

Influencia de las *substancias no metálicas* en la adherencia entre acero y concreto

Humberto Hoyos*, Alberto Lara*, Pedro Therán**

Resumen

El objetivo de este estudio fue investigar la influencia de contaminantes comunes del sector de la construcción (substancias no metálicas) en el esfuerzo de adherencia que se desarrolla en el acero de refuerzo y el concreto circundante. Se construyeron 36 viguetas para realizar los ensayos, reforzadas con varillas N° 4 (12.7 mm), N° 5 (15.9 mm) y N° 6 (19.1 mm); a su vez, se usaron contaminantes comunes que se pueden encontrar en cualquier obra donde se construya elementos de concreto reforzado, tales como: aceite quemado, caliche y lechada. Los resultados señalan que estas substancias, al crear una capa que recubre al refuerzo, previa a la colocación del concreto, contribuyen a que se pierda adherencia y se generen deslizamientos entre el acero y el concreto, lo cual provoca como posibles resultados, el agrietamiento de los elementos estructurales, debido a que el acero de refuerzo no empieza a trabajar en el momento indicado, sino que le deja toda la responsabilidad estructural al concreto.

Palabras claves: Adherencia, vigas, contaminantes, acero, concreto.

Abstract

The objective of this study, was to investigate the influence of pollutants common of the sector of the construction (non metallic substances) in the bond stress, that is developed in the reinforcement steel and the surrounding concrete. Thirtieth six beam was built to carry out the test, reinforced with bars of N° 4 (12.7 mm), N° 5 (15.9 mm) and N° 6 (19.1 mm); in turn common pollutants were used, that can be in any work where it is built elements of reinforced concrete, such as: oil, caliche and grout. The results point out that these substances, when creating a layer that recovers to the reinforcement, previous to the placement of the concrete, it contributes to that lost anchorage and slips are generated between the steel and the concrete, causing as possible results the cracking of the structural elements because of the reinforcement steel does not begin to work in the recommended moment, but that it leaves all the structural responsibility to the concrete.

Key words: Bond stress, beam, pollutants, steel, concrete.

Fecha de recepción: 21 de marzo de 2001

* Ingeniero Civil de la Universidad del Norte.

** Ingeniero Civil de la Corporación Universitaria de la Costa (CUC); Especialista en análisis y diseño de estructuras; profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Norte; Coordinador de la Especialización de análisis y diseño de estructuras de la misma Universidad. (ptheran@uninorte.edu.co).

INTRODUCCIÓN

La adherencia en las barras de refuerzo juega un rol muy importante en los miembros estructurales cuando están sujetos no sólo a carga estática sino también a cargas dinámicas. Esta adherencia puede ser descrita por relaciones de deslizamiento versus adherencia, esfuerzo de adherencia promedio, modos de falla, etc.

Las relaciones de deslizamiento versus adherencia en barras de refuerzo embebidas en concreto están controladas por un número de fenómenos, tales como: adhesión química, resistencia a la fricción y efecto de cuña entre los resaltes del refuerzo y el concreto circundante. Cuando la adhesión química se rompe, el comportamiento difiere sustancialmente del tipo de barra. En el caso de barras deformadas, una vez las cargas producen el deslizamiento relativo entre acero y concreto, el efecto de cuña empieza a trabajar, lo cual provoca que se generen esfuerzos longitudinales y radiales en el concreto circundante. Las fuerzas radiales causan grietas de tensión internas alrededor de la barra.

Una vez las grietas de tensión se desarrollan, la adherencia cae rápidamente, a menos que se provea al elemento estructural de refuerzo transversal para restringir la propagación de las grietas. La carga a la cual se produce la fractura es principalmente función del esfuerzo de tensión y de la capacidad de deformación del concreto.

1. PROGRAMA DE ENSAYOS

Por el proceso constructivo de los elementos de concreto reforzado, el acero de refuerzo se ve constantemente contaminado (sucio) con sustancias comunes que se encuentran en cualquier obra donde se esté trabajando con concreto; como ejemplo se pueden mencionar: aceite quemado, caliche, lechada del mismo concreto, óxido del refuerzo, etc. Todas estas sustancias se adhieren al acero y crean una película entre éste y el concreto antes del fraguado y curado, y esto da como resultado un posible contaminante que puede actuar de manera adversa en el desarrollo estructural de los elementos de hormigón [4], [5].

El programa de ensayos consistió en fallar a flexión 36 viguetas de concreto reforzado, con acero de refuerzo a flexión y estribos para evitar falla por tensión diagonal. El concreto utilizado tenía una resistencia a la compresión de 28 MPa y el acero de refuerzo una resistencia a la tensión de 420 MPa.

Las 36 viguetas fueron divididas en grupos de 12 viguetas, ya que se estudió la influencia de 3 tipos de contaminantes comunes en la construcción, a su vez dentro de los grupos de 12 viguetas se tuvieron en cuenta también 3 diámetros distintos de acero corrugado.

1.1. ESPECÍMENES DE ENSAYO

La figura 1 muestra la configuración de las viguetas utilizadas en el proyecto de investigación. El ensayo se encuentra normalizado por la Unión Internacional de Laboratorios de Ensayos de Materiales y Estructuras (RILEM), bajo la numeración RC.5, la cual especifica el ensayo de adherencia por flexión.

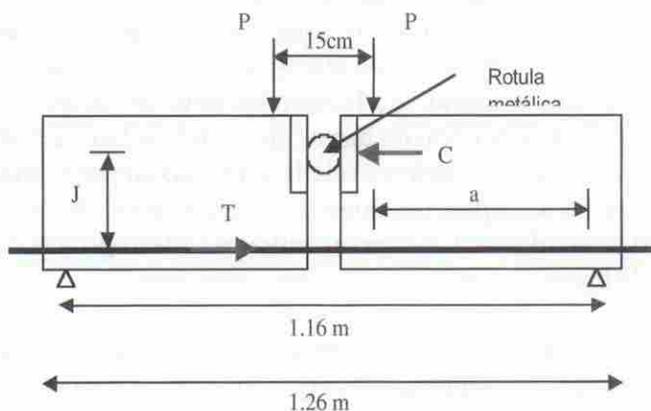


Figura 1. Esquema de las cargas actuantes en las viguetas durante el ensayo

Las viguetas poseen una longitud de 1.26 metros de largo y una sección transversal de 15 cm de ancho por 24 cm de alto. Se usó concreto de 28 MPa y acero con un límite de fluencia de 420 MPa. En las normas de la RILEM RC.5 se especifica que la longitud de desarrollo para este ensayo debe ser 10 veces el diámetro de la barra ($10 d_b$). Con el objetivo de simular las condiciones en situaciones más propias de nuestro medio se determinó que la longitud de desarrollo de las barras sería la que resultara en la ecuación C.12.1 en la sección C.12.2.3. de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes (NSR-98). En las demás indicaciones se siguió la normatividad del ensayo.

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{9 f_y \alpha \beta \gamma}{10 \sqrt{f'c} \left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} 1$$

¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. Bogotá, 1998.

Donde $\{(c+K_{tr}) / d_b\} \leq 2.5$, para prevenir una falla por extracción; además, la longitud de desarrollo no debe ser menor de 300 mm.

- L_d : Longitud de desarrollo, mm
- d_b : Diámetro de la barra, mm
- α : Coeficiente relacionado con la localización de la barra, dado en la NSR-98 en la sec. 12.2.4.
- β : Coeficiente relacionado con el tipo de refuerzo, dado en la NSR-98 en la sec. 12.2.4.
- γ : Coeficiente de escala relacionado con el diámetro de la barra, dado en la NSR-98 en la sec. 12.2.4.
- f_y : Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, MPa
- f'_c : Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de curado, MPa
- c : Menor distancia medida de la superficie del concreto al centro de la barra que se está desarrollando, o la mitad de la distancia centro a centro de las barras que se están desarrollando; la menor de las dos.
- K_{tr} : Índice de refuerzo transversal.

Lo cual dio como resultado que la longitud de desarrollo de las varillas N° 6 (19.1 mm) fuera de 436.61 mm, para las varillas N° 5 (15.9 mm) la longitud de desarrollo es de 363.46 mm, y para las varillas de N° 4 (12.7 mm) fuera de 290.31 mm. Para los ensayos se eligió una longitud de desarrollo de 48 cm, la cual será suficiente para todos los diámetros en estudio.

1.1.1 Materiales utilizados

A continuación se enuncian los materiales utilizados en el proyecto de investigación, y se describen sus características más importantes:

1.1.1.1 **Contaminantes.** Por los objetivos de la investigación se usaron tres tipos de contaminantes: aceite quemado, lechada y caliche. Estas sustancias no metálicas (llamadas así porque están compuestas básicamente de carbono, nitrógeno, oxígeno, cloro, fósforo, hidrógeno, etc.) representan tal vez los contaminantes más comunes en una construcción, ya que hacen parte del proceso constructivo en la elaboración de elementos reforzados. Estos contaminantes fueron aplicados en toda la longitud de desarrollo 24 horas antes del vaciado del concreto.

1.1.1.2 **Concreto.** En el estudio se utilizó concreto normal de 28 MPa, con un asentamiento de 9 pulgadas. El esfuerzo a la compresión especificado está basado en cilindros testigos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura fallados a los 3, 7 y 28 días. En la tabla 1 se pueden ver los resultados del ensayo de compresión a los 3, 7 y 28 días de curado.

Tabla 1

Lecturas de ensayo de compresión a los cilindros testigo del concreto

	Asentamiento mm (in)	Lectura 1 MPa (psi)	Lectura 2 MPa (psi)	Promedio MPa (psi)
Resistencia 3D	228.6 (9)	19.27 (2753)	19.34 (2763)	19.31 (2758)
Resistencia 7D	228.6 (9)	25.83 (3690)	23.84 (3405)	24.84 (3548)
Resistencia 28D	228.6 (9)	31.18 (4454)	29.65 (4236)	30.42 (4345)

1.1.1.3 *Acero de refuerzo*. Se utilizó acero de bajo carbono, con un límite de fluencia de 420 MPa.

2. DATOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A continuación se presenta la tabla 2, donde se resume el comportamiento y modo de falla de las 36 viguetas ensayadas. En la primera columna se presenta la nomenclatura que describe a la vigueta que se está ensayando, compuesta por el diámetro de la barra en pulgadas y la primera letra del contaminante utilizado, por ejemplo, 3/4 NC. Este código indica que la vigueta se encuentra reforzada con una varilla de 3/4 de pulgada (Nº 6) y no se encuentra contaminada. En resumen, las letras utilizadas serán: A, para indicar aceite quemado; C, para indicar contaminación con caliche; y L, para indicar contaminación con lechada.

En la segunda columna se describe el modo de falla presentado en la vigueta, con el siguiente código explicado a continuación. Para indicar falla por fluencia del acero se usarán las letras FA; si la falla ocurrió o se inicio con tensión diagonal, se indicará con las letras TD; finalmente, si la viga falla por falta de adherencia, se denotará con las letras AH.

En los ensayos realizados se debe recordar que se obtienen dos resultados por vigueta. En la tabla 2 se presenta la carga de falla a 3 mm de deslizamiento (ya que en este nivel de deslizamiento se nota una pérdida significativa de adherencia) del lado de la viga más afectado. En la columna 3 se muestra la carga a que estaba sometida la viga, en las columnas 4 y 5 se muestra la tensión en la barra y la adherencia desarrollada por el refuerzo, respectivamente.

Tabla 2
Carga y Adherencia a los 3 mm de deslizamiento

No	Vigueta	M. de falla	P (KN)	T (KN)	m (MPa)
1	3/4 NC	TD+AH	81,40	130,24	4,52
2	3/4 NC	TD+AH	78,29	125,26	4,35
3	3/4 NC	TD+AH	81,40	130,24	4,52
4	3/4 A	AH	57,83	92,52	3,21
5	3/4 A	AH	59,16	94,66	3,29
6	3/4 A	AH	65,83	105,33	3,66
7	3/4 C	AH	68,06	108,89	3,78
8	3/4 C	AH	66,28	106,05	3,68
9	3/4 C	AH	66,28	106,05	3,68
10	3/4 L	TD+AH	78,29	125,26	4,35
11	3/4 L	TD+AH	79,18	126,69	4,40
12	3/4 L	TD+AH	79,62	127,40	4,42
13	5/8 NC	FA	56,94	91,10	3,16
14	5/8 NC	FA	55,60	88,96	3,09
15	5/8 NC	FA	58,27	93,23	3,24
16	5/8 A	AH	44,04	70,46	2,45
17	5/8 A	AH	43,59	69,75	2,42
18	5/8 A	AH	44,04	70,46	2,45
19	5/8 C	AH	58,72	93,95	3,26
20	5/8 C	AH	58,72	93,95	3,26
21	5/8 C	AH	58,72	93,95	3,26
22	5/8 L	AH	58,72	93,95	3,26
23	5/8 L	AH	59,61	95,37	3,31
24	5/8 L	AH	35,59	56,94	1,98
25	1/2 NC	FA+AH	45,37	72,59	2,52
26	1/2 NC	FA+AH	45,37	72,59	2,52
27	1/2 NC	FA+AH	42,70	68,32	2,37
28	1/2 A	FA+AH	44,48	71,17	2,47
29	1/2 A	FA+AH	44,04	70,46	2,45
30	1/2 A	FA+AH	44,93	71,88	2,50
31	1/2 C	FA+AH	38,25	61,21	2,13
32	1/2 C	FA+AH	38,70	61,92	2,15
33	1/2 C	FA+AH	40,03	64,05	2,22
34	1/2 L	FA+AH	38,25	61,21	2,13
35	1/2 L	FA+AH	39,14	62,63	2,17
36	1/2 L	FA+AH	44,48	71,17	2,47

Los resultados obtenidos en la tabla 2 fueron deducidos de la figura 1. Asumiendo que la fuerza de compresión que actúa en la rótula (C) es igual a la fuerza que actúa en la barra de estudio (T), se toma equilibrio de momento en cualquiera de los apoyos y se obtiene la siguiente ecuación:

$$Tj = Pa$$

Donde:

T = Fuerza en la barra

j = Brazo del par de fuerzas, C y T

P = Carga aplicada a un lado de rótula de acero

a = Claro de cortante

Despejando a la fuerza en la barra, tenemos:

$$T = \frac{Pa}{j}$$

Para el caso de los ensayos efectuados, el claro de cortante tiene un valor de 48 cm, y el brazo del par de fuerza es igual a 15 cm, lo cual da como resultado la siguiente expresión:

$$T = 3.2 P$$

Pero la carga que envía la máquina para fallarlas es 2P, así que la ecuación finalmente es:

$$T = 1.6 \times (2P)$$

Donde:

2P = Carga de la máquina

Para el cálculo de la adherencia se divide la tensión de la barra entre el área lateral de la varilla expuesta al contacto con el concreto. La ecuación que da estos resultados se presenta a continuación:

$$\mu = \frac{T}{\pi * d_b * l_d}$$

Donde:

T = Tensión en la barra

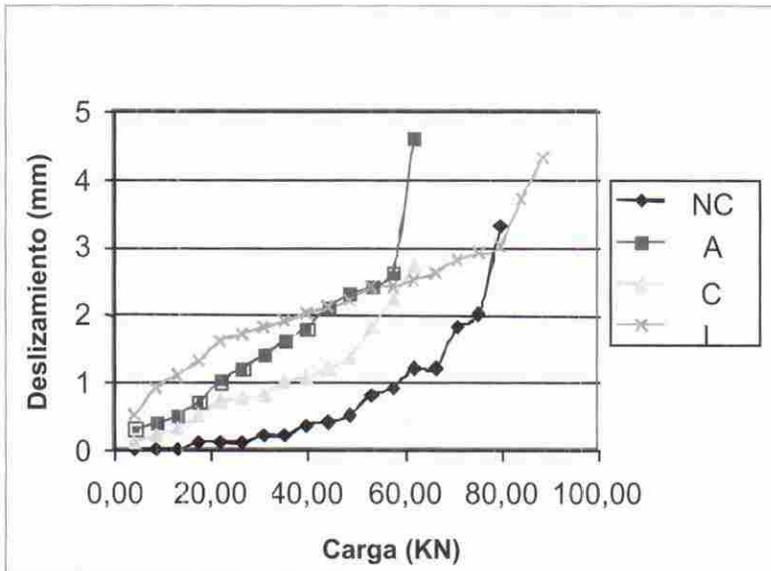
$\pi = 3.14159265359$

d_b = Diámetro de la barra

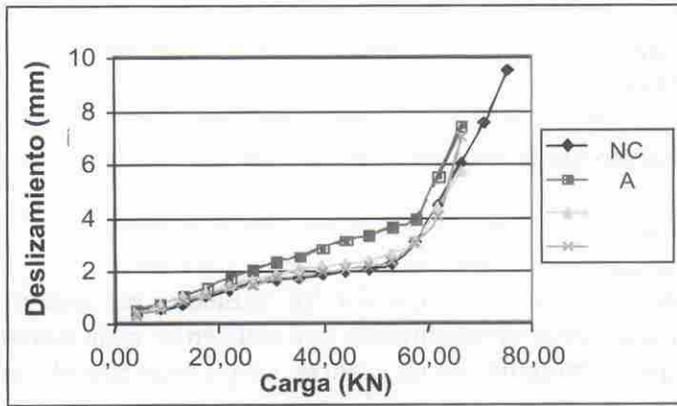
L_d = Longitud de desarrollo

2.1. RESULTADOS OBTENIDOS

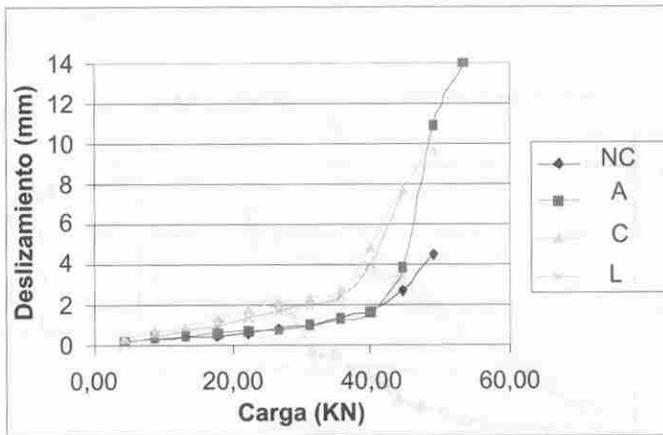
El ensayo de adherencia por flexión, al dar dos resultados por ensayo, muestra dos comportamientos de carga-deslizamiento, que ocurren en cada extremo de la viga. Los resultados que se presentan en las gráficas 2, 3 y 4 muestran el comportamiento Carga Vs Deslizamiento más desfavorable encontrado en los ensayos. Se puede notar cómo las viguetas a ciertos incrementos de carga presentan un deslizamiento entre acero y concreto bastante satisfactorio, pero al llegar a 3 mm se observa que con pocos incrementos de carga el deslizamiento crece rápidamente.



Gráfica 2. Carga-deslizamiento para las viguetas de 19.1 mm de diámetro, discriminadas por tipo de contaminación



Gráfica 3. Carga-deslizamiento para las viguetas de 15.9 mm de diámetro, discriminadas por tipo de contaminación



Gráfica 4. Carga-deslizamiento para las viguetas de 12.7 mm de diámetro, discriminadas por tipo de contaminación

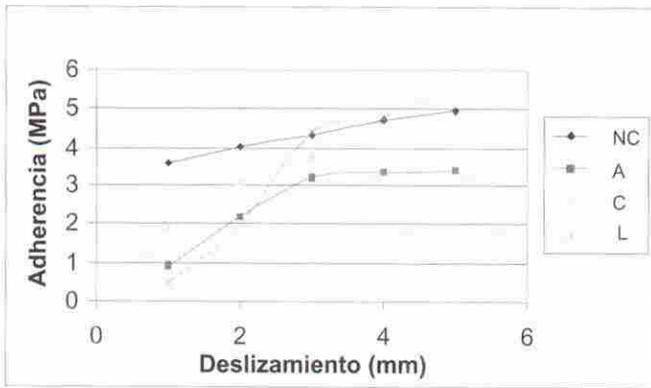
2.2. RELACIONES DESLIZAMIENTO VS ADHERENCIA

Una vez identificadas las gráficas que presentaban el comportamiento Carga Vs Deslizamiento más adverso, se procedió a calcular el esfuerzo de adherencia, que era el objetivo de la investigación.

La adherencia se calculó para varios desplazamientos del acero, los cuales fueron: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm y 5 mm. Estos puntos fueron escogidos en función del

deslizamiento de 3 mm, ya que el ensayo especifica que cuando el deslizamiento es mayor o igual a 3 mm, se considera que la viga ha fallado por adherencia, como se pudo constatar en las gráficas de Carga Vs Deslizamiento.

En las gráficas de Deslizamiento Vs Adherencia, para las varillas N° 6 (19.1 mm), gráfica 5, se observa que a medida que aumenta el deslizamiento aumenta la adherencia hasta cierto punto, ya que las curvas tienden a ser asintóticas con respecto al eje de las abscisas y a partir de este punto la curva intenta bajar. Esto indica que existe un tope máximo del deslizamiento hasta el cual se gana adherencia, pero de ahí en adelante empieza a perderse, hasta que se pierde totalmente cuando ocurre la falla. Se puede observar que la viga 3/4NC tiene una adherencia superior con respecto a las otras vigas contaminadas, y la más afectada es la 3/4 A .



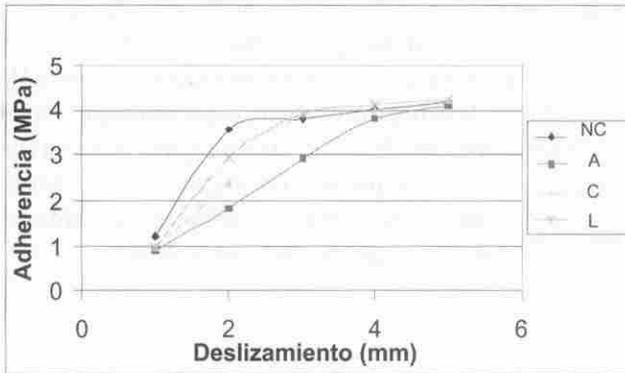
Gráfica 5. Deslizamiento (mm) Vs Adherencia para las viguetas reforzadas con varillas de 19.1 mm de diámetro, discriminadas por contaminante

La curva 3/4 L presenta un comportamiento distinto al de las otras curvas por su escasez de adherencia al principio, pero si se sigue el recorrido de la gráfica se observa que ésta gana o recupera adherencia de una manera extraordinaria en comparación con las otras curvas. Esto podría ser atribuido a que una vez que ocurre el deslizamiento, la única manera de desarrollar adherencia adicional es mediante fricción, por la acción de cuña de pequeñas partículas de arena alojadas entre la varilla y el concreto que la rodea².

En la gráfica 6 se ve un comportamiento similar: se nota que la vigueta 5/8 NC presenta mejor adherencia que las otras vigas contaminadas con aceite, caliche y

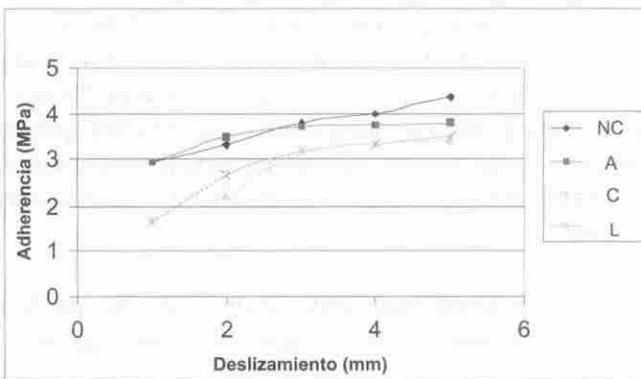
² PARK, P. *Estructuras de concreto reforzado*. México, Limusa, 1988. 796 p.

lechada. En esta gráfica se demuestra nuevamente la facilidad para recuperar adherencia de las vigas contaminadas con lechada, gracias al fenómeno que se describió anteriormente de las partículas de arena que la conforman.



Gráfica 6. Deslizamiento (mm) Vs Adherencia para las viguetas reforzadas con varillas de 15.9 mm de diámetro, discriminadas por contaminante

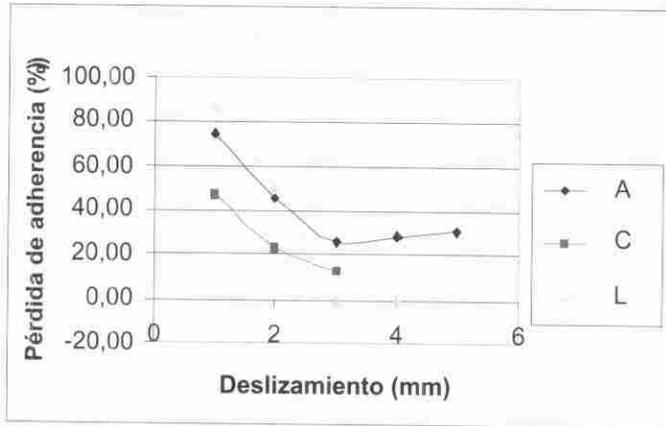
Finalmente, en la gráfica 7 se muestra el comportamiento de las viguetas reforzadas con diámetro de 1/2" (12.7 mm). Se nota en esta gráfica que el comportamiento exhibido no es muy similar al mostrado en las viguetas reforzadas con varillas de diámetro de 5/8" y 3/4", ya que el aceite quemado no afectó adversamente la adherencia en los deslizamientos iniciales, si ésta es comparada con los resultados de la vigueta 1/2 NC. Pero aunque el comportamiento no es tan marcado, como sucedió en los otros dos diámetros estudiados, se puede ver que con el caliche y la lechada se obtienen adherencias más bajas si la comparamos con la viga no contaminada.



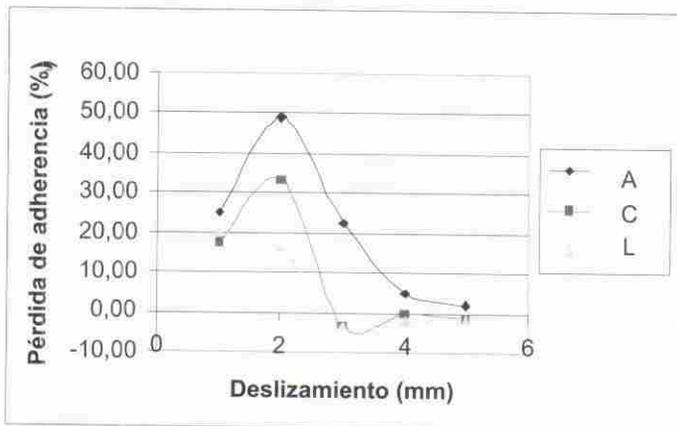
Gráfica 7. Deslizamiento (mm) Vs Adherencia para las viguetas reforzadas con varillas de 12.7 mm de diámetro, discriminadas por contaminante

2.3. INCIDENCIA DE LOS CONTAMINANTES EN LA ADHERENCIA

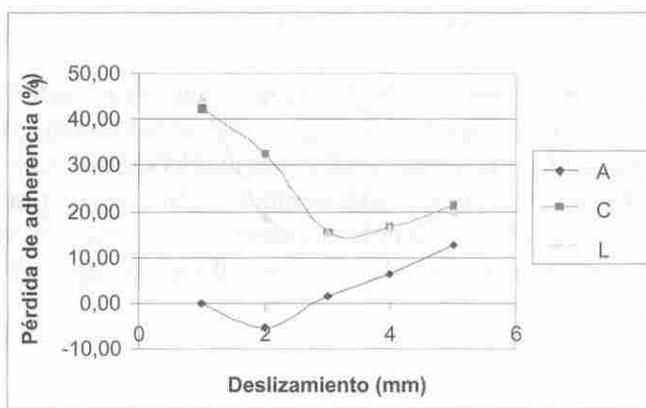
Por último se presentan las gráficas 8, 9 y 10, las cuales muestran el porcentaje de pérdida de adherencia con respecto a la vigueta no contaminada, en cada nivel de deslizamiento; estas gráficas muestran el grado de incidencia de los contaminantes en la adherencia del refuerzo. En los deslizamientos iniciales se puede ver que el porcentaje de pérdida de adherencia es importante, pero al final del ensayo se ve una recuperación en la adherencia, y en algunos casos llega a recuperarse totalmente.



Gráfica 8. Porcentaje de pérdida de adherencia Vs Deslizamiento para la varilla N° 6 (19.1 mm)



Gráfica 9. Porcentaje de pérdida de adherencia Vs Deslizamiento para la varilla N° 5 (15.9 mm)



Gráfica 10. Porcentaje de pérdida de Deslizamiento Vs Adherencia para la varilla N° 4 (12.7 mm)

CONCLUSIÓN

Los ensayos han podido establecer la incidencia de contaminantes comunes del sector de la construcción en la adherencia entre acero y concreto. Es así como con las gráficas presentadas se puede notar un comportamiento en la adherencia no uniforme, debido a estos contaminantes.

Se puede notar que con el refuerzo N° 6 (19.1 mm) la incidencia es más notoria, ya que a niveles bajos de deslizamiento se observa una baja adherencia por parte de los refuerzos contaminados. Esto debido a que se ha interrumpido el aporte en la adherencia de la adhesión química, con lo cual se ha dejado toda la responsabilidad al efecto de cuña entre los resaltes del refuerzo y el concreto, y cualquier otro aporte debido a fricción entre los dos materiales.

En el caso del refuerzo N° 5 (15.9 mm) se puede ver este mismo comportamiento: a deslizamientos iniciales existe poca adherencia en el refuerzo contaminado, pero posteriormente se nota cómo la adherencia es prácticamente igualada con el paso del deslizamiento de la barra. Esto confirma que inicialmente existe poca adhesión química, y la única forma que la adherencia se incremente es por medio de los resaltes de las barras de refuerzo.

En el refuerzo N° 4 (12.7 mm) se ve un comportamiento menos marcado, pero se deduce el mismo análisis. Se puede ver que el contaminante más perjudicial fue el aceite quemado, en segundo lugar el caliche, y el tercero fue para la lechada.

En conclusión, se debe ver y notar que cualquier sustancia puede afectar de manera adversa la adherencia entre acero y concreto, cualquier refuerzo debe ser limpiado correctamente antes de hacer el vaciado del concreto. La adherencia es una propiedad de los elementos de concreto desconocida y no muy estudiada, así que al no disponer de datos concretos en normas o códigos, es recomendable llevar a cabo un proceso de limpieza y eliminación de cualquier contaminante común del sector de la construcción que se pueda adherir al acero de refuerzo.

Bibliografía

- [1] Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes. Bogota, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1998, NSR-98.
- [2] COMPEDIUM OF RILEM TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR TESTING AND USE OF CONSTRUCTION MATERIALS (21 de agosto, 2000) (vía Internet). <http://www.rilem.org/rtf.pdf>
- [3] HOMOLOGACIÓN DE LA ADHERENCIA DE LAS BARRAS CORRUGADAS (21 de agosto, 2000) (vía Internet). <http://www.procuno.com/imagenes/ANEJO5.html>
- [4] MACGREGOR, James G. *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. 3ª ed., 1997. 939 p.
- [5] NAWY, Edward G. *A fundamental approach*. 3ª ed., 1996. 832 p.
- [6] PARK, P. *Estructuras de concreto reforzado*. México, Limusa, 1988. 796 p.