Regional, Unidad Oaxaca**

---

---

**Maestría en Ciencias en Conservación y  
Aprovechamiento de Recursos Naturales**

**Especialidad en Ingeniería**

**Pérdida de ductilidad por corrosión del acero de refuerzo  
embebido en HPC agrietado que contiene CNI**

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de:**

**Maestro en Ciencias**

**Presenta:**

**Gladis Fabiola Gómez Luna**

**Directores:**

**Dr. Pedro Montes García (CIIDIR OAXACA)**

**Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel (UANL)**

**Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. Junio 2019**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 14:00 horas del día 30 del mes de abril de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:

**Pérdida de ductilidad por corrosión del acero de refuerzo embebido en HPC agrietado que contiene CNI**

Presentada por el alumno:

GÓMEZ  
Apellido paterno  
Nombre(s) GLADIS FABIOLA

LUNA  
Apellido materno

Con registro: 

A	1	7	0	3	5	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:


Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

~~Dr. Pedro Montes García~~

  
Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

~~Dr. Juan Rodríguez Ramírez~~

  
Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

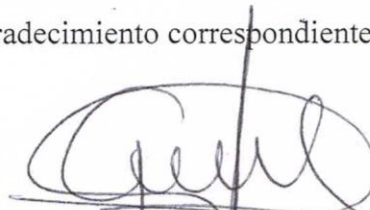


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca el día 13 del mes de mayo del año 2019, el (la) que suscribe **Gómez Luna Gladis Fabiola** alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales con número de registro A170359, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Dres. Pedro Montes García y Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel y cede los derechos del trabajo intitulado **Pérdida de ductilidad por corrosión del acero de refuerzo embebido en HPC agrietado que contiene CNI**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [gladhizgolu@gmail.com](mailto:gladhizgolu@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Gladis Fabiola Gómez Luna  
Nombre y firma



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## Agradecimientos

Agradezco a las siguientes instituciones y a las siguientes personas ya que sin ellos no hubiera sido posible este proyecto:

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR OAXACA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), por darme la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de manutención que me fue otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP), por el financiamiento de los siguientes proyectos de investigación:

- Efecto de la corrosión en las propiedades de tensión de acero embebido en concreto de altas prestaciones agrietado que contiene inhibidor a base de nitrito de calcio. No. SIP:20170716
- Efecto del ICBNC en la corrosión del concreto reforzado de altas prestaciones agrietado. No. SIP:20180032

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de New Brunswick Canadá por el préstamo del equipo para hacer las pruebas de tensión de las varillas.

A mis directores de tesis:

Dr. Pedro Montes García por su apoyo, su paciencia, sus enseñanzas y dedicación a la presente tesis, pero sobre todo por su amistad.

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel por las revisiones y las valiosas aportaciones a la presente tesis.

A los Dres. Juan Rodríguez Ramírez y Víctor Guillermo Jiménez Quero y al M.C. Frank Manuel León Martínez por sus revisiones y observaciones a la presente tesis.

Al Dr. Pedro Montes García por la elaboración de los especímenes, y el monitoreo de la corrosión del acero de refuerzo.

Al Dr. Herwing López Calvo por el monitoreo de la corrosión del acero de refuerzo.

Al Dr. Pedro Montes, al postdoctorante Edward Mofatt y al estudiante de maestría Andrew Fahim por su apoyo en la ejecución de las pruebas de tensión.

A mis compañeros de equipo de trabajo les agradezco sus enseñanzas, su amistad, su apoyo y su confianza brindada:

Doctorante Víctor Lujan

Dr. Marco Maldonado

Tesistas de licenciatura Pablo Mandarín y Emanuel Miguel

A mis amigos Erika, Estefanía, Diana, Emmanuel, Miguel, Edwin, Daniel y Héctor por su amistad y su apoyo en toda la maestría.

A mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.

A Helena por motivarme todos los días.

**A Helena**

## Resumen

En la presente tesis se analiza la pérdida de ductilidad ( $\mu$ ) de acero de refuerzo causada por el fenómeno de la corrosión en especímenes embebidos en concreto de alto desempeño. Para tal fin se diseñó un experimento factorial  $3^4$  donde las variables independientes fueron el ancho de grieta (AG), el contenido de un inhibidor a base de nitrito de calcio (CNI), el contenido de ceniza volante (CV) y la relación agua-cemento del concreto (a/c), en tres niveles cada una. Los especímenes fueron expuestos durante nueve años a un ambiente marino natural, y se monitoreó anualmente la densidad de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) del acero de refuerzo mediante el método de resistencia a la polarización lineal. Al concluir el periodo de exposición se extrajeron las varillas de refuerzo y ensayaron a tensión en una máquina universal. Con los datos obtenidos se elaboraron diagramas esfuerzo-deformación, y de ellos se estimaron las siguientes propiedades: módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, deformación de fluencia, elongación, tenacidad y  $\mu$  de las varillas. En seguida se evaluó la influencia de las variables en las propiedades de tensión obtenidas, encontrando diferencias significativas principalmente entre las varillas embebidas en especímenes sin grietas comparadas con aquellas embebidas en especímenes agrietados. Además, la pérdida de las propiedades a tensión fue mayor en las deformaciones que en los esfuerzos. En especímenes sin grietas la adición de CNI y la interacción entre CNI y CV fueron benéficas para preservar las propiedades a tensión del acero. Las a/cs bajas resultaron mejores para preservar las propiedades de tensión; además, la adición de CNI y CV mejoran el comportamiento del acero en a/cs altas. En especímenes agrietados las propiedades de tensión disminuyeron significativamente con respecto a los no agrietados y al incrementar el AG la disminución fue mayor. El CNI, la CV y la interacción entre ambas no tuvieron efectos benéficos para preservar las propiedades de tensión del acero. Por último, se intentó establecer la correlación entre  $i_{\text{corr}}$  y  $\mu$ . Al considerar todas las variables se obtuvo una baja correlación, la cual incrementó ligeramente al analizar los resultados por cada variable. Es por ello que las ecuaciones de ajuste obtenidas en esta investigación resultan poco confiables para fines de predicción debido a la complejidad de la corrosión.

## Abstract

This thesis analyses the loss of ductility of steel reinforcement caused by corrosion of specimens embedded in high performance concrete. For this purpose, a  $3^4$  factorial design was implemented where the independent variables were crack width (AG), content of calcium nitrite-based corrosion inhibitor (CNI), content of fly ash (CV) and water-to-cementitious materials ratio of concrete (a/c), in three levels each. The specimens were exposed for nine years to a natural marine environment, and the corrosion current density ( $i_{corr}$ ) of the reinforcing steel was monitored annually by the linear polarization resistance method. At the end of the exposure period, the reinforcing bars were retrieved and tested under tension. With the obtained data stress-strain diagrams were elaborated and modulus of elasticity, yield stress, ultimate stress, yield strain, elongation, tenacity and ductility ( $\mu$ ) of the rebars were estimated. The influence of the variables on the tension parameters was then evaluated, finding significant differences mainly between the rebars embedded in specimens without cracks and cracked ones. In addition, the loss of tension properties was higher in the strains than in the stresses. In specimens without cracks the addition of CNI and the interaction between CNI and CV were beneficial to preserve the tensile properties of the steel. The low a/cs were better to preserve the tensile properties; furthermore, the addition of CNI and CV improve the behavior of the steel in high a /cs. In cracked specimens the tension parameters of the rebars decreased significantly with respect to those without cracks, when the AG was wider the deleterious effect was greater CNI, CV and their interaction caused no beneficial effects to preserve the tensile properties of the steel. Finally, the correlation between  $i_{corr}$  and  $\mu$  was investigated. When considering all the variables, a low correlation was obtained, but slightly increased when were separately analysed. Based on this, the adjustment equations obtained in this investigation are unreliable as predictors because of the complex nature of corrosion.



## ÍNDICE

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Definición de nomenclatura .....</b>	<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Justificación .....	5
1.4 Antecedentes .....	6
1.5 Objetivos .....	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos .....	9
1.6 Hipótesis.....	10
<b>CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>12</b>
2.1 Estructura del concreto reforzado .....	12
2.2 Generalidades del concreto .....	13
2.2.1 Fenómeno de hidratación del cemento Portland .....	15
2.2.2 Aditivos minerales.....	19
2.2.2.1 Ceniza volante .....	19
2.2.2.2 Humo de sílice .....	20
2.2.3 Aditivos químicos .....	22
2.2.3.1 Superplastificantes .....	22
2.2.3.2. Incluidores de aire .....	23
2.2.4 Reacción puzolánica.....	24
2.2.5 Agrietamiento del concreto .....	26
2.3 Generalidades del acero de refuerzo .....	27
2.3.1 Estructura general de los metales .....	28
2.3.2 Imperfecciones de los metales .....	29
2.3.2.1 Defectos puntuales .....	29
2.3.2.2 Defectos lineales .....	30
2.3.2.3 Defectos planares.....	30
2.3.2.4 Defectos volumétricos .....	31
2.3.3 Comportamiento mecánico de los metales .....	32
2.3.3.1 Deformación elástica y Ley de Hooke .....	33
2.3.3.2 Deformación plástica .....	35

2.3.3.3 Endurecimiento por deformación .....	36
2.3.3.4 Fractura .....	39
2.3.3.5 Resiliencia .....	43
2.3.3.6 Tenacidad (T) .....	44
2.3.3.7 Ductilidad ( $\mu$ ) .....	45
2.4 El fenómeno de la corrosión en el concreto reforzado .....	46
2.5 Mecanismo de corrosión del acero de refuerzo .....	49
2.6 Métodos para prevenir la corrosión del acero de refuerzo .....	50
2.6.1 Uso de concreto de alto desempeño (HPC) .....	50
2.6.2 Uso de inhibidores de corrosión .....	51
2.7 Evaluación de la corrosión mediante el método de resistencia a la polarización lineal (LPR) .....	53
<b>CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
3.1 Diseño del experimento .....	55
3.2 Materiales .....	56
3.2.1 Cemento .....	56
3.2.2 Agregados .....	57
3.2.3 Aditivos químicos.....	57
3.2.4 Ceniza volante .....	58
3.2.5 Acero .....	58
3.3 Fabricación y exposición de los especímenes .....	61
3.3.1 Preparación de las mezclas y colocación del concreto.....	61
3.3.2 Exposición de los especímenes y monitoreo de la corrosión .....	65
3.4 Pruebas a tensión .....	66
3.5 Estimación de las propiedades a tensión y análisis de los datos .....	68
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
4.1 Análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de corrosión .....	70
4.1.1 Especímenes sin grietas.....	70
4.1.2 Especímenes agrietados .....	71
4.2 Análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de tensión.....	76
4.2.1 Especímenes sin grietas.....	76
4.2.1.1 Esfuerzos.....	76
4.2.1.2 Deformaciones .....	76
4.2.2 Especímenes agrietados .....	77
4.2.2.1 Esfuerzos.....	78
5.2.2.2 Deformaciones .....	78
4.3 Análisis estadístico de los resultados de tensión .....	83
4.3.1 Esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) .....	84
4.3.1.1 Especímenes sin grietas.....	84
4.3.1.2 Especímenes agrietados .....	85
4.3.2 Esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ ) .....	86
4.3.2.1 Especímenes sin grietas.....	86
4.3.2.2 Especímenes agrietados .....	87

4.3.3 Deformaciones a la fluencia ( $\epsilon_y$ ) .....	88
4.3.3.1 Especímenes sin grietas.....	88
4.3.3.2 Especímenes agrietados .....	89
4.3.4 Elongación (e).....	90
4.3.4.1 Especímenes sin grietas.....	90
4.3.4.2 Especímenes agrietados .....	92
4.3.5 Tenacidad (T) .....	92
4.3.5.1 Especímenes sin grietas.....	92
4.3.5.2 Especímenes agrietados .....	94
4.3.6 Ductilidad ( $\mu$ ) .....	94
4.3.6.1 Especímenes sin grietas.....	94
4.3.6.2 Especímenes agrietados .....	96
4.4 Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$ .....	96
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>100</b>
Especímenes sin grietas.....	100
Especímenes agrietados .....	103
Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$ .....	105
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>106</b>
Especímenes sin grietas.....	106
Especímenes agrietados .....	107
Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$ .....	108
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>115</b>
Análisis estadístico .....	115

## Lista de Tablas

### Capítulo II

<b>Tabla 2. 1</b> Compuestos del cemento Portland .....	<b>14</b>
<b>Tabla 2. 2</b> Reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland (expresados en óxidos) .....	<b>16</b>

### Capítulo III

<b>Tabla 3. 1</b> Diseño experimental de la investigación .....	<b>56</b>
<b>Tabla 3. 2</b> Análisis químico y físico del cemento (Montes, 2003).....	<b>57</b>
<b>Tabla 3. 3</b> Análisis químico y físico del cemento (Montes, 2003).....	<b>58</b>
<b>Tabla 3. 4</b> Composición química del acero (Montes, 2003) .....	<b>59</b>
<b>Tabla 3. 5</b> Proporción de mezclas para 1m <sup>3</sup> de concreto.....	<b>62</b>
<b>Tabla 3. 6</b> Nomenclatura de las varillas expuestas.....	<b>64</b>

### Capítulo IV

<b>Tabla 4. 1</b> Resumen de las correlaciones.....	<b>99</b>
---	-----------

## Lista de Figuras

### Capítulo II

<b>Figura 2. 1</b> Evolución de calor durante las etapas de hidratación del cemento Portland (Castillo, 2015) .....	<b>18</b>
<b>Figura 2. 2</b> Estructuras cristalinas comunes: a) hexagonal compacta, b) cúbica centrada en las caras y c) cúbica centrada en el cuerpo .....	<b>28</b>
<b>Figura 2. 3</b> Dislocaciones de cuña y helicoidal en arreglos cristalinos .....	<b>30</b>
<b>Figura 2. 4</b> Diagrama esfuerzo deformación para metales sometidos a ensayos de tensión.....	<b>33</b>
<b>Figura 2. 5</b> Diagrama esquemático tensión-deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga-descarga .....	<b>35</b>
<b>Figura 2. 6</b> Relación del contenido de carbono en las propiedades mecánicas del acero (Frómata y Delás, 2009).....	<b>38</b>
<b>Figura 2. 7</b> Fractura en pruebas de tensión de metales a) fractura dúctil, b) fractura frágil .....	<b>39</b>
<b>Figura 2. 8</b> Representación de grietas internas y externas causantes de la fractura en un material.....	<b>42</b>
<b>Figura 2. 9</b> Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura .....	<b>46</b>
<b>Figura 2. 10</b> Representación esquemática de la corrosión del acero en concreto (Montes, 2003) .....	<b>48</b>
<b>Figura 2. 11</b> Representación esquemática del proceso de corrosión en la superficie de un metal expuesto a un ambiente húmedo (Young, 1998).....	<b>50</b>
<b>Figura 2. 12</b> Protección del acero con nitrito de calcio (Montes, 2003) .....	<b>52</b>

### Capítulo III

<b>Figura 3. 1</b> Esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ ) de las varillas control c .....	<b>60</b>
<b>Figura 3. 2</b> Esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ ) de las varillas control c.....	<b>60</b>
<b>Figura 3. 3</b> Elongaciones ( $e$ ) de las varillas control c .....	<b>61</b>
<b>Figura 3. 4</b> Dimensión y detalles de los especímenes de concreto .....	<b>62</b>
<b>Figura 3. 5</b> Detalles de la fabricación de los especímenes de concreto .....	<b>63</b>
<b>Figura 3. 6</b> Localización (a y b) y lugar de exposición (c y d) de los especímenes en la Bahía de Maine, EUA .....	<b>65</b>
<b>Figura 3. 7</b> Representación esquemática del método de RPL.....	<b>66</b>
<b>Figura 3. 8</b> a) Varillas ordenadas, b) determinación del diámetro de las varillas..	<b>67</b>
<b>Figura 3. 9</b> Máquina universal Instron KPX .....	<b>68</b>

### Capítulo IV

<b>Figura 4. 1</b> $i_{corr}$ de varillas embebidas en concretos con a/c de 0.29 .....	<b>73</b>
<b>Figura 4. 2</b> $i_{corr}$ de varillas embebidas en concretos con a/c de 0.37 .....	<b>74</b>
<b>Figura 4. 3</b> $i_{corr}$ de varillas embebidas en concretos con a/c de 0.45 .....	<b>75</b>
<b>Figura 4. 4</b> Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de las varillas embebidas en concretos con a/c de 0.29 ..	<b>80</b>

<b>Figura 4. 5</b>	Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de las varillas embebidas en concretos con a/c de 0.37 ..	<b>81</b>
<b>Figura 4. 6</b>	Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de las varillas embebidas en concretos con a/c de 0.45 ..	<b>82</b>
<b>Figura 4. 7</b>	Resumen del $\sigma_y$ .....	<b>85</b>
<b>Figura 4. 8</b>	Resumen del $\sigma_u$ .....	<b>87</b>
<b>Figura 4. 9</b>	Resumen de la $\epsilon_y$ .....	<b>89</b>
<b>Figura 4. 10</b>	Resumen de la e .....	<b>91</b>
<b>Figura 4. 11</b>	Resumen de la T .....	<b>93</b>
<b>Figura 4. 12</b>	Resumen de la $\mu$ .....	<b>95</b>
<b>Figura 4. 13</b>	Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$ de todas las varillas .....	<b>97</b>
<b>Figura 4. 14</b>	Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$ bajo la influencia de las variables a) AG, b) CNI, c) CV y d) a/c .....	<b>98</b>

## Definición de nomenclatura

AG	Ancho de grieta (mm)
a/c	Relación agua cemento (adimensional)
CNI	Nitrito de calcio (L/m <sup>3</sup> )
CV	Ceniza volante (%)
E	Módulo de elasticidad (MPa)
e	Elongación (%)
HPC	Concreto de alto desempeño (por sus siglas en inglés)
$i_{corr}$	Densidad de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
RPL	Resistencia a la polarización lineal
T	Tenacidad (MPa)
$\epsilon$	Deformación (adimensional)
$\epsilon_y$	Deformación a la fluencia (adimensional)
$\mu$	Ductilidad (adimensional)
$\sigma$	Esfuerzo (MPa)
$\sigma_u$	Esfuerzo máximo (MPa)
$\sigma_y$	Esfuerzo a la fluencia (MPa)

# **CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Introducción**

El hombre primitivo sólo tuvo acceso a un número limitado de materiales que encontró en la naturaleza: piedra, madera, arcilla y cuero. Con el transcurso del tiempo, el hombre descubrió técnicas para producir materiales con propiedades superiores a las de los naturales; entre estos nuevos materiales se encontraban la cerámica y algunos metales, además, descubrió que las propiedades de un material se podían modificar mediante tratamiento térmico o por adición de otras sustancias (Callister, 2002). Sin embargo, juntamente con el descubrimiento de estos materiales surgieron problemas de durabilidad, que a la fecha persisten; uno de los más preocupantes es la corrosión. De manera general, la corrosión es el deterioro de un material debido a la interacción con el ambiente, y se presenta de manera natural y espontánea (Fontana, 1986).

Los materiales más afectados por la corrosión son los metales, los cuales son muy utilizados en varias industrias, por ejemplo en la de transportes y en la de construcción. En esta última el acero representa la columna vertebral de su desarrollo; su éxito se debe en gran medida, a la combinación con el concreto, el cual protege al acero del medio circundante, esta combinación se conoce como concreto reforzado.

El concreto reforzado es usado exitosamente debido a su versatilidad y economía, puede moldearse en diferentes formas y acabados; bajo ciertas condiciones se desempeña como un material durable y resistente (Broomfield, 2003). No obstante, en ocasiones presenta fallas prematuras debido a la interacción con ambientes agresivos, por ejemplo, un ambiente marino.

Las estructuras dañadas por la corrosión sufren un rápido deterioro, y frecuentemente requieren reparaciones para continuar en uso. Diversas soluciones se han planteado para detener este fenómeno, pero a la fecha, ningún método por



si solo a resultado totalmente efectivo; tal parece que la combinación de varios métodos puede ser la solución que más se acerque a los resultados deseados (Montes et al., 2004).

Con base en lo anterior han surgido estudios que analizan el comportamiento de varios métodos, tal es el caso de la presente investigación. La cual forma parte de un estudio a largo plazo, y tiene como objetivo analizar la pérdida de  $\mu$  del acero de refuerzo debido a la corrosión, mediante la interacción de varios métodos usados en la prevención de este fenómeno. Para tal efecto, se consideraron especímenes de concreto reforzado agrietados expuestos a un ambiente marino natural (Montes, 2003). Dicha investigación está estructurada de la siguiente manera:

En el capítulo I se plantea la investigación, en el cual se expone la problemática que da origen a este trabajo y la importancia de su estudio; en seguida, se encuentra la sección de antecedentes que incluye una revisión de trabajos relacionados con el tema que sirven como referencias en esta tesis. Más adelante se plantea el objetivo general, los objetivos específicos y las hipótesis en las que se basa la presente investigación.

En el capítulo II se presentan los conceptos y las teorías que sustentan la investigación, los cuales incluyen la estructura general del concreto reforzado, las generalidades del concreto, las generalidades del acero de refuerzo, el fenómeno de la corrosión, el mecanismo de corrosión en el acero de refuerzo, los métodos de prevención de la corrosión y por último la técnica de resistencia a la polarización lineal para el monitoreo de la corrosión en estructuras de concreto reforzado.

El capítulo III, denominado materiales y métodos, contiene el diseño experimental de la investigación, los materiales y los procedimientos empleados en la fabricación de los especímenes. También se describen las condiciones de exposición de dichos especímenes, el monitoreo de la corrosión, las pruebas de tensión en las varillas de

refuerzo, los cálculos efectuados para determinar las propiedades de tensión a partir de las pruebas de tensión y las herramientas empleadas en su análisis.

En el capítulo IV se presentan los resultados de la investigación, en la primera sección se hace un análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de corrosión el cual se divide en especímenes sin grietas y especímenes agrietados. En la siguiente sección se hace el análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de tensión, que incluyen las propiedades de esfuerzo a la fluencia, esfuerzo máximo, deformación a la fluencia, elongación, tenacidad y  $\mu$ , divididos cada uno en especímenes agrietados y especímenes sin grietas. En seguida se presenta el análisis estadístico de los resultados de tensión mencionados anteriormente. La última sección del capítulo expone la correlación entre los resultados de corrosión y los resultados de  $\mu$  de las varillas.

Las siguientes secciones corresponden a la discusión y las conclusiones de los resultados y están divididas en especímenes sin grietas, especímenes agrietados y la correlación entre la corrosión y la  $\mu$  del acero de refuerzo.

La sección de bibliografía contiene todas las referencias citadas en el presente documento, las cuales están ordenadas alfabéticamente. Finalmente, se encuentra el anexo del análisis estadístico de los resultados de tensión que respaldan al capítulo IV de esta tesis.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La industria siderúrgica emplea gran cantidad de energía y dinero en la explotación y extracción de minerales para fabricar los metales; los minerales son compuestos químicos inorgánicos a base de óxidos de metales o sales, por lo general, carbonatos, sulfatos o sulfuros. Una vez fabricado el metal y expuesto al ambiente, donde existe humedad, oxígeno, cloruros, sulfatos y otros agentes químicos, reacciona para producir compuestos más estables; favoreciendo la formación de los óxidos, sulfatos o cloruros del metal (Broomfield, 2003).

En ambientes marinos e industriales con altos contenidos de cloruros y CO<sub>2</sub> el problema resulta grave, particularmente en la infraestructura, donde la corrosión conlleva a la pérdida de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo. En estas zonas se observa con frecuencia estructuras deterioradas, que representan una amenaza para los usuarios ante eventos inesperados como los sismos y la reparación o sustitución de estas estructuras requiere millonarias inversiones, lo cual ocasiona grandes pérdidas económicas.

Un reporte generado en EUA por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión arrojó los siguientes resultados (NACE, 1998); el costo directo de la corrosión en 1998 ascendía a 276 billones de dólares por año, 3.1% del PIB, sin incluir los gastos indirectos generados. Con base en el mismo estudio se proyectaron los costos para el año 2016, considerando la inflación y cambios de consumo en la población; el costo estimado fue de 1.1 trillones de dólares por año, 6.2% del PIB. Si bien, este reporte corresponde a los gastos generados en EUA, es posible establecer una idea de lo que sucede en el ámbito mundial.

Debido a esta situación, ha emergido un importante mercado dedicado a la prevención de la corrosión y por ende la prevención de los daños ocasionados, como la pérdida de  $\mu$  en el acero de refuerzo estructural. Diferentes métodos se han implementado para retardar la corrosión del acero estructural, por ejemplo, agentes inhibidores, recubrimientos epóxicos, galvanización del acero con zinc, concretos de alto desempeño con baja permeabilidad, etcétera; los cuales por si solos, no han tenido un desempeño satisfactorio debido a la naturaleza tan compleja del fenómeno de la corrosión. Tal parece que la combinación de estos métodos puede dar mejores resultados, es por ello que se requiere investigación sobre el tema.

La incorporación de aditivos a un concreto de alto desempeño, como método para prevenir la corrosión y evitar la pérdida de  $\mu$  en el acero estructural, hace el mecanismo de la corrosión más complejo (Montes, 2003). Por lo anterior, se requiere realizar investigación que evalúe los cambios en la efectividad de los

métodos de prevención de la corrosión en concreto reforzado. La investigación, en este último caso, se puede llevar a cabo mediante la estimación de la pérdida de propiedades mecánicas de varillas embebidas en concreto, después de ser expuestas a un ambiente corrosivo.

### **1.3 Justificación**

El material más usado en la industria de la construcción es el concreto reforzado; a la fecha, no se dispone de un material que proporcione los mismos beneficios, y que además represente un costo similar o menor a éste. Las propiedades mecánicas del acero hacen posible su empleo en diferentes y variadas estructuras; sin embargo, aproximadamente el 25% de la producción anual de acero es destruida por la corrosión (Ávila y Genescá, 1996).

El costo de la corrosión incrementará substancialmente durante las siguientes décadas debido a la escasez mundial de materiales de construcción, los altos costos de la energía para su fabricación y la contaminación en la fabricación del acero, entre otros factores (Fontana, 1986). El panorama no es alentador y la implementación de medidas que retrasen este fenómeno son prioridad. La industria de la construcción, en su conjunto, genera entre 40 y 50% de los gases de efecto invernadero; las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la fabricación del acero están en el orden de 1.8 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero, mientras que la fabricación de cemento Portland provoca emisiones de CO<sub>2</sub> hasta del 5% del total de emisiones mundiales (García et al., 2014).

Además de la alarmante contaminación causada por las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante la manufactura del acero y del cemento, estos procesos también causan durante su producción el consumo de grandes cantidades de energía, la deforestación en zonas de extracción de materias primas y la contaminación de los mantos acuíferos. En consecuencia, la pérdida de las propiedades del acero de refuerzo en concreto a causa de la corrosión contribuye significativamente a la

reducción de los recursos naturales (Fontana, 1986); por ende a la destrucción del medio ambiente.

A la par de los problemas económicos y ambientales que ocasiona la corrosión del acero surge también la problemática social, debido al riesgo estructural causado por la pérdida de  $\mu$  en el acero de refuerzo de las estructuras, lo cual pone en riesgo el patrimonio y la vida de los usuarios.

Como ya se dijo anteriormente, la interacción de diferentes métodos en la prevención de la corrosión del acero de refuerzo parece ser la mejor alternativa para retrasar dicha problemática. Por lo tanto, se requiere estudiar a fondo el efecto de las interacciones de diferentes métodos de prevención de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero de refuerzo. Particularmente en la pérdida de  $\mu$ .

#### **1.4 Antecedentes**

Como se ha mencionado anteriormente, el concreto reforzado es el material más empleado en la industria de la construcción, en donde el concreto protege al acero de refuerzo, esta protección es efectiva en ambientes no agresivos; sin embargo, en ambientes agresivos resulta ineficiente. Cuando la protección del acero no es suficiente los agentes contaminantes causan la corrosión del acero. La corrosión es un problema latente que no se ha podido detener y consiste básicamente en el deterioro del acero cuando éste interactúa con el medio ambiente. Como resultado de este deterioro las propiedades mecánicas del acero son afectadas ocasionando daños en las estructuras.

Debido a la poca efectividad de los métodos para prevenir la corrosión por si solos, se ha estudiado la combinación de ellos. Actualmente, se cuenta con investigaciones que han analizado en primer lugar, la influencia de factores tales como la relación agua materiales cementantes, la adición de inhibidores de corrosión, y la incorporación de cenizas volantes, así como la interacción entre ellos.

Kondratova et al. 2003, analizaron la eficacia de dos inhibidores de corrosión, uno a base de CNI y otro orgánico (OCI), en especímenes de concreto armado con a/c de 0.40 en condiciones agrietadas y no agrietadas expuestas a un ambiente marino. Después de doce meses de exposición encontraron que el uso de los inhibidores de corrosión en concretos no agrietados es benéfica en la prevención de la corrosión. Donde encontró que el OCI fue más eficiente que el CNI en losas no agrietadas, pero ningún inhibidor resultó efectivo en losas agrietadas. Otros estudios han abordado el efecto de los factores mencionados anteriormente en la corrosión del acero de refuerzo en probetas expuestas a ambiente simulado durante un año, los resultados indicaron que la a/c juega un papel importante en el desarrollo de las grietas por corrosión. Es decir, mientras más baja es la a/c las posibilidades de agrietamiento debido a la corrosión son menores, este comportamiento mejora cuando se adiciona a la mezcla CV y CNI. La combinación de estos tres elementos, en ciertas proporciones (baja a/c 0.29 y 0.37, 20% de ceniza volante y 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI), resulta benéfica para la prevención de la corrosión ya que reduce la permeabilidad del concreto disminuyendo el ingreso de agentes agresivos del medio ambiente circundante (Montes et al., 2004).

Así mismo, se han analizado los efectos de la corrosión en las propiedades mecánicas del acero de refuerzo. López (2012), obtuvo resultados en especímenes preparados con concreto de alto desempeño (HPC por sus siglas en ingles) en diferentes a/cs y diferentes cantidades de CNI, los cuales fueron expuestos a un ambiente natural durante siete años en condiciones de agrietamiento. El estudio reporta que en muestras de acero embebidas en concretos con a/cs bajas (0.29 y 0.37), las profundidades de las picaduras de corrosión fueron menores que en el acero embebido en concretos con a/c alta (0.45), independientemente de la adición o no de CNI. Las grietas son el principal factor que promueve la corrosión por picadura, y al parecer no importa su ancho. En varillas embebidas en concreto agrietado y adicionado con CNI el esfuerzo a la fluencia fue ligeramente afectada por la corrosión, por el contrario, se redujo considerablemente el esfuerzo último y la elongación a la ruptura en 18 y 82% respectivamente, con respecto a las varillas

control. Cuando se usó CNI en combinación con un concreto de baja a/c se obtuvieron resultados favorables en comparación con los resultados obtenidos de concretos sin CNI, por el contrario, en losas agrietadas el CNI no proporcionó una mejor protección al acero (López, 2012).

En otro estudio se realizaron pruebas de tensión en vigas de concreto armado sometiendo los especímenes a un proceso de corrosión electroquímico acelerado, encontrando que la corrosión disminuye la resistencia a la flexión y cambia el modo de falla de las vigas de concreto armado. Los autores encontraron también que la corrosión puede también cambiar la curva carga-deflexión y disminuye la  $\mu$  del elemento (Du et al., 2007).

Por su parte Zhu y François (2014) llevaron a cabo pruebas mecánicas en varillas expuestas a un ambiente natural durante 26 y 28 años en donde encontraron que la  $\mu$  se redujo drásticamente, siendo la profundidad de las picaduras de corrosión el principal factor perjudicial en el desempeño mecánico del acero.

En 2015, Fernández et al., investigaron el comportamiento mecánico de varillas embebidas en concretos adicionados con 4% de NaCl, las cuales fueron sometidas a un proceso de corrosión artificial mediante métodos de corriente inducida. Para analizar el comportamiento mecánico del acero se efectuaron pruebas a tensión en donde se encontró que la corrosión redujo el esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo máximo. La corrosión también causó fallas prematuras en el acero y por lo tanto la reducción severa de la  $\mu$ . Sin embargo, la reducción de las propiedades mecánicas del acero no fue proporcional al grado de corrosión.

En el mismo sentido Ou et al. (2016) estudiaron las propiedades a la tensión de aceros corroídos de manera natural y artificial, en donde observaron que existe una diferencia significativa entre los resultados de las varillas corroídas de manera natural y los resultados de las varillas corroídas artificialmente. No obstante, tanto la resistencia máxima como la capacidad de deformación disminuyeron al aumentar

la corrosión en ambos casos, además, la meseta de fluencia disminuyó cuando aumentó la pérdida de masa por corrosión.

En el presente estudio se da seguimiento a una investigación a largo plazo iniciada por varios autores (Kondratova et al. 2003, Montes, 2003, Montes et al., 2004 y López, 2012), en donde se ha monitoreado el efecto de CNI y el agrietamiento en la corrosión de las probetas de concreto de alto desempeño reforzado expuestas a un ambiente marino simulado y a uno natural durante nueve años. En esta tesis se efectuaron pruebas a tensión del acero expuesto al ambiente natural para conocer el efecto de los factores analizados en las propiedades a la tensión de dicho acero, principalmente en la pérdida de  $\mu$ .

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Analizar la pérdida de  $\mu$  por corrosión del acero de refuerzo embebido en HPC agrietado que contiene CNI y que fue expuesto a un ambiente marino natural durante nueve años.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

1. Analizar el efecto de las variables AG, CNI, CV y a/c en los resultados de corrosión de las varillas en estudio
2. Efectuar pruebas de tensión a las varillas para determinar las propiedades de módulo de elasticidad (E), resistencia a la fluencia ( $\sigma_y$ ), resistencia máxima ( $\sigma_\mu$ ), deformación a la fluencia ( $\epsilon_y$ ), elongación (e), tenacidad (T) y ductilidad ( $\mu$ ).
3. Analizar el efecto del AG, del CNI, de la CV y de la a/c en las propiedades de tensión de las varillas.



4. Analizar la pérdida de  $\mu$  de las varillas, con base en los resultados obtenidos.
5. Establecer la correlación entre las densidades de corrosión ( $i_{corr}$ ) y las  $\mu$  de las varillas estudiadas.

## 1.6 Hipótesis

Las siguientes hipótesis se plantean considerando varillas de acero al carbono embebidas en especímenes de HPC sin grietas y agrietados expuestos a un ambiente marino natural durante nueve años, en donde se buscó mejorar la protección del acero de refuerzo ante el fenómeno de la corrosión. La protección consistió en la adición de aditivos tanto químicos como minerales en diferentes relaciones a/c, con la finalidad de preservar las propiedades a la tensión del acero y evitar la pérdida de  $\mu$ .

Con base en las consideraciones anteriores se obtuvieron las siguientes hipótesis de interés:

1. Las grietas en el concreto reforzado disminuyen los valores de las propiedades de tensión del acero de refuerzo, y mientras más ancha es la grieta mayor es su efecto en dichas propiedades.
2. Las adiciones de 12.5 y 25 L/m<sup>3</sup> de CNI contribuyen a preservar las propiedades de tensión del acero de refuerzo en especímenes sin grietas y agrietados.
3. Las adiciones de 20 y 40% de CV contribuye a preservar las propiedades de tensión del acero de refuerzo en especímenes sin grietas y agrietados.
4. Las propiedades a tensión del acero de refuerzo son inversamente afectadas por la a/c empleada en el concreto, en un rango de 0.29 a 0.45.

5. Las interacciones entre las diferentes dosis mencionadas de CNI y CV y las diferentes a/cs contribuyen a preservar las propiedades de tensión del acero de refuerzo en especímenes sin grietas y agrietados.
  
6. Existe una alta correlación entre el grado de corrosión y la pérdida de  $\mu$  del acero de refuerzo, por lo tanto es posible predecir la pérdida de  $\mu$  del acero a partir de los valores de  $I_{corr}$ .

## **CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 Estructura del concreto reforzado**

El concreto reforzado está compuesto por un arreglo de varillas de acero al carbono embebido en concreto para formar elementos estructurales. Cada elemento estructural es diseñado asumiendo que el concreto y el acero actúan juntos para resistir esfuerzos. Además, en un medio básico (pH de 12.5) como el concreto, el acero se encuentra normalmente en estado pasivo, recubierto de una película continua y estable de óxidos e hidróxidos que lo mantienen protegido del oxígeno y la humedad del medio circundante que son los factores esenciales de toda acción corrosiva (Calleja y Andrade, 1973).

La función principal del recubrimiento de concreto es servir como un revestimiento protector del acero. Su efectividad es una función tanto de su composición química como de su estructura física. Los aspectos importantes de su estructura física incluyen su porosidad total, su distribución del tamaño de poro y el grado en que los poros están interconectados. Por otro lado, el cemento Portland endurecido ("pasta de cemento") es poroso y contiene soluciones de poros que son químicamente activas. La naturaleza de la pasta de cemento y su estructura de poros y la composición de la solución de poros serán los factores dominantes que controlan la efectividad de la cubierta de concreto. (Bentur et al., 2005).

La "barrera química" es la alta alcalinidad de la solución de agua de poro del concreto. Esto permite la formación y el mantenimiento de una película de pasivación protectora permanente en la superficie del acero. La "barrera física" es la densidad y la impermeabilidad de la cubierta de concreto, que limita la difusión de oxígeno y humedad hacia el acero y, por lo tanto, puede bloquear la reacción de corrosión, incluso si la película de pasivación se ha roto (Bentur et al., 2005).

Lo anterior resulta idóneo en ciertas condiciones ambientales; no obstante, cuando los elementos estructurales son expuestos a ambientes agresivos, por ejemplo con alto contenido de cloruros, la protección del concreto resulta ineficiente debido a su naturaleza porosa y permeable que permiten el ingreso de los agentes agresivos, dando lugar a la corrosión del acero de refuerzo. Una vez que la corrosión ha comenzado, su desarrollo dependerá de varios factores, los más importantes son la disponibilidad de oxígeno y la presencia humedad en los poros del concreto adyacentes al acero. Estas condiciones proporcionan un medio a través del cual pueda fluir la corriente iónica en el proceso de corrosión.

En daño por corrosión en las estructuras de concreto armado se dan tanto en la reducción de la sección transversal del acero como en el agrietamiento producido por la deposición continua de óxido en las proximidades del acero de refuerzo dentro del concreto. El volumen del óxido producido es sustancialmente mayor que el volumen de acero que desaparece durante la reacción de corrosión. En consecuencia, se crean tensiones expansivas en el concreto que rodea el acero. Este proceso acelera la corrosión del acero ya que una vez que comienza el agrietamiento, la eficacia química y física de la cubierta se ve afectada y se pueden esperar mayores tasas de corrosión.

Para atender la problemática de deterioro que presentan las estructuras de concreto reforzado a causa de la corrosión, es necesario conocer las propiedades de los materiales que la conforman. Por tal motivo, a continuación se describen de manera general los conceptos y fundamentos teóricos del concreto y del acero.

## **2.2 Generalidades del concreto**

El concreto es un material compuesto de agregados gruesos y finos incrustados en una matriz de cemento Portland hidratado endurecido. El agregado suele ser impermeable y más o menos químicamente inerte (Bentur et al., 2005). El endurecimiento del concreto es la consecuencia de la reacción química del cemento

con el agua, el concreto puede ser adicionado con otros materiales cementantes y adiciones minerales y químicas (Kosmatka, 2004).

El principal ingrediente del concreto es el cemento Portland que está formado por Clinker y yeso hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) que funciona como regulador de fraguado. El Clinker es producto de la molienda de caliza y arcilla llevados a una temperatura de  $1450^\circ\text{C}$  (Taylor, 2001). Posteriormente se realiza la molienda del Clinker agregando yeso (5% máximo), obteniendo los compuestos químicos de la Tabla 2.1 (Mehta y Monteiro, 2006).

Cada compuesto aporta diferentes propiedades fundamentales al cemento, las principales son las siguientes (Kosmatka, 2004).

**Tabla 2. 1 Compuestos del cemento Portland**

compuesto	mineral	fórmula	abreviatura	% masa
silicato tricálcico	alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45-60
silicato dicálcico	belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15-30
aluminato tricálcico	celita	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	6-12
ferroaluminato tetracálcico	felita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	6-8
sulfato de calcio hidratado (yeso)	anhidrita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CS}$	5

**Silicato tricálcico:** se hidrata y endurece rápidamente, es responsable del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general, la resistencia temprana del concreto de cemento Portland es mayor, cuando el porcentaje de  $\text{C}_3\text{S}$  aumenta.

**Silicato dicálcico:** se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

**Aluminato tricálcico:** libera gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las

resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de  $C_3A$  resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos.

**Ferroaluminato tetracálcico:** es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (clinkerización o cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al  $C_4AF$  y sus hidratos.

**Sulfato de calcio hidratado (yeso):** se adiciona al cemento durante la molienda final, ofreciendo sulfato para la reacción con el  $C_3A$  y la formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio). Esto controla la hidratación del  $C_3A$ . Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido.

En presencia de agua estos compuestos reaccionan y forman nuevos compuestos que constituyen la pasta de cemento endurecido en el concreto. Por lo tanto, a continuación se describe el fenómeno de hidratación de las partículas de cemento.

### **2.2.1 Fenómeno de hidratación del cemento Portland**

En presencia de agua los compuestos del cemento se hidratan para formar nuevos compuestos, los cuales constituyen la microestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. Los silicatos de calcio  $C_3S$  y  $C_2S$  se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (comúnmente llamado gel de tobermorita). El cemento Portland hidratado contiene del 15% hasta 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado. El aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El  $C_3A$ , sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua

se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines. Estas transformaciones de los compuestos se presentan en la Tabla 2.2 (Kosmatka, 2004).

El mecanismo de hidratación del cemento a temperatura ambiente se caracteriza por diferentes etapas las cuales suceden desde los primeros minutos hasta después de varios días (Castillo, 2015).

**Tabla 2. 2 Reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland (expresados en óxidos)**

2(3CaO.SiO <sub>2</sub> ) Silicato tricálcico	+11H <sub>2</sub> O Agua	=3CaO.2SiO <sub>2</sub> .8H <sub>2</sub> O+3(CaO.H <sub>2</sub> O) Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+3(CaO.H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio
2(2CaO.SiO <sub>2</sub> ) Silicato dicálcico	+9H <sub>2</sub> O Agua	=3CaO.2SiO <sub>2</sub> .8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+CaO.H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+3(CaO.SO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O) Yeso	+26H <sub>2</sub> O Agua	=6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SO <sub>3</sub> .32H <sub>2</sub> O Etringita
2(3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Aluminato tricálcico	+6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SO <sub>3</sub> .32H <sub>2</sub> O Etringita	+4H <sub>2</sub> O Agua	=3(4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+CaO.H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio	+12H <sub>2</sub> O Agua	=4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .13H <sub>2</sub> O Aluminato tetracálcico hidratado
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ferroaluminato tetracálcico	+10H <sub>2</sub> O Agua	+2(CaO.H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio	=6CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O Ferroaluminato de calcio hidratado

### **Etapas I, Período de pre-inducción (primeros minutos)**

Inmediatamente al tener contacto el cemento con el agua ocurre una rápida disolución de las especies iónicas en la fase líquida y la formación de las fases hidratadas da comienzo. Los sulfatos alcalinos presentes en el cemento se disuelven completamente en segundos, contribuyendo con iones K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. El sulfato de calcio se disuelve hasta saturación contribuyendo también con iones Ca<sup>+2</sup> y iones SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> adicionales. El silicato tricálcico se disuelve congruentemente y una capa de C-S-H precipita en la superficie de las partículas de cemento. En esta fase, la concentración de iones Ca<sup>+2</sup> y OH<sup>-</sup> incrementan. Al mismo tiempo, iones de silicato entran en la fase líquida, aunque su concentración es muy baja. La fracción de C<sub>3</sub>S hidratado en la fase de pre-inducción permanece en niveles de 2 y 10%.

El  $C_3A$  se disuelve y reacciona con los iones  $Ca^{+2}$  y  $SO_4^{-2}$  presentes en la fase líquida formando etringita (AFt) que también precipita en la superficie de la partícula de cemento. El contenido de  $C_3A$  que se hidrata en el periodo de pre-inducción puede variar entre 5% y 25%.

### **Etapa II, Período de inducción o periodo durmiente (a las pocas horas)**

Justo después del periodo inicial de hidratación acelerada, la velocidad de las reacciones de hidratación de todos los minerales del Clinker se desarrolla a una velocidad muy baja. En este periodo el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados es mínimo, lo que explica que el cemento adquiera plasticidad y sea trabajable durante un determinado tiempo. La concentración de hidróxido de calcio (CH) presenten en la fase líquida alcanza su máximo e inicia a disminuir, el pH alcanza valores de 12.5. Hay indicios de que la terminación del periodo de inducción y el inicio de la reacción principal se debe principalmente a la nucleación de una segunda etapa de formación de C-S-H proveniente de la fase líquida.

### **Etapa III, Periodo de aceleración (3-12 horas después del mezclado)**

Después de 1-3 horas, es decir, al final del período de inducción, empieza la solidificación o *fraguado inicial*. En este periodo, la reacción de hidratación se acelera nuevamente y está controlada por la nucleación y crecimiento de los productos de hidratación. La velocidad del  $C_3S$  se acelera y el C-S-H de la segunda fase comienza a formarse. En este periodo se inicia también la hidratación del  $C_2S$ . Una vez que cierto valor crítico de iones  $Ca^{+2}$  e hidroxilo se alcanzan, comienza la precipitación de C-S-H y CH. El *fraguado final* se alcanza al finalizar esta etapa.

### **Etapa IV y V, Periodo de desaceleración**

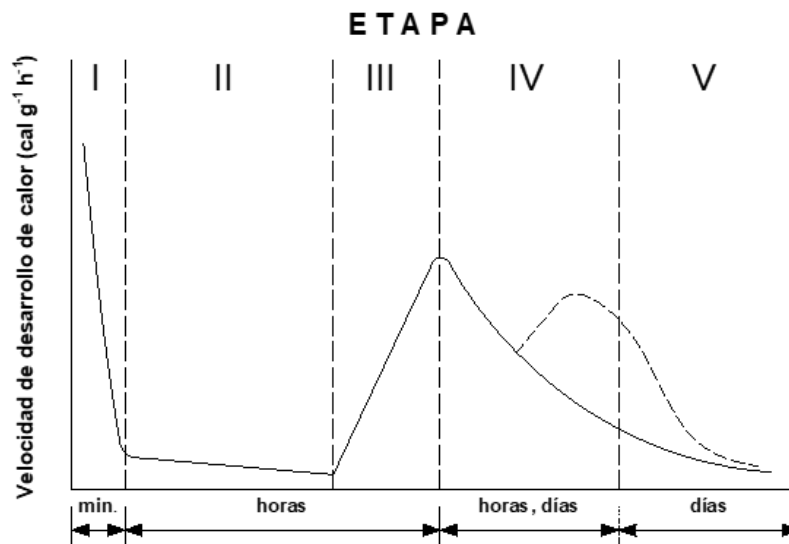
En este periodo hay una continua formación de productos de hidratación. A partir de este momento, mientras el espesor de la capa sigue creciendo y el movimiento



a través de la capa C-S-H determina la velocidad de la reacción y la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa. Posteriormente, la velocidad de reacción empieza a disminuir hasta alcanzar un estado estable (etapa V) después de 12 a 24 horas.

A  $a/c$ s altas, el proceso de hidratación continuará hasta que todo el cemento sea consumido. Sin embargo, residuos de partículas grandes de cemento pueden persistir aún en pastas endurecidas. A  $a/c$ s bajas, las reacciones pueden detenerse aún en presencia de grandes porcentajes de material sin reaccionar, este debido al agua insuficiente para llevar a cabo las reacciones de hidratación.

La hidratación, como otras reacciones químicas, es sensible con respecto a la temperatura. La velocidad de reacción aumenta con la temperatura. Pero la dependencia entre la velocidad y la temperatura está relacionada con el grado de reacción. La etapa en la que la temperatura tiene más importancia es en el período de aceleración (etapa III) donde la velocidad de reacción es controlada químicamente. En la Figura 2.1 se presentan las 5 etapas de la hidratación del cemento Portland determinadas por calorimetría de conducción.



**Figura 2. 1 Evolución de calor durante las etapas de hidratación del cemento Portland (Castillo, 2015)**

En la práctica la fabricación del concreto requiere el empleo de otros materiales adicionales al cemento, el agua y los agregados, para cubrir los requerimientos del diseño. Estos materiales se conocen como aditivos y se clasifican en minerales y químicos, dentro de los aditivos minerales se incluyen normalmente los polvos como las puzolanas y los materiales cementantes; mientras que los aditivos químicos se encuentran en forma líquida como los superplastificantes. A continuación se describen algunos aditivos comúnmente usados en la elaboración de concretos.

## **2.2.2 Aditivos minerales**

### **2.2.2.1 Ceniza volante**

La ceniza volante es un material de aluminio-silicato amorfo finamente dividido con cantidades variables de calcio y hierro y con rangos de partículas entre 1 y 150  $\mu\text{m}$ . Durante la reacción puzolánica, el hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado por la hidratación del cemento Portland, se transforma en varios hidratos de calcio-silicato (C-S-H) e hidratos de calcio-aluminato (Comité ACI 232, 2003).

Las cenizas volantes, cuando se utilizan racionalmente en combinación con el cemento Portland, contribuyen con el concreto fresco y endurecido en la mejora de las propiedades como la trabajabilidad, la reducción del sangrado, el calor de hidratación y la permeabilidad entre otros. Por otra parte, se experimenta la reducción de la resistencia a la compresión del concreto en edades tempranas; sin embargo, se mejora la resistencia a largo plazo y en algún momento la resistencia a la compresión del concreto con cenizas volantes será igual a la del concreto de cemento Portland, siempre que se proporcione un curado adecuado (Thomas, 2007).

De acuerdo con la norma ASTM C-618, existen dos tipos de cenizas volantes basadas en la fuente de origen. Aquellos con un bajo contenido de cal se han clasificado como clase F (pobre en cal), y la clase C es una ceniza volante rica en

cal. La distinción primaria entre las cenizas de clase F y C es que la ceniza volante de clase F tiene propiedades puzolánicas, mientras que la ceniza volante de clase C, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes. La ASTM C 618 establece que el contenido mínimo de la suma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  debería ser  $\geq 70\%$  y  $\geq 50\%$  para las clases F y C, respectivamente.

#### **2.2.2.2 Humo de sílice**

Es un producto secundario de la fabricación de silicón y de aleaciones de fierro y silicón a partir de la reducción del cuarzo de alta pureza y carbón en un horno de arco eléctrico sumergido. El SiO gaseoso que escapa se oxida y se condensa en la forma de partículas esféricas extremadamente finas de sílice amorfo ( $\text{SiO}_2$ ); por eso, el nombre de humo de sílice. El humo de sílice contiene aproximadamente 94-98% de  $\text{SiO}_2$  cuando proviene de la fabricación de silicón y entre 86-90% cuando deriva de aleaciones. La densidad real es de aproximadamente  $2200 \text{ kg m}^{-3}$ , pero la densidad aparente del polvo recién filtrado es de solo  $200 \text{ kg m}^{-3}$ . Esto hace que el material sea difícil de manejar a menos que se aglomere en nódulos o se use como una suspensión (Taylor, 2001). Aunque el humo de sílice se incorpora usualmente en la mezcla en la tolva medidora, en algunos países se produce cemento mezclado que contiene humo de sílice, usualmente de 6.5 a 8 por ciento por peso.

El sílice en la forma de vidrio (amorfo) es altamente reactivo, y la pequeñez de las partículas acelera la reacción con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento Portland. Las partículas de humo de sílice son extremadamente finas, casi todas tienen un diámetro en el rango de 0.03 y 0.3  $\mu\text{m}$ ; el diámetro medio típico es menor de 0.1  $\mu\text{m}$  (Neville, 2012).

El uso del humo de sílice tiene el propósito de producir concreto con mayores propiedades, principalmente alta resistencia temprana y baja permeabilidad. Los efectos benéficos del humo de sílice no se limitan a su reacción puzolánica, hay

también un efecto físico de la capacidad de las partículas extremadamente finas de humo de sílice para estar localizadas en proximidad muy estrecha con las partículas de agregado; o sea, en la interface de la pasta de cemento y el agregado (Neville, 2012). Debido a la alta reactividad del humo de sílice con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento Portland, se recomienda un máximo de 3 a 5 por ciento de humo de sílice. Los beneficios adicionales del reemplazo por humo de sílice son: sangrado reducido y mayor cohesión de la mezcla. Sin embargo, tal uso del humo de sílice se limita a ciertas áreas geográficas con un abastecimiento local abundante de humo de sílice.

La gran área superficial de las partículas de humo de sílice, que se tiene que humedecer, aumenta la demanda de agua, de modo que, en las mezclas con una baja relación a/c, es necesario emplear un superfluidificante. De esta manera, es posible mantener la relación requerida.

Además de la reacción puzolánica entre la sílice amorfa del humo de sílice y el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento Portland, el humo de sílice contribuye al progreso de la hidratación del cemento Portland. Esta contribución surge de la finura extrema de las partículas de humo de sílice las cuales proveen sitios de nucleación para el hidróxido de calcio. Así, ocurre el desarrollo temprano de resistencia (Neville, 2012).

Una consecuencia de la rapidez de las reacciones tempranas en concretos que contienen humo de sílice es que el desarrollo de calor de hidratación en tales concretos llega a ser muy alto.

## **2.2.3 Aditivos químicos**

### **2.2.3.1 Superplastificantes**

Los superplastificantes también llamados aditivos reductores de agua de alto rango porque son capaces de reducir de tres a cuatro veces el agua en una mezcla de concreto dada, en comparación con los aditivos reductores de agua normales consisten en tensioactivos aniónicos de cadena larga y alto peso molecular (20,00 a 30,000) con un gran número de grupos polares en la cadena de hidrocarburo. Cuando se adsorbe en partículas de cemento, el surfactante imparte una fuerte carga negativa, lo que ayuda a disminuir considerablemente la tensión superficial del agua circundante y aumenta considerablemente la fluidez del sistema (Mehta y Monteiro, 2006). La norma ASTM C 494-92 clasifica los superplastificantes como aditivos de Tipo F, cuando los superplastificantes son también retardantes son llamados aditivos del tipo G.

Existen cuatro categorías principales de superplastificantes: condensados de melamineformaldehído sulfonado, condensado de naftalenoformaldehído sulfonado, lignosulfonatos modificados y otros como ésteres acid sulfónicos y ésteres de carbohidrato. Casi todos los superplastificantes están en forma de sales de sodio y en menor cantidad en forma de sales de calcio; las últimas, sin embargo, tienen una solubilidad inferior. Una consecuencia del uso de sales de sodio es la introducción de álcalis adicionales dentro del concreto lo cual puede ser de importancia para las reacciones de hidratación del cemento y para una reacción potencial álcali-sílice (Neville, 2012).

La acción principal de las moléculas de los superplastificantes es envolver las partículas de cemento y darles una carga altamente negativa de modo que se repelen unas de otras. Esto da por resultado la defloculación y la dispersión de las partículas de cemento. Los resultados de la acción del superplastificante se observa en una trabajabilidad muy alta del concreto con una resistencia también muy alta.

El concreto resultante se puede colocar con poca o sin ninguna compactación y no está sujeto a exceso de sangrado o de segregación. Tal concreto se denomina concreto fluido y es útil para colocarse en secciones altamente reforzadas, en áreas inaccesibles y también donde se desean colados muy rápidos. Los superplastificantes no alteran fundamentalmente la microestructura de la pasta de cemento hidratado, el efecto principal es una mejor distribución de las partículas de cemento y consecuentemente su mejor hidratación (Neville, 2012).

### **2.2.3.2. Inclusores de aire**

Los aditivos inclusores de aire (incorporadores de aire) se usan para introducir y estabilizar burbujas microscópicas de aire en el concreto. El inclusor de aire mejora considerablemente la durabilidad de concretos expuestos a ciclos de congelación y deshielo

El aire incorporado mejora la resistencia del concreto al descascaramiento de la superficie causado por el uso de productos descongelantes. Además, también se mejora la trabajabilidad del concreto fresco y se reducen o eliminan tanto la segregación como el sangrado (exudación). El aditivo incorporador de aire se lo adiciona directamente a los materiales del concreto antes o durante el mezclado. Los ingredientes básicos usados en estos aditivos son sales de resinas de madera (resina vinsol), algunos detergentes sintéticos, sales de lignina sulfonatada, sales de ácidos de petróleo, sales de material protaináceo, ácidos grasos y resinosos y sus sales, sulfonatos de alquilbenceno y sales de hidrocarburos sulfonados (Kosmatka, 2004). El concreto con aire incluido contiene diminutas burbujas de aire distribuidas uniformemente por toda la pasta de cemento,

Los vacíos de aire incluido actúan como cámaras huecas en la pasta, donde el agua congelada y el agua emigrante pueden entrar, aliviando la presión y previniendo daños al concreto. Bajo la descongelación, la mayoría del agua retorna para los capilares debido a la acción capilar y a la presión del aire comprimido en las

burbujas. Por lo tanto, las burbujas están preparadas para proteger el concreto del próximo ciclo de congelación-deshielo

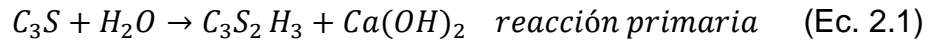
La cantidad de aire a ser empleada en el concreto con aire incluido depende del tipo de estructura, de las condiciones del clima, del número de ciclos de congelación-deshielo, de la exposición a los descongelantes y de la vida útil de la estructura. El código ACI de la construcción recomienda que el concreto que se va a exponer a la congelación y al deshielo en ambiente con humedad o a descongelantes debe tener el contenido de aire para exposición severa con base en el tamaño del agregado grueso. Además, la relación agua-materiales cementantes no debe exceder 0.45.

Muchos de los aditivos del concreto no alteran sus propiedades ni influyen en el proceso de hidratación; sin embargo, la adición de materiales puzolánicos genera una reacción secundaria en el proceso de hidratación que es conocida como reacción puzolánica, misma que se describe a continuación.

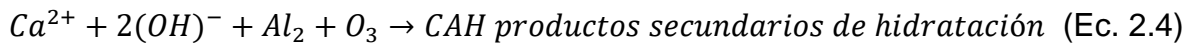
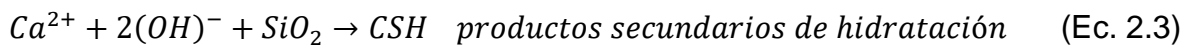
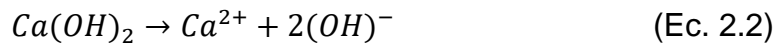
#### **2.2.4 Reacción puzolánica**

Cuando se adiciona puzolana al concreto la hidratación del cemento ocurre en una reacción primaria, mientras que en una reacción secundaria ocurre la hidratación de la puzolana. Para que la reacción secundaria ocurra es necesaria la reacción primaria.

El silicato hidratado de calcio ( $C_3S_2H_3$ ), el aluminato hidratado de calcio ( $C_3AH_6$ ) y el hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) son los productos principales de la hidratación, este último se deposita en forma separada como un sólido cristalino. El  $Ca(OH)_2$  se une a los granos de cemento adyacentes durante el endurecimiento y forman una matriz endurecida que rodea las partículas de la puzolana inalterada. La reacción del silicato tricálcico que producen los productos principales de hidratación es (Mohamed, 1998):

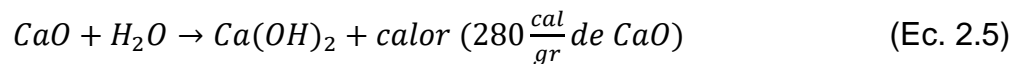


Adicionalmente, la hidratación del cemento conduce a un aumento en el valor de pH del agua de los poros. Las bases fuertes disuelven la sílice y alúmina tanto de los minerales de la puzolana como de los materiales amorfos sobre la superficie de sus partículas. La sílice y alúmina hidratada poco a poco reaccionan con los iones de calcio liberados de la hidrólisis del cemento para formar compuestos insolubles (productos secundarios de hidratación). Esta reacción secundaria es conocida como la reacción puzolánica. Las reacciones puzolánicas que generan productos secundarios de hidratación se dan como:

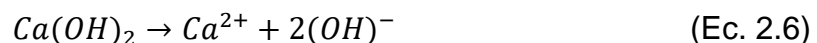


La fuerza cementante de los productos primarios de hidratación es más fuerte que la de los secundarios, sin embargo, tanto la hidratación del cemento como las reacciones puzolánicas pueden durar meses, incluso años después de elaborar la mezcla, por lo tanto, se espera que la resistencia aumente con el tiempo.

Cuando se hidrata el óxido de calcio (CaO) con el agua de los poros de la puzolana se libera una gran cantidad de calor, tan alta como para llegar al punto de ebullición del agua en los poros, la reacción está dada por:



El  $Ca(OH)_2$  resultante de la hidratación del CaO se disocia en el agua de acuerdo con la siguiente ecuación, donde la concentración del calcio y el pH del agua de los poros incrementa, y el  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  de las partículas de puzolana se disuelven.





Los iones de calcio reaccionan con el  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disueltos para formar geles de silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH), respectivamente. Estos geles se unen a las partículas de la puzolana de una forma similar a la producida por la hidratación del cemento Portland. Sin embargo, el proceso del enlace del CaO es mucho más lento que el del proceso del cemento.

### **2.2.5 Agrietamiento del concreto**

Las grietas en el concreto aceleran el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo al permitir el acceso de agentes corrosivos a la superficie del acero. Cuando el acero de refuerzo trabaja en áreas de tensión en la estructura, se producirán pequeñas grietas en el concreto a medida que los esfuerzos excedan la resistencia a la tracción del acero. La mayoría de estas son pequeñas grietas que intersectan al acero de refuerzo en ángulos rectos y no conducen a la corrosión del acero, ya que la entrada de los agentes corrosivos está limitada y contenida por la alcalinidad local de la matriz cementante. Obviamente, existe un límite para esta capacidad de "autocuración" (Wessel, 2004).

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado depende en gran medida de la resistencia del concreto a la penetración de agentes agresivos (por ejemplo, cloruros,  $\text{CO}_2$ , sulfatos y agua) cuando se exponen a su entorno de servicio. Esto se debe a que la mayoría de los mecanismos de degradación que afectan al concreto están controlados por el transporte de agentes agresivos a través de su microestructura inevitablemente porosa. La vida útil de las estructuras de concreto en un ambiente marino a menudo está determinada por el tiempo que tardan los iones de cloruro en penetrar la cubierta de concreto en cantidades suficientes para inducir la corrosión del acero de refuerzo (Abyaneh et al., 2016)

En la práctica, las estructuras de concreto armado están sujetas a varios tipos de acciones que inducen tensiones que exceden la resistencia a la tracción del concreto, originando la formación de grietas (TR 22, 2010). Estos incluyen carga

estructural, gradientes térmicos, ciclos de mojado-secado y ciclos de congelación-deshielo. Como tal, las estructuras de concreto armado en servicio casi siempre están agrietadas; las grietas superiores a 0.1 mm afectan seriamente la impermeabilidad del concreto. Las grietas también actúan como vías para agentes agresivos, acelerando así el proceso de corrosión (TR 44, 2015). Cuando las grietas aparecen, su influencia en el transporte supera la de los poros capilares debido a su mayor tamaño y menor longitud de flujo. Por lo tanto, las grietas no solo afectan la permeabilidad, sino también la durabilidad a largo plazo de las estructuras de concreto armado (Abyaneh et al., 2016).

El daño directo que resulta de la corrosión del acero en el concreto reforzado es la reducción del diámetro y el área de la sección transversal de la varilla. El riesgo para la seguridad de la estructura será una función de la diferencia residual entre el aumento del nivel de tensión resultante y la resistencia elástica del acero. Esta diferencia será pequeña, y se incurrirá en un alto riesgo de seguridad, si la reducción en la sección es severa y la tensión de trabajo inicial del acero es alta. Una falla frágil del acero puede ocurrir con solo una pequeña pérdida real de metal, tales fallas resultan de la presencia simultánea de tensiones de tracción y un medio corrosivo (Bentur et al., 2005). Para entender el comportamiento del acero ante los efectos de la corrosión es necesario conocer su estructura y sus propiedades mecánicas, mismas que se describen a continuación.

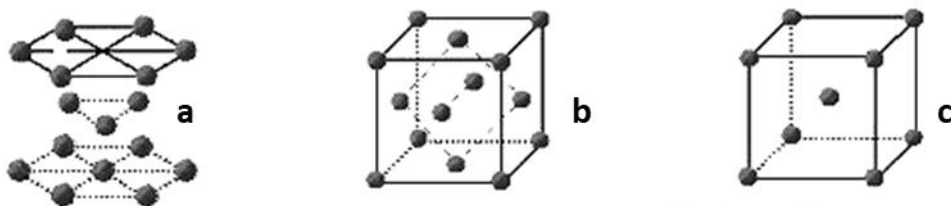
### **2.3 Generalidades del acero de refuerzo**

El acero es un material del grupo de los metales, este grupo de materiales posee excelentes propiedades, entre sus beneficios más notorios se encuentra su capacidad para conducir calor y electricidad, y su alta resistencia y  $\mu$ . Estas propiedades hacen que sea un material altamente usado en infinidad de industrias, particularmente en aplicaciones estructurales; además mediante ciertos tratamientos y aleaciones, pueden mejorar propiedades específicas. Tal es el caso del acero que es una aleación metálica hierro-carbono, el contenido de carbono

suele ser inferior al 2%. En estos tratamientos se alteran sus propiedades fisicoquímicas a nivel molecular con el objetivo de modificar su comportamiento mecánico de acuerdo con necesidades particulares.

### 2.3.1 Estructura general de los metales

El enlace atómico que presentan los sólidos cristalinos, como los metales, es de tipo metálico y de naturaleza no direccional. Por consiguiente, no hay restricciones, en cuanto al número y posición de átomos vecinos más próximos; lo cual conduce, para la mayoría de los metales, a microestructuras cristalinas con gran número de vecinos muy próximos y densamente empaquetados. La mayoría de los metales comunes cristalizan en las siguientes tres microestructuras cristalinas (Figura 2.2): 1) cúbica centrada en las caras (FCC), en este arreglo los átomos están localizados en los vértices y en el centro de todas las caras del cubo o celdilla unidad cúbica y todos se comparten con los átomos vecinos, 2) cúbica centrada en el cuerpo (BCC), aquí la celdilla unidad cúbica tiene átomos localizados en los ocho vértices y un átomo en el centro, los ocho átomos ubicados en los vertices son compartidos con las celdillas vecinas y el átomo del centro no se comparte y 3) hexagonal compacta (HC), donde las bases superior e inferior consisten en hexágonos regulares con sus átomos en los vértices y uno en el centro y otro plano de tres átomos está situado entre ambos planos (Callister, 2002).



**Figura 2. 2 Estructuras cristalinas comunes: a) hexagonal compacta, b) cúbica centrada en las caras y c) cúbica centrada en el cuerpo**

Los metales que presentan microestructura cristalina FCC tienden a poseer baja resistencia mecánica y alta  $\mu$ , mientras que los metales con arreglo BCC, como el

fierro, presentan alta resistencia mecánica, pero disminuye su  $\mu$  y finalmente los de tipo HC se caracterizan por ser materiales frágiles (Askeland, 1998).

### **2.3.2 Imperfecciones de los metales**

Debido a la naturaleza de los metales, las redes cristalinas no están exentas de imperfecciones, las cuales tienen efectos en el comportamiento mecánico del material. Estas imperfecciones se presentan como irregularidades en la red cristalina y se analizan a continuación.

#### **2.3.2.1 Defectos puntuales**

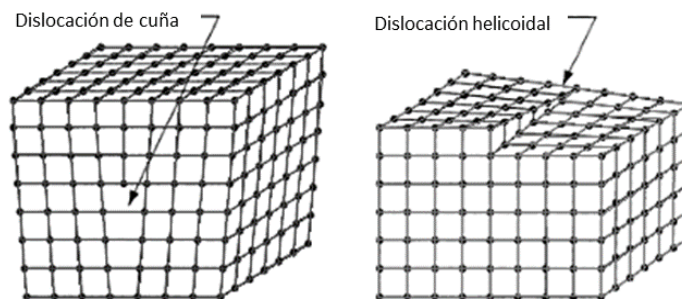
Los defectos puntuales están constituidos por vacantes, es decir, lugares reticulares vacíos en la red cristalina, por autointersticiales que son átomos de disolvente que ocupan posiciones intersticiales, y por átomos de impurezas en los sólidos como disoluciones sólidas y unidades de concentración (Callister, 2002).

Las vacantes pueden producirse durante la solidificación como resultado de perturbaciones locales durante el crecimiento de los cristales, o por las reordenaciones atómicas en un cristal ya existente debido a la movilidad de los átomos (Smith, 2006).

Las disoluciones sólidas pueden ser de tipo sustitucional o intersticial, en el primer caso los átomos de impurezas o soluto reemplazan o sustituyen a los átomos del disolvente, mientras que en el segundo caso un átomo de soluto se coloca en un intersticio y va llenando los vacíos o los intersticios atómicos del disolvente; en la disolución sólida se mantiene la estructura cristalina original y no se genera una nueva fase. En las unidades de concentración se expresa la composición de una aleación en función de la concentración de sus componentes, ya sea el porcentaje en peso o en porcentaje atómico (Callister, 2002).

### 2.3.2.2 Defectos lineales

Los defectos lineales o dislocaciones en los sólidos cristalinos son defectos que provocan una distorsión de la red centrada en torno a una línea. Las dislocaciones pueden ser de dos tipos, dislocación de cuña que consiste en una porción extra de un plano de átomos o semiplano, cuya arista termina dentro del cristal, en la región afectada existe una red localmente distorsionada; y dislocación helicoidal, la cual se presenta al aplicar un esfuerzo cizallante, la distorsión atómica asociada a una dislocación helicoidal también es lineal y situada a lo largo de la línea de la dislocación, Figura 2.3 (Callister, 2002). Ambos tipos de dislocaciones se crean durante la solidificación de los sólidos cristalinos y también se pueden formar en la deformación plástica o permanente del metal, por condensación de vacantes y por desajuste atómico en las disoluciones sólidas (Smith, 2006).



**Figura 2. 3 Dislocaciones de cuña y helicoidal en arreglos cristalinos**

### 2.3.2.3 Defectos planares

Los defectos planares incluyen superficies externas, límites de grano y maclas, (Smith, 2006). La superficie libre o externa de cualquier material es el tipo más común de defecto planar, ya que los átomos están enlazados a otros átomos sólo, por un lado. Por consiguiente, los átomos de la superficie tienen menor número de vecinos y, por lo tanto, tienen un mayor estado de energía, que hace a la superficie susceptible a erosionar y a reaccionar con elementos del ambiente.

En los metales, los límites de grano se originan durante la solidificación, cuando los cristales formados desde diferentes núcleos crecen simultáneamente juntándose unos con otros. El límite de grano es una región estrecha entre dos granos de entre dos y cinco diámetros atómicos de ancho, y es una región de átomos no alineados entre dos granos adyacentes. El ordenamiento atómico en los límites de grano es menor que en los granos debido a esta falta de orden. A temperatura ordinaria, los límites de grano disminuyen la plasticidad dificultando el movimiento de dislocación en la región del límite de grano.

#### **2.3.2.4 Defectos volumétricos**

Los defectos volumétricos o tridimensionales se forman cuando un grupo de átomos o de defectos puntuales se unen para formar un vacío tridimensional o poro de manera inversa, un grupo de átomos de alguna impureza puede unirse para formar un precipitado tridimensional. El tamaño de un defecto volumétrico puede variar desde unos cuantos nanómetros hasta centímetros o, en ocasiones, puede ser mayor (Smith, 2006).

La mayoría de estos defectos son de dimensiones moleculares y solo se puede observar mediante microscopios potentes, sin embargo son de gran influencia en el comportamiento mecánico del material, ya que generan zonas vulnerables. Por ejemplo, en el caso del acero se puede presentar falla frágil cuando este se somete a un esfuerzo.

Conocer la estructura molecular y los defectos que comúnmente presentan los metales es importante para manipular y controlar sus propiedades, gracias a esto se han desarrollado diferentes tipos de aleaciones con características específicas para satisfacer diferentes necesidades. Sin embargo, cuando estas últimas se usan en combinación con otros materiales como el concreto y se exponen al medio ambiente, surgen otros problemas como la corrosión, que afecta negativamente su comportamiento mecánico.

Actualmente existen diversos métodos para retrasar el inevitable proceso de corrosión, sin embargo, es necesario investigar si estos métodos afectan el comportamiento mecánico de los metales.

### **2.3.3 Comportamiento mecánico de los metales**

Comúnmente los materiales que se encuentran en servicio están sometidos a fuerzas o cargas; por lo tanto, es necesario conocer las características del material para diseñar elementos resistentes a las deformaciones. El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, o sea su deformación. Las propiedades mecánicas más importantes en los metales son el módulo de elasticidad, la resistencia, la dureza, la  $\mu$  y la rigidez; estas propiedades se determinan mediante ensayos de laboratorio en donde se producen las condiciones de servicio hasta llegar al límite de fractura.

Para lo anterior se deben considerar factores como la naturaleza de la carga, la duración y las condiciones del medio. La carga aplicada puede ser una tracción, una compresión o una cizalladura, y su magnitud puede ser constante o fluctuar continuamente; el tiempo de aplicación varía desde unos segundos hasta varios años.

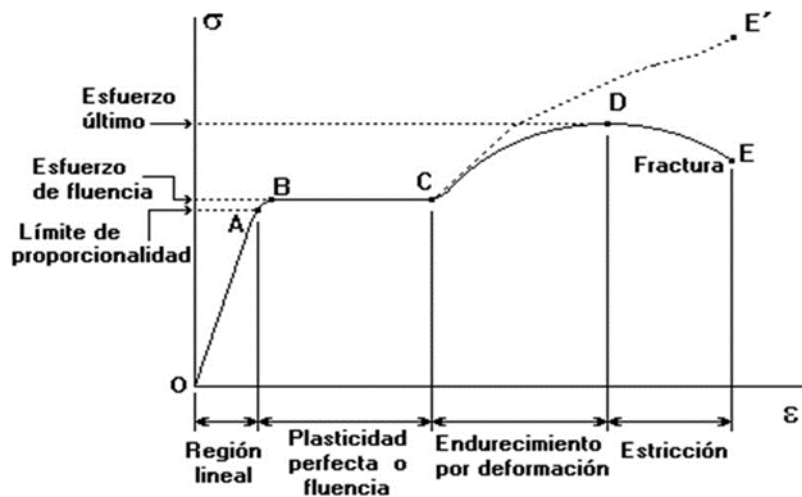
En el ensayo a tracción se deforma una probeta hasta la rotura, con una carga de tracción uniaxial que aumenta gradualmente. El resultado de esta prueba se registra como carga en función del alargamiento para obtener tensión nominal y deformación nominal respectivamente. La tensión nominal  $\sigma$  se define mediante la relación:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde F es la carga instantánea aplicada perpendicularmente a la sección de la probeta en Newtons (N) o libras fuerza (lbf) y  $A_0$  es el área de la sección original

antes de aplicar la carga y está dada en  $m^2$  o  $pulg^2$ , por lo tanto, las unidades de  $\sigma$  se dan en libras fuerza por pulgada cuadrada (psi) o megapascuales (MPa).

Si una carga es estática o cambia de forma lenta con el tiempo y se aplica uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza, el comportamiento mecánico puede ser estimado con un ensayo de esfuerzo-deformación a temperatura ambiente y sus propiedades se pueden observar en un diagrama esfuerzo-deformación similar a la Figura 2.4 (Beer, 2007).



**Figura 2. 4 Diagrama esfuerzo deformación para metales sometidos a ensayos de tensión**

### 2.3.3.1 Deformación elástica y Ley de Hooke

La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña ya que, los átomos del metal se estiran en sus posiciones originales, pero sin alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal es retirada, los átomos vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial sin sufrir daños (Smith, 2006)

En muchos metales sometidos a esfuerzos de tracción el esfuerzo y la deformación son proporcionales, de acuerdo con la ley de Hooke,



$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Ec. 2.8})$$

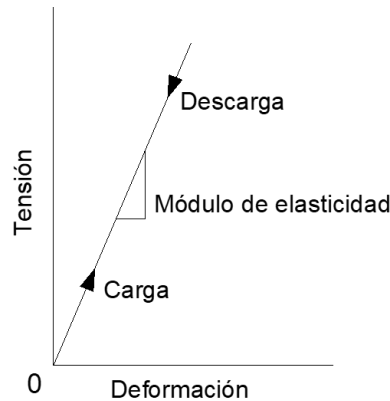
donde la constante de proporcionalidad  $E$  es el módulo de elasticidad y está dado en MPa o psi. El módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del metal o aleación (Smith, 2006). Como la deformación  $\varepsilon$  es una cantidad adimensional, el módulo  $E$  se expresa en las mismas unidades que es esfuerzo  $\sigma$ .

Cuando la deformación es proporcional a la tensión, la deformación se denomina deformación elástica; al presentar la tensión en el eje de abscisas se obtiene una relación lineal, como se observa en la Figura 2.5 la pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad  $E$ . Este módulo puede ser interpretado como la rigidez, o sea, la resistencia de un material a la deformación elástica. Cuando mayor es el módulo, más rígido es el material, por lo tanto, menor será la deformación elástica originada cuando se aplica una determinada tensión (Callister, 2002).

La deformación elástica no es permanente, lo cual significa que cuando se retira la fuerza, la pieza vuelve a su forma original, ver Figura 2.5; la aplicación de la carga corresponde al movimiento desde el origen a lo largo de la línea recta. Al retirar la carga, la línea es recorrida en la dirección opuesta volviendo al origen.

A escala atómica la deformación elástica macroscópica se manifiesta como pequeños cambios en los espacios interatómicos y los enlaces interatómicos son estirados, por lo tanto, la magnitud del módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos, es decir, de las fuerzas de enlace interatómicas. Para la mayoría de los materiales metálicos, la deformación elástica únicamente persiste hasta deformaciones unitarias de alrededor de 0.005. A medida que el material se deforma más allá de este punto, el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación (la ley de Hooke deja de ser válida) y ocurre la

deformación plástica, la cual es permanente, y gradual en la mayoría de los metales (Callister, 2002).



**Figura 2. 5 Diagrama esquemático tensión-deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga-descarga**

### 2.3.3.2 Deformación plástica

En los materiales que tienen arreglos cristalinos, como los metales, la deformación tiene lugar mediante un proceso de deslizamiento, en el cual está involucrado el movimiento de las dislocaciones. Por lo tanto, la capacidad de un material para deformarse plásticamente depende de la capacidad de las dislocaciones para moverse. Puesto que la dureza y la resistencia (tanto a la deformación plástica como a la tracción) están relacionadas con la facilidad con la cual la deformación plástica puede ocurrir, la resistencia mecánica se puede aumentar reduciendo la movilidad de las dislocaciones; o sea, mayores fuerzas mecánicas serán requeridas para iniciar la deformación plástica. Por el contrario, cuando más holgado sea el movimiento de las dislocaciones, mayor será la facilidad con que un metal podrá deformarse, y será más blando y menos resistente. Virtualmente todas las técnicas de refuerzo (o sea, de endurecimiento) se basan en este principio: la restricción y el impedimento de las dislocaciones convierte al material en más duro y resistente (Callister, 2002).

Cuando un cristal se deforma hay alguna distorsión en la estructura cristalina, la deformación resulta mayor sobre los planos de deslizamiento y fronteras de grano y esta distorsión aumenta a mayor deformación. Esto se manifiesta con un incremento en resistencia para una deformación posterior. Uno de los aspectos notorios de la deformación plástica es que el esfuerzo necesario para iniciar el deslizamiento es menor que el requerido para continuar la deformación en los planos subsecuentes. Independientemente de la deformación de la estructura reticular, el apilamiento de las dislocaciones contra obstáculos (como fronteras de grano y átomos extraños) y el enlace de dislocaciones en los planos de deslizamiento que se cortan incrementan la resistencia a la deformación posterior (Avner, 1988).

### **2.3.3.3 Endurecimiento por deformación**

El endurecimiento por deformación es un fenómeno por el cual un metal dúctil se hace más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Denominado también como acritud o endurecimiento por trabajo en frío, la mayoría de los metales se endurecen por deformación a temperatura ambiente. El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica con base en las interacciones entre los campos de deformación de las dislocaciones. La densidad de dislocaciones en un metal aumenta con la deformación; en consecuencia, la distancia media entre dislocaciones disminuye resultando en una disminución del movimiento de una dislocación debido a la presencia de otras dislocaciones. A medida que la densidad de dislocaciones aumenta, la resistencia al movimiento de éstas debido a otras dislocaciones se hace más pronunciada. Así, la tensión necesaria para deformar el metal aumenta con la acritud (Callister, 2002).

Cuando metales dúctiles experimentan un trabajo en frío a temperatura ambiente, se endurecen por deformación debido a la interacción entre las dislocaciones, pero también se presenta una disminución del alargamiento ( $\mu$ ) asociado al aumento de la resistencia de tracción (Smith, 2006).

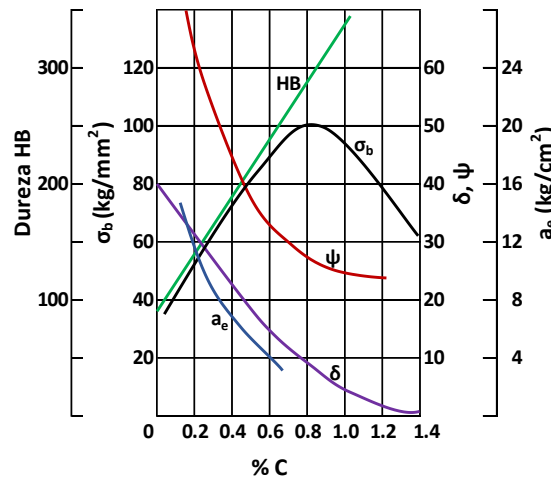
Para reforzar y endurecer un metal comúnmente se alea con átomos de impurezas que forman soluciones sólidas sustitucionales o intersticiales, por este motivo se denomina endurecimiento por disolución sólida. El aumento de la concentración de los átomos de impurezas produce un aumento en la resistencia de la tracción y de la dureza; las aleaciones son más resistentes que los metales puros debido a que los átomos de impurezas en solución producen una deformación de la red de los átomos vecinos del solvente dificultando las interacciones de los campos de deformación de la red de las dislocaciones y de estos átomos de impurezas. Por ejemplo, una impureza cuyo tamaño es menor que el átomo del cristal al cual substituye ejerce deformaciones de tracción sobre la red del entorno; inversamente, un átomo sustitucional mayor impone deformaciones de compresión en su vecindad; en estos casos los átomos de soluto tienden a segregarse alrededor de las dislocaciones de tal manera que se reduzca la energía de deformación total, es decir, para que se elimine parte de la energía almacenada en la red alrededor de una dislocación. Para que esto ocurra una impureza menor que el átomo solvente se localiza donde la deformación de tracción anula parte de la deformación de compresión de la dislocación (Callister, 2002).

La resistencia al deslizamiento es mayor cuando están presentes átomos de impurezas debido a que la deformación total de la red debe aumentar si a partir de ellos se separa una dislocación. Además, las mismas interacciones de la red existirán entre los átomos de impurezas y dislocaciones que están en movimiento durante la deformación plástica. Por lo tanto, una mayor tensión aplicada es necesaria para primero iniciar y después continuar la deformación plástica en las aleaciones que son soluciones sólidas.

Todas las propiedades del metal que dependen de su estructura se ven afectadas por la deformación plástica o por el trabajo en frío. La resistencia a la tensión, la resistencia a la fluencia y la dureza aumentan, mientras que la  $\mu$ , representada por el porcentaje de alargamiento, disminuye. Aunque la resistencia y la dureza aumentan, la rapidez de cambio para cada una no es la misma; la dureza aumenta

más rápidamente en el primer 10% de reducción, en tanto que la resistencia a la tensión aumenta aproximadamente de manera lineal. La resistencia a la fluencia aumenta más rápidamente que la resistencia a la tensión, así que, a mayor intensidad de deformación plástica, el intervalo entre la resistencia de fluencia y de tensión disminuye. La  $\mu$  sigue una trayectoria opuesta a la de la dureza, un gran decremento en el primer 10% de reducción y después una disminución con una rapidez menor (Avner, 1988).

En los aceros al carbono se establecen relaciones entre el carbono, la dureza y otras propiedades como se muestra en la Figura 2.6 (Frómeta y Delás, 2009). En la cual se observa que la dureza (HB) aumenta con el incremento de carbono (%C), del mismo modo la resistencia ( $\sigma_b$ ) aumenta hasta un punto máximo en el cual comienza a disminuir hasta la ruptura, sin embargo, el alargamiento ( $\delta$ ), la estricción ( $\psi$ ) y la resiliencia ( $a_e$ ) disminuyen con el incremento de carbono.



**Figura 2. 6 Relación del contenido de carbono en las propiedades mecánicas del acero (Frómeta y Delás, 2009)**

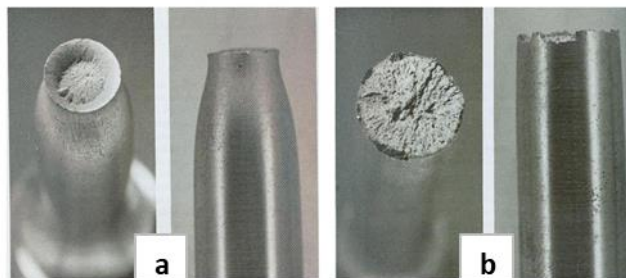
La deformación nominal se define como la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la muestra considerada (Smith, 2006).

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde  $l_0$  es la longitud original antes de aplicar la carga,  $l_i$  es la longitud instantánea y  $\Delta l$  es el alargamiento producido por la deformación. La deformación nominal no tiene unidades, por lo tanto, es independiente del sistema de unidades.

#### 2.3.3.4 Fractura

El proceso de fractura de un metal está compuesto de dos etapas, la formación y la propagación de una fisura en respuesta a una tensión aplicada, la cual puede ser dúctil o frágil, como se muestra en la Figura 2.7, esta clasificación se basa en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles normalmente tienen deformaciones plásticas substanciales con muy alta absorción de energía antes de la fractura, el proceso se da de manera lenta a medida que la grieta se extiende. Por otro lado, en la fractura frágil las grietas se extienden de forma rápida con poca deformación plástica y poca absorción de energía, estas grietas se consideran inestables y la propagación de la grieta una vez iniciada continua espontáneamente sin un aumento en la tensión aplicada, ocasionando una fractura súbita y catastrófica sin previo aviso (Callister, 2002).



**Figura 2. 7 Fractura en pruebas de tensión de metales a) fractura dúctil, b) fractura frágil**

La fractura dúctil se presenta en metales blandos, normalmente a temperatura ambiente, aunque en algunos metales se puede presentar a altas temperaturas. Estos materiales se rompen cuando la estricción se reduce a un área de casi el 100%; una vez iniciada la estricción se forman pequeñas microcavidades en el interior de la sección del metal, a medida que la deformación aumenta estas

microcavidades se hacen mayores, se juntan y forman una grieta elíptica perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada, la grieta continúa creciendo mediante la unión de las microcavidades hasta llegar a la fractura.

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos; este proceso es conocido como descohesión y se denomina fractura transgranular o transcristalina, debido a que las grietas pasan a través de los granos. En algunas aleaciones la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes del grano, esta fractura se denomina intergranular. Este tipo de fractura se produce después de un proceso que debilita o fragiliza las regiones de los bordes de grano (Callister, 2002).

La resistencia a la fractura de un material sólido es una función de las fuerzas cohesivas que existen entre los átomos. La resistencia cohesiva teórica de un sólido elástico frágil se estima aproximadamente igual a  $E/10$ , la resistencia a la fractura experimental de la mayoría de los materiales de ingeniería normalmente oscila entre 10 y 1000 veces menor que el valor teórico. A. A. Griffith en 1920 propuso que esta discrepancia entre la resistencia cohesiva teórica y la resistencia a la fractura observada se debía a la presencia de grietas microscópicas, las cuales siempre existen en condiciones normales en la superficie y en el interior de los materiales (Callister, 2002).

Las grietas se mueven lo suficientemente lento para verlas extenderse, por lo tanto, el fenómeno no es instantáneo puesto que se necesita cierto tiempo para alimentar la energía de la grieta desde el campo de esfuerzo hasta la grieta para que ésta se propague. Una grieta estática puede ser estable y no se propagará, hasta que determinado nivel de carga provoque que la grieta sea inestable y se propague hasta llegar a la fractura. Griffith mostró que el crecimiento de la grieta ocurre cuando la velocidad de liberación de energía de la carga aplicada es mayor que la velocidad de la energía del crecimiento de la grieta. El crecimiento de la grieta puede

ser estable o inestable. Este último caso ocurre cuando la *velocidad* de cambio de liberación de energía en relación con la longitud de la grieta es igual o mayor que la *velocidad* de cambio de la energía del crecimiento de la grieta (Budynas y Nisbett, 2008).

En la Figura 2.8 se observa que la magnitud de la tensión localizada disminuye con la distancia a la punta de la grieta, en las posiciones muy alejadas la tensión es exactamente la tensión nominal  $\sigma_0$ , o sea la carga dividida por el área de la sección. Debido a la capacidad para amplificar en sus alrededores a una tensión aplicada, estos defectos se denominan en ocasiones concentradores de tensión. Si se supone que la grieta tiene una forma elíptica y está orientada con su eje mayor perpendicular a la tensión aplicada, la tensión máxima en el extremo de la grieta,  $\sigma_m$ , puede ser aproximada por la siguiente ecuación (Callister, 2002):

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

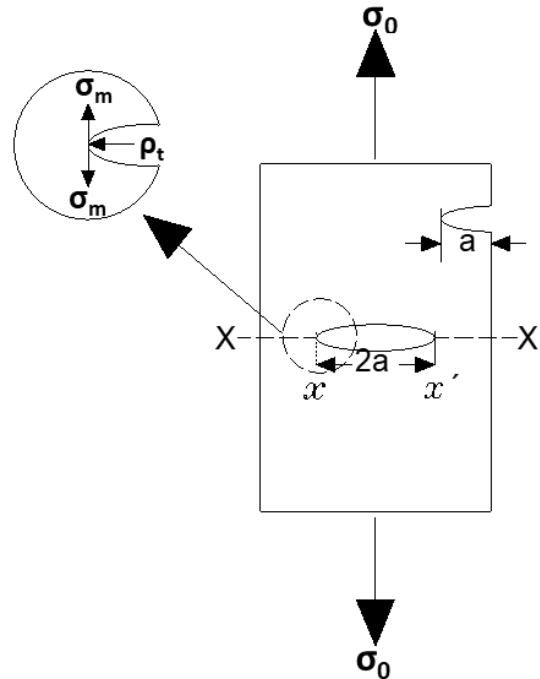
Donde  $\sigma_0$  es la magnitud de la tensión nominal aplicada,  $\rho_t$  es el radio de curvatura de la punta de la grieta, y  $a$  representa la longitud de una grieta superficial, o bien la mitad de la longitud de una grieta interna. Así para una microgrieta relativamente larga que tiene un radio de curvatura pequeño, el factor  $(a/\rho_t)^{1/2}$  puede ser muy grande. Esto dará un valor de  $\sigma_m$  muchas veces mayor que  $\sigma_0$ . A menudo el cociente  $\sigma_m/\sigma_0$  se denomina factor de concentración de tensiones  $K_t$

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

El cual es simplemente una medida del grado con que una tensión externa es amplificada en el extremo de una grieta pequeña. La amplificación de la tensión no se restringe a defectos microscópicos, pueden ocurrir en discontinuidades macroscópicas internas como agujeros, en ángulos vivos y en entallas en



estructuras grandes. Esto explica porque los aceros corroídos, principalmente aquellos que presentan corrosión localizada, tienden a presentar fallas frágiles.



**Figura 2. 8 Representación de grietas internas y externas causantes de la fractura en un material**

Durante la propagación de una grieta se produce la liberación de energía de deformación elástica, o sea, parte de la energía que es almacenada en el material cuando es deformado elásticamente. También se forman nuevas superficies en las caras de la grieta cuando esta se extiende, lo que origina un incremento en la energía superficial del sistema. Griffith desarrolló un criterio para la propagación de una grieta elíptica realizando un balance energético entre estas dos energías. Demostró que la tensión crítica que se requiere para propagar una grieta en un material frágil está dada por (Callister, 2002)

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde  $E$  es el módulo elástico,  $\gamma_s$  es la energía superficial específica y  $a$  es la mitad de la longitud de una grieta interna. La idea principal de la obra de Griffith fue que

la propagación de grietas se determina por la relación entre la energía de deformación y la energía superficial necesaria para la creación de las nuevas superficies al avanzar la grieta. Griffith afirmó que cuando una grieta se propaga, la disminución de la energía de deformación es compensada por el aumento de la energía potencial causada por la tensión en las superficies de grieta recién creadas (Razvan, 2009 citado en Rodríguez, 2013).

La ecuación anterior es aplicable a materiales frágiles, pero la mayoría de los metales experimentan deformación plástica antes de la fractura lo cual produce un achatamiento del extremo de la grieta, o sea, un aumento en el radio de la punta de esta, lo cual aumenta la resistencia a la fractura. Esto se considera reemplazando  $\gamma_s$  por  $\gamma_s + \gamma_p$  en la ecuación anterior, donde  $\gamma_p$  representa la energía de deformación plástica asociada con la extensión de la grieta. Para materiales muy dúctiles puede ocurrir que  $\gamma_p \gg \gamma_s$ . en la década de 1950 G.R. Irwin incorporó ambos términos en uno solo, obteniendo

$$G = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

que representa la **energía disponible para la fractura** o la tasa de liberación de energía elástica. La extensión de la grieta ocurre cuando  $G$  excede de un valor crítico  $G_c$  (Callister, 2002).

### 2.3.3.5 Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar; esta propiedad se denomina módulo de resiliencia  $U_r$ , y es la energía de deformación por unidad de volumen requerido para deformar un material hasta el límite elástico (Callister, 2002).

Matemáticamente se representa como el área bajo la curva tensión deformación hasta la fluencia.

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Suponiendo que la región es elásticamente lineal,

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (\text{Ec. 2.15})$$

En donde  $\varepsilon_y$  es la deformación en el límite elástico; las unidades de resiliencia son el producto de las unidades de los ejes del diagrama tensión-deformación (pulg.-lb<sub>f</sub>/pulg.<sup>3</sup> = psi o J/m<sup>3</sup> = Pa). Tanto pulgadas por libra fuerza como Joules son unidades de energía, por lo tanto, el área bajo la curva tensión-deformación representa absorción de energía por unidad de volumen (en pulgadas cúbicas o metros cúbicos) de material. Los materiales resilientes son aquellos que tienen un límite elástico muy alto y un módulo de elasticidad muy bajo, sin embargo, esta propiedad puede afectarse debido al uso al que se expone el material, por ejemplo, materiales del mismo lote pueden tener resultados diferentes; del cual aquellos con mayor resiliencia generalmente tendrán mayor tenacidad.

### **2.3.3.6 Tenacidad (T)**

La tenacidad es la capacidad de los materiales para absorber energía, en particular bajo un esfuerzo repentino (condiciones de impacto); deformándose plásticamente antes de la fractura. La tenacidad no se considera normalmente en el diseño de ingeniería, pero es una propiedad importante en la selección de un acero estructural para uso bajo carga y/o condiciones ambientales que pueden dar lugar a fractura frágil.

Un acero resistente a la fractura frágil, bajo condiciones de impacto, debe tener la capacidad de absorber energía considerable cuando se producen concentraciones

de tensión. La fractura frágil puede ocurrir en esfuerzos por debajo de los niveles de diseño normales; cuando el acero se somete a cargas de impacto a temperaturas relativamente bajas. Bajo tales condiciones, el acero experimenta una transición del comportamiento de fractura dúctil (absorción de alta energía) a temperaturas más altas a un comportamiento de fractura no dúctil o frágil (absorción de baja energía) a temperaturas más bajas. Diferentes aceros varían ampliamente en la temperatura a la que se produce la transición de fractura dúctil a frágil (Young, 1998).

Los altos valores de absorción de energía están asociados con una fractura dúctil, de tipo cortante, de aspecto fibroso con deformación plástica; los valores de baja absorción de energía se asocian con una fractura frágil y granular (Young, 1998). Las unidades de medida son las mismas que las de  $U_r$ .

### 2.3.3.7 Ductilidad ( $\mu$ )

La  $\mu$  es la capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse; un material es dúctil si es capaz de deformarse de manera permanente y apreciable en el rango inelástico antes de fallar. De la  $\mu$  dependen la absorción de energía y la disipación de energía en un material (Bozzo, 2004).

Un material que experimenta poca o nula deformación plástica se considera frágil; en la Figura 2.9 se ilustra el diagrama tensión-deformación para materiales dúctiles y frágiles, como materiales frágiles pueden considerarse aquellos que tienen una deformación a la fractura menor que aproximadamente 5% (Callister, 2002).

La  $\mu$  en un material se puede medir de dos maneras (Askeland, 1998): en una primera opción se miden las distancias entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El porcentaje de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

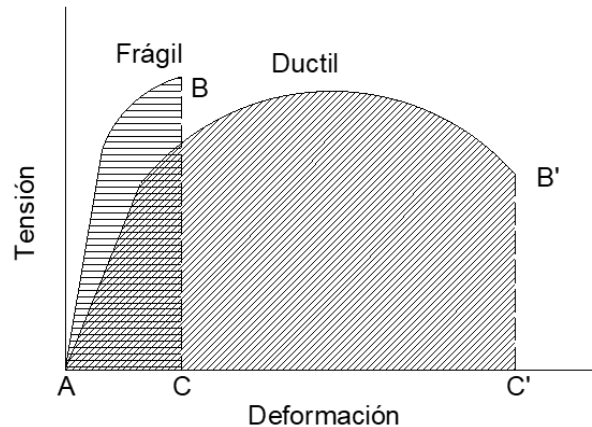
Donde  $l_f$  es la distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material y  $l_o$  es la longitud inicial.

Un segundo método para medir la  $\mu$  es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El porcentaje de reducción en área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba:

$$\% \text{ de reducción en área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde  $A_f$  es el área de la sección transversal en la superficie de la fractura.

La  $\mu$  de un material indica, en el diseño, el grado en que una estructura podrá deformarse antes de la fractura; así también, especifica el grado de deformación que puede permitirse durante las operaciones de conformación (Callister, 2002).



**Figura 2. 9 Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura**

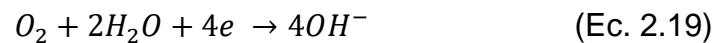
#### **2.4 El fenómeno de la corrosión en el concreto reforzado**

La corrosión del acero es esencialmente un proceso electroquímico que involucra la formación de un ánodo y un cátodo, con una corriente eléctrica conformada por electrones fluyendo en la varilla de acero y iones moviéndose en la solución del poro

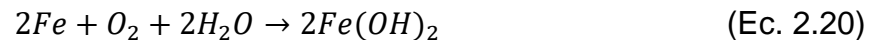
del concreto entre el ánodo y el cátodo. La corrosión se da en el ánodo donde los átomos de hierro son oxidados a iones de  $Fe^{2+}$ , liberando electrones que fluyen a través de la varillas hasta el cátodo. La oxidación del hierro tiene lugar de acuerdo con la siguiente reacción anódica:



El cátodo está localizado a cierta distancia y requiere la presencia de humedad y oxígeno para que ocurra la reducción de oxígeno conforme a la siguiente reacción catódica:



Los átomos de hierro se transforman en iones ferrosos que se disuelven en la solución alrededor del ánodo. Pueden difundirse y combinarse con los iones hidroxilo ( $OH^-$ ) dando lugar al hidróxido ferroso [ $Fe(OH)_2$ ], de acuerdo con la siguiente reacción redox:



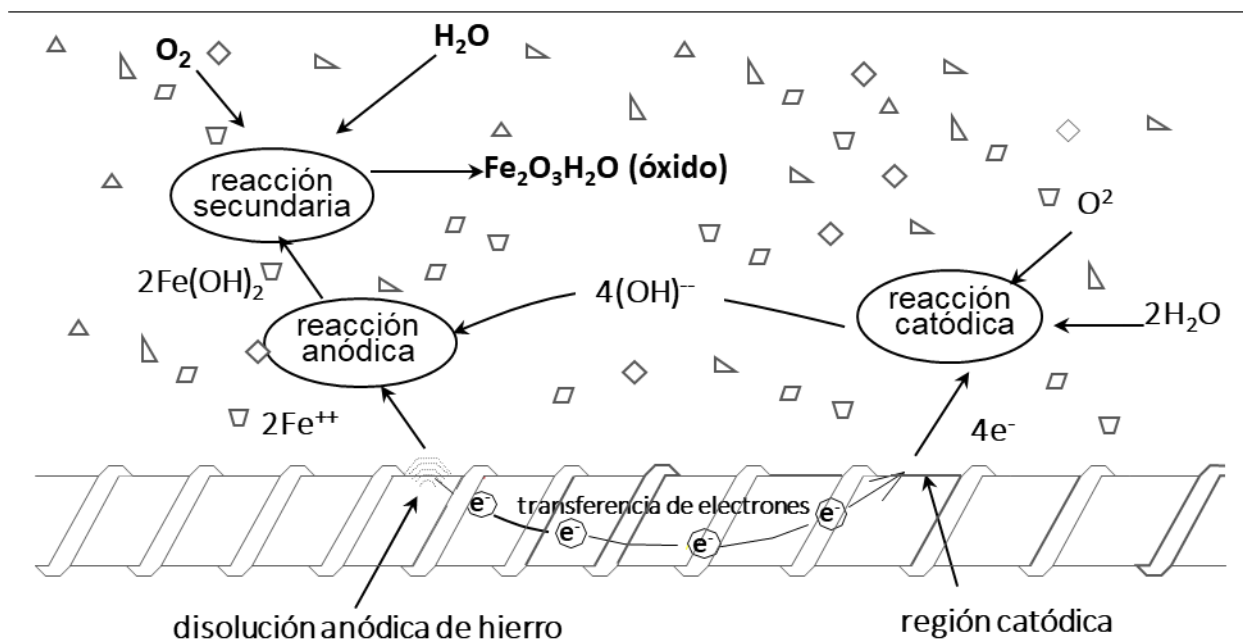
El óxido ferroso hidratado formado de acuerdo con la ecuación 2.20 ( $FeO \cdot H_2O$ ) se oxida adicionalmente para formar óxido férrico hidratado ( $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ), que es un producto rojizo, mejor conocido como óxido. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.10.

La corrosión en el acero de refuerzo produce dos tipos de efectos dañinos para las estructuras (Young 1998):

1. Reducción de la sección del área de acero, por lo tanto, reduce la capacidad de carga del acero de refuerzo.

2. Agrietamiento y desprendimiento del concreto, es el resultado de la expansión de las tensiones creada por el óxido. El óxido es naturalmente voluminoso (el volumen es de dos a seis veces más que el acero con que fue formado) y es depositado en espacios confinados entre el acero y el concreto.

Sin embargo, las cantidades iniciales de óxido formado por la corrosión, 0.1 a 0.5 mm del acero de refuerzo, no influyen en la capacidad de carga del acero, pero si es suficiente para causar grietas. Por lo tanto, el primer daño que concierne al proceso de corrosión del acero en concreto es la aparición de grietas y el desprendimiento de las mismas. La secuencia de los eventos usualmente involucra la aparición de grietas en la superficie del concreto, paralela al acero de refuerzo, este es un aviso de que la corrosión está ocurriendo y es necesario el mantenimiento y reparación de la estructura (Young, 1998).



**Figura 2. 10 Representación esquemática de la corrosión del acero en concreto (Montes, 2003)**

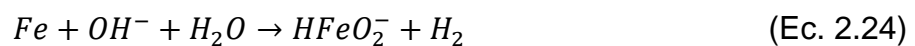
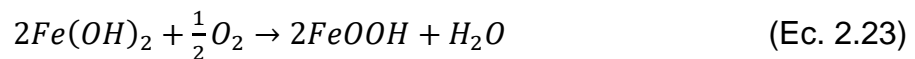
Un concreto ordinario no es suficiente para proteger al acero en ambientes agresivos, se requiere el uso de concretos de alto desempeño que pueden incluir aditivos químicos y minerales, puzolanas, materiales cementantes suplementarios

y una relación agua-cemento inferior a 0.45. Esto con la finalidad de evitar la pérdida de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo para que la estructura cumpla con el periodo de vida útil sin poner en riesgo la seguridad estructural y todo lo que esto conlleva.

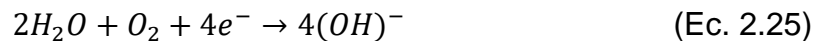
## 2.5 Mecanismo de corrosión del acero de refuerzo

La corrosión en el acero de refuerzo es un proceso electroquímico que requiere de un flujo de electrones para generar corriente, se caracteriza por la formación de una zona anódica capaz de producir electrones en la cual se oxida el hierro para formar iones ferrosos y una zona catódica capaz de consumir electrones en la cual ocurre la reducción del oxígeno para formar iones hidroxilo. Ambas zonas se generan en la superficie del acero y puede estar juntas o separadas. (ACI 222R-01).

En este caso la reacción de media celda anódica conlleva a la disolución del hierro, pudiéndose dar de la siguiente manera:

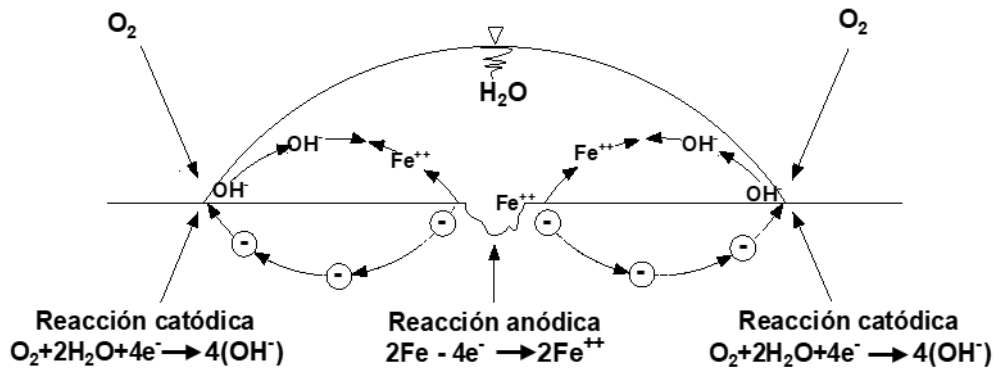


Y las reacciones catódicas de media celda posible serán:



La naturaleza de la corrosión electroquímica en concreto armado en un medio ambiente acuoso puede ser descrita en la Figura 2.11:





**Figura 2. 11 Representación esquemática del proceso de corrosión en la superficie de un metal expuesto a un ambiente húmedo (Young, 1998)**

## 2.6 Métodos para prevenir la corrosión del acero de refuerzo

La base de la prevención de la corrosión radica en la protección del acero, donde el principal protector es el concreto, por lo tanto la prevención de la corrosión se enfoca en la mejora de la matriz cementante y la protección del acero de refuerzo. Dentro de los métodos más conocidos se encuentran los que se describen a continuación.

### 2.6.1 Uso de concreto de alto desempeño (HPC)

Actualmente existen concretos que reúnen una combinación especial de requerimientos de desempeño y uniformidad que no siempre puede ser logrados usando materiales tradicionales, mezclado normal, criterios de colocación normales y prácticas de curado ordinarias, normalmente conocidos como de alto desempeño (Russell, 1999). Un concreto de alto desempeño es un concreto en el cual ciertas características son desarrolladas para una aplicación y medioambiente particular. Algunas de las propiedades requeridas incluyen alta durabilidad y vida útil larga en ambientes severos, baja permeabilidad y difusión, alta resistencia a la congelación y a los daños causados por las sales de deshielo, baja permeabilidad y baja penetración de cloruros. Estos concretos tienen una relación agua materiales cementantes de 0.20 a 0.45 y normalmente se usan reductores de agua para volverlos fluidos y trabajables (Kosmatka, 2004).

La naturaleza del concreto es porosa y permeable, lo cual no ayuda a prevenir la corrosión en ambientes agresivos. Con la finalidad de disminuir la permeabilidad de la matriz cementante se pueden adicionar otros materiales cementantes o puzolanas como la ceniza volante. Que debido a su forma y tamaño reduce la permeabilidad del concreto.

Estos concretos se caracterizan por el uso de relaciones agua materiales cementantes (a/mc) bajas. La a/mc es la masa del agua dividida por la masa del material cementante que es cemento Portland más ceniza volante, escoria, humo de sílice y/o puzolanas naturales. Cuando se trata de estructuras expuestas a cloruros el ACI 318-2012 recomienda una a/mc menor a 0.40 para protección contra la corrosión del refuerzo. Puntos importantes también son la selección de materiales sanos, el diseño adecuado del concreto, el uso correcto de aditivos y la correcta ejecución para evitar las fisuras y el agrietamiento.

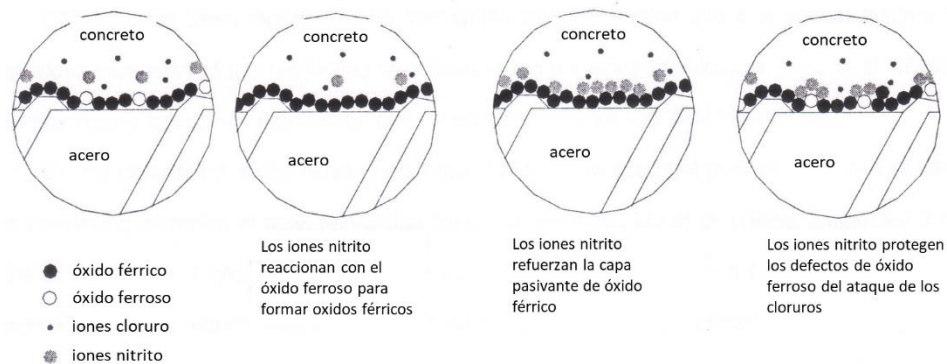
### **2.6.2 Uso de inhibidores de corrosión**

Los inhibidores de la corrosión son aditivos químicos que se adicionan al concreto para proteger el acero de la corrosión con poco efecto perjudicial sobre las propiedades a corto y largo plazo del concreto. Debido a las discrepancias obtenidas por algunos investigadores hay una renuncia natural a utilizarlos porque, en un futuro no podría retirarse del concreto si tuviera un efecto negativo sobre el proceso de corrosión del acero o de las propiedades mecánicas del concreto. Los inhibidores de corrosión son un método alternativo para prevenir y/o retrasar la corrosión del acero en concreto (Hansson, 1998).

Los inhibidores de corrosión pueden clasificarse según sus métodos de aplicación, mecanismos de protección o su contenido (Söylev y Richardson, 2008). Con respecto a sus métodos de aplicación, los inhibidores de corrosión se pueden mezclar en concreto o mortero fresco, aplicados como solución de impregnación sobre la superficie de concreto endurecido o como pretratamiento de superficie

sobre las varillas de refuerzo antes de la colocación del concreto (López, 2012). Basándose en sus mecanismos de protección, los inhibidores de corrosión pueden ser inhibidores anódicos, catódicos, y multifuncionales o mixtos. Estos tipos de inhibidores deben reducir la oxidación anódica o la reducción catódica, o ambas reacciones (Rixon y Mailvaganam, 1999). El principio de los inhibidores es proporcionar protección contra la corrosión ya sea formando una película protectora normalmente de uno o dos nanómetros de grosor sobre el sustrato de acero o interceptando los agentes corrosivos y evitando que ataquen el acero (Fadayomi, 1997).

Un inhibidor ampliamente usado en la industria de la construcción es aquel a base de CNi, que contribuye con la capa de óxido férrico natural para evitar que los iones cloruro interactúen con iones ferrosos. El nitrito hace esto de tres maneras: oxida el óxido ferroso a óxido férrico, que no es atacado por los cloruros, y lo adsorbe en la superficie del metal y crea una capa protectora de óxido férrico y repara la capa de pasivación después de haber sido interrumpido por iones de cloruro, este fenómeno se puede representar gráficamente en la Figura 2.12 (Montes, 2003).



**Figura 2. 12 Protección del acero con nitrito de calcio (Montes, 2003)**

El CNi es un inhibidor anódico que mejora significativamente la resistencia a la corrosión del acero en concreto con valores de relación agua-cemento inferiores a 0.5 (Berke, 1988). Se ha reportado que el nitrito de calcio es también compatible con el humo de sílice, y se sugiere que proporciona protección al acero de refuerzo

en presencia de cloruros (Pyc, 1999). También se ha reportado que el uso de CNI tiene un efecto no perjudicial sobre la resistencia a la compresión a 28 días del concreto, además, tiene buena interacción con la ceniza volate (Montes et al., 2004).

Por el contrario, algunos investigadores han reportado efectos perjudiciales del nitrito de calcio sobre las propiedades del concreto y una aparente deficiencia en la prevención de la corrosión del acero de refuerzo. Por ejemplo, Li et al., 1999, sugirieron que la adición de CNI al concreto de alto desempeño en combinación con cenizas volantes debilita la resistencia del concreto a la difusión de cloruro y la resistencia a la compresión se reduce en comparación con la de la mezcla de control. Nmai y MacDonald, 1999, informaron que CNI parece ser ineficaz en la reducción de la corrosión, a menos que una gran cantidad se añade a la mezcla.

## **2.7 Evaluación de la corrosión mediante el método de resistencia a la polarización lineal (LPR)**

Dentro de los métodos para evaluar el comportamiento de corrosión del acero en el concreto las técnicas electroquímicas son muy útiles, además la mayoría de estas técnicas no son destructivas y se pueden usar por periodos prolongados de monitoreo. Una muy usada es el método de resistencia de polarización lineal (LPR) ya que cuantifica el daño generado por la corrosión en el acero de refuerzo.

El método de LPR fue propuesto por Stern y Geary en 1957, este método electroquímico se basa en la medición de la resistencia a la polarización de la interfaz metal-medio para un potencial de corrosión constante. Aquí, la velocidad de corrosión expresada en términos de la densidad de corriente de disolución del metal es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización (Farivot, 2016).

La norma internacional ASTM G 59-91 define la resistencia a la polarización por la fórmula:

$$R_p = \frac{\partial \Delta E}{\partial i} \Big|_{i=0, dE/dt \rightarrow 0} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Donde la resistencia de un electrodo corroyéndose se define como la pendiente de un potencial contra una densidad de corriente lineal igual a cero ( $i=0$ ), el grado de polarización debe ser cercano a cero.

El valor de la resistencia a la polarización se usa para calcular la velocidad de corrosión en forma de la densidad de la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) mediante el uso de la ecuación.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde:  $i_{corr}$ = Densidad de corriente de corrosión en A/cm<sup>2</sup>, B= Constante en V y  $R_p$ = Resistencia a la polarización en  $\Omega \cdot \text{cm}^2$

Sin embargo, para el coeficiente B, se deben conocer las pendientes de Tafel  $b_a$ ,  $b_c$  (Ec. 2.30). El coeficiente es estrictamente empírico para un sistema de corrosión dado. En un sistema de concreto armado donde el acero se está corroyendo activamente, se utiliza un valor constante de B igual a 0.026 V (Feliú et al., 1989).

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Dónde:

$b_a$  y  $b_c$  son las pendientes de las líneas rectas de ánodo y cátodo de Tafel en coordenadas semilogarítmicas (mV).

Los fundamentos descritos en este capítulo son útiles y necesarios para desarrollar la propuesta metodología de esta investigación, la cual se encuentra en el siguiente capítulo.

## **CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente estudio forma parte de una investigación a largo plazo que consta de varias etapas. Es por ello que el diseño experimental, la fabricación de los especímenes con y sin refuerzo, y su exposición a ambientes agresivos se ha reportado con anterioridad (Montes, 2003). El monitoreo de la resistencia a la compresión del concreto a uno y nueve años ya se ha reportado (Montes et al. 2005, López et al. 2012). El deterioro por corrosión del acero de refuerzo embebido en esos concretos a uno y siete años también se ha estudiado, (Montes et al. 2004, López et al. 2018). En esta tesis se presentan los resultados de las pruebas de corrosión de las varillas embebidas en los especímenes que fueron expuestos durante nueve años a un ambiente marino natural; y se enfatiza el análisis de los resultados de las pruebas de tensión de dichas varillas. El análisis de la información será fundamental para analizar la pérdida de  $\mu$  del acero de refuerzo causada por la corrosión.

### **3.1 Diseño del experimento**

Se consideraron cuatro variables independientes que afectan el proceso de corrosión de las estructuras de HPC reforzado, las cuales fueron el AG, la adición de CNI como inhibidor de la corrosión, la adición de CV como suplemento parcial del cemento y la a/c (Montes, 2003).

Para estudiar la influencia de estas variables en las propiedades a la tensión del acero expuesto a un proceso de deterioro por corrosión se adoptó un diseño factorial  $3^4$ ; es decir, cuatro variables independientes con tres niveles cada una. Las variables respuesta fueron esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ ), esfuerzo máximo ( $\sigma_\mu$ ), deformación a la fluencia ( $\epsilon_y$ ), elongación ( $e$ ), tenacidad ( $T$ ) y ductilidad ( $\mu$ ). Por último, se analizará la correlación entre los resultados de corrosión y los resultados de ductilidad ( $\mu$ ). Con el objetivo de corroborar la validez de los resultados de las pruebas de tensión del acero en estudio se analizó el módulo de elasticidad ( $E$ ). En

la Tabla 3.1 se muestran los detalles del diseño experimental de la presente investigación.

**Tabla 3. 1 Diseño experimental de la investigación**

Variables independientes	Niveles			Unidades	Variables dependientes	Unidades
<b>AG</b>	0	0.25	0.5	(mm)	$\sigma_y$	MPa
<b>CNI</b>	0	12.5	25	(L/m <sup>3</sup> )	$\sigma_u$	MPa
<b>CV</b>	0	20	40	(%)	$\epsilon_y$	Adimensional
<b>a/c</b>	0.29	0.37	0.45	Adimensional	e	%
					T	MPa
					$\mu$	Adimensional

## 3.2 Materiales

### 3.2.1 Cemento

El cemento utilizado corresponde al cemento Portland tipo I (ASTM C150/C150M), adicionado con 8.2% de humo de sílice. Los análisis químico y físico se muestran en la Tabla 3.2, en la cual se observa que el compuesto C<sub>3</sub>A se encuentra ligeramente por debajo del límite inferior (6-12%) (Mehta y Monteiro, 2006). Dicho componente es particularmente importante en esta investigación debido a su capacidad para ligar cloruros; si el contenido de C<sub>3</sub>A estuviera por encima del límite superior tendría efectos considerables en el proceso de corrosión del acero de refuerzo y debería ser considerado en la investigación (Taylor, 2001).

**Tabla 3. 2 Análisis químico y físico del cemento (Montes, 2003)**

Composición química	Contenido (%)	Análisis físico	Contenido
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	26.70	Finura malla 45 µm	94.30% pasó
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.00	Finura Blaine	555 m <sup>2</sup> /kg
Óxido de fierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.90	Tiempo de fraguado inicial (Vicat)	125 min
Óxido de calcio, total (TCaO)	59.60	Expansión autoclave	0.00%
Óxido de magnesio (MgO)	0.90	Resistencia a la compresión a 3 días	26.00 MPa
Trióxido de sulfuro	2.70	Resistencia a la compresión a 7 días	35.10 MPa
Pérdida por ignición	1.70	Resistencia a la compresión a 28 días	55.10 MPa
Óxido de calcio, libre(FCaO)	1.50	% de humo de sílice	8,20%
Álcali equivalente (Na <sub>2</sub> O)	0.46		
Componentes potenciales			
C <sub>3</sub> A	5.70		

### 3.2.2 Agregados

Los agregados utilizados fueron grava a base de piedra caliza triturada con un tamaño máximo de 12.5 mm y densidad relativa de 2.69, y arena de río con módulo de finura de 2.65 y densidad relativa de 2.62.

### 3.2.3 Aditivos químicos

Los especímenes fueron expuestos un ambiente marino natural en donde se experimentaron ciclos de congelamiento y deshielo, es por ello que se tuvo que adicionar a la mezcla de concreto un inclusor de aire de acuerdo con la norma ASTM C260. El concreto utilizado fue de alto desempeño, por lo cual se requirió de la adición de 8.2% de humo de sílice y relaciones a/c bajas. El uso de humo de sílice y a/cs bajas origina problemas de trabajabilidad del concreto en estado fresco; por lo tanto, fue necesario adicionar un retardante de acuerdo con la norma ASTM C 494 y un reductor de agua tipo F de acuerdo con la norma ASTM C 494. Finalmente, se adicionó el inhibidor de corrosión en las proporciones que indica el diseño del experimento; el inhibidor contenía un mínimo de 30% de nitrito de calcio, según la ficha técnica del fabricante (Montes, 2003).



### 3.2.4 Ceniza volante

La CV utilizada fue de Tipo F, de acuerdo con la clasificación de la norma ASTM C618; el análisis físico y químico se muestra en la Tabla 3.3.

**Tabla 3. 3 Análisis químico y físico del cemento (Montes, 2003)**

Análisis físico		límites especificados para la ceniza volante clase F
Resultados de prueba (%)		ASTM C618-94 (%)
Índice de actividad de fuerza		control mínimo
Con cemento Portland a 7 días	81.30	75.00
Con cemento Portland a 28 días	87.10	75.00
Finura		
Retenido en el tamiz de 45 mm	13.20	Max. 34.00
Solidez, autoclave		
Expansión o contracción	0.03	Max. 0.80
agua requerida		
Control	95.00	Max. 105.00
<i>Requerimientos químicos</i>		
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO <sub>3</sub> , (35.0+15.2+31.4)	81.6	70.00
SO <sub>3</sub>	2.01	5.00
Contenido de humedad	0.15	3.00
Pérdida por ignición	2.03	6.00
Carbón	0.45	
Total de álcalis	1.7	
Álcalis solubles	0.138	
gravedad específica	2.50	

### 3.2.5 Acero

Se utilizó acero al carbono de tipo estructural de 15 mm de diámetro, de acuerdo con la norma ASTM A36/A36M; su composición química se muestra en la Tabla 3.4. El acero control estuvo conformado por 81 varillas que procedían del mismo lote del grupo de experimentación. Estas varillas control se denominaron “varillas c”, y

fueron probadas a tensión al inicio de la investigación obteniendo las propiedades de  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$  y  $e$  (Montes 2003).

**Tabla 3. 4 Composición química del acero (Montes, 2003)**

Elemento	Contenido (%)	Recomendado por ASTM A36/A36M (%)
Carbono	0.43	0.26 - 0.29
Manganeso	0.886	0.20 - 0.90
Fósforo	0.007	0.04
Azufre	0.034	0.05
Silicón	0.166	0.15 -0.30
Cobre	0.359	0.20
Níquel	0.118	--
Cromo	0.117	--
Molibdeno	0.042	--
Estaño	0.012	--
Boro	0.00055	--
Zinc	0.014	--
Nitrógeno	0.0064	--

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran los resultados de  $\sigma_y$  y  $\sigma_u$  de las varillas control. El  $\sigma_y$  tiene una media de 463.76 MPa con una desviación estándar de 3.30 MPa y un coeficiente de variación de 0.71%, mientras que para el  $\sigma_u$  los valores fueron 743.06 MPa, 5.82 MPa y 0.78%, respectivamente. El análisis estadístico indicó que no hay diferencia significativa entre las mediciones obtenidas para cada propiedad.

En la Figura 3.3 se muestran los resultados de  $e$  con una media estimada de 10.42%, desviación estándar de 0.73% y coeficiente de variación de 7.03%. De manera similar que en los resultados de  $\sigma_y$  y  $\sigma_u$  la variabilidad de los valores de la elongación no es significativa.

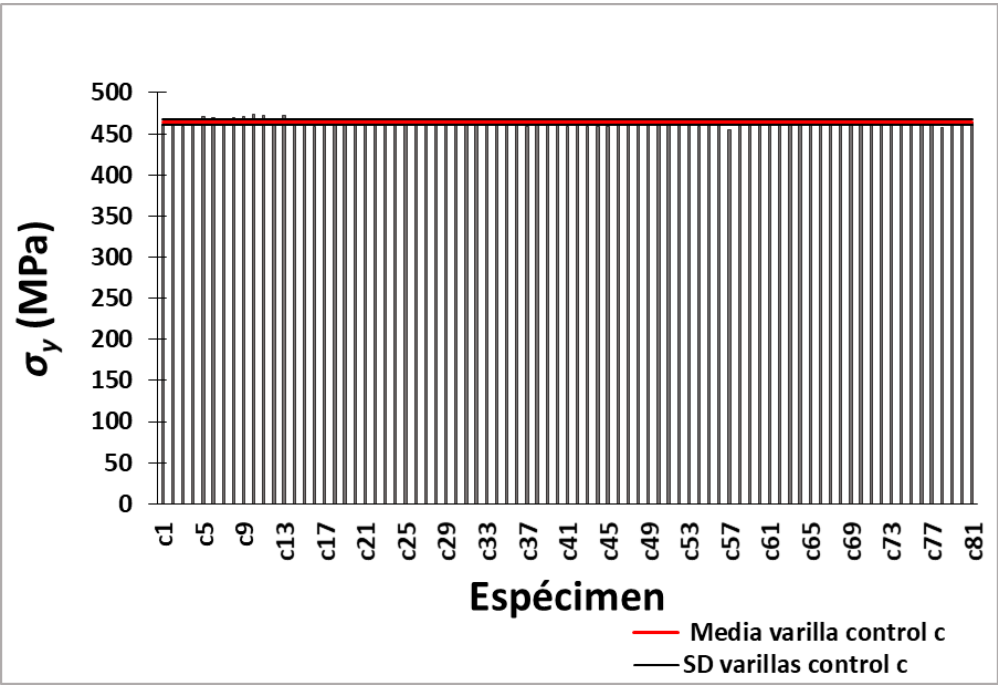


Figura 3. 1 Esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ ) de las varillas control c

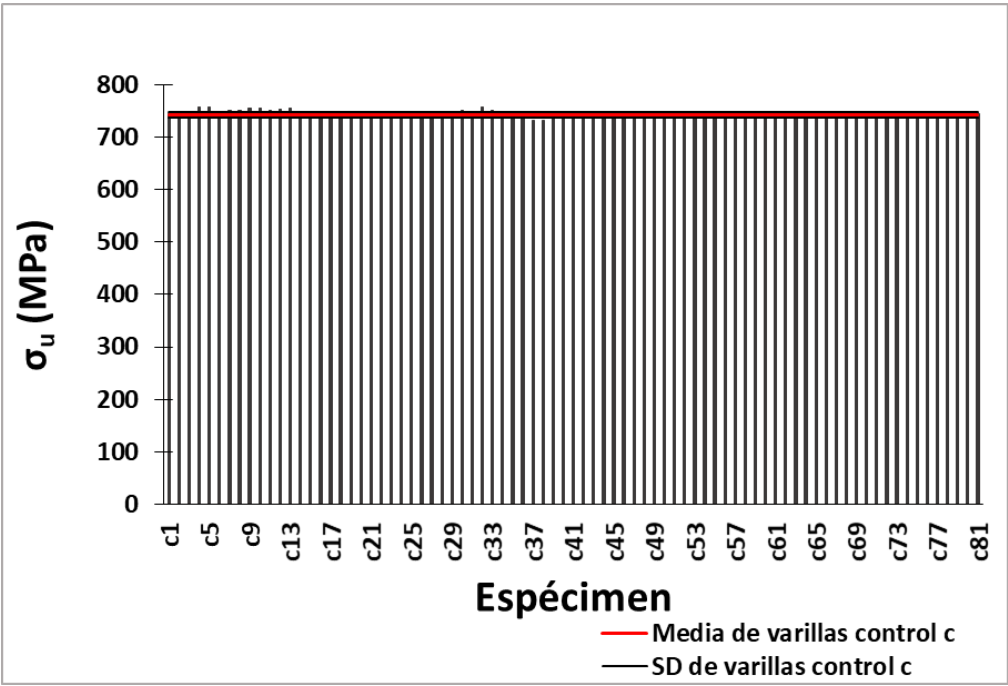
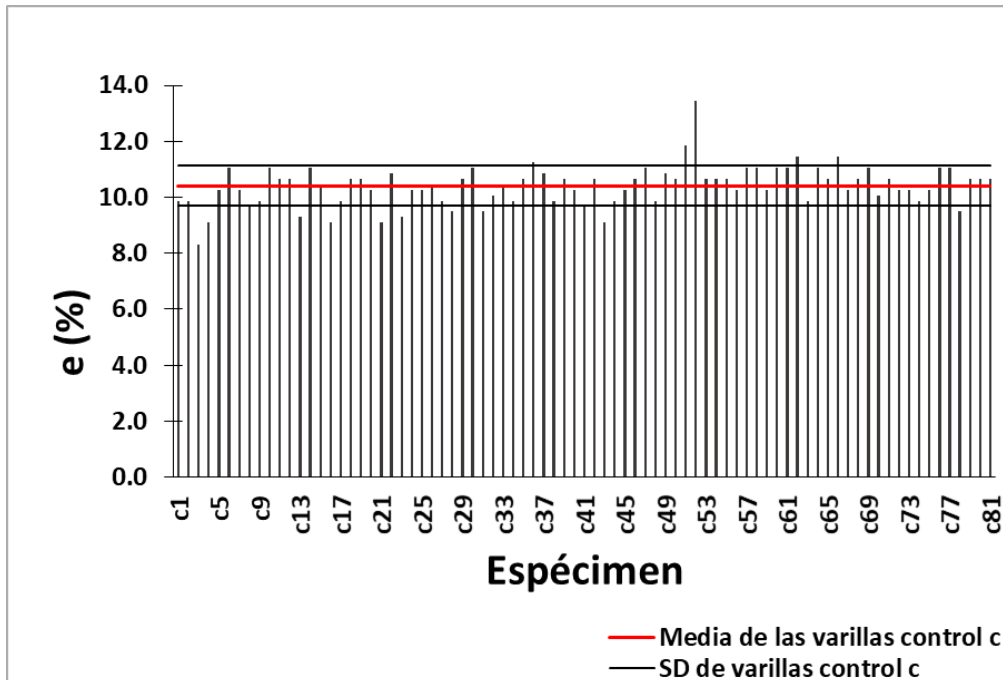


Figura 3. 2 Esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ ) de las varillas control c



**Figura 3. 3 Elongaciones (e) de las varillas control c**

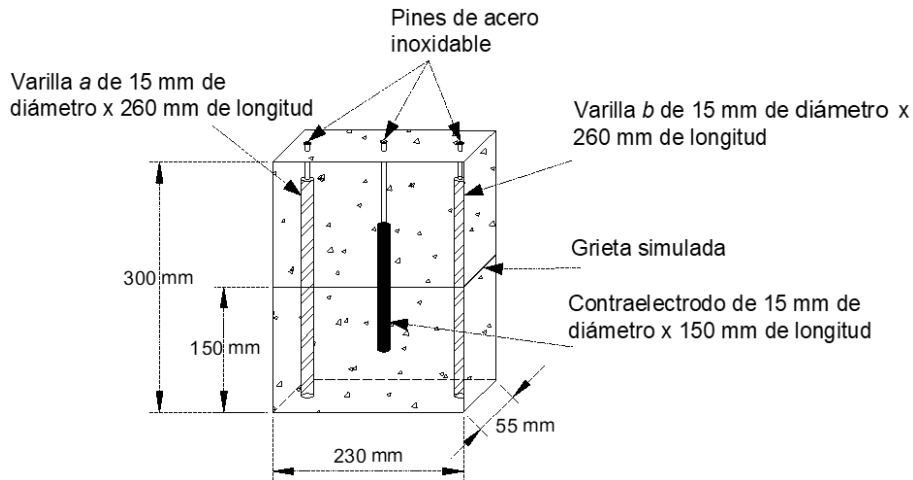
### 3.3 Fabricación y exposición de los especímenes

#### 3.3.1 Preparación de las mezclas y colocación del concreto

Con base en el diseño factorial seleccionado se elaboraron 27 mezclas de concreto, las proporciones se muestran en la Tabla 3.5. Por cada mezcla se fabricaron tres especímenes prismáticos de 55 x 230 x 300 mm, con diferentes AG. En cada espécimen se colocaron dos varillas de acero al carbono de 15 mm de diámetro x 260 mm de longitud (varillas *a* y *b*), con el propósito de evaluar la corrosión del acero de refuerzo; también se colocó una varilla de acero inoxidable de 15 mm de diámetro por 150 mm de longitud, la cual sirvió como contraelectrodo para monitorear la corrosión de las varillas *a* y *b* (ver detalles en la Figura 3.4). El recubrimiento de las varillas *a* y *b* fue de  $20 \pm 2$  mm.

**Tabla 3. 5 Proporción de mezclas para 1m<sup>3</sup> de concreto**

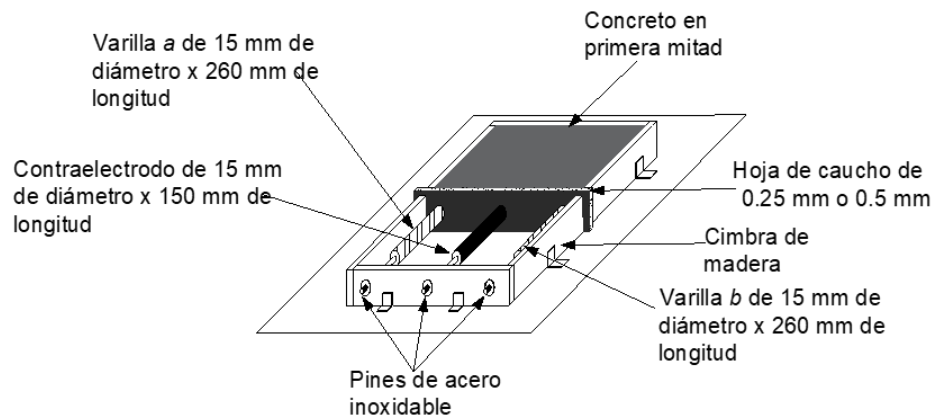
No. Mezcla	CV (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	Agua (kg)	CNI (L)	a/c	Aire %	Revenimiento (mm)	
1	0	544	1029	664	154	0.0	0.29	4.0	165	
2				664	155	12.5		5.5	160	
3				664	155	25.0		4.5	200	
4	87	422	992	646	148	0.0		6.0	180	
5				646	148	12.5		7.0	190	
6				646	149	25.0		7.0	170	
7	177	317	987	650	145	0.0		7.5	115	
8				650	145	12.5		7.5	130	
9				650	145	25.0		7.0	160	
10	0	441	997	702	164	0.0	0.37	7.0	150	
11				702	164	12.5		6.0	170	
12				702	164	25.0		6.0	150	
13	73	351	985	694	158	0.0		8.0	110	
14				694	158	12.5		7.0	130	
15				694	157	25.0		7.5	135	
16	150	268	993	699	155	0.0		0.45	8.0	120
17				699	156	12.5			7.5	120
18				699	155	25.0			7.5	150
19	0	371	957	703	169	0.0	8.0		120	
20				705	167	12.5	7.0		130	
21				705	167	25.0	7.5		150	
22	63	300	963	706	165	0.0	6.0		110	
23				706	164	12.5	7.5		140	
24				788	163	25.0	7.5		150	
25	132	236	992	730	167	0.0	0.45	7.0	105	
26				730	166	12.5		7.0	135	
27				730	166	25.0		6.0	185	



**Figura 3. 4 Dimensión y detalles de los especímenes de concreto**

Para la fabricación de los especímenes se construyeron moldes de madera con las dimensiones requeridas. El procedimiento de vertido del concreto se llevó a cabo en dos partes, el primer día se colocó concreto hasta la mitad del molde en los 81 especímenes; al día siguiente se elaboraron mezclas similares para concluir la fabricación colocando el concreto directamente sobre el concreto del día anterior.

Las grietas se simularon utilizando hojas de caucho de 0.25 y 0.5 mm (ver Figura 3.5). Los especímenes se desmoldaron y curaron en un cuarto húmedo durante 28 días a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa de no menos del 95%, de acuerdo con la norma ASTM C192/C192M.



**Figura 3. 5 Detalles de la fabricación de los especímenes de concreto**

Con el fin de identificar cada varilla de acuerdo con las características del concreto donde se encontraban embebidas; se utilizó la letra M seguida de un número consecutivo del 1 al 81 y la letra *a* o *b*, por ejemplo, *M1a* corresponde a la varilla “*a*” que se encontraba embebida en el espécimen que contenía cero AG, cero CNI, cero CV y *a/c* de 0.29 y *M1b* corresponde a la varilla “*b*” del mismo espécimen (ver detalles en la Tabla 3.6).

**Tabla 3. 6 Nomenclatura de las varillas expuestas**

Varilla	Tipo de mezcla	AG (mm)	CNI (L/m <sup>3</sup> )	CV (%)	a/c	Varilla	Tipo de mezcla	AG (mm)	CNI (L/m <sup>3</sup> )	CV (%)	a/c	Varilla	Tipo de mezcla	AG (mm)	CNI (L/m <sup>3</sup> )	CV (%)	a/c
M1a, M1b	1	0	0	0	0.29	M28a, M28b	10	0	0	0	0.37	M55a, M55b	19	0	0	0	0.45
M2a, M2b		0.25				M29a, M29b		0.25				M56a, M56b		0.25			
M3a, M3b		0.5				M30a, M30b		0.5				M57a, M57b		0.5			
M4a, M4b	2	0	12.5			M31a, M31b	11	0	M58a, M58b			20	0				
M5a, M5b		0.25				M32a, M32b		0.25	M59a, M59b				0.25				
M6a, M6b		0.5				M33a, M33b		0.5	M60a, M60b				0.5				
M7a, M7b	3	0	25			M34a, M34b	12	0	M61a, M61b			21	0				
M8a, M8b		0.25				M35a, M35b		0.25	M62a, M62b				0.25				
M9a, M9b		0.5				M36a, M36b		0.5	M63a, M63b				0.5				
M10a, M10b	4	0	0	M37a, M37b	13	0	M64a, M64b	22	0								
M11a, M11b		0.25		M38a, M38b		0.25	M65a, M65b		0.25								
M12a, M12b		0.5		M39a, M39b		0.5	M66a, M66b		0.5								
M13a, M13b	5	0	12.5	M40a, M40b	14	0	M67a, M67b	23	0								
M14a, M14b		0.25		M41a, M41b		0.25	M68a, M68b		0.25								
M15a, M15b		0.5		M42a, M42b		0.5	M69a, M69b		0.5								
M16a, M16b	6	0	25	M43a, M43b	15	0	M70a, M70b	24	0								
M17a, M17b		0.25		M44a, M44b		0.25	M71a, M71b		0.25								
M18a, M18b		0.5		M45a, M45b		0.5	M72a, M72b		0.5								
M19a, M19b	7	0	0	M46a, M46b	16	0	M73a, M73b	25	0								
M20a, M20b		0.25		M47a, M47b		0.25	M74a, M74b		0.25								
M21a, M21b		0.5		M48a, M48b		0.5	M75a, M75b		0.5								
M22a, M22b	8	0	12.5	M49a, M49b	17	0	M76a, M76b	26	0								
M23a, M23b		0.25		M50a, M50b		0.25	M77a, M77b		0.25								
M24a, M24b		0.5		M51a, M51b		0.5	M78a, M78b		0.5								
M25a, M25b	9	0	25	M52a, M52b	18	0	M79a, M79b	27	0								
M26a, M26b		0.25		M53a, M53b		0.25	M80a, M80b		0.25								
M27a, M27b		0.5		M54a, M54b		0.5	M81a, M81b		0.5								

### 3.3.2 Exposición de los especímenes y monitoreo de la corrosión

Los especímenes elaborados fueron expuestos a un ambiente marino natural en la Bahía de Maine, EUA (Figura 3.6), por un periodo de nueve años. Durante este tiempo se monitoreó anualmente la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) de las varillas a y b, mediante el método de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL); el equipo utilizado para este propósito fue un potenciostato CMS 105 de GAMRY Instruments Inc. (Montes, 2003).



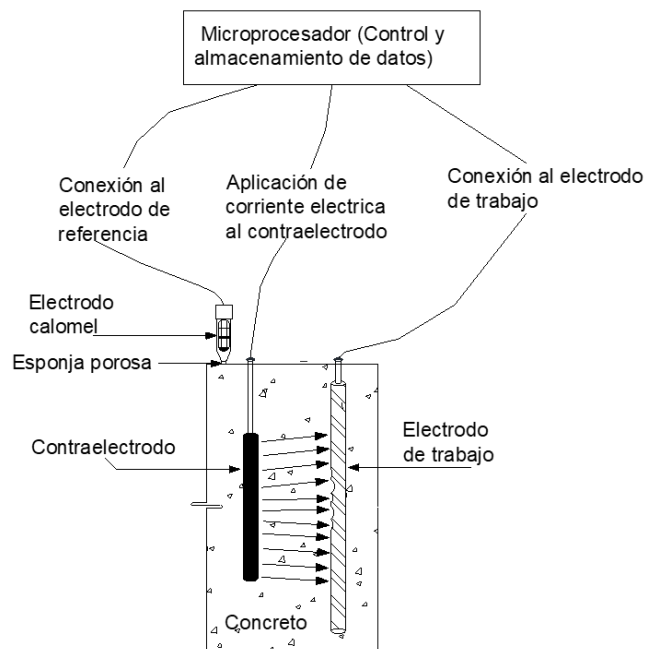
**Figura 3. 6 Localización (a y b) y lugar de exposición (c y d) de los especímenes en la Bahía de Maine, EUA**

La prueba de RPL se realizó con base en la norma ASTM G59, la cual se llevó a cabo conectando las terminales del potenciostato a la varilla a (electrodo de trabajo), al contra electrodo (acero inoxidable) y al electrodo de referencia calomel (Figura 3.7), y aplicando una polarización de  $\pm 20$  mV vs potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ). En seguida se efectuó el mismo procedimiento para la varilla b. Al concluir esta prueba



se determinó el valor de  $i_{corr}$  de cada varilla utilizando el software Echem Analyst® (Montes, 2003).

Los resultados de  $i_{corr}$  obtenidos en las pruebas de RPL se graficaron para identificar la condición de corrosión de cada una de las varillas expuestas al ambiente marino natural durante los nueve años. En dichas gráficas se colocaron, en el eje horizontal, los años en que se tomaron las lecturas y en el eje vertical los resultados de  $i_{corr}$  en  $\mu A/cm^2$ . Con la ayuda de estas gráficas se determinó la influencia de las variables independientes en la condición de corrosión de las varillas evaluadas.



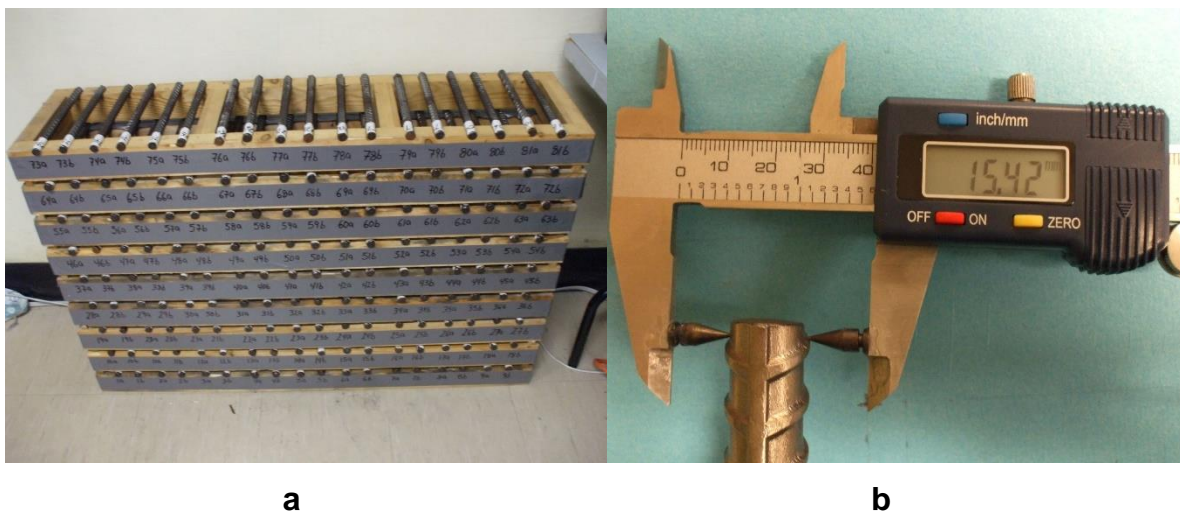
**Figura 3. 7 Representación esquemática del método de RPL**

### 3.4 Pruebas a tensión

Al concluir el periodo de exposición de los especímenes se retiraron del ambiente marino natural y se llevaron al laboratorio de ingeniería de la universidad de New Brunswick, en donde se llevó a cabo la autopsia que consistió en la extracción de las varillas *a* y *b*. Esta actividad se llevó a cabo con la ayuda de marro y cincel. Una

vez extraídas las varillas se efectuó su limpieza para remover los fragmentos de concreto y el óxido adherido.

La limpieza se efectuó de manera mecánica mediante una esmeriladora de banco con carda metálica para remover completamente el óxido formado en la superficie. Al concluir la limpieza se ordenaron en un estante de madera (Figura 3.8a), y con la ayuda de un vernier se midió y registró la longitud y diámetro de cada varilla (Figura 3.8b); concluida esta actividad se procedió a la prueba de tensión de las varillas.



**Figura 3. 8 a) Varillas ordenadas, b) determinación del diámetro de las varillas**

La prueba a la tensión a las varillas se efectuó con base en la norma ASTM A370-17, para lo cual se utilizó una máquina universal marca Instron, modelo KPX con capacidad de 600 kN (Figura 3.9).

Previo al inicio de la prueba se verificó la calibración del equipo y la programación del software. Se colocó la varilla en la máquina universal sujetando ambos extremos de la varilla con las mordazas del cabezal de la máquina y se ajustaron ambos extremos para iniciar la aplicación de la carga. Se aplicó una fuerza de tensión uniaxial que aumentó de manera gradual hasta llegar a la ruptura de la varilla. El

software del equipo generó un archivo que contenía las cargas aplicadas y los desplazamientos asociados a dichas cargas.



**Figura 3. 9 Máquina universal Instron KPX**

### **3.5 Estimación de las propiedades a tensión y análisis de los datos**

Las propiedades a tensión del acero de refuerzo se determinaron con base en los resultados de carga ( $P$ ) y desplazamiento ( $d$ ), obtenidos en las pruebas de tensión efectuadas a las varillas  $a$  y  $b$  de cada espécimen. Los valores de los esfuerzos ( $\sigma$ ) se obtuvieron dividiendo la carga ( $P$ ) entre el área inicial de la varilla, y los valores de las deformaciones ( $\epsilon$ ) dividiendo el desplazamiento ( $d$ ) entre la longitud inicial. Con los datos obtenidos se construyeron las gráficas esfuerzo-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de cada varilla en las cuales se identificaron los valores de esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ ), esfuerzo máximo ( $\sigma_\mu$ ), esfuerzo a la fractura ( $\sigma_{fr}$ ), deformación a la fluencia ( $\epsilon_y$ ), deformación al esfuerzo máximo ( $\epsilon_\mu$ ) y deformación a la fractura ( $\epsilon_{fr}$ ). A partir de las gráficas  $\sigma$ - $\epsilon$  se determinó el módulo de elasticidad ( $E$ ) del acero, el cual se obtuvo con base en un promedio de las derivadas de los valores de la curva esfuerzo-deformación en el rango elástico. La elongación ( $e$ ) se calculó al dividir la diferencia de la longitud final de la varilla menos la longitud inicial entre la longitud inicial y al multiplicarlo por cien. La ductilidad ( $\mu$ ) se obtuvo al dividir la  $\epsilon_{fr}$  entre la  $\epsilon_y$ , y la

tenacidad (T) integrando el área bajo la curva de la gráfica esfuerzo deformación mediante el programa MATLAB®.

La influencia de las variables independientes en los resultados de las propiedades evaluadas en las varillas *a* y *b*, se analizaron comparando los valores obtenidos en las varillas embebidas en especímenes afectados por las variables independientes contra las varillas en especímenes que no fueron afectadas por dichas variables (especímenes con niveles de las variables iguales a cero). Por ejemplo, las varillas embebidas en especímenes agrietados contra aquellas embebidas en especímenes no agrietados. Asimismo, el  $\sigma_y$ , el  $\sigma_u$  y la *e* de las varillas expuestas en especímenes sin grietas se analizaron con respecto a las varillas control *c*, para evaluar la pérdida de las propiedades mecánicas originales, ocasionada por el deterioro por corrosión.

Para llevar a cabo el análisis mencionado anteriormente se requirió el uso del paquete estadístico SPSS®, donde por medio del análisis de la varianza se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de las variables. Mientras que para determinar la existencia de diferencias entre las varillas expuestas durante nueve años a un ambiente marino natural y las varillas control se efectuó la prueba T de Student.

Para establecer la correlación entre los resultados de  $i_{corr}$  y los resultados de ductilidad ( $\mu$ ) obtenidos en las varillas expuestas durante nueve años, se utilizó la aplicación Curve Fitting del programa MATLAB®, en el cual se obtuvo un ajuste polinómico de cuarto grado para explicar la correlación entre las propiedades analizadas. Primero se hizo la correlación entre las  $i_{corr}$  y las  $\mu$  de todas las varillas, en seguida se hicieron correlaciones con base en las variables AG, CNI, CV y *a/c*.

Los resultados derivados de la aplicación de la metodología descrita anteriormente, se presentan en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### 4.1 Análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de corrosión

En esta sección se presentan los resultados de  $i_{corr}$  obtenidos en las varillas embebidas en los especímenes expuestos al ambiente marino natural durante nueve años. Los resultados indican que todas las varillas experimentaron corrosión, la cual varía de acuerdo con la influencia de las variables independientes AG, CNI, CV y a/c. En las Figuras 4.1 (a/c=0.29), 4.2 (a/c=0.37) y 4.3 (a/c=0.45) sobresale el efecto negativo del agrietamiento ya que las varillas embebidas en especímenes agrietados tuvieron mayor corrosión que aquellas varillas embebidas en especímenes sin grietas. Este efecto fue más evidente en las a/cs de 0.29 y 0.37. Es por ello que el análisis de los resultados se divide en especímenes sin grietas y especímenes agrietados.

#### 4.1.1 Especímenes sin grietas

En las figuras 4.1a, 4.1b y 4.1c se observa que en las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y sin grietas, la adición de CNI contribuyó a reducir la corrosión. Este mismo efecto se observó para la a/c de 0.37 (Figs. 4.2a, 4.2b y 4.2c) y para la a/c de 0.45 (Figs. 4.3a, 4.3b y 4.3c). De igual manera, se observa que la adición de CV reduce la corrosión del acero de refuerzo (Figs. 4.1a vs. 4.1d, Figs. 4.2a vs. 4.2d y Figs. 4.3a vs. 4.3d, para las a/c de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente). Este efecto es mayor al incrementar la adición de CV de 20% a 40% (Figs. 4.1d vs. 4.1g, Figs. 4.2d vs. 4.2g y Figs. 4.3d vs. 4.3g, para las a/c de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente).

Los resultados también sugieren que la interacción entre CNI y CV disminuyen la corrosión (Figs. 4.1e, 4.2e y 4.3e); este efecto es mayor cuando se combinan CNI y 40% de CV (Figs. 4.1h, 4.1i, 4.2h, 4.2i, 4.3h y 4.3i).

Finalmente, las varillas embebidas en especímenes con a/cs de 0.29 y 0.37 (Figs. 4.1a y 4.2a) tuvieron menor corrosión que aquellas embebida en concretos con a/c de 0.45 (Fig. 4.3a). En las a/c de 0.29 y 0.37 la condición de corrosión fue de “baja a moderada” mientras que en la a/c de 0.45 se alcanzó una condición de “alta velocidad de corrosión”.

#### **4.1.2 Especímenes agrietados**

En las Figs. 4.1, 4.2 y 4.3 también se muestran los resultados de  $i_{corr}$  de las varillas expuestas en especímenes agrietados, donde se observa un incremento de  $i_{corr}$  respecto a las varillas en especímenes no agrietados. Es evidente que el AG de 0.25 mm incrementa la corrosión; no obstante, no se observa un incremento sustancial de la corrosión cuando el AG se incrementa de 0.25 a 0.50 mm. Lo anterior sugiere que la existencia de la grieta promueve mayor corrosión, más no así el ancho de la misma.

Al adicionar CNI no se observan efectos en la reducción o incremento de  $i_{corr}$  en las varillas expuestas en especímenes agrietados (Figs. 4.1a, 4.1b y 4.1c, Figs. 4.2a, 4.2b y 4.2c y Figs. 4.3a, 4.3b y 4.3c, para las a/cs de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente). Sin embargo, la adición de CV disminuye la corrosión (Figs. 4.1a vs. 4.1d, Figs. 4.2a vs. 4.2d y Figs. 4.3a vs. 4.3d, para las a/c de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente), este efecto mejora al incrementar la cantidad de CV de 20% a 40% (Fig. 4.1d vs. 4.1g, Fig. 4.2d vs. 4.2g y Fig. 4.3d vs. 4.3g, para las a/c de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente).

En cuanto a la interacción de las variables CNI y CV se observa una disminución de  $i_{corr}$  al combinar 25 L/m<sup>3</sup> de CNI y 40% de CV (Figs. 4.1i, 4.2i y 4.3i); al combinar 12.5 o 25 L/m<sup>3</sup> de CNI con 20% de CV y 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI con 40% de CV no se observa incremento o reducción de  $i_{corr}$  (Figs. 4.1e,f,h, 4.2e,f,h y 4.3e,f,h).

Con respecto a la a/c se observa que las varillas embebidas en concreto con a/c de 0.29 experimentaron menor corrosión que aquellas embebidas en una a/c de 0.37, y éstas experimentaron menor corrosión que aquellas embebidas en el concreto con a/c de 0.45 (Figs. 4.1a, 4.2a y 4.3a).

En general se puede concluir que el agrietamiento incrementó la corrosión, lo cual se evidencia con la condición de corrosión de “moderada a alta” y de “alta velocidad de corrosión” que presentaron las varillas embebidas en especímenes agrietados en comparación con “baja a moderada” que presentaron los especímenes en concreto no agrietado.





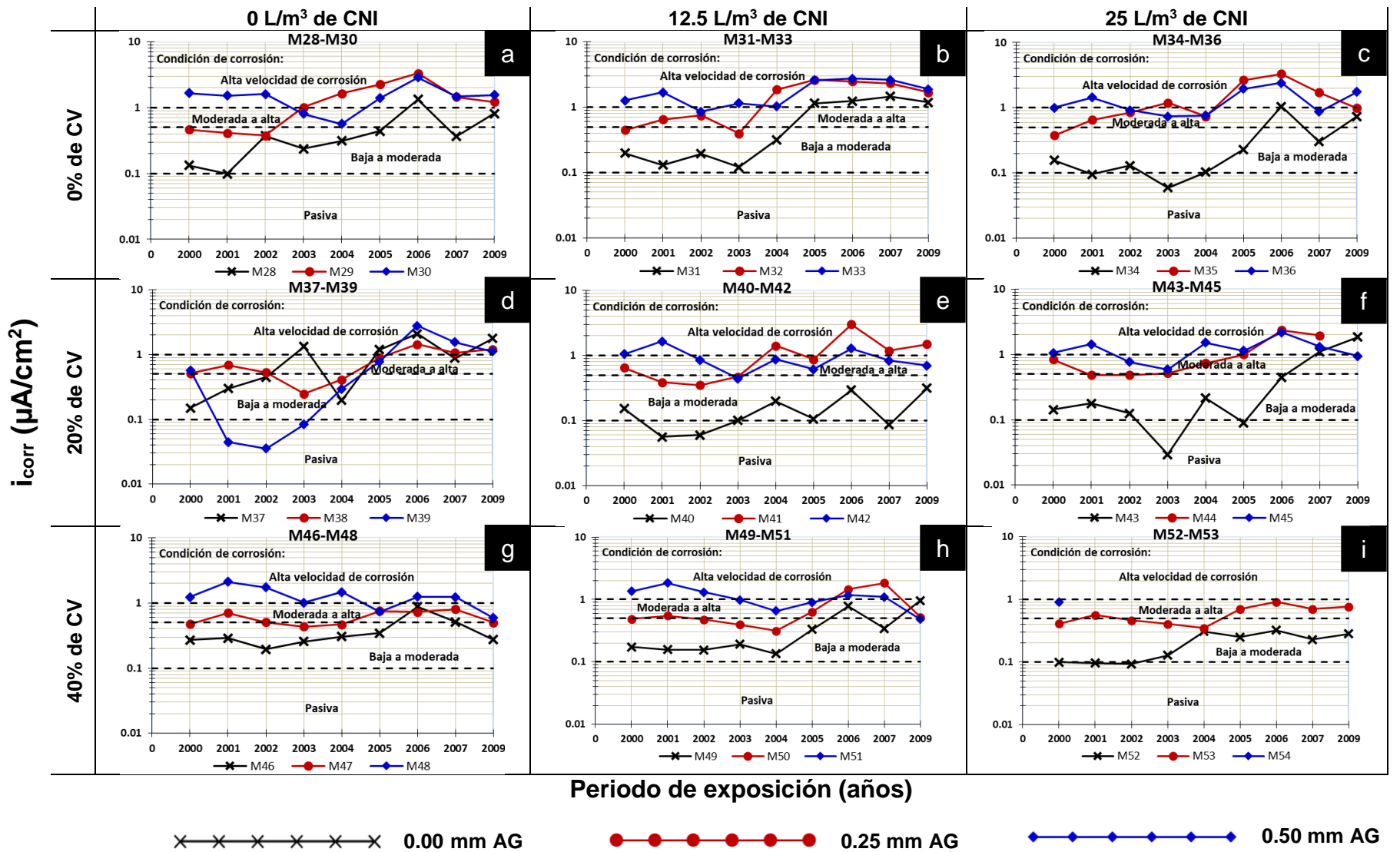


Figura 4. 2  $i_{corr}$  de varillas embebidas en concretos con a/c de 0.37

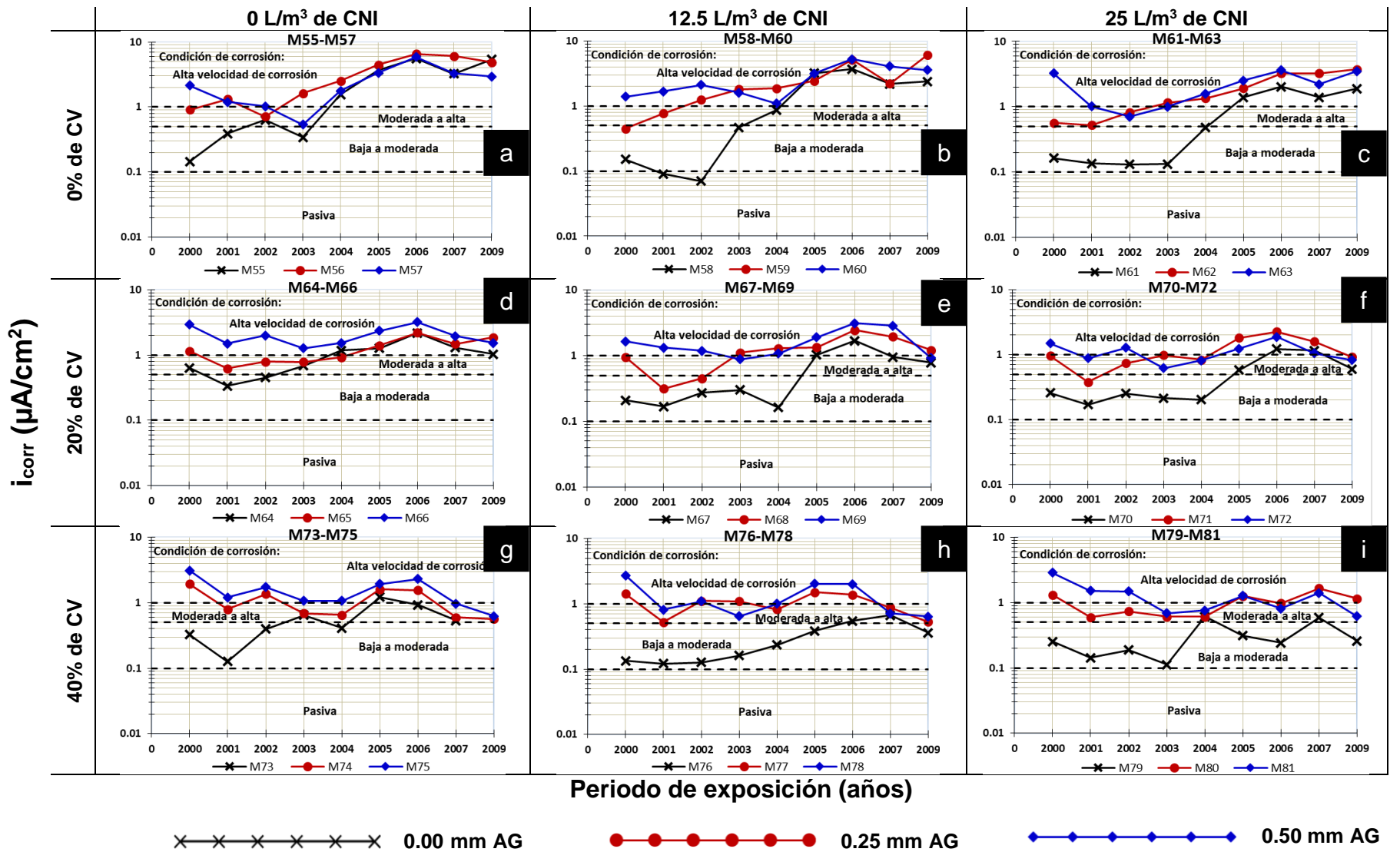


Figura 4. 3  $i_{corr}$  de varillas embebidas en concretos con a/c de 0.45

## **4.2 Análisis descriptivo de los resultados de las pruebas de tensión**

La presente sección muestra los resultados de las pruebas a tensión efectuadas a las varillas embebidas en los especímenes expuestos al ambiente marino natural durante nueve años. Las curvas esfuerzo-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) mostradas en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 sugieren que, el rango elástico, el esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ ) y la deformación a la fluencia ( $\epsilon_{fy}$ ) de todas las varillas utilizadas en el presente estudio son similares. No obstante, en la zona de endurecimiento por deformación, en el esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ ), en la deformación máxima ( $\epsilon_u$ ) y en la deformación a la fractura ( $\epsilon_{fr}$ ) se observan cambios importantes debidos principalmente a la influencia de la variable AG en dichas propiedades. Estos cambios consisten en la disminución de los esfuerzos y principalmente en la disminución de las deformaciones. Para determinar el efecto del CNI, la CV y la a/c en las propiedades obtenidas el análisis de los resultados se divide primeramente en esfuerzos y deformaciones en especímenes no agrietados y a continuación en especímenes agrietados.

### **4.2.1 Especímenes sin grietas**

#### **4.2.1.1 Esfuerzos**

En las Figs. 4.4a-i, 4.5a-i y 4.6a-i de las a/cs 0.29, 0.37 y 0.45 respectivamente, se muestran las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas. En donde se observa que el CNI, la CV, la interacción entre CNI y CV y la a/c no tuvieron efectos aparentes en los  $\sigma_y$  y  $\sigma_u$  de las varillas, ya que los valores son similares.

#### **4.2.1.2 Deformaciones**

En las figuras mencionadas en el párrafo anterior también parece que ninguna de las variables independientes ni sus interacciones afectaron la  $\epsilon_y$  y la  $\epsilon_u$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas.

En las Figs. 4.4a vs. 4.4b-c de la a/c 0.29 se observa que el CNI contribuye a preservar las deformaciones a la fractura ( $\epsilon_{fr}$ ) de las varillas; sin embargo, en la a/c

de 0.37 la adición de CNI aparentemente disminuye dicha propiedad (Fig. 4.5a vs. 4.5b-c). En la a/c de 0.45 se observa que la  $\epsilon_{fr}$  se preserva al adicionar 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI (Figura 4.6a vs. 4.6b); no obstante, parece ser que la adición de 25 L/m<sup>3</sup> de CNI disminuye la  $\epsilon_{fr}$  (Figura 4.6a vs. 4.6c).

En cuanto a la adición de CV los resultados sugieren una disminución del  $\epsilon_{fr}$  en todas las a/cs (Figs. 4.4a vs. 4.4d,g, 4.5a vs. 4.5d,g y 4.6a vs. 4.6d,g de las a/cs 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente).

Con respecto a las interacciones de las variables CNI y CV, en la a/c de 0.29 aparentemente los valores de la  $\epsilon_{fr}$  se preservan al combinar 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI y 40% de CV (Fig. 4.4a vs. 4.4h). En la a/c de 0.37 se tuvo una disminución en los valores del  $\epsilon_{fr}$  al combinar CNI con 20% de CV (Figs. 4.5a vs. 4.5e-f), pero al incrementar la CV a 40%, los valores de la  $\epsilon_{fr}$  aumentaron (Figs. 4.5a vs 4.5h-i). En cuanto al efecto de las interacciones en la a/c de 0.45, parece que la  $\epsilon_{fr}$  se preserva al combinar 40% de CV y CNI (Fig. 4.6a vs. 4.6h-i).

Por último las  $\epsilon_{fr}$  de las varillas embebidas en concretos con a/c de 0.45 son menores que aquellas en a/cs de 0.29 y 0.37 (Fig. 4.6a vs. 4.4a y 4.6a vs. 4.5a). Esto indica un probable efecto negativo de la a/c de 0.45 para preservar las  $\epsilon_{fr}$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas, con respecto a las a/cs de 0.29 y 0.37.

#### **4.2.2 Especímenes agrietados**

Las varillas embebidas en especímenes agrietados tuvieron  $\sigma_u$ ,  $\epsilon_u$  y  $\epsilon_{fr}$  considerablemente inferiores a las varillas embebidas en especímenes sin grietas. En estas varillas la falla se produjo inmediatamente después de alcanzar el valor del  $\sigma_u$ , lo cual sugiere un tipo de falla frágil; además se observó que cuando se incrementa el ancho de la grieta de 0.25 a 0.5 mm disminuyen aún más los valores del  $\sigma_u$ , de la  $\epsilon_u$  y de la  $\epsilon_{fr}$ , comparados con los especímenes no agrietados.

#### 4.2.2.1 Esfuerzos

En las Figs. 4.4a-i, 4.5a-i y 4.6a-i con  $a/c_s$  de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente, se muestran los  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados. En estas figuras no es posible identificar el efecto de las variables independientes en los valores de  $\sigma_u$ , esto debido a la variación en los resultados. No obstante, se observa que las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm tuvieron valores mayores de  $\sigma_u$  que las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm.

#### 5.2.2.2 Deformaciones

En lo que respecta a las deformaciones, las  $\epsilon_u$  y  $\epsilon_{fr}$  de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm fueron menores que las  $\epsilon_u$  y  $\epsilon_{fr}$  de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm, esto sugiere que a mayor AG mayor es la pérdida de las deformaciones.

En cuanto a las variables CNI, CV y  $a/c$ , así como sus interacciones, no es posible establecer sus efectos en la  $\epsilon_u$  y la  $\epsilon_{fr}$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados, debido a la variabilidad en los valores de deformaciones.

En resumen, el efecto de la corrosión fue mayor en las varillas embebidas en especímenes agrietados. Sin embargo, se aprecia que el daño ocasionado por la corrosión a las varillas de acero en lo referente a la reducción de los esfuerzos ( $\sigma$ ), aunque evidente, no es tan relevante como es la reducción en la capacidad de deformación ( $\epsilon$ ) de las varillas. Esto se debe a que los  $\sigma$  dependen de la sección transversal de la varilla, mientras que las  $\epsilon$  dependen tanto de la sección transversal como de la forma superficial de dicha varilla, los cuales son afectados por la corrosión.

Debido a la variabilidad de los resultados, especialmente de las varillas embebidas en especímenes agrietados, se requiere un análisis detallado de los datos, con el

fin de estudiar si el efecto de las variables independientes es significativo en las propiedades mecánicas obtenidas. Por lo tanto, en las siguientes secciones se analizan los resultados de manera detallada.







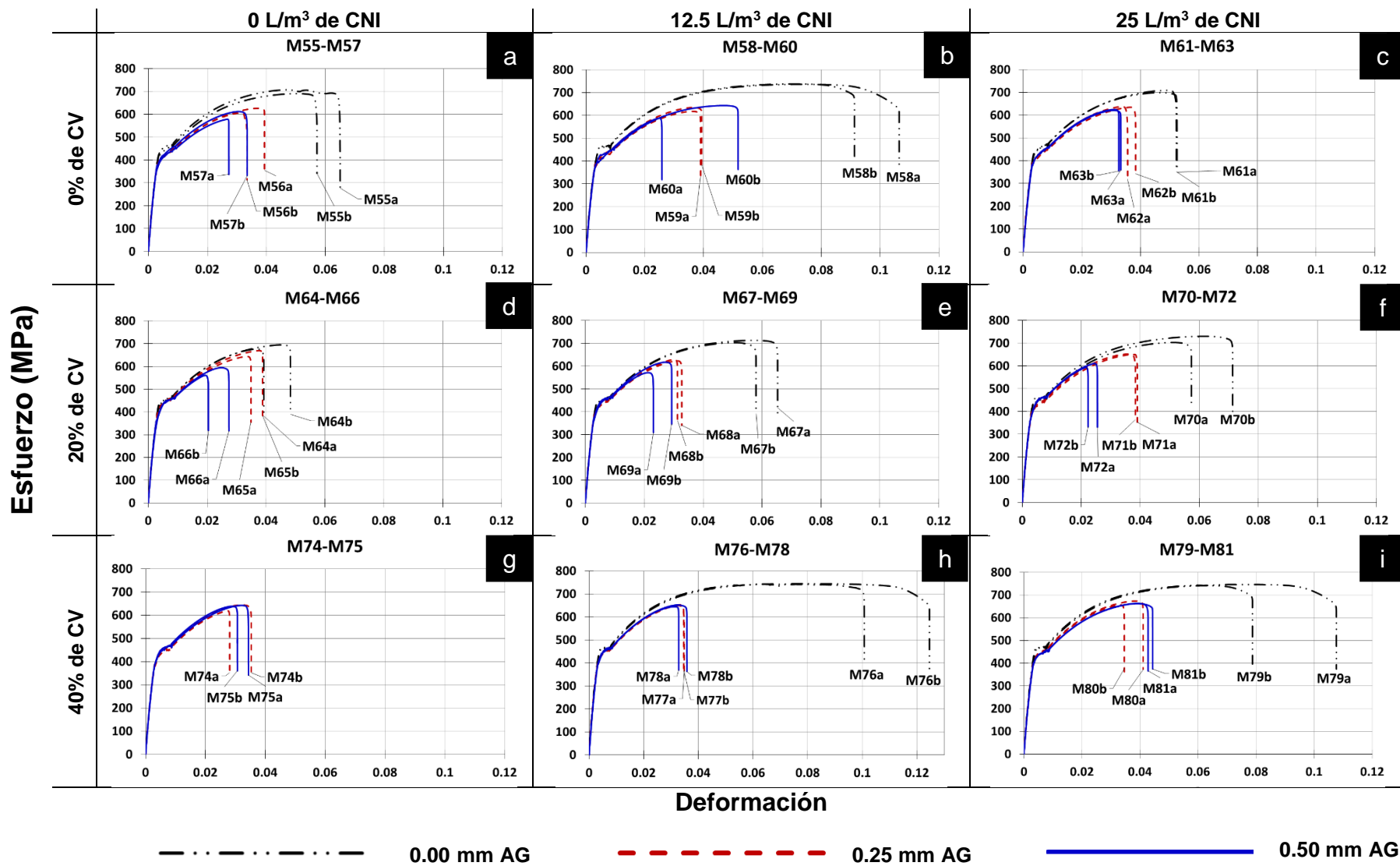


Figura 4. 6 Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de las varillas embebidas en concretos con a/c de 0.45

### 4.3 Análisis estadístico de los resultados de tensión

Para llevar a cabo el análisis estadístico primeramente se hizo un análisis exploratorio de los datos para verificar la independencia, la normalidad y la homogeneidad de las varianzas. El análisis efectuado indicó que los datos no cumplen con la normalidad y con la homogeneidad de varianzas, con base en estos resultados se hizo la transformación de los datos aplicando la raíz cuadrada, el inverso de la raíz cuadrada, el logaritmo natural, etcétera. A pesar de estos tratamientos los datos no cumplen con las condiciones mencionadas, que son requisitos para el análisis con métodos paramétricos, por tal motivo se hicieron análisis no paramétricos; sin embargo los métodos no paramétricos no son robustos y no permitieron hacer las comparaciones de interés en esta investigación. No obstante los datos son factibles de analizar de manera individual mediante el ANOVA de una vía, además con esta prueba se pueden establecer las comparaciones de interés, dicho análisis estadístico se muestra en el ANEXO de esta tesis. A continuación se analiza el efecto de las variables en las propiedades de tensión del acero con base en el análisis estadístico efectuado.

De las regiones elásticas de todas las gráficas de las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se estimó el módulo de elasticidad (E), el cual tiene un valor medio de 203,786 MPa, con una desviación estándar de 13,406 MPa y un coeficiente de variación de 6.57%, el cual no resulta significativo. El valor de E de un material depende de su estructura molecular, mismo que se da en la manufactura mediante la composición química y los tratamientos térmicos empleados, por lo tanto, una variación ligera en el E no conduce a ninguna diferencia significativa (Beer, 2007 y Callister, 2002).

Para el estudio de los efectos de las variables en las propiedades mecánicas se analizaron los esfuerzos a la fluencia ( $\sigma_y$ ), los esfuerzos máximos ( $\sigma_u$ ), las deformaciones a la fluencia ( $\epsilon_y$ ), las elongaciones (e), las tenacidades (T) y las ductilidades ( $\mu$ ) de las varillas expuestas al ambiente marino natural durante nueve años. Asimismo se hizo la correlación entre los resultados de corrosión y los

resultados de ductilidad ( $\mu$ ). A continuación, se presenta el análisis de dichas propiedades.

### **4.3.1 Esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ )**

#### **4.3.1.1 Especímenes sin grietas**

En la Figura 4.7 se observa que los  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas tuvieron una media de 416.92 MPa con una desviación estándar (DE) de 22.35 MPa. En la misma figura también se observa que la media del  $\sigma_y$  de las varillas control (463.76 MPa  $\pm$  3.3 MPa) es mayor que la media de las varillas expuestas en los especímenes sin grietas. Lo anterior sugiere que el  $\sigma_y$  de las varillas expuestas disminuyó debido al deterioro por corrosión. También se observa que el  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 fue mayor que el  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes con a/cs de 0.37 y 0.45.

Al llevar a cabo el análisis estadístico se encontró diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los  $\sigma_y$  de las varillas expuestas en especímenes sin grietas y las varillas control. En cuanto a la influencia de la a/c, también se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre los  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en la a/c de 0.29 y las varillas embebidas en la a/c de 0.37 y entre las varillas en la a/c de 0.29 y las varillas en la a/c de 0.45. Esto indica que una baja a/c mantiene sin cambios significativos el  $\sigma_y$  del acero; debido a que, la matriz cementante es más densa y con menos porosidad capilar y conectividad entre ellos, lo que disminuye la permeabilidad del concreto y por lo tanto evita el ingreso de los agentes agresivos (Montes, 2004).

Las variables CNI y CV no tuvieron efectos significativos en los  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas.

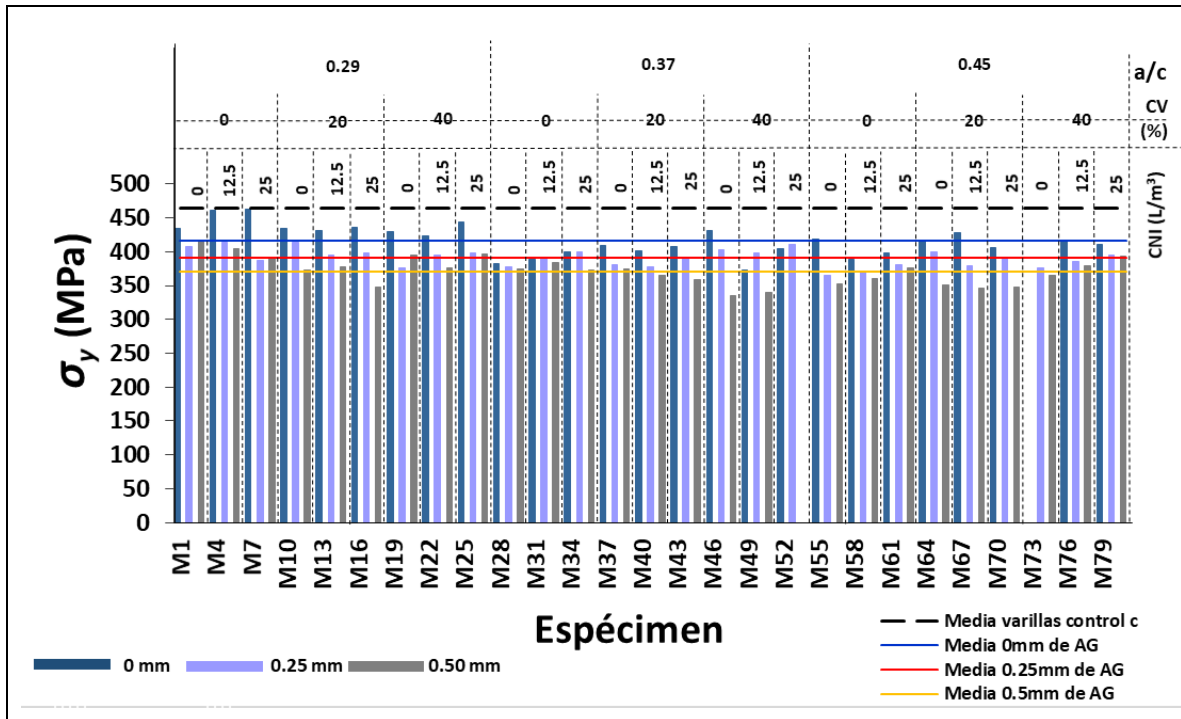


Figura 4. 7 Resumen del  $\sigma_y$

#### 4.3.1.2 Especímenes agrietados

En la Figura 4.7 se observa que la media del  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes no agrietados ( $416.92 \pm 22.35$  MPa) es mayor que la media del  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm ( $391.18 \pm 13.14$  MPa). Este último también es mayor a la media de  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm ( $371.37 \pm 20.54$  MPa).

El análisis estadístico del  $\sigma_y$  de las varillas en especímenes agrietados indicó que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los resultados de las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las varillas embebidas en especímenes

con AG de 0.25 mm, también indicó diferencias significativas entre estas últimas y aquellas en especímenes con AG de 0.5 mm.

De la misma manera, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.001$ ) entre los  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y los  $\sigma_y$  de las varillas en especímenes con a/cs de 0.37 y de 0.45.

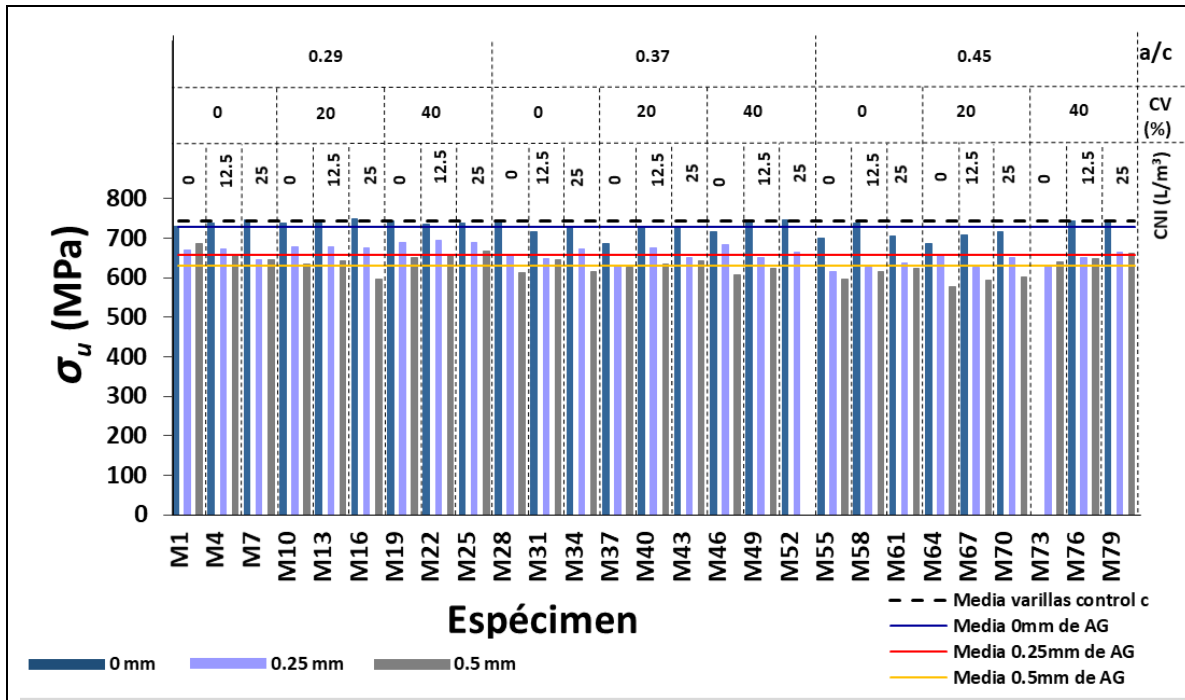
Con respecto a la influencia de las variables CNI y CV en los  $\sigma_y$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados, el análisis estadístico indicó que no tuvieron efectos significativos.

### **4.3.2 Esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ )**

#### **4.3.2.1 Especímenes sin grietas**

Los resultados del  $\sigma_u$  (Figura 4.8) muestran que la media de las varillas control ( $743.05 \pm 5.82$  MPa) es ligeramente mayor que la media de las varillas embebidas en especímenes sin grietas ( $728.22 \pm 18.14$  MPa); no obstante, el análisis estadístico indicó que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre dichos valores. Esto sugiere que el deterioro a causa de la corrosión generada en un ambiente marino natural durante nueve años disminuye el  $\sigma_u$  del acero.

El análisis estadístico también indica que el CNI no afectó significativamente los valores del  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas. En cuanto a la CV, existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.011$ ) entre los  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes sin CV y las varillas en especímenes con 40% de CV, de igual modo, hay diferencias significativas entre las varillas en especímenes con 20% de CV y las varillas en especímenes con 40% de CV. Por el contrario, no existen diferencias entre las varillas embebidas en especímenes sin CV y aquellas con 20%. Lo anterior demuestra que la adición de 40% de CV preserva el  $\sigma_u$  del acero de refuerzo



Varillas	Media (MPa)	DE (MPa)	CV (%)	Reducción (%)
Control c	743.05	± 5.82	0.78	0
0mm de AG	728.22	± 18.14	2.49	2
0.25mm de AG	658.45	± 21.04	3.19	11
0.5mm de AG	630.88	± 25.56	4.05	15

**Figura 4. 8 Resumen del  $\sigma_u$**

Por último, se hallaron diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.002$ ) entre los  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y las varillas en especímenes con a/c de 0.37 y 0.45. Esto indica que en la a/c de 0.29 el  $\sigma_u$  de las varillas fue mayor que en las varillas embebidas en la a/c de 0.37 y 0.45. No existen diferencias estadísticamente significativas entre las varillas embebidas en la a/c de 0.37 y aquellas en la a/c de 0.45.

#### 4.3.2.2 Especímenes agrietados

En la Figura 4.8 también se observa que la media de las varillas en especímenes sin grietas ( $728.22 \pm 18.14$  MPa) es mayor que la media de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm ( $658.45 \pm 21.04$  MPa), y esta a su vez, es

mayor que la media de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm ( $630.88 \pm 25.56$  MPa).

Al efectuar el análisis estadístico de los  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm, estas últimas también tienen diferencias significativas con respecto a las varillas en especímenes con AG de 0.5mm.

En cuanto al afecto del CNI no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Por el contrario, si hay diferencias significativas ( $p = 0.011$ ) entre los  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes con 20% de CV y las varillas en especímenes con 40% de CV, sin embargo, no hay diferencias entre los  $\sigma_u$  de las varillas en especímenes sin CV y aquellas en especímenes con 20 y 40% de CV.

Por último, el análisis estadístico indicó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los resultados del  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y las varillas en especímenes con a/c de 0.37 y de 0.45; lo cual indica que una a/c de 0.29 preserva mejor el  $\sigma_u$  que a/cs mayores como 0.37 y 0.45.

### **4.3.3 Deformaciones a la fluencia ( $\epsilon_y$ )**

#### **4.3.3.1 Especímenes sin grietas**

En la Figura 4.9 se observan las  $\epsilon_y$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas, al analizar estadísticamente estos resultados se hallaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los especímenes embebidos en la a/c de 0.29 y los especímenes en las a/cs de 0.37 y 0.45. Esto significa que una a/c baja preserva mejor las  $\epsilon_y$  de las varillas.

En cuanto al efecto de las variables CNI y CV las  $\epsilon_y$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas, no tuvieron diferencias significativas en los resultados.

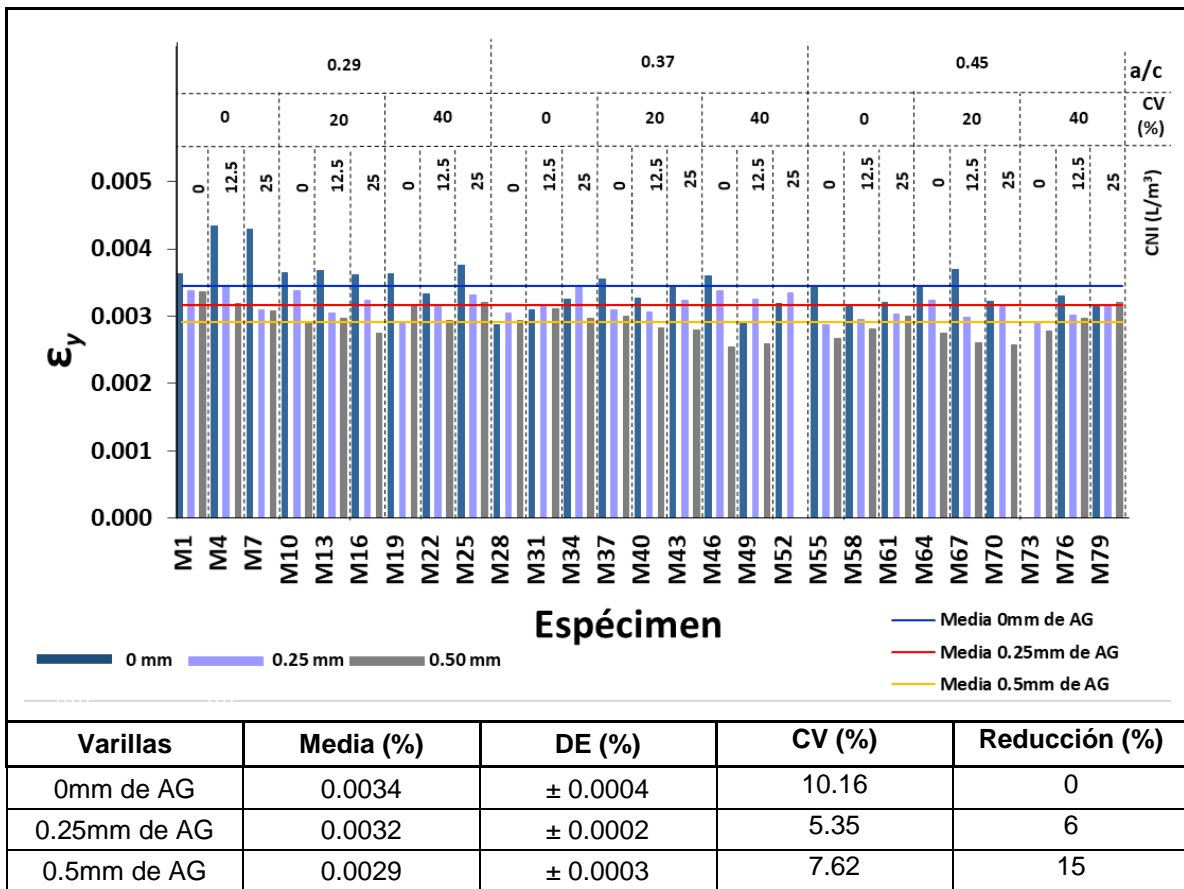


Figura 4. 9 Resumen de la  $\epsilon_y$

#### 4.3.3.2 Especímenes agrietados

En la Figura 4.9 se observa que la media de las varillas embebidas en especímenes sin grietas ( $0.0034 \pm 0.0004$ ) es mayor a la media de las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm ( $0.0032 \pm 0.0002$ ). También se observa que al incrementar el AG a 0.5 mm las  $\epsilon_y$  disminuyen (media =  $0.0029 \pm 0.0003$ ). El análisis estadístico indicó que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm, asimismo, existen diferencias significativas entre estas últimas y las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm. Esto quiere decir que las grietas



en el concreto disminuyen las  $\epsilon_y$  de las varillas expuestas durante nueve años a un ambiente marino natural y además mientras más ancha es la grieta mayor será la pérdida de la  $\epsilon_y$ .

El análisis estadístico también indicó que las variables CNI y CV no tuvieron efectos significativos en las  $\epsilon_y$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados.

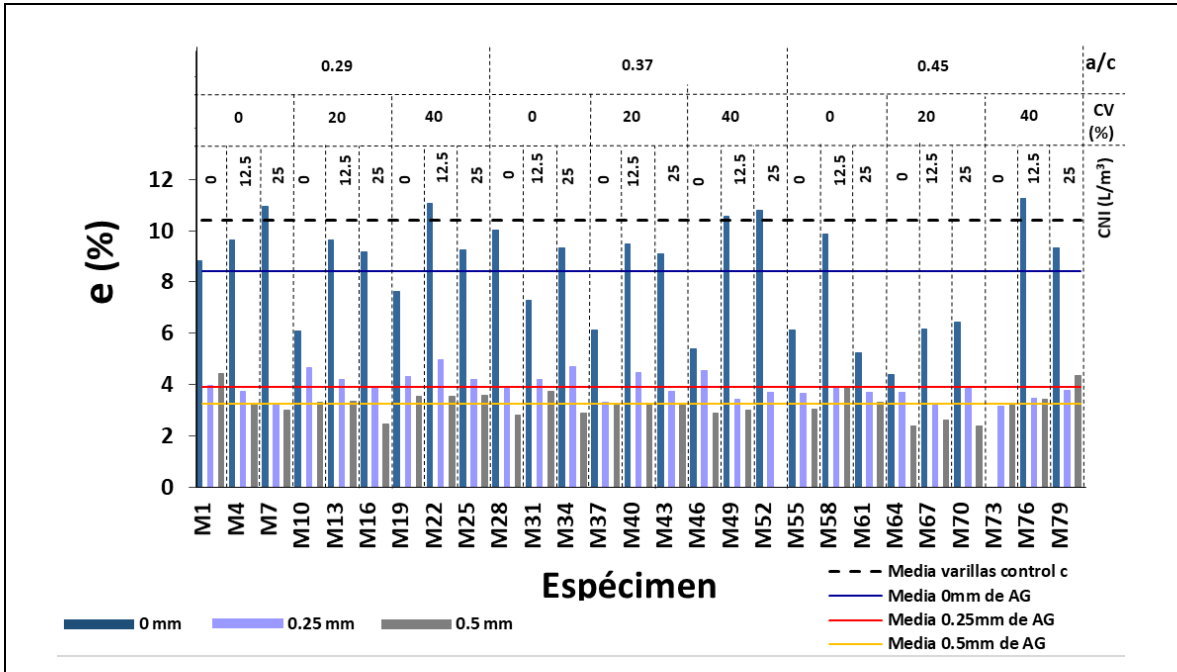
Por último, la variable a/c afecto significativamente ( $p=0.002$ ) las  $\epsilon_y$  entre las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y aquellas varillas en especímenes con a/c de 0.45; no obstante, no hay diferencias significativas entre las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.37 y las varillas en especímenes con a/c de 0.29 y 0.45.

#### **4.3.4 Elongación (e)**

##### **4.3.4.1 Especímenes sin grietas**

En la Figura 4.10 se observa que la media de las elongaciones (e) de las varillas control ( $10.42 \pm 0.73\%$ ) es mayor que la media de las varillas embebidas en especímenes sin grietas ( $8.43 \pm 2.07\%$ ). El análisis estadístico indicó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ambos resultados.

Respecto al efecto del CNI se hallaron diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.001$ ), entre las varillas embebidas en especímenes adicionados con CNI y las varillas en especímenes sin CNI. Esto sugiere que las varillas preservan mejor sus elongaciones cuando se encuentran en especímenes adicionados con CNI, ya sea 12.5 o 25 L/m<sup>3</sup>, pero las elongaciones son mayores cuando se adiciona 12.5 L/m<sup>3</sup>.



Varillas	Media (%)	DE (%)	CV (%)	Reducción (%)
Control	10.42	± 0.73	7.03	0
0mm de AG	8.43	± 2.07	24.55	19
0.25mm de AG	3.94	± 0.46	11.72	62
0.5mm de AG	3.24	± 0.53	16.33	69

**Figura 4. 10 Resumen de la e**

Al adicionar CV se observó que la elongación disminuye en las varillas embebidas en especímenes con 20% de CV, y aumentan cuando se encuentran en especímenes adicionados con 40% de CV. Al llevar a cabo el análisis estadístico se encontró que no existen diferencias significativas entre las varillas embebidas en especímenes sin CV y aquellas en especímenes con 20% de CV, tampoco existen diferencias significativas entre las varillas en especímenes sin CV y aquellas en especímenes con 40% de CV. Por el contrario, existen diferencias significativas ( $p=0.023$ ) entre las varillas embebidas en especímenes con 20% de CV y aquellas en especímenes con 40% de CV.

Por último, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.047$ ), entre las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y las varillas embebidas en la a/c de 0.45. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre

las elongaciones de las varillas embebidas en la a/c de 0.37 y aquellas varillas en la a/c de 0.29 y 0.45.

#### **4.3.4.2 Especímenes agrietados**

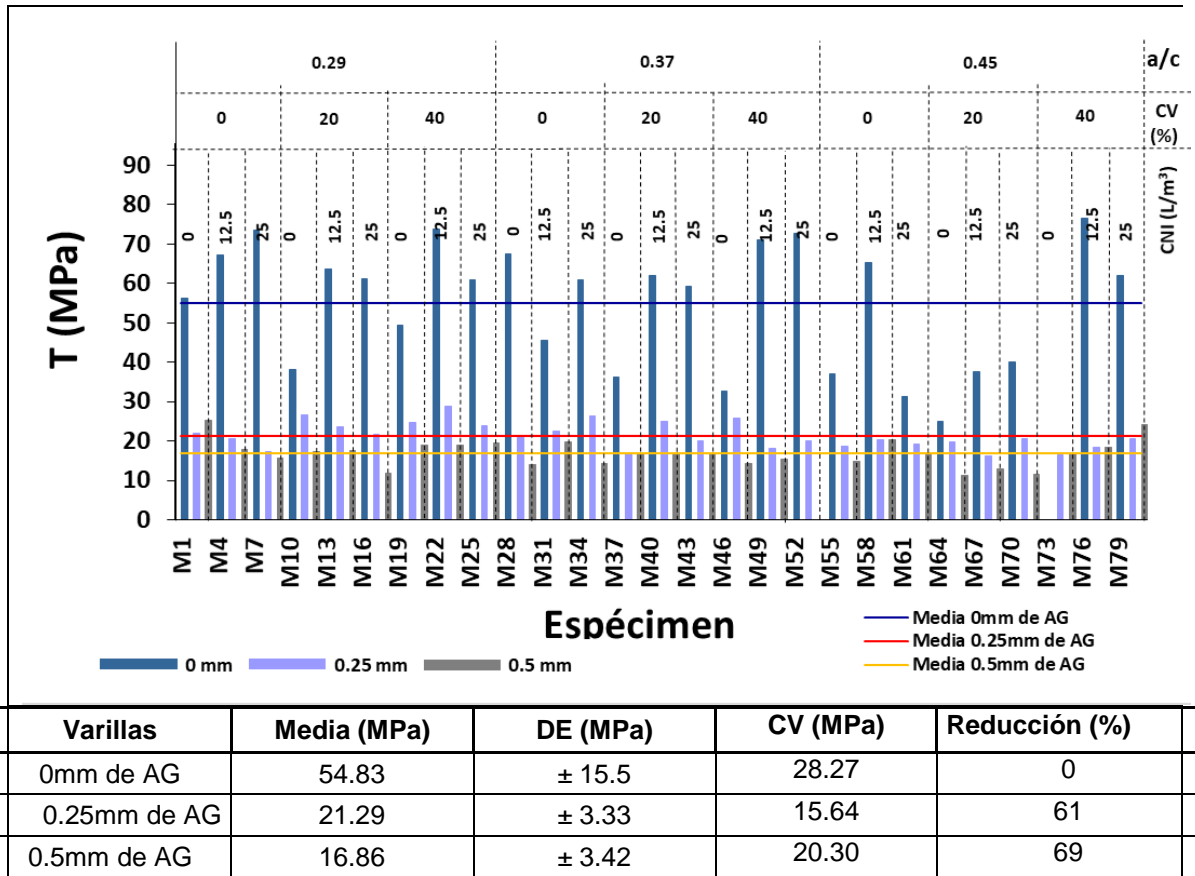
Las elongaciones de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) a las elongaciones de las varillas embebidas en especímenes sin grietas, y también son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) a aquellas en especímenes con AG de 0.5 mm. Las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm tuvieron elongaciones mayores que las varillas en especímenes con AG de 0.5 mm, esto significa que en especímenes agrietados cuando más ancha es la grieta mayor será la pérdida de elongación.

Las variables CNI, CV y a/c no tuvieron efectos significativos en las elongaciones de las varillas en especímenes agrietados.

#### **4.3.5 Tenacidad (T)**

##### **4.3.5.1 Especímenes sin grietas**

La Figura 4.11 muestra las T de las varillas embebidas en especímenes sin grietas que fueron expuestos durante nueve años a un ambiente marino natural. Al llevar a cabo el análisis estadístico se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.001$ ) entre las varillas embebidas en especímenes que contenían CNI y las varillas en especímenes que no contenían CNI. Esto indica que tanto 12.5 como 25 L/m<sup>3</sup> de CNI preserva las T de las varillas, pero los resultados son mayores cuando se adiciona 12.5 L/m<sup>3</sup>.



**Figura 4. 11 Resumen de la T**

De igual manera, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.019$ ) entre las varillas embebidas en especímenes que contenían 20% de CV y aquellas en especímenes con 40% de CV, pero no existen diferencias significativas entre las varillas en especímenes sin CV y aquellas en especímenes con 20 y 40% de CV. Las varillas en especímenes con 20% de CV tuvieron T inferiores a las varillas en especímenes con 40% de CV.

Por último, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.043$ ) entre las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y las varillas embebidas en a/c de 0.45. No obstante, no existen diferencias significativas entre las varillas embebidas en la a/c de 0.37 y aquellas en la a/c de 0.29 y 0.45.

#### **4.3.5.2 Especímenes agrietados**

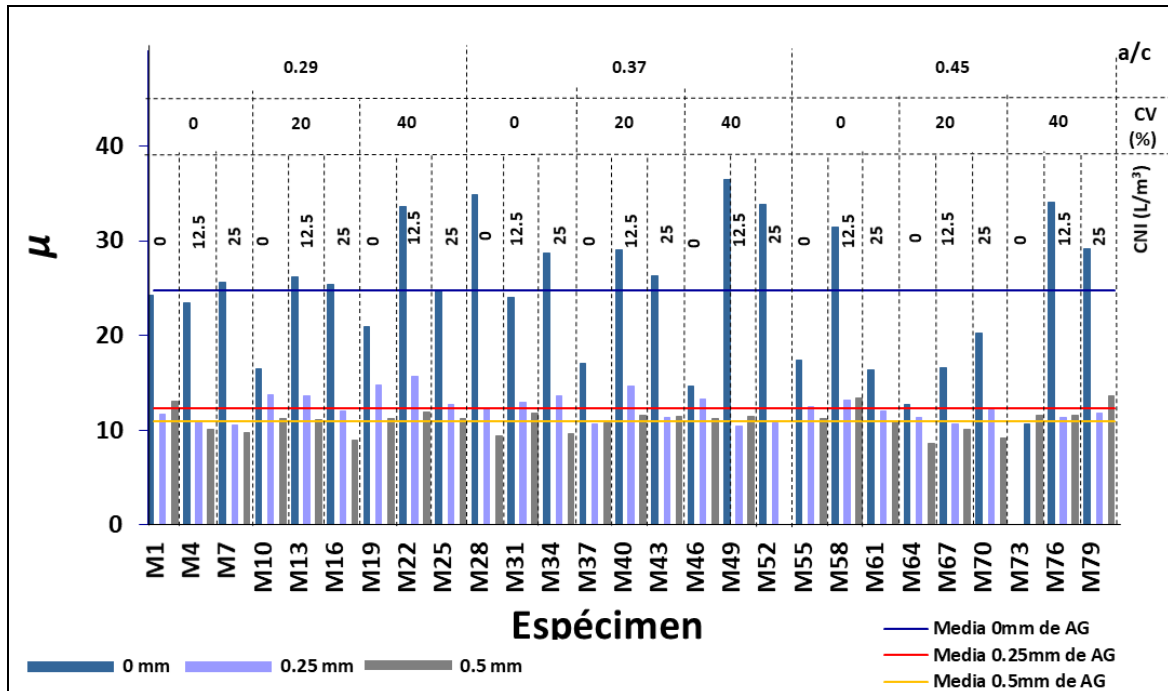
La Figura 4.11 también muestra las T de las varillas embebidas en especímenes agrietados. En las cuales se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre las T de las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las T de las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm, estas últimas también difieren significativamente con las T de las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.5 mm. Lo anterior indica que mientras más ancha es la grieta mayor será la pérdida de T en las varillas.

Finalmente, se encontraron diferencias significativas ( $p = 0.019$ ) entre las T de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 y las T de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.45, pero no existen diferencias entre las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.37 y las varillas en especímenes con a/c de 0.29 y de 0.45. Esto señala que las tenacidades se preservan mejor en a/c bajas que en a/c altas. El CNI y la CV no tuvieron efectos significativos en la T de las varillas en especímenes sin grietas.

#### **4.3.6 Ductilidad ( $\mu$ )**

##### **4.3.6.1 Especímenes sin grietas**

La Figura 4.12 muestra las  $\mu$  de las varillas expuestas a un ambiente marino natural durante nueve años, para las cuales el análisis estadístico indicó que existen diferencias significativas ( $p = 0.002$ ) entre las  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes sin CNI y las  $\mu$  de las varillas en especímenes adicionados con CNI. Esto sugiere que las varillas preservan mejor la  $\mu$  cuando se encuentran en especímenes que contienen CNI, ya sea 12.5 o 25 L/m<sup>3</sup>, no obstante, las  $\mu$  son mayores cuando las varillas se encuentran en especímenes adicionados con 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI.



Varillas	Media	DE	CV	Reducción (%)
0mm de AG	24.75	± 6.91	27.92	0
0.25mm de AG	12.26	± 1.43	11.70	50
0.5mm de AG	10.98	± 1.28	11.66	56

**Figura 4. 12 Resumen de la  $\mu$**

En cuanto a la variable CV no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes sin CV y aquellas en especímenes con 20% de CV, tampoco existen diferencias significativas entre las  $\mu$  de las varillas en especímenes sin CV y aquellas con 40% de CV. Sin embargo, existen diferencias significativas ( $p=0.012$ ) entre las  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes con 20% de CV y aquellas en especímenes con 40% de CV. Lo anterior se debe a que al adicionar 20% de CV a los especímenes la  $\mu$  de las varillas disminuye respecto a las varillas en especímenes sin CV, en cambio al incrementar la CV de 20 a 40% la  $\mu$  aumenta.

Con respecto a la variable a/c no se tuvieron diferencias significativas entre las  $\mu$  de las tres a/cs estudiadas.

#### 4.3.6.2 Especímenes agrietados

En la Figura 4.12 también se muestran las  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes agrietados, en las cuales existen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre las  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes sin grietas y aquellas en especímenes con AG de 0.25 mm, también existen diferencias significativas entre estas últimas y las varillas en especímenes con AG de 0.5 mm. Las varillas embebidas en especímenes con AG de 0.25 mm tuvieron mayor  $\mu$  que las varillas en especímenes con AG de 0.5 mm. Esto significa que en especímenes agrietados cuando más ancha es la grieta mayor será la pérdida de  $\mu$ .

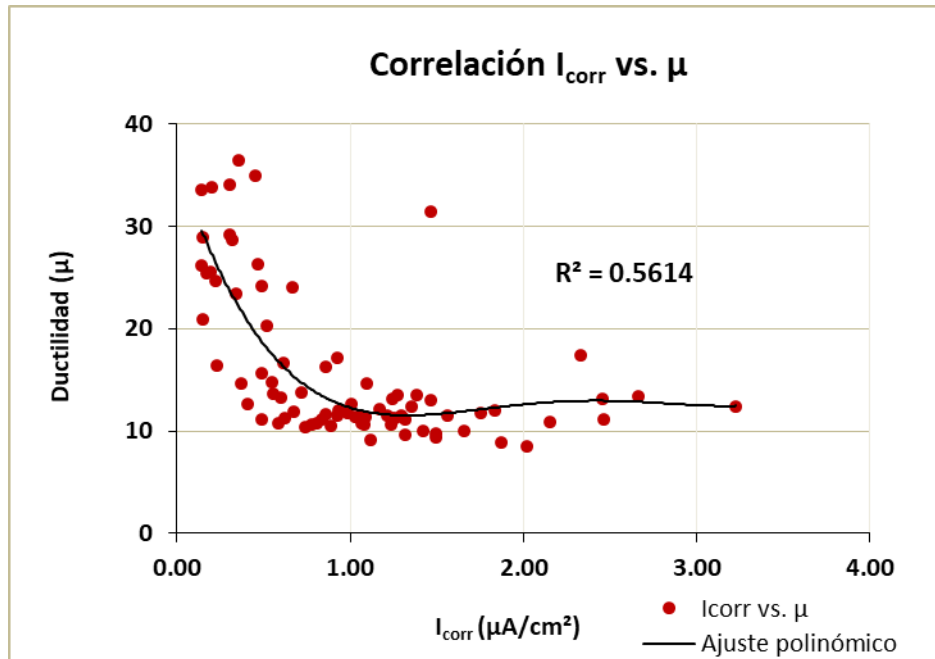
Las variables CNI, CV y a/c no tuvieron efectos significativos en las  $\mu$  de las varillas en especímenes agrietados.

#### 4.4 Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$

En la Figura 4.13 se presenta el diagrama de dispersión de  $i_{corr}$  y  $\mu$  de todas las varillas, en la cual se observa que los datos no tienen una tendencia lineal. La nube de puntos de la gráfica se aproxima más a una curva, y se ajusta mejor a una función polinómica, la cual permite presentar la correlación entre las variables de manera práctica. Al efectuar el ajuste polinómico se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0.5614, lo que significa que la corrosión explica el 56.14% de la variabilidad en la  $\mu$ . Lo anterior está expresado por la siguiente ecuación de correlación:

$$\mu = 1.25 I_{corr}^4 - 11.56 I_{corr}^3 + 38.05 I_{corr}^2 - 51.62 I_{corr} + 36.19$$

De la cual, a partir de los valores de  $i_{corr}$  se puede predecir la  $\mu$  del acero de refuerzo; no obstante, la correlación entre ambas variables es baja, en parte por la complejidad del fenómeno de la corrosión y por otro lado por la influencia de las variables independientes.



**Figura 4. 13 Correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$  de todas las varillas**

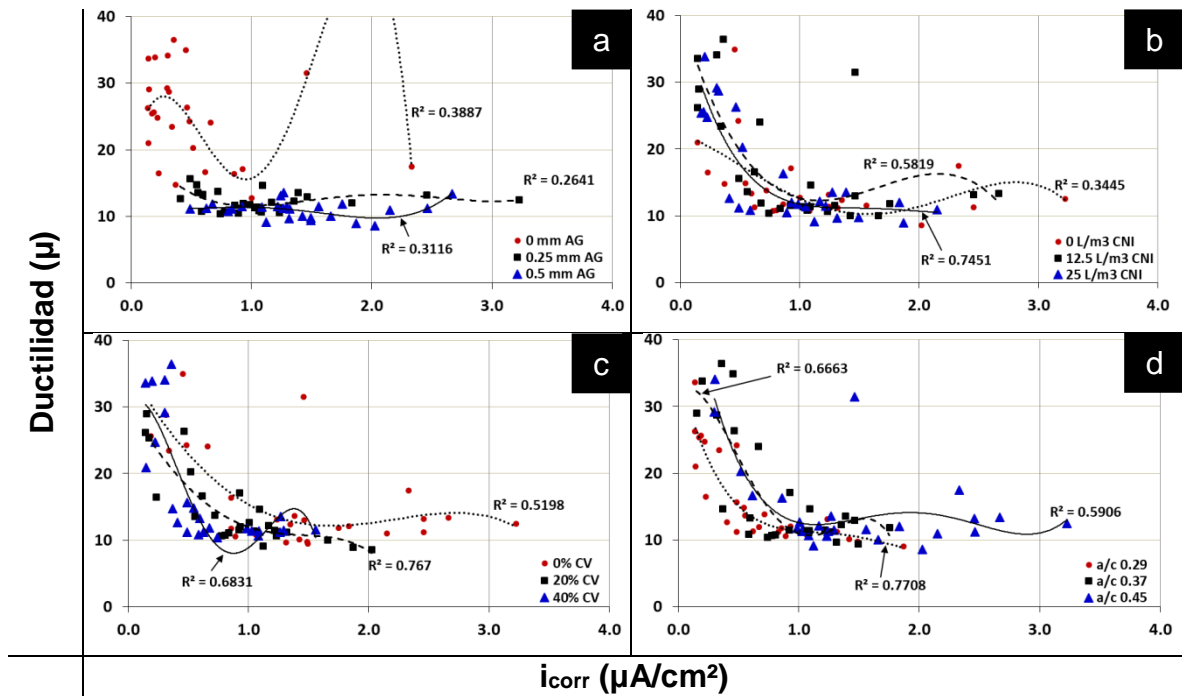
Para conocer el efecto de las variables independientes, en la Figura 4.14 se muestra la correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$  por cada variable y en la Tabla 4.1 se muestran los  $R^2$  y las ecuaciones obtenidas en cada correlación. Con base en los resultados obtenidos, en la Figura 4.14a se observa que la corrosión de las varillas embebidas en especímenes sin grietas explica el 38.87% de la variabilidad en la  $\mu$  de dichas varillas. En las varillas en especímenes agrietados la  $i_{corr}$  explica el 26.41% y el 31.16% de la variabilidad en la  $\mu$  de las varillas en especímenes con AG de 0.25 y 0.5 mm, respectivamente.

La  $i_{corr}$  de las varillas embebidas en especímenes sin CNI explica el 34.45% de la variabilidad de la  $\mu$  (Figura 4.14b). Sin embargo, la  $i_{corr}$  de las varillas embebidas en especímenes con 12.5 y 25 L/m<sup>3</sup> de CNI explican el 58.19% y el 74.51% de la variabilidad de  $\mu$ , respectivamente.

La correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$  de las varillas en especímenes sin CV (Figura 4.14c) indica que el 51.98% de la variabilidad en la  $\mu$  es explicada por el grado de corrosión



en dichas varillas. En las varillas en especímenes con 20% y 40% de CV el 76.84% y 64.57% de la variabilidad en la  $\mu$  esta explicada por la corrosión de dichas varillas.



**Figura 4. 14 Correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$  bajo la influencia de las variables a) AG, b) CNI, c) CV y d) a/c**

Por último, en la Figura 4.14d se presenta la correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$  de las varillas embebidas en especímenes con diferentes a/cs, donde se observa que la  $i_{corr}$  explica el 77.08%, el 66.63% y el 59.06% de la variabilidad en la  $\mu$  de las varillas en a/cs de 0.29, 0.37 y 0.45, respectivamente.

Al correlacionar la  $i_{corr}$  y la  $\mu$  por variables se tuvieron siete correlaciones superiores a la correlación general (todas las variables), ver Tabla 4.1. Donde la mayor fue para las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 ( $R^2=0.7708$ ). Asimismo, hubieron cinco correlaciones por debajo de la correlación general, donde la menor fue para las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm ( $R^2=0.2641$ ).

**Tabla 4. 1 Resumen de las correlaciones**

Variable	Nivel	R <sup>2</sup>	Ecuación de correlación
Todas	Todos	0.5614	$\mu = 1.25 I_{corr}^4 - 11.56 I_{corr}^3 + 38.05 I_{corr}^2 - 51.62 I_{corr} + 36.19$
AG	0	0.3887	$\mu = -44.65 I_{corr}^4 + 188.20 I_{corr}^3 - 234.30 I_{corr}^2 + 88.87 I_{corr} + 17.68$
	0.25	0.2641	$\mu = 1.20 I_{corr}^4 - 9.79 I_{corr}^3 + 27.39 I_{corr}^2 - 30.06 I_{corr} + 22.85$
	0.5	0.3116	$\mu = 1.45 I_{corr}^4 - 6.39 I_{corr}^3 + 8.36 I_{corr}^2 - 3.73 I_{corr} + 11.67$
CNI	0	0.3445	$\mu = -1.60 I_{corr}^4 + 8.98 I_{corr}^3 - 11.60 I_{corr}^2 - 5.29 I_{corr} + 22.11$
	12.5	0.5819	$\mu = -0.24 I_{corr}^4 - 6.45 I_{corr}^3 + 36.29 I_{corr}^2 - 56.77 I_{corr} + 39.81$
	25	0.7451	$\mu = 3.37 I_{corr}^4 - 23.87 I_{corr}^3 + 61.46 I_{corr}^2 - 68.85 I_{corr} + 39.62$
CV	0	0.5198	$\mu = -0.47 I_{corr}^4 + 0.58 I_{corr}^3 + 10.28 I_{corr}^2 - 30.68 I_{corr} + 35.69$
	20	0.7670	$\mu = -3.20 I_{corr}^4 + 8.22 I_{corr}^3 + 4.76 I_{corr}^2 - 27.51 I_{corr} + 29.73$
	40	0.6831	$\mu = -73.80 I_{corr}^4 + 229.20 I_{corr}^3 - 202.90 I_{corr}^2 + 26.16 I_{corr} + 30.24$
a/c	0.29	0.7708	$\mu = 7.00 I_{corr}^4 - 39.82 I_{corr}^3 + 81.05 I_{corr}^2 - 72.38 I_{corr} + 35.54$
	0.37	0.6663	$\mu = -33.40 I_{corr}^4 + 121.40 I_{corr}^3 - 128.00 I_{corr}^2 + 19.14 I_{corr} + 31.80$
	0.45	0.5906	$\mu = 4.13 I_{corr}^4 - 32.91 I_{corr}^3 + 91.95 I_{corr}^2 - 106.10 I_{corr} + 55.52$

## DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos en las secciones anteriores a continuación se discute el efecto de las variables independientes y sus interacciones en las propiedades evaluadas. Debido a la variabilidad tan grande entre los resultados de las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las varillas embebidas en especímenes agrietados la discusión se divide en especímenes sin grietas y especímenes agrietados. Por último se discuten las correlaciones obtenidas entre la  $i_{corr}$  y la  $\mu$  de las varillas.

### Especímenes sin grietas

Existen diferencias significativas entre los  $\sigma_y$ , los  $\sigma_u$  y las  $e$  de las varillas embebidas en especímenes expuestos al ambiente marino natural durante nueve años y los  $\sigma_y$ , los  $\sigma_u$  y las  $e$  de las varillas control. Esto se debe a que las varillas expuestas durante nueve años fueron afectadas por la corrosión y los  $\sigma_y$ , los  $\sigma_u$  y las deformaciones disminuyen con respecto al grado de corrosión existente en dichas varillas (Fernández et al., 2015 y Ou et al., 2016).

La adición de CNI, ya sea 12.5 o 25 L/m<sup>3</sup>, contribuyó a preservar únicamente las propiedades de deformación ( $e$ ,  $\mu$  y  $T$ ) en las  $a/cs$  de 0.29 y 0.45. Sin embargo, las varillas embebidas en especímenes adicionados con 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI tuvieron mayores deformaciones que aquellas embebidas en especímenes con 25 L/m<sup>3</sup>. Una cantidad grande de CNI no es necesariamente mejor para la prevención de la corrosión, esto se debe a que el CNI aporta una cantidad extra de calcio, el cual incrementa el calor de hidratación del concreto, que a su vez, causa micro-grietas en la matriz cementante que favorecen la corrosión del acero de refuerzo. El CNI no tuvo efectos en las deformaciones de la  $a/c$  de 0.37, tampoco en los esfuerzos ( $\sigma_y$  y  $\sigma_u$ ) de las tres  $a/cs$ . En varillas embebidas en especímenes con  $a/cs$  altas como 0.45 y expuestas a ambientes corrosivos, 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI ayuda a preservar el  $\sigma_u$  y la  $e$ ; sin embargo en  $a/cs$  bajas el CNI no tiene efectos (Montes, 2003 y López,

2012). También, se ha reportado que 12 L/m<sup>3</sup> de CNI ayuda a disminuir la corrosión del acero de refuerzo, inclusive cantidades pequeñas de CNI, como 3.6 L/m<sup>3</sup> tienen efectos positivos (Ann et al, 2006). Esto se debe posiblemente a que, el CNI crea una segunda capa pasivante en la superficie del acero o repara la capa existente (Fadayomi, 1997 y Montes, 2003); además el CNI densifica la matriz cementante, lo cual disminuye la cantidad de poros capilares y su conectividad, por lo tanto se mejora la impermeabilidad del concreto (Montes et al., 2004). Estos efectos del CNI limitan el ingreso de los agentes agresivos, lo cual retrasa el fenómeno de la corrosión y por lo tanto se preservan mejor las propiedades mecánicas del acero.

La adición de 20% de CV no tuvo efectos en los resultados de los esfuerzos, sin embargo, la adición de 40% incrementó los  $\sigma_u$ . Debido a lo anterior se tuvieron diferencias significativas entre los  $\sigma_u$  de las varillas en especímenes adicionadas con 40% de CV y aquellas sin CV, también entre las varillas en especímenes con 40% de CV y aquellas en especímenes con 20%, en cambio, no existen diferencias significativas entre los  $\sigma_u$  de las varillas en especímenes sin CV y aquellas que contenían 20% de CV. Respecto a las deformaciones de las varillas embebidas en especímenes sin CV, se tuvo una ligera disminución al adicionar 20% de CV, pero al incrementar la cantidad a 40% las deformaciones tuvieron un incremento. Con base en lo anterior, existen diferencias significativas entre las deformaciones de las varillas embebidas en especímenes adicionados con 20% de CV y aquellas en especímenes con 40% de CV. No obstante, no existen diferencias significativas entre las varillas embebidas en especímenes sin CV y aquellas con 20 o 40% de CV. El efecto de la CV en las propiedades de esfuerzos y deformaciones fue similar en todas las a/cs estudiadas. Por otra parte, la adición de CV ayuda a prevenir la corrosión de las varillas, principalmente cuando se incrementa de 20 a 40%. El efecto benéfico de la CV se debe a que es un material puzolánico, por lo tanto una de las ventajas es la reducción de la porosidad y la conectividad de estos poros en la matriz cementante y en consecuencia se limita el ingreso de los cloruros causantes de la corrosión (Montes, 2003 y Montes *et al*, 2004).

Las interacciones entre las variables resultaron efectivas para preservar las propiedades a la tensión del acero de refuerzo, en los casos que se mencionan en seguida. Las a/cs de 0.29 y 0.37 adicionadas con CV preservan eficazmente las propiedades de deformaciones de las varillas cuando se incorpora CNI, este efecto tuvo los mejores resultados cuando se combinaron 40% de CV y 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI. En el caso de la a/c de 0.45 las deformaciones mejoran sustancialmente al combinar grandes cantidades de CV, por ejemplo 40% y CNI, especialmente 12.5 L/m<sup>3</sup>. Recientemente se ha reportado que 20% de CV más 15 L/m<sup>3</sup> de CNI son efectivos en una a/c de 0.4 para prevenir la corrosión del acero de refuerzo en concretos no agrietados (López et al., 2018). Este efecto se debe a que tanto la CV como el CNI hacen más densa la matriz cementante, lo cual mejora su impermeabilidad y limita el ingreso de los agentes agresivos (Montes et al., 2004).

El efecto benéfico de las interacciones es más evidente en las deformaciones que en los esfuerzos. En las a/cs de 0.29 y 0.37 todas las varillas embebidas en especímenes adicionados con CNI y CV tuvieron fallas a la fractura de tipo dúctil con alta absorción de energía, con deformaciones a la fractura en el rango de 8 y 12%. Las varillas en a/c de 0.45 también tuvieron fallas a la fractura de tipo dúctil, aquellas adicionadas con 40% de CV y CNI se deformaron entre 8% y 12%, sin embargo, las varillas embebidas en especímenes con 20% de CV y CNI se deformaron entre 5% y 8%, apenas en el límite para considerarse dúctil. Ya que de acuerdo con la literatura un material dúctil es aquel con deformaciones a la fractura superiores a 5%, de lo contrario se considera frágil (Callister, 2002). Además la fractura del acero de refuerzo cambia de dúctil a frágil de forma gradual con el aumento de la corrosión (Zhu et al., (2017).

Por último, las a/cs de 0.29 y 0.37 preservaron eficazmente tanto las propiedades de esfuerzo como las propiedades de deformación, por el contrario la a/c de 0.45 resultó deficiente para preservar principalmente las propiedades de deformación. Estos resultados en las propiedades mecánicas coinciden con los resultados de corrosión, en donde las varillas expuestas en las a/cs de 0.29 y 0.37 tuvieron menor

corrosión que las varillas expuestas en especímenes con a/c de 0.45. Resultados similares fueron reportados por López (2012), donde varillas embebidas en concreto con a/c de 0.45 expuestas durante siete años a un ambiente con alto contenido de cloruros, tuvieron reducción significativa en la carga a la fluencia, la carga última y la elongación en comparación con varillas embebidas en a/cs menores. También, en el monitoreo de la corrosión se ha reportado que el acero embebido en a/cs bajas tienen menor probabilidad de corrosión que en a/cs altas (Montes *et al.*, 2004). Este comportamiento se debe a que, en una baja a/c la matriz cementante es más densa, por lo tanto, disminuyen los poros capilares y por consiguiente disminuye la permeabilidad del concreto, lo cual limita el ingreso de los cloruros causantes de la corrosión (Montes *et al.*, 2004). En consecuencia una a/c alta tiende a aumentar la permeabilidad de la matriz cementante y por lo tanto aumenta la corrosión y la pérdida de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo.

### **Especímenes agrietados**

La condición de agrietamiento de los especímenes de concreto incrementó la corrosión del acero de refuerzo, sin embargo al aumentar el ancho de la grieta de 0.25 a 0.5 mm, no hay diferencias considerables en los resultados. Otras investigaciones han reportado que las grietas en el concreto promueven intensamente la corrosión del acero de refuerzo, alcanzando niveles de corrosión hasta diez veces más que las varillas embebidas en especímenes sin grietas (Montes, *et al.*, 2004). Por otra parte, las varillas embebidas en especímenes agrietados experimentaron mayor pérdida de resistencia y deformación que aquellas varillas embebidas en especímenes sin grietas, lo cual fue ocasionado por el efecto de la corrosión en dichas varillas. Tanto en los esfuerzos ( $\sigma_y$  y  $\sigma_u$ ) como en las deformaciones ( $\epsilon_y$ ,  $e$ ,  $\mu$  y  $T$ ) se tuvieron diferencias significativas entre las varillas embebidas en especímenes sin grietas y las varillas en especímenes con AG de 0.25 mm, y estas a su vez difieren significativamente de las varillas en especímenes con AG de 0.5 mm. Estudios recientes han reportado que la existencia de las grietas en el concreto aumentan la actividad corrosiva del acero

de refuerzo, además cuando más ancha es la grieta, mayor es la corrosión en el acero de refuerzo (López et al., 2018 y Ye et al, 2018). También, se ha reportado que en varillas embebidas en especímenes agrietados es común la corrosión por picaduras, las cuales disminuyen los esfuerzos y sobre todo la capacidad de deformación del acero (Du et al., 2007, & Ou et al., 2016); principalmente por la profundidad y la distribución de las picaduras (Apostolopoulos et al., 2013), sin importar el ancho de las grietas (López, 2012). Otras investigaciones han reportado que la corrosión del acero de refuerzo disminuye considerablemente el  $\sigma_y$  y el  $\sigma_u$ , no obstante, las deformaciones no son proporcionales al grado de corrosión ya que dependen del efecto de otras propiedades como la concentración de tensiones debido a las picaduras y la falta de homogeneidad en la composición química del acero de refuerzo (Fernández et al., 2015). El CNI y la CV no tuvieron efectos en los esfuerzos ni en las deformaciones de las varillas expuestas en especímenes agrietados.

Los esfuerzos ( $\sigma_y$  y  $\sigma_u$ ) de las varillas embebidas en especímenes con a/c de 0.29 fueron significativamente mayores que aquellas varillas en especímenes con a/cs de 0.37 y 0.45, mientras que los esfuerzos de las varillas en la a/c de 0.37 no tuvieron diferencias significativas a los esfuerzos de la a/c de 0.45. En lo que respecta a las  $\epsilon_y$ , las  $e$  y las  $\mu$  la a/c no tuvo efectos en los resultados; sin embargo, la T de las varillas en la a/c de 0.29 tienen diferencias significativas con las varillas en la a/c de 0.45, pero ninguna de las dos tiene diferencia significativa con las varillas embebidas en la a/c de 0.37. Lo anterior indica que mientras más grande es la a/c mayor es la corrosión del acero de refuerzo y por lo tanto la pérdida de sus propiedades. Esto se debe a que al incrementar la a/c, también incrementa la permeabilidad de la matriz cementante la cual permite el ingreso de los agentes agresivos causantes de la corrosión, por lo tanto el acero de refuerzo queda expuesto tanto a corrosión localizada causado por las grietas del concreto, como a corrosión general debido a la alta permeabilidad de la matriz cementante.

## Correlación entre $i_{\text{corr}}$ y $\mu$

Las correlaciones entre  $i_{\text{corr}}$  y  $\mu$  tuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre 0.2641 y 0.7708, esto indica que del 26.41 al 77.08% de la  $\mu$  depende de la  $i_{\text{corr}}$  de las varillas. Sin embargo, un  $R^2$  menor a 0.69754 no establece una relación confiable entre la pérdida de  $\mu$  y el grado de corrosión (Fernández et al., 2015). Esto se debe a que la  $\mu$  es afectada por otras propiedades como la concentración de esfuerzos debido a las picaduras de corrosión y la falta de homogeneidad en la estructura molecular del acero, además de la complejidad del fenómeno de la corrosión (Fernández et al., 2015 y Ou et al., 2016). A pesar de tener  $R^2$  mayores a 0.69754, las ecuaciones obtenidas a partir de la correlación no son confiables para fines de predicción.



## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones de la presente investigación, con base en los resultados y discusión de las pruebas a tensión de las varillas embebidas en especímenes expuestos durante nueve años a un ambiente marino natural. Debido a la variabilidad de los resultados, causada principalmente por el agrietamiento de los especímenes, las conclusiones se dividen en aquellas para especímenes sin grietas y especímenes agrietados

### Especímenes sin grietas

1. Las adiciones de 12.5 y 25 L/m<sup>3</sup> de CNI contribuye a preservar significativamente ( $p \gg 0.05$ ) las propiedades de deformación ( $\epsilon$ ,  $T$  y  $\mu$ ) del acero de refuerzo embebido en concretos con  $a/c_s$  de 0.29 y 0.45; de los cuales las varillas en especímenes adicionados con 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI tuvieron mejor desempeño que 25 L/m<sup>3</sup>.
2. La adición de 20% de CV no tuvo efectos en el  $\sigma_u$ ; no obstante, la adición de 40% de CV contribuye a preservar significativamente ( $p=0.133$ ) el  $\sigma_u$  de las varillas embebidas en las tres  $a/c_s$  estudiadas. Por el contrario, la CV no contribuye a preservar significativamente ( $p \ll 0.05$ ) las deformaciones ( $\epsilon$ ,  $T$  y  $\mu$ ) en las tres  $a/c_s$  estudiadas.
3. La interacción entre el CNI y la CV en  $a/c_s$  de 0.29 y 0.37 preservan las deformaciones de las varillas. La combinación con es aquella con 40% de CV más 12.5 L/m<sup>3</sup> de CNI. Las varillas embebidas en especímenes con  $a/c$  de 0.45 adicionados con CNI preservaron sus deformaciones únicamente al adicionar 40% de CV. El efecto benéfico de las interacciones es más evidente en las deformaciones que en los esfuerzos.

4. Las a/cs de 0.29 y 0.37 preservan significativamente ( $p >> 0.05$ ) tanto las propiedades de esfuerzo como las propiedades de deformación de las varillas en especímenes sin grietas; por el contrario, dichas propiedades disminuyeron significativamente ( $p << 0.05$ ) en las varillas embebidas en la a/c de 0.45.
5. La corrosión disminuye significativamente ( $p << 0.05$ ) los esfuerzos a la fluencia ( $\sigma_y$ ), los esfuerzos máximos ( $\sigma_u$ ) y las elongaciones ( $e$ ) de las varillas embebidas en especímenes de HPC expuestos durante nueve años a un ambiente marino natural, con respecto a las varillas control.

### **Especímenes agrietados**

6. Las grietas de 0.25 mm de ancho disminuyen significativamente ( $p << 0.05$ ) los esfuerzos ( $\sigma_y$  y  $\sigma_u$ ) y deformaciones ( $\epsilon_y$ ,  $e$ ,  $\mu$  y  $T$ ) de las varillas de refuerzo. Además, al incrementar el AG a 0.5 mm la disminución de las propiedades mencionadas es significativamente mayor ( $p << 0.05$ ). Con base en lo anterior se concluye que las grietas disminuyen los valores de esfuerzos y deformaciones de las varillas y mientras más ancha es la grieta mayor es la pérdida de dichas propiedades.
7. El CNI, la CV y la combinación de ambos no contribuyen a preservar los esfuerzos y deformaciones de las varillas embebidas en concretos agrietados, sin importar el ancho de la grieta.
8. La a/c de 0.29 preserva de mejor los  $\sigma_y$ , los  $\sigma_u$  y las Ts de las varillas, que las a/cs de 0.37 y 0.45; no obstante, la variable a/c no contribuye a preservar significativamente ( $p << 0.05$ ) las  $\epsilon_y$ , las  $e$  y las  $\mu$ .

### **Correlación entre $i_{\text{corr}}$ y $\mu$**

9. Las correlaciones obtenidas entre las densidades de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) y las ductilidades ( $\mu$ ) en esta investigación son bajas; por lo tanto, las ecuaciones de correlación son poco confiables para fines predictivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abyaneh, S.D., Wong, H.S. y Buenfeld, N.R. (2016). Simulating the effect of microcracks on the diffusivity and permeability of concrete using a three-dimensional model. *Computational Materials Science* 119 (2016) 130–143. Elsevier.
- ACI Committee 232.2R. (2003). *Use of Fly Ash in Concrete*, American Concrete.
- ACI 222R-96. (1996). *Corrosion of Metals in Concrete*. Manual of Concrete Practice 2001. Reported by ACI Committee 222. Association, Skokie, IL, 24 pages.
- Ann, K.Y., Jung, H. S., Kim, H. S., y Moon, H. Y. (2006). Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 530 – 535.
- Askeland, R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (pp. 130-147). México: Thomson Editores S.A. de C.V.
- ASTM A36/A36M Standard Specification for Carbon Structural Steel.
- ASTM G59 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurement.
- ASTM C150 / C150M - 17 Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM C192/C192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- ASTM C260 Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete.
- ASTM A370-17 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- ASTM C494 Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto.
- ASTM C618–15 Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto.
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill.

- Apostolopoulos, C., Demis, S., Papadakis, V. (2013). Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth análisis. *Construction and Building Materials* 38 (2013)139-146.
- Ávila, J., Genescá, J. (1996). Más allá de la herrumbre (pp. 17-29). México: FONDO DE CULTURA ECONÓMICA.
- Beer, F., Johnston, E., Dewolf, J., Mazurek, D. (2007). *Mecánica de Materiales* (pp. 47-56). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Bentur, A., Diamond, S. y Berke, N. (2005). *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*. London: E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall.
- Bozzo, L., Barbat. A. (2004). Diseño sismorresistente de edificios Técnicas convencionales y avanzadas (pp. 104-107). España: Editorial Reverté, S.A.
- Broomfield J. (2003). *Corrosion of Steel in Concrete*. London: Routledge.
- Budynas, R., Nisbett, J., (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México. MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Calleja. J., Andrade M.C. (1973). Prevención de la corrosión de armaduras en el hormigón mediante aditivos inhibidores. *Materiales de Construcción*, vol. 23, nº 150-151. Abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre de 1973.
- Callister, W.D. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: Reverté, S.A.
- Castillo, C. (2015). MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MATRICES CEMENTANTES MEDIANTE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Du, Y., Clark, L.A., Chan, A.H.C. (2007). Impact of Reinforcement Corrosion on Ductile Behavior of Reinforced Concrete Beams. *ACI Materials Journal* Technical paper (2007) Title No.104-S28.
- Fadayomi, J. (1997). Corrosion-Inhibitors, *Concrete*, Vol.31, No.8, pp. 21-22.
- Faritov, A. T., Rozhdestvenskii, Y. G., Yamshchikova, S. A., Minnikhanova, E. R., & Tyusenkov, A. S. (2016). Improvement of the linear polarization resistance method for testing steel corrosion inhibitors. *Russian*

Metallurgy, 2016(11),1035-1041.

doi:<http://dx.doi.org/10.1134/S0036029516110070>.

- Feliú, S., González, J. A., and Andrade, C. (1996). Electrochemical methods for on-site determinations of corrosion rates of rebars. Techniques to assess the corrosion activity of steel reinforced concrete structures, ASTM STP 1276, N. Berke, E. Escalante, C. Nmai, and D. Whiting, eds., ASTM, West Conshohocken, 107-118.
- Fernández, I., Bairán, J., Marí, A. (2015). Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and  $\sigma$ - $\epsilon$  behavior. Construction and Building Materials (2015). Title No. 101 pag. 772-783.
- Fontana, M., (1986). Corrosion Engineering (Third edition, pp 167). USA: McGraw-Hill.
- Frómata Salas, Zenaida Paulette, Delás Magdaleón, Francisco. (2009). INFLUENCIA DEL CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO PARA REFUERZO DE HORMIGÓN. Tecnología Química [en línea] 2009, XXIX [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2018] Disponible en:<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761008> ISSN 0041-8420.
- García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. Int J Life Cycle Assess.19:3–12.
- Hansson, C., Manmoliti, L., Hope, B.B. (1998). Corrosion inhibitors in Concrete-Part 1: The Principles, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 12, pp. 1775-1781, Elsevier Science Ltd.
- Kondratova, I.L., Montes, P., Bremner, T. W. (2003). Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors. Cement & Concrete Composites 25 (2003) 483–490.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto, EUA. PCA Portland Cement Association.
- Li, Z., Peng, J. y Ma, B. (1999). Investigation of chloride diffusion for high performance concrete containing fly ash, microsilica and chemical admixtures. ACI Mater J 1999:391–6.

- Li, Z., Ma, B., Peng, J. y Qi, M. (2000). The microstructure and sulfate resistance mechanism of high-performance concrete containing CNI. *Cement Concr Compos* 2000;22:369–77.
- López, H., Montes, P., Bremner, T., Thomas, M., Jiménez, V., (2012). Compressive strength of HPC containing CNI and fly ash after long-term exposure to a marine environment. *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 110-118.
- López, H.Z., (2012). EVALUATION OF CORROSION IN CRACKED HIGH PERFORMANCE CONCRETE EXPOSED TO A NATURAL CHLORIDE ENVIRONMENT (pp. 227-239). Canada: UNIVERSITY OF NEW BRUNSWICK.
- López, H., Montes, P., Jiménez, V., Gómez, H., Bremner, T., Thomas, M. (2018). Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash. *Cement & Concrete Composites* 88 (2018) 200-210.
- Meheta. P. y Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Publishing.
- Montes, P., Bremner, T., Lister, D. (2004). Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment. *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 243–253.
- Montes, P., Bremner, T., Mrawira, D. (2005). Effects of Calcium Nitrate-Based Corrosión Inhibitor and Fly Ash of Compressive Strength of High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal Technical paper* (2005) Title No.102-M01.
- Montes, P. (2003). *Performance of Corrosion Inhibitors and Epoxy Coatings in Cracked reinforced Concrete Subject to a Marine Environment*, Ph.D. Dissertation, University of New Brunswick, Canada, 234 pages.
- NACE Corrosion Costs Study, (1998). NACE International the Corrosion Society.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete fifth edition*. Prentice Hall.

- Nmai, C. K., & McDonald, D. (1999, March). Long-term effectiveness of corrosion inhibiting admixtures and implications on the design of durable reinforced concrete structures: a laboratory investigation. In International Symposium on The Role of Admixtures in High Performance Concrete (pp. 21-26).
- Ou, Y., Susanto, Y., Roh, H. (2016). Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars. *Construction and Building Materials* 103 (2016) 93-104.
- Pyc WA, Zemajtis J, Weyers RE, Sprinkel MM. (1999). Evaluating corrosion-inhibiting admixtures. *Concr Int* 1999:39–44.
- Razvan, R. (2009). Some remarks on the history of fracture. s.l.: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS, SIMULATION, MODELLING.
- Rixom, R. Mailvaganam, N. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. Third Edition, E & FN SPON, pp. 220.
- Rodríguez, C.A., (2013). PATRONES Y MECANISMOS DE FRACTURA EN LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS (Tesis de grado de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.
- Russell, H. G. (1999). ACI defines high-performance concrete. *Concrete international*, 21(2), 56-57.
- Smith, W., Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.
- Söylev, T., and Richardson, M. (2008). Corrosion inhibitors for steel in concrete: State of the art report. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 609–622. EUA. Elsevier.
- Taylor, H., (2001). *Cement chemistry* 2nd edition. (pp. 1-2, 284-286). EUA: Thomas Telford Publishing.



- Thomas, M. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete, IS548. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- TR 22. (2010). Concrete Society, Technical Report 22: Non-structural Cracks in Concrete, fourth ed., Camberley.
- TR 44. (2015). Concrete Society, Technical Report 44: The Relevance of Cracking in Concrete Corrosion of Reinforcement, Camberley.
- Wessel, J.K. (2004). Handbook of advanced materials: enabling new designs. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. (Capítulo 11. Corrosion of Engineering Materials. Akid, R.).
- Ye, H., Fu, C., Jin, N. y Jin, X., (2018). Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques. *Construction and Building Materials* 162 (2018) 286–297.
- Young, J.F., Mindess, S., Gray, R.J., Bentur, A. (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials* (pp. 249-252, 300-303). USA: Prentice-Hall.
- Zhu, W., François, R. (2014). Experimental investigation of the relationships between residual cross-section shapes and the ductility of corroded bars. *Construction and Building Materials* 69 (2014) 335-345. Elsevier.
- Zhu, W., François, R., Poon, C. y Dai, J. (2017). Influences of corrosion degree and corrosion morphology on the ductility of steel reinforcement. *Construction and Building Materials*, 148(2017) 297-306. Elsevier.

# ANEXO

## Análisis estadístico

El análisis estadístico de las propiedades evaluadas  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $\epsilon_y$ ,  $e$ ,  $T$  y  $\mu$  se llevó a cabo en el programa SPSS®, en primer lugar, para las varillas en especímenes sin grietas se hizo una prueba T de muestra única entre la media de las varillas control los resultados de  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ , y  $e$ , en seguida se hizo un ANOVA a todas las propiedades evaluadas. En segundo lugar hizo un ANOVA a todas las propiedades evaluadas de las varillas embebidas en especímenes agrietados. Por último, en el programa MATLAB® se llevó a cabo la correlación entre  $i_{corr}$  y  $\mu$ .

### Contenido

<b>1. Esfuerzo a la fluencia (<math>\sigma_y</math>)</b> .....	<b>117</b>
1.1 Especímenes sin grietas .....	117
1.1.1 Prueba T de muestra única.....	117
1.1.2 ANOVA .....	117
1.2 ANOVA de especímenes agrietados.....	118
<b>2. Esfuerzo máximo (<math>\sigma_u</math>)</b> .....	<b>120</b>
2.1 Especímenes sin grietas .....	120
2.1.1 Prueba T de muestra única.....	120
2.1.2 ANOVA .....	120
2.2 ANOVA de especímenes agrietados.....	123
<b>3. Deformación a la fluencia (<math>\epsilon_y</math>)</b> .....	<b>126</b>
3.1 ANOVA de especímenes sin grietas .....	126
3.2 ANOVA de especímenes agrietados.....	127
<b>4. Elongación (<math>e</math>)</b> .....	<b>129</b>
4.1 Especímenes sin grietas .....	129
4.1.1 Prueba T de muestra única.....	129
4.1.2 ANOVA .....	129
4.2. ANOVA de especímenes agrietados.....	133
<b>5. Tenacidad (T)</b> .....	<b>134</b>

5.1 ANOVA de especímenes sin grietas .....	134
5.2 ANOVA de especímenes agrietados.....	137
<b>6. Ductilidad (<math>\mu</math>).....</b>	<b>139</b>
6.1 ANOVA de especímenes sin grietas .....	139
6.2 ANOVA de especímenes agrietados.....	141
<b>7. Correlación entre <math>i_{corr}</math> y <math>\mu</math> .....</b>	<b>143</b>

# 1. Esfuerzo a la fluencia ( $\sigma_y$ )

## 1.1 Especímenes sin grietas

### 1.1.1 Prueba T de muestra única

Prueba T de muestra única						
	Valor de prueba = 463.76					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
$\sigma_y$ sin grietas	-12.994	51	.000	-46.83944	-54.0763	-39.6026

### 1.1.2 ANOVA

#### Variable a/c

ANOVA					
$\sigma_y$ sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	15201.099	2	7600.549	19.337	.000
Dentro de grupos	19259.487	49	393.051		
Total	34460.586	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
$\sigma_y$ sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.831	2	49	.442

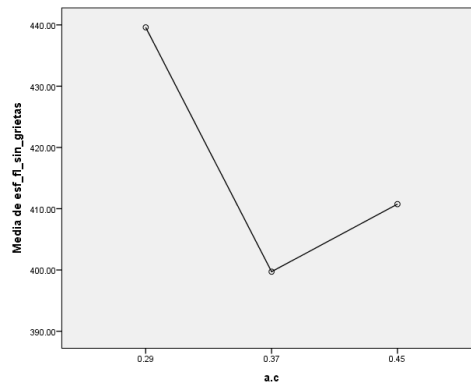


Gráfico de medias de  $\sigma_y$  sin grietas vs. a/c

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: $\sigma_y$ sin grietas							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	39.88951*	6.60850	.000	23.9173	55.8617
		0.45	28.86066*	6.81189	.000	12.3969	45.3245
	0.37	0.29	-39.88951*	6.60850	.000	-55.8617	-23.9173
		0.45	-11.02885	6.81189	.247	-27.4927	5.4350
	0.45	0.29	-28.86066*	6.81189	.000	-45.3245	-12.3969
		0.37	11.02885	6.81189	.247	-5.4350	27.4927
Games-Howell	0.29	0.37	39.88951*	6.15272	.000	24.7908	54.9883
		0.45	28.86066*	6.89323	.001	11.7840	45.9373
	0.37	0.29	-39.88951*	6.15272	.000	-54.9883	-24.7908
		0.45	-11.02885	7.36902	.307	-29.1879	7.1302
	0.45	0.29	-28.86066*	6.89323	.001	-45.9373	-11.7840
		0.37	11.02885	7.36902	.307	-7.1302	29.1879

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 1.2 ANOVA de especímenes agrietados

Variable AG					
ANOVA					
esf.fluencia ( $\sigma_y$ )					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	54267.056	2	27133.528	52.705	.000
Dentro de grupos	79797.337	155	514.822		
Total	134064.394	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
esf.fluencia ( $\sigma_y$ )			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
4.282	2	155	.015

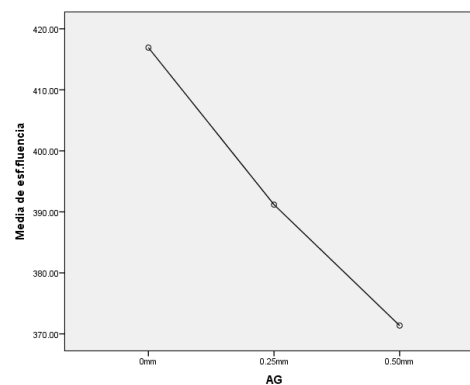


Gráfico de medias  $\sigma_y$  vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: esf.fluencia ( $\sigma_y$ )							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	25.73652*	4.40842	.000	15.3042	36.1688
		0.50mm	45.55462*	4.44981	.000	35.0244	56.0849
	0.25mm	0mm	-25.73652*	4.40842	.000	-36.1688	-15.3042
		0.50mm	19.81810*	4.40842	.000	9.3858	30.2504
	0.50mm	0mm	-45.55462*	4.44981	.000	-56.0849	-35.0244
		0.25mm	-19.81810*	4.40842	.000	-30.2504	-9.3858
Games-Howell	0mm	0.25mm	25.73652*	4.32338	.000	15.4316	36.0414
		0.50mm	45.55462*	4.89287	.000	33.9161	57.1931
	0.25mm	0mm	-25.73652*	4.32338	.000	-36.0414	-15.4316
		0.50mm	19.81810*	4.07980	.000	10.1017	29.5345
	0.50mm	0mm	-45.55462*	4.89287	.000	-57.1931	-33.9161
		0.25mm	-19.81810*	4.07980	.000	-29.5345	-10.1017

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable a/c

ANOVA					
$\sigma_y$ agrietados					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	7040.501	2	3520.250	7.445	.001
Dentro de grupos	48703.591	103	472.850		
Total	55744.092	105			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
$\sigma_y$ agrietados			
Estadístico de	gl1	gl2	Sig.
Levene	2	103	.215

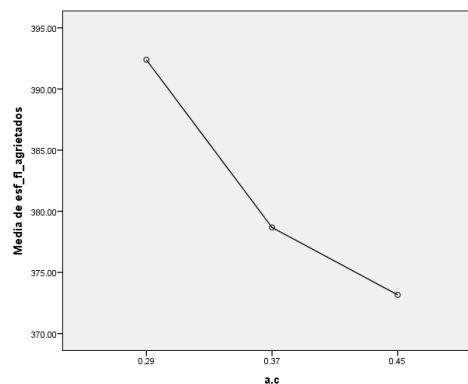


Gráfico de medias  $\sigma_y$  agrietados vs. a/c

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: $\sigma_y$ agrietados							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	13.71152*	5.20020	.026	1.3451	26.0779
		0.45	19.22443*	5.12537	.001	7.0359	31.4129
	0.37	0.29	-13.71152*	5.20020	.026	-26.0779	-1.3451
		0.45	5.51291	5.20020	.541	-6.8535	17.8793
	0.45	0.29	-19.22443*	5.12537	.001	-31.4129	-7.0359
		0.37	-5.51291	5.20020	.541	-17.8793	6.8535
Games-Howell	0.29	0.37	13.71152*	5.63223	.046	.1940	27.2291
		0.45	19.22443*	4.59428	.000	8.2186	30.2303
	0.37	0.29	-13.71152*	5.63223	.046	-27.2291	-.1940
		0.45	5.51291	5.36600	.563	-7.3900	18.4159
	0.45	0.29	-19.22443*	4.59428	.000	-30.2303	-8.2186
		0.37	-5.51291	5.36600	.563	-18.4159	7.3900

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 2. Esfuerzo máximo ( $\sigma_u$ )

### 2.1 Especímenes sin grietas

#### 2.1.1 Prueba T de muestra única

Prueba T de muestra única						
	Valor de prueba = 743.05					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
$\sigma_u$ sin grietas	-5.596	51	.000	-14.85769	-20.1881	-9.5273

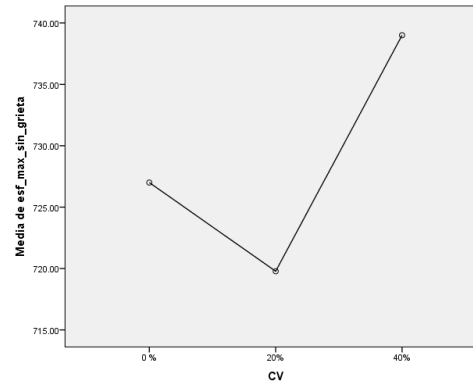
#### 2.1.2 ANOVA

##### Variable CV

ANOVA					
$\sigma_u$ sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3168.966	2	1584.483	5.000	.011
Dentro de grupos	15527.111	49	316.880		
Total	18696.077	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CV)			
$\sigma_u$ sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
8.112	2	49	.001



**Gráfico de medias  $\sigma_u$  sin grietas vs. CV**

Comparaciones múltiples (CV)							
Variable dependiente: $\sigma_u$ sin grietas							
	(I) CV	(J) CV	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 %	20%	7.22222	5.93371	.449	-7.1191	21.5635
		40%	-12.00000	6.11632	.133	-26.7827	2.7827
	20%	0 %	-7.22222	5.93371	.449	-21.5635	7.1191
		40%	-19.22222*	6.11632	.008	-34.0049	-4.4395
	40%	0 %	12.00000	6.11632	.133	-2.7827	26.7827
		20%	19.22222*	6.11632	.008	4.4395	34.0049
Games-Howell	0 %	20%	7.22222	6.78693	.543	-9.4646	23.9091
		40%	-12.00000*	4.76706	.046	-23.8113	-.1887
	20%	0 %	-7.22222	6.78693	.543	-23.9091	9.4646
		40%	-19.22222*	5.93894	.010	-34.0730	-4.3715
	40%	0 %	12.00000*	4.76706	.046	.1887	23.8113
		20%	19.22222*	5.93894	.010	4.3715	34.0730

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

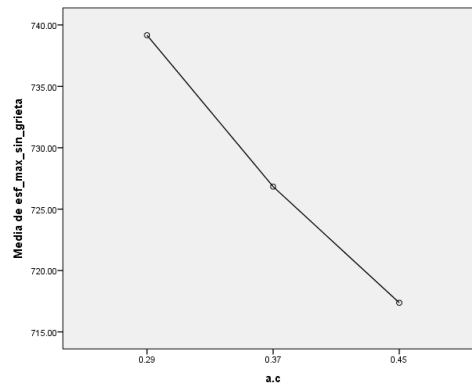


**Variable a/c**

<b>ANOVA</b>					
$\sigma_u$ sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	4073.327	2	2036.663	6.825	.002
Dentro de grupos	14622.750	49	298.423		
Total	18696.077	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideraran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

<b>Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)</b>			
$\sigma_u$ sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
12.930	2	49	.000



**Gráfico de medias  $\sigma_u$  sin grietas vs. a/c**

<b>Comparaciones múltiples (a/c)</b>							
Variable dependiente: $\sigma_u$ sin grietas							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	12.33333	5.75831	.092	-1.5841	26.2507
		0.45	21.79167*	5.93553	.002	7.4459	36.1374
	0.37	0.29	-12.33333	5.75831	.092	-26.2507	1.5841
		0.45	9.45833	5.93553	.258	-4.8874	23.8041
	0.45	0.29	-21.79167*	5.93553	.002	-36.1374	-7.4459
		0.37	-9.45833	5.93553	.258	-23.8041	4.8874
Games-Howell	0.29	0.37	12.33333*	4.76815	.045	.2593	24.4074
		0.45	21.79167*	5.80239	.004	6.8750	36.7083
	0.37	0.29	-12.33333*	4.76815	.045	-24.4074	-.2593
		0.45	9.45833	7.27659	.406	-8.4856	27.4023
	0.45	0.29	-21.79167*	5.80239	.004	-36.7083	-6.8750
		0.37	-9.45833	7.27659	.406	-27.4023	8.4856

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 2.2 ANOVA de especímenes agrietados

### Variable AG

ANOVA esf.máximo ( $\sigma_u$ )					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	262136.087	2	131068.043	225.804	.000
Dentro de grupos	89969.895	155	580.451		
Total	352105.981	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
esf.máximo ( $\sigma_u$ )			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3.714	2	155	.027

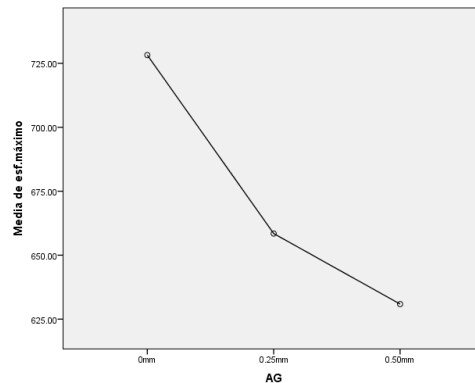


Gráfico de medias  $\sigma_u$  vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: esf.máximo ( $\sigma_u$ )							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	69.76065*	4.68098	.000	58.6834	80.8379
		0.50mm	97.33385*	4.72494	.000	86.1525	108.5152
	0.25mm	0mm	-69.76065*	4.68098	.000	-80.8379	-58.6834
		0.50mm	27.57320*	4.68098	.000	16.4959	38.6505
	0.50mm	0mm	-97.33385*	4.72494	.000	-108.5152	-86.1525
		0.25mm	-27.57320*	4.68098	.000	-38.6505	-16.4959
Games-Howell	0mm	0.25mm	69.76065*	4.09064	.000	60.0316	79.4897
		0.50mm	97.33385*	4.84751	.000	85.7774	108.8903
	0.25mm	0mm	-69.76065*	4.09064	.000	-79.4897	-60.0316
		0.50mm	27.57320*	5.10772	.000	15.4147	39.7317
	0.50mm	0mm	-97.33385*	4.84751	.000	-108.8903	-85.7774
		0.25mm	-27.57320*	5.10772	.000	-39.7317	-15.4147

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable CV

ANOVA					
$\sigma_u$ agrietados					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	7625.575	2	3812.788	4.691	.011
Dentro de grupos	83714.085	103	812.758		
Total	91339.660	105			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CV)			
$\sigma_u$ agrietados			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.901	2	103	.409

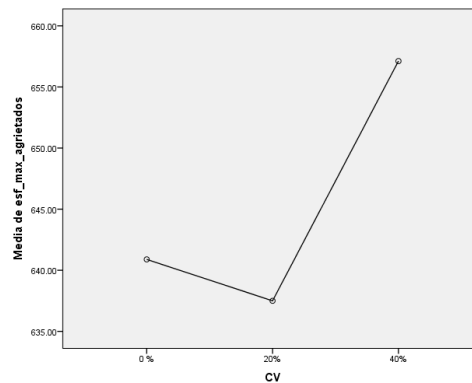


Gráfico de medias  $\sigma_u$  agrietados vs. CV

Comparaciones múltiples (CV)							
Variable dependiente: $\sigma_u$ agrietados							
	(I) CV	(J) CV	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 %	20%	3.38889	6.71962	.869	-12.5908	19.3686
		40%	-16.22876*	6.81772	.050	-32.4418	-.0158
	20%	0 %	-3.38889	6.71962	.869	-19.3686	12.5908
		40%	-19.61765*	6.81772	.013	-35.8306	-3.4047
	40%	0 %	16.22876*	6.81772	.050	.0158	32.4418
		20%	19.61765*	6.81772	.013	3.4047	35.8306
Games-Howell	0 %	20%	3.38889	7.04050	.880	-13.4794	20.2571
		40%	-16.22876*	6.30593	.032	-31.3384	-1.1191
	20%	0 %	-3.38889	7.04050	.880	-20.2571	13.4794
		40%	-19.61765*	6.90624	.016	-36.1770	-3.0583
	40%	0 %	16.22876*	6.30593	.032	1.1191	31.3384
		20%	19.61765*	6.90624	.016	3.0583	36.1770

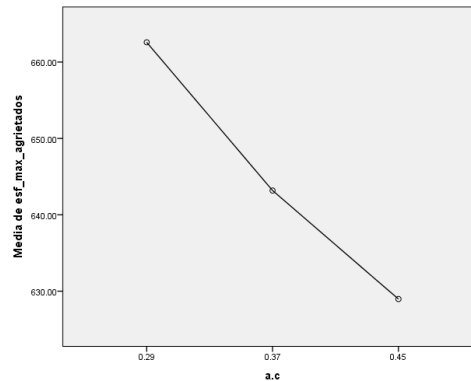
\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

**Variable a/c**

ANOVA					
$\sigma_u$ agrietados					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	20490.997	2	10245.498	14.895	.000
Dentro de grupos	70848.663	103	687.851		
Total	91339.660	105			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
$\sigma_u$ agrietados			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.095	2	103	.910



**Gráfico de medias  $\sigma_u$  agrietados vs. a/c**

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: $\sigma_u$ agrietados							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	19.40686*	6.27199	.007	4.4916	34.3221
		0.45	33.61111*	6.18174	.000	18.9105	48.3117
	0.37	0.29	-19.40686*	6.27199	.007	-34.3221	-4.4916
		0.45	14.20425	6.27199	.065	-.7110	29.1195
	0.45	0.29	-33.61111*	6.18174	.000	-48.3117	-18.9105
		0.37	-14.20425	6.27199	.065	-29.1195	.7110
Games-Howell	0.29	0.37	19.40686*	6.08290	.006	4.8317	33.9820
		0.45	33.61111*	6.34221	.000	18.4234	48.7989
	0.37	0.29	-19.40686*	6.08290	.006	-33.9820	-4.8317
		0.45	14.20425	6.25860	.067	-.7928	29.2013
	0.45	0.29	-33.61111*	6.34221	.000	-48.7989	-18.4234
		0.37	-14.20425	6.25860	.067	-29.2013	.7928

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### 3. Deformación a la fluencia ( $\epsilon_y$ )

#### 3.1 ANOVA de especímenes sin grietas

##### Variable a/c

ANOVA					
E <sub>y</sub> sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.000	2	.000	14.607	.000
Dentro de grupos	.000	49	.000		
Total	.000	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
E <sub>y</sub> sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.201	2	49	.819

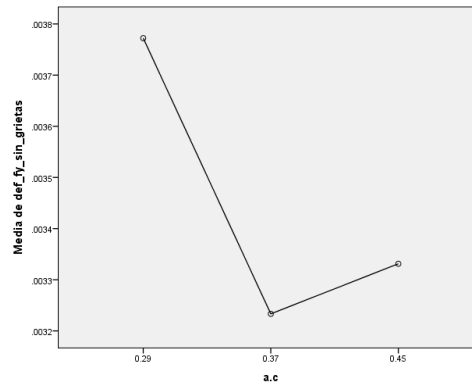


Gráfico de medias  $\epsilon_y$  sin grietas vs. a/c

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: $\epsilon_y$ sin grietas							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	.00054*	.00011	.000	.0003	.0008
		0.45	.00044*	.00011	.001	.0002	.0007
	0.37	0.29	-.00054*	.00011	.000	-.0008	-.0003
		0.45	-.00010	.00011	.644	-.0004	.0002
	0.45	0.29	-.00044*	.00011	.001	-.0007	-.0002
		0.37	.00010	.00011	.644	-.0002	.0004
Games-Howell	0.29	0.37	.00054*	.00011	.000	.0003	.0008
		0.45	.00044*	.00011	.001	.0002	.0007
	0.37	0.29	-.00054*	.00011	.000	-.0008	-.0003
		0.45	-.00010	.00010	.597	-.0003	.0001
	0.45	0.29	-.00044*	.00011	.001	-.0007	-.0002
		0.37	.00010	.00010	.597	-.0001	.0003

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### 3.2 ANOVA de especímenes agrietados

#### Variable AG

ANOVA					
def_fluencia ( $\epsilon_y$ )					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.000	2	.000	43.432	.000
Dentro de grupos	.000	155	.000		
Total	.000	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
def_fluencia ( $\epsilon_y$ )			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
5.873	2	155	.003

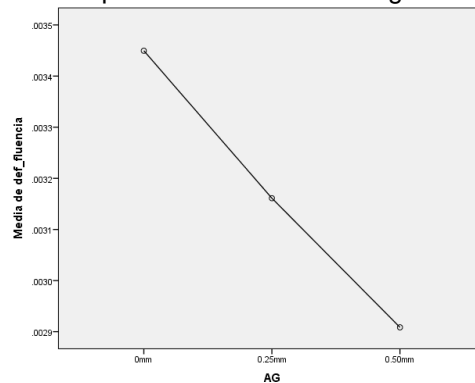


Gráfico de medias  $\epsilon_y$  vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: def_fluencia ( $\epsilon_y$ )							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	.00029*	.00006	.000	.0002	.0004
		0.50mm	.00054*	.00006	.000	.0004	.0007
	0.25mm	0mm	-.00029*	.00006	.000	-.0004	-.0002
		0.50mm	.00025*	.00006	.000	.0001	.0004
	0.50mm	0mm	-.00054*	.00006	.000	-.0007	-.0004
		0.25mm	-.00025*	.00006	.000	-.0004	-.0001
Games-Howell	0mm	0.25mm	.00029*	.00006	.000	.0001	.0004
		0.50mm	.00054*	.00006	.000	.0004	.0007
	0.25mm	0mm	-.00029*	.00006	.000	-.0004	-.0001
		0.50mm	.00025*	.00005	.000	.0001	.0004
	0.50mm	0mm	-.00054*	.00006	.000	-.0007	-.0004
		0.25mm	-.00025*	.00005	.000	-.0004	-.0001

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable a/c

ANOVA					
$\epsilon_y$ agrietados					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.000	2	.000	6.509	.002
Dentro de grupos	.000	103	.000		
Total	.000	105			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
$\epsilon_y$ agrietados			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.790	2	103	.066

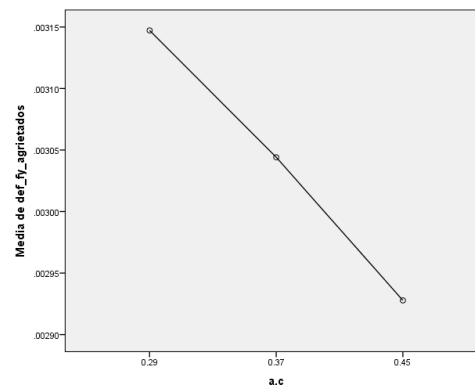


Gráfico de medias  $\epsilon_y$  agrietados vs. a/c

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: $\epsilon_y$ agrietados							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	.00010	.00006	.222	.0000	.0002
		0.45	.00022*	.00006	.001	.0001	.0004
	0.37	0.29	-.00010	.00006	.222	-.0002	.0000
		0.45	.00012	.00006	.148	.0000	.0003
	0.45	0.29	-.00022*	.00006	.001	-.0004	-.0001
		0.37	-.00012	.00006	.148	-.0003	.0000
Games-Howell	0.29	0.37	.00010	.00007	.281	-.0001	.0003
		0.45	.00022*	.00005	.000	.0001	.0003
	0.37	0.29	-.00010	.00007	.281	-.0003	.0001
		0.45	.00012	.00007	.188	.0000	.0003
	0.45	0.29	-.00022*	.00005	.000	-.0003	-.0001
		0.37	-.00012	.00007	.188	-.0003	.0000

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

#### 4. Elongación (e)

##### 4.1 Especímenes sin grietas

##### 4.1.1 Prueba T de muestra única

Prueba de muestra única						
	Valor de prueba = 10.42					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
e_sin_grietas	-6.551	51	.000	-1.99115	-2.6013	-1.3810

##### 4.1.2 ANOVA

##### Variable CNI

ANOVA					
e_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	63.211	2	31.605	8.520	.001
Dentro de grupos	181.769	49	3.710		
Total	244.980	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.



Prueba de homogeneidad de varianzas (CNI)			
e_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.307	2	49	.737

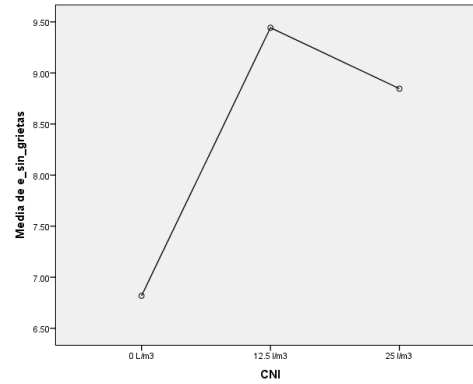


Gráfico de medias e sin grietas vs. CNI

Comparaciones múltiples (CNI)							
Variable dependiente: e_sin_grietas							
	(I) CNI	(J) CNI	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 l/m3	12.5 l/m3	-2.62583*	.66177	.001	-4.2253	-1.0264
		25 l/m3	-2.02917*	.66177	.010	-3.6286	-.4297
	12.5 l/m3	0 l/m3	2.62583*	.66177	.001	1.0264	4.2253
		25 l/m3	.59667	.64201	.625	-.9550	2.1484
	25 l/m3	0 l/m3	2.02917*	.66177	.010	.4297	3.6286
		12.5 l/m3	-.59667	.64201	.625	-2.1484	.9550
Games-Howell	0 l/m3	12.5 l/m3	-2.62583*	.65086	.001	-4.2264	-1.0252
		25 l/m3	-2.02917*	.66623	.013	-3.6668	-.3915
	12.5 l/m3	0 l/m3	2.62583*	.65086	.001	1.0252	4.2264
		25 l/m3	.59667	.64621	.630	-.9870	2.1803
	25 l/m3	0 l/m3	2.02917*	.66623	.013	.3915	3.6668
		12.5 l/m3	-.59667	.64621	.630	-2.1803	.9870

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable CV

ANOVA					
e_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	34.858	2	17.429	4.064	.023
Dentro de grupos	210.122	49	4.288		
Total	244.980	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CV)			
e_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.005	2	49	.995

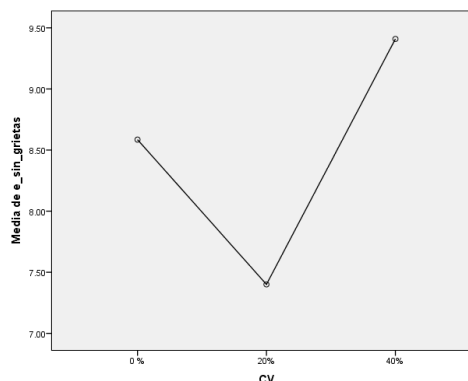


Gráfico de medias e sin grietas vs. CV

Comparaciones múltiples (CV)							
Variable dependiente: e_sin_grietas							
	(I) CV	(J) CV	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 %	20%	1.18500	.69027	.209	-4833	2.8533
		40%	-.82382	.71151	.484	-2.5435	.8958
	20%	0 %	-1.18500	.69027	.209	-2.8533	.4833
		40%	-2.00882*	.71151	.018	-3.7285	-.2892
	40%	0 %	.82382	.71151	.484	-.8958	2.5435
		20%	2.00882*	.71151	.018	.2892	3.7285
Games-Howell	0 %	20%	1.18500	.68011	.204	-4817	2.8517
		40%	-.82382	.72497	.499	-2.6073	.9596
	20%	0 %	-1.18500	.68011	.204	-2.8517	.4817
		40%	-2.00882*	.71308	.022	-3.7641	-.2536
	40%	0 %	.82382	.72497	.499	-.9596	2.6073
		20%	2.00882*	.71308	.022	.2536	3.7641

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable a/c

ANOVA					
e_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	28.759	2	14.379	3.259	.047
Dentro de grupos	216.221	49	4.413		
Total	244.980	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
e_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.290	2	49	.112

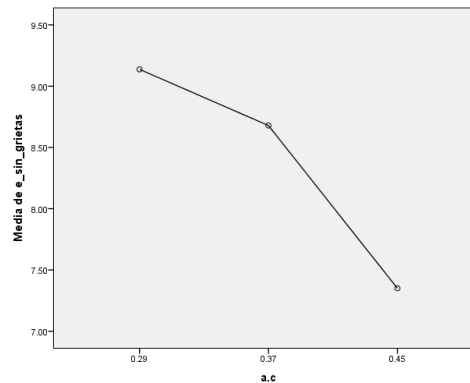


Gráfico de medias e sin grietas vs. a/c

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: e_sin_grietas							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	.45833	.70021	.791	-1.2340	2.1507
		0.45	1.78660*	.72176	.044	.0422	3.5310
	0.37	0.29	-.45833	.70021	.791	-2.1507	1.2340
		0.45	1.32826	.72176	.167	-.4162	3.0727
	0.45	0.29	-1.78660*	.72176	.044	-3.5310	-.0422
		0.37	-1.32826	.72176	.167	-3.0727	.4162
Games-Howell	0.29	0.37	.45833	.62760	.747	-1.0838	2.0005
		0.45	1.78660	.73947	.058	-.0546	3.6278
	0.37	0.29	-.45833	.62760	.747	-2.0005	1.0838
		0.45	1.32826	.80281	.240	-.6531	3.3097
	0.45	0.29	-1.78660	.73947	.058	-3.6278	.0546
		0.37	-1.32826	.80281	.240	-3.3097	.6531

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 4.2. ANOVA de especímenes agrietados

### Variable AG

ANOVA elongación (e)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	858.051	2	429.025	234.989	.000
Dentro de grupos	282.987	155	1.826		
Total	1141.038	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
elongación (e)			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
72.888	2	155	.000

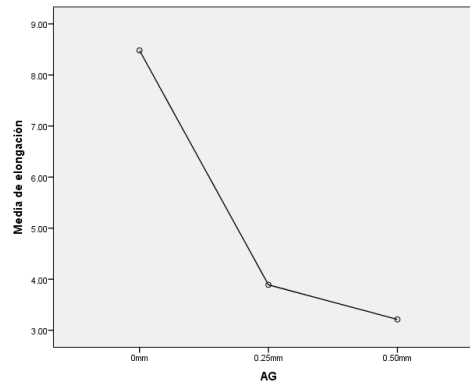


Gráfico de medias e vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: elongación (e)							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	4.59188*	.26253	.000	3.9706	5.2131
		0.50mm	5.26923*	.26499	.000	4.6421	5.8963
	0.25mm	0mm	-4.59188*	.26253	.000	-5.2131	-3.9706
		0.50mm	.67735*	.26253	.029	.0561	1.2986
	0.50mm	0mm	-5.26923*	.26499	.000	-5.8963	-4.6421
		0.25mm	-.67735*	.26253	.029	-1.2986	-.0561
Games-Howell	0mm	0.25mm	4.59188*	.31347	.000	3.8386	5.3452
		0.50mm	5.26923*	.31290	.000	4.5172	6.0213
	0.25mm	0mm	-4.59188*	.31347	.000	-5.3452	-3.8386
		0.50mm	.67735*	.12629	.000	.3771	.9776
	0.50mm	0mm	-5.26923*	.31290	.000	-6.0213	-4.5172
		0.25mm	-.67735*	.12629	.000	-.9776	-.3771

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 5. Tenacidad (T)

### 5.1 ANOVA de especímenes sin grietas

Variable CNI					
ANOVA					
T_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3557.233	2	1778.617	8.607	.001
Dentro de grupos	10126.270	49	206.659		
Total	13683.503	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CNI)			
T_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.212	2	49	.809

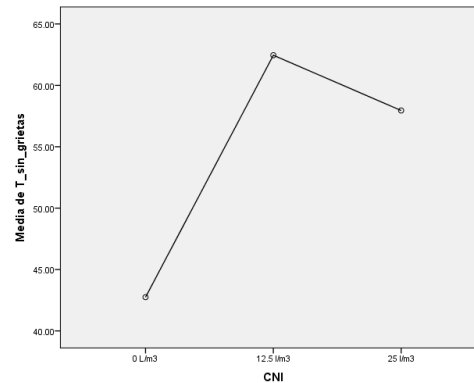


Gráfico de medias T sin grietas vs. CNI

Comparaciones múltiples (CNI)							
Variable dependiente: T_sin_grietas							
	(I) CNI	(J) CNI	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 l/m3	12.5 l/m3	-19.70590*	4.93935	.001	-31.6439	-7.7679
		25 l/m3	-15.20368*	4.93935	.009	-27.1417	-3.2657
	12.5 l/m3	0 l/m3	19.70590*	4.93935	.001	7.7679	31.6439
		25 l/m3	4.50222	4.79187	.618	-7.0794	16.0838
	25 l/m3	0 l/m3	15.20368*	4.93935	.009	3.2657	27.1417
		12.5 l/m3	-4.50222	4.79187	.618	-16.0838	7.0794
Games-Howell	0 l/m3	12.5 l/m3	-19.70590*	4.85183	.001	-31.6346	-7.7772
		25 l/m3	-15.20368*	4.94212	.012	-27.3507	-3.0566
	12.5 l/m3	0 l/m3	19.70590*	4.85183	.001	7.7772	31.6346
		25 l/m3	4.50222	4.84740	.626	-7.3768	16.3812
	25 l/m3	0 l/m3	15.20368*	4.94212	.012	3.0566	27.3507
		12.5 l/m3	-4.50222	4.84740	.626	-16.3812	7.3768

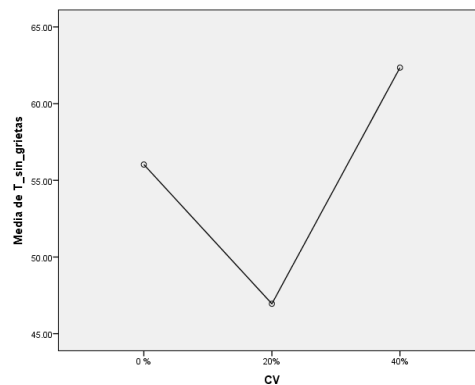
\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable CV

ANOVA					
T_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2046.561	2	1023.281	4.309	.019
Dentro de grupos	11636.942	49	237.489		
Total	13683.503	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CV)			
T_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.014	2	49	.986



### Gráfico de medias T sin grietas vs. CV

Comparaciones múltiples (CV)							
Variable dependiente: T_sin_grietas							
	(I) CV	(J) CV	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 %	20%	9.07667	5.13689	.191	-3.3388	21.4921
		40%	-6.31618	5.29498	.463	-19.1137	6.4814
	20%	0 %	-9.07667	5.13689	.191	-21.4921	3.3388
		40%	-15.39285*	5.29498	.015	-28.1904	-2.5953
	40%	0 %	6.31618	5.29498	.463	-6.4814	19.1137
		20%	15.39285*	5.29498	.015	2.5953	28.1904
Games-Howell	0 %	20%	9.07667	5.10001	.192	-3.4225	21.5759
		40%	-6.31618	5.39415	.479	-19.5802	6.9479
	20%	0 %	-9.07667	5.10001	.192	-21.5759	3.4225
		40%	-15.39285*	5.24995	.017	-28.3129	-2.4728
	40%	0 %	6.31618	5.39415	.479	-6.9479	19.5802
		20%	15.39285*	5.24995	.017	2.4728	28.3129

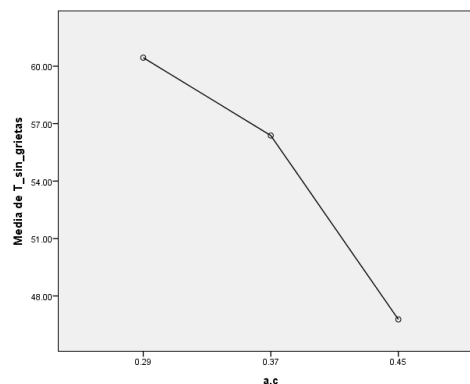
\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable a/c

ANOVA					
T_sin_grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1649.142	2	824.571	3.357	.043
Dentro de grupos	12034.361	49	245.599		
Total	13683.503	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
T_sin_grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.595	2	49	.085



### Gráfico de medias T sin grietas vs. a/c

Comparaciones múltiples (a/c)							
Variable dependiente: T_sin_grietas							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	4.06611	5.22387	.718	-8.5596	16.6918
		0.45	13.67125*	5.38464	.038	.6570	26.6855
	0.37	0.29	-4.06611	5.22387	.718	-16.6918	8.5596
		0.45	9.60514	5.38464	.186	-3.4091	22.6194
	0.45	0.29	-13.67125*	5.38464	.038	-26.6855	-.6570
		0.37	-9.60514	5.38464	.186	-22.6194	3.4091
Games-Howell	0.29	0.37	4.06611	4.67455	.663	-7.4274	15.5596
		0.45	13.67125	5.49728	.051	-.0280	27.3705
	0.37	0.29	-4.06611	4.67455	.663	-15.5596	7.4274
		0.45	9.60514	6.01636	.263	-5.2411	24.4514
	0.45	0.29	-13.67125	5.49728	.051	-27.3705	.0280
		0.37	-9.60514	6.01636	.263	-24.4514	5.2411

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

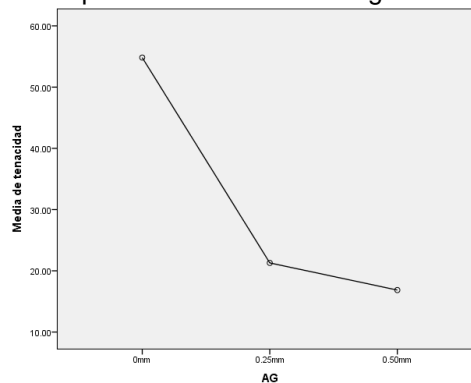
## 5.2 ANOVA de especímenes agrietados

### Variable AG

ANOVA					
tenacidad					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	45023.427	2	22511.713	227.894	.000
Dentro de grupos	15311.125	155	98.781		
Total	60334.552	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
tenacidad			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
90.018	2	155	.000





### Gráfico de medias T vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: tenacidad							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	33.54244*	1.93104	.000	28.9727	38.1122
		0.50mm	37.97423*	1.94918	.000	33.3616	42.5868
	0.25mm	0mm	-33.54244*	1.93104	.000	-38.1122	-28.9727
		0.50mm	4.43179	1.93104	.059	-.1379	9.0015
	0.50mm	0mm	-37.97423*	1.94918	.000	-42.5868	-33.3616
		0.25mm	-4.43179	1.93104	.059	-9.0015	.1379
Games-Howell	0mm	0.25mm	33.54244*	2.32804	.000	27.9379	39.1470
		0.50mm	37.97423*	2.34366	.000	32.3359	43.6126
	0.25mm	0mm	-33.54244*	2.32804	.000	-39.1470	-27.9379
		0.50mm	4.43179*	.77016	.000	2.6000	6.2635
	0.50mm	0mm	-37.97423*	2.34366	.000	-43.6126	-32.3359
		0.25mm	-4.43179*	.77016	.000	-6.2635	-2.6000

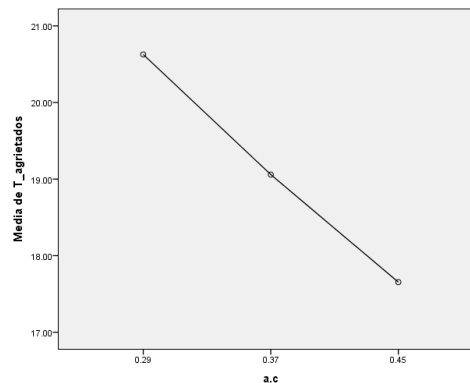
\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable a/c

ANOVA					
T_agrietados					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	159.258	2	79.629	4.124	.019
Dentro de grupos	1988.659	103	19.307		
Total	2147.916	105			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (a/c)			
T_agrietados			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.631	2	103	.534



## Gráfico de medias T agrietados vs. a/c

<b>Comparaciones múltiples (a/c)</b>							
Variable dependiente: T_agrietados							
	(I) a.c	(J) a.c	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0.29	0.37	1.56840	1.05080	.299	-.9305	4.0673
		0.45	2.97306*	1.03568	.014	.5101	5.4360
	0.37	0.29	-1.56840	1.05080	.299	-4.0673	.9305
		0.45	1.40466	1.05080	.378	-1.0942	3.9035
	0.45	0.29	-2.97306*	1.03568	.014	-5.4360	-.5101
		0.37	-1.40466	1.05080	.378	-3.9035	1.0942
Games-Howell	0.29	0.37	1.56840	1.08172	.321	-1.0235	4.1603
		0.45	2.97306*	1.03884	.015	.4846	5.4615
	0.37	0.29	-1.56840	1.08172	.321	-4.1603	1.0235
		0.45	1.40466	1.01493	.355	-1.0279	3.8373
	0.45	0.29	-2.97306*	1.03884	.015	-5.4615	-.4846
		0.37	-1.40466	1.01493	.355	-3.8373	1.0279

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 6. Ductilidad ( $\mu$ )

### 6.1 ANOVA de especímenes sin grietas

<b>Variable CNI</b>					
<b>ANOVA</b>					
$\mu$ sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	632.334	2	316.167	7.246	.002
Dentro de grupos	2138.123	49	43.635		
Total	2770.457	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CNI)			
$\mu$ sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.540	2	49	.586

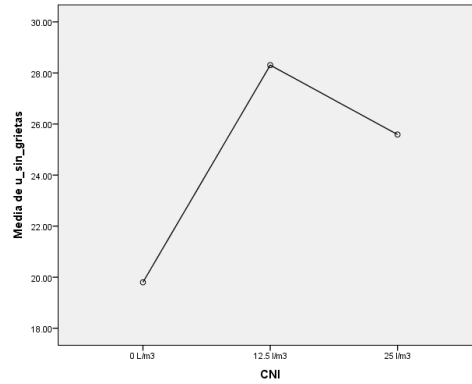


Gráfico de medias  $\mu$  sin grietas vs. CNI

Comparaciones múltiples (CNI)							
Variable dependiente: $\mu$ sin grietas							
	(I) CNI	(J) CNI	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 l/m3	12.5 l/m3	-8.50611*	2.26966	.001	-13.9917	-3.0205
		25 l/m3	-5.78889*	2.26966	.036	-11.2745	-.3033
	12.5 l/m3	0 l/m3	8.50611*	2.26966	.001	3.0205	13.9917
		25 l/m3	2.71722	2.20190	.439	-2.6046	8.0390
	25 l/m3	0 l/m3	5.78889*	2.26966	.036	.3033	11.2745
		12.5 l/m3	-2.71722	2.20190	.439	-8.0390	2.6046
Games-Howell	0 l/m3	12.5 l/m3	-8.50611*	2.44165	.004	-14.5076	-2.5047
		25 l/m3	-5.78889*	2.16249	.032	-11.1339	-.4438
	12.5 l/m3	0 l/m3	8.50611*	2.44165	.004	2.5047	14.5076
		25 l/m3	2.71722	2.15222	.426	-2.5751	8.0095
	25 l/m3	0 l/m3	5.78889*	2.16249	.032	.4438	11.1339
		12.5 l/m3	-2.71722	2.15222	.426	-8.0095	2.5751

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

### Variable CV

ANOVA					
$\mu$ sin grietas					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	458.299	2	229.149	4.856	.012
Dentro de grupos	2312.158	49	47.187		
Total	2770.457	51			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (CV)			
$\mu$ sin grietas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
.288	2	49	.751

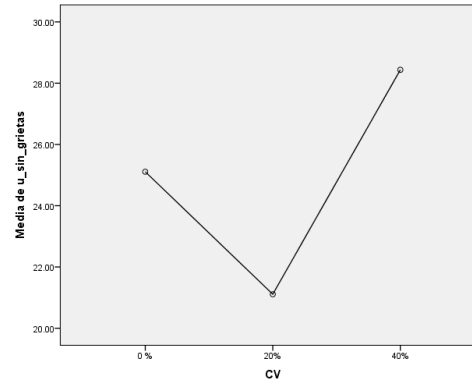


Gráfico de medias  $\mu$  sin grietas vs. CV

Comparaciones múltiples (CV)							
Variable dependiente: $\mu$ sin grietas							
	(I) CV	(J) CV	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0 %	20%	3.99944	2.28976	.198	-1.5347	9.5336
		40%	-3.32736	2.36023	.344	-9.0318	2.3771
	20%	0 %	-3.99944	2.28976	.198	-9.5336	1.5347
		40%	-7.32681*	2.36023	.009	-13.0313	-1.6223
	40%	0 %	3.32736	2.36023	.344	-2.3771	9.0318
		20%	7.32681*	2.36023	.009	1.6223	13.0313
Games-Howell	0 %	20%	3.99944	2.11757	.158	-1.1929	9.1918
		40%	-3.32736	2.53506	.400	-9.5809	2.9261
	20%	0 %	-3.99944	2.11757	.158	-9.1918	1.1929
		40%	-7.32681*	2.42716	.014	-13.3358	-1.3178
	40%	0 %	3.32736	2.53506	.400	-2.9261	9.5809
		20%	7.32681*	2.42716	.014	1.3178	13.3358

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 6.2 ANOVA de especímenes agrietados

### Variable AG

ANOVA					
ductilidad ( $\mu$ )					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6041.818	2	3020.909	152.173	.000
Dentro de grupos	3077.024	155	19.852		
Total	9118.842	157			

\* Cuando existan diferencias significativas se consideran comparaciones múltiples de ASD Tukey para varianzas homogéneas y Games-Howell para varianzas no homogéneas.

Prueba de homogeneidad de varianzas (AG)			
ductilidad ( $\mu$ )			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
82.245	2	155	.000

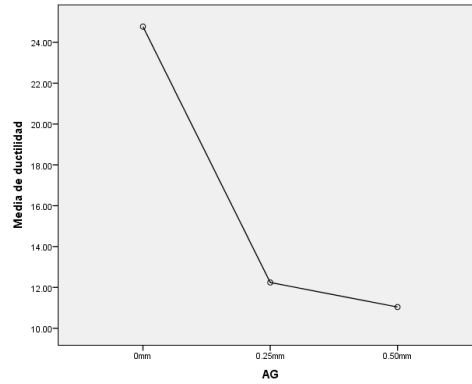


Gráfico de medias  $\mu$  vs. AG

Comparaciones múltiples (AG)							
Variable dependiente: ductilidad ( $\mu$ )							
	(I) AG	(J) AG	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	0mm	0.25mm	12.52849*	.86567	.000	10.4799	14.5771
		0.50mm	13.73077*	.87380	.000	11.6630	15.7986
	0.25mm	0mm	-12.52849*	.86567	.000	-14.5771	-10.4799
		0.50mm	1.20228	.86567	.349	-.8463	3.2508
	0.50mm	0mm	-13.73077*	.87380	.000	-15.7986	-11.6630
		0.25mm	-1.20228	.86567	.349	-3.2508	.8463
Games-Howell	0mm	0.25mm	12.52849*	1.04941	.000	10.0018	15.0552
		0.50mm	13.73077*	1.05167	.000	11.1992	16.2623
	0.25mm	0mm	-12.52849*	1.04941	.000	-15.0552	-10.0018
		0.50mm	1.20228*	.32449	.001	.4307	1.9739
	0.50mm	0mm	-13.73077*	1.05167	.000	-16.2623	-11.1992
		0.25mm	-1.20228*	.32449	.001	-1.9739	-.4307

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## 7. Correlación entre $i_{corr}$ y $\mu$

Fit name:

X data:

Y data:

Z data:

Weights:

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 p1 = 1.246 (-1.46, 3.953)  
 p2 = -11.56 (-28.81, 5.689)  
 p3 = 38.05 (1.945, 74.15)  
 p4 = -51.62 (-79.66, -23.59)  
 p5 = 36.19 (29.77, 42.6)

Goodness of fit:  
 SSE: 1890  
 R-square: 0.5614  
 Adjusted R-square: 0.5377  
 RMSE: 5.054

Fit name:

X data:

Y data:

Z data:

Weights:

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 p1 = -44.65 (-80.07, -9.227)  
 p2 = 188.2 (32.62, 343.8)  
 p3 = -234.3 (-448.1, -20.57)  
 p4 = 88.87 (-16.65, 194.4)  
 p5 = 17.68 (2.542, 32.83)

Goodness of fit:  
 SSE: 729,5  
 R-square: 0.3887  
 Adjusted R-square: 0.2722  
 RMSE: 5.894

Fit name:

X data:

Y data:

Z data:

Weights:

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 p1 = 1.202 (-1.036, 3.441)  
 p2 = -9.792 (-25.49, 5.904)  
 p3 = 27.39 (-9.723, 64.51)  
 p4 = -30.06 (-64.46, 4.344)  
 p5 = 22.85 (12.36, 33.34)

Goodness of fit:  
 SSE: 39.38  
 R-square: 0.2641  
 Adjusted R-square: 0.1303  
 RMSE: 1.338

Fit name:

X data:

Y data:

Z data:

Weights:

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 p1 = 1.451 (-2.859, 5.761)  
 p2 = -6.39 (-33.51, 20.73)  
 p3 = 8.365 (-51.52, 68.26)  
 p4 = -3.728 (-58.08, 50.63)  
 p5 = 11.67 (-5.158, 28.49)

Goodness of fit:  
 SSE: 28.23  
 R-square: 0.3116  
 Adjusted R-square: 0.1805  
 RMSE: 1.159

Fit name: 0 L/m3 de CNI

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1 \cdot x^4 + p2 \cdot x^3 + p3 \cdot x^2 + p4 \cdot x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -1.603 (-6.244, 3.037)  
p2 = 8.987 (-21.75, 39.72)  
p3 = -11.6 (-78.47, 55.27)  
p4 = -5.29 (-59.82, 49.24)  
p5 = 22.11 (8.328, 35.89)

Goodness of fit:  
SSE: 496.9  
R-square: 0.3445  
Adjusted R-square: 0.2196  
RMSE: 4.864

Fit name: 12.5 L/m3 de CNI

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1 \cdot x^4 + p2 \cdot x^3 + p3 \cdot x^2 + p4 \cdot x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -0.2385 (-13.61, 13.14)  
p2 = -6.453 (-76.14, 63.23)  
p3 = 36.29 (-81.6, 154.2)  
p4 = -56.77 (-131.3, 17.76)  
p5 = 39.81 (25.76, 53.87)

Goodness of fit:  
SSE: 819.6  
R-square: 0.5819  
Adjusted R-square: 0.5059  
RMSE: 6.103

Fit name: 25 L/m3 de CNI

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1 \cdot x^4 + p2 \cdot x^3 + p3 \cdot x^2 + p4 \cdot x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = 3.369 (-16.4, 23.14)  
p2 = -23.87 (-112.8, 65.07)  
p3 = 61.46 (-73.57, 196.5)  
p4 = -68.85 (-148.2, 10.5)  
p5 = 39.62 (25.68, 53.56)

Goodness of fit:  
SSE: 368.4  
R-square: 0.7451  
Adjusted R-square: 0.6965  
RMSE: 4.188

Fit name: 0% de CV

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1 \cdot x^4 + p2 \cdot x^3 + p3 \cdot x^2 + p4 \cdot x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -0.4717 (-5.547, 4.604)  
p2 = 0.5771 (-34.56, 35.71)  
p3 = 10.28 (-71.2, 91.76)  
p4 = -30.68 (-102.2, 40.89)  
p5 = 35.69 (17.04, 54.34)

Goodness of fit:  
SSE: 680.4  
R-square: 0.5198  
Adjusted R-square: 0.4325  
RMSE: 5.561

Fit name: 20% de CV

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -3.2 (-23.88, 17.48)  
p2 = 8.223 (-77.88, 94.33)  
p3 = 4.759 (-114.4, 124)  
p4 = -27.51 (-89.79, 34.77)  
p5 = 29.73 (20.4, 39.06)

Goodness of fit:  
SSE: 206.8  
R-square: 0.767  
Adjusted R-square: 0.7247  
RMSE: 3.066

Fit name: 40% de CV

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -73.8 (-182.8, 35.22)  
p2 = 229.2 (-138.6, 597.1)  
p3 = -202.9 (-617.7, 211.9)  
p4 = 26.16 (-151.4, 203.8)  
p5 = 30.24 (6.618, 53.85)

Goodness of fit:  
SSE: 604.1  
R-square: 0.6831  
Adjusted R-square: 0.6197  
RMSE: 5.496

Fit name: 0.29 a/c

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = 7.001 (-23.98, 37.98)  
p2 = -39.82 (-161, 81.36)  
p3 = 81.05 (-74.95, 237)  
p4 = -72.38 (-146.7, 1.971)  
p5 = 35.54 (25.3, 45.78)

Goodness of fit:  
SSE: 269.1  
R-square: 0.7708  
Adjusted R-square: 0.7291  
RMSE: 3.497

Fit name: 0.37 a/c

X data: Icorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

---

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$   
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -33.4 (-94.81, 28.02)  
p2 = 121.4 (-113.1, 355.8)  
p3 = -128 (-431.9, 175.9)  
p4 = 19.14 (-134.5, 172.7)  
p5 = 31.8 (7.103, 56.49)

Goodness of fit:  
SSE: 643.7  
R-square: 0.6663  
Adjusted R-square: 0.6028  
RMSE: 5.537



Fit name: 0.45 a/c

X data: lcorr

Y data: Ductilidad

Z data: (none)

Weights: (none)

Results

Linear model Poly4:  
 $f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 =	4.132	(-1.119, 9.382)
p2 =	-32.91	(-69.58, 3.764)
p3 =	91.95	(6.36, 177.5)
p4 =	-106.1	(-182, -30.14)
p5 =	55.52	(34.66, 76.38)

Goodness of fit:

SSE:	466.4
R-square:	0.5906
Adjusted R-square:	0.5126
RMSE:	4.713