

Soldabilidad de las varillas estructurales nacionales de alta resistencia

Ing. **JORGE E. CONTRERAS CRUZ**
Profesor Asociado U.N.
Especializado en Soldadura

INTRODUCCION

El campo de las construcciones soldadas se ha venido desarrollando desde comienzos de siglo. El auge alcanzado por los países avanzados, el empleo de los aceros de alta resistencia y en la intensa aplicación de la soldadura eléctrica, han logrado satisfacer necesidades tales como: Reducción en las dimensiones de vigas y columnas, abaratar los costos de las estructuras, aminorar el peso propio del conjunto, permitir mayores luces entre vigas o columnas, reducir el tiempo de construcción, aprovechamiento más eficiente los materiales, dar completa libertad al diseñador en cuanto a formas y proporciones de características modernas con valor estético, y permitir el diseño de estructuras en el campo plástico.

En los últimos años se ha demostrado que las juntas soldadas presentan mejor comportamiento que las uniones convencionales (amarradas, pernaadas, roblonadas) al ser sometidas a cargas de fatiga, cargas de impacto y vibración severa. Estos tipos de cargas son las que generalmente actúan en las construcciones en caso de catástrofes naturales de tipo sísmico.

El territorio nacional se encuentra en uno de los ambientes sismotectónicos más interesantes y complicados que existen. En sus inmediaciones confluyen los bordes de tres placas tectónicas que viajan independientemente: La placa de Nazca en el Océano Pacífico, la placa Caribe al norte y la placa continental suramericana. En 1984 el gobierno colombiano expidió el decreto 1400 o Código Nacional de Construcciones Sismorresistentes.

Para proyectos estructurales de edificaciones se considera antieconómico diseñar las estructuras para que respondan "elásticamente" a las fuerzas de inercia inducidas por los terremotos. Por este motivo la norma sísmica suministra, intencionalmente, fuerzas horizontales de diseño menores que las correspondientes fuerzas de inercia del terremoto para el cual se proyectó la edificación.

La norma considera el acero como el material sismorresistente por excelencia. Estos aceros deben tener con-

Con el presente estudio se pretende mostrar y dar confianza al ingeniero civil, al arquitecto, al ingeniero mecánico sobre la soldabilidad y buen comportamiento de la soldadura en barras de acero de alta resistencia o sismorresistentes empleadas en construcciones civiles.

sistencia en las propiedades mecánicas, alto grado de soldabilidad, ductilidad adecuada, estar libre de desgarramiento laminar y además deben tener otros requisitos según la aplicación: propiedades anticorrosivas, resistencia al impacto, etc.

Los aceros con altas características son aceros de baja aleación. En cuanto a la soldabilidad de estos aceros, la industria nacional ha logrado superar el inconveniente de la composición de los aceros y electrodos. Sin embargo se presenta otra serie de obstáculos que evitan una aplicación industrial masiva de la soldadura en construcción:

1. Desinformación general sobre la aplicabilidad de la soldadura en las construcciones civiles por parte de los ingenieros.
2. Falta de investigación en la aplicabilidad del código AWS D 1.4 respecto al precalentamiento del metal base, con electrodos y materiales nacionales.
3. Poca profundización sobre los métodos de ensamble de los componentes estructurales.
4. Falta de un análisis de costos al construir edificaciones soldadas.
5. Poca factibilidad y confiabilidad de la inspección del proceso de soldadura.
6. Carencia de pruebas y control de calidad de las uniones soldadas.
7. Falta de mano de obra calificada en esta área.
8. Carencia de un plan para ampliar la aceptación de la soldadura de las construcciones sismorresistentes.

OBJETIVO

Con el presente trabajo se pretende salvar los anteriores obstáculos, y los resultados obtenidos son un soporte al fortalecimiento de la naciente Asociación Colombiana de Soldadura. Esta busca en sus inicios difundir las bondades de las normas, calificar la mano de obra y prestar una asesoría técnica calificada en concordancia con la Universidad Nacional.

Este estudio esta dirigido a Ingenieros civiles, Ingenieros de estructuras y arquitectos.

La investigación contó con el apoyo de empresas como: ELECTROMANUFACTURAS S.A., SIMESA, SIDERURGICA PAZ DEL RIO Y SIDBOYACA.

Agradezco la colaboración desinteresada e inteligente de los estudiantes del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional.

MATERIALES

En la tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de las varillas de acero estructural de alta resistencia con que contó esta investigación.

METODOLOGIA

Se empleó el proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido, para realizar las uniones a tope directo e indirecto con barras y ángulo como materiales auxiliares de unión haciendo la evaluación del carbono equivalente ($CE = \%C + Mn/6 + Cu/40 + Ni/20 + Cr/10 + Mo/50 - V/50$), mediante el análisis químico de las muestras suministradas por los fabricantes, se estableció que era de 0.53%, 0.57%, 0.34% y 0.48% para los materiales

Fabricante	ACERO	σ_y	σ_u	δ	Resistencia al impacto (kg^2m/cm^2)
		kpsi	kpsi	%	
A	Acero de refuerzo corrugado, ASTM A - 706	62	99	14	3,44
B	Acero de refuerzo, ASTM A - 615, grado 60	63	91	13	8,32
C	Acero de refuerzo corrugado, ASTM A - 615, grado 60	62	90	11	12,53
D	Angulo estructural, ASTM A - 572, grado 50	53	76	15	---

σ_y = esfuerzo de fluencia

σ_u = esfuerzo último

δ = elongación

TABLA 2
RESISTENCIA ULTIMA A LA TRACCION DE LAS UNIONES EN ESTUDIO

Probeta	Dn - 25,48 mm	Probeta	Dn - 25,38 mm.	Probeta	Dn - 25,48 mm
	An - 510 mm ²		An - 506mm ²		An - 510 mm ²
	Gn Kgs/mm ²		Gn Kgs/mm ²		Gn kgs/mm ²
1A-3	74.18	18-3	64.18	1C-3	64.24
-4	73.02	-4	* 62.92	-4	* 60.05
-5	74.31	-5	63.91	-5	63.78
-6	67.68	-6	64.26	-6	60.75
Promedio 1A	72.30	Promedio 1B	63.82	Promedio 1C	62.21
2A-3	67.22	2B-3	64.43	2C-3	* 62.94
-4	73.30	-4	62.68	-4	62.34
-5	67.76	-5	64.27	-5	64.24
-6	* 67.84	-6	63.73	-6	64.55
Promedio 2A	69.03	Promedio 2B	63.85	Promedio 2C	63.52
3A-3	* 67.50	3B-3	63.59	3C-3	63.76
-4	74.04	-4	63.73	-4	63.99
-5	68.37	-5	63.84	-5	63.94
-6	67.92	-6	63.79	-6	64.12
Promedio 3A	69.46	Promedio 3B	63.74	Promedio 3C	63.95

* Probetas que presentaron rotura frágil.

A,B,C, y D respectivamente, y teniendo en cuenta lo recomendado por el código AWS D1.4 para varillas de 1" de diámetro, se decidió precalentar únicamente el material B, a una temperatura de 100°C. Este precalentamiento se hizo con llama oxiacetilénica y la temperatura entre pases fue controlada mediante el uso de tizas térmicas que registran la temperatura entre 100 y 105°C.

Se seleccionó el electrodo E-9018-G de 3.2 mm de diámetro para las juntas a tope directo con múltiples pases, y de 4.0 mm de diámetro para las juntas a tope indirecto con un solo pase por cada cordón.

ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de tracción e impacto se aprecian en las tablas 2 y 3 respectivamente.

En la figura 1 se observan los perfiles de dureza en las juntas a tope.

Nota: Cada probeta posee una identificación de acuerdo con la siguiente especificación: H I-K.

H describe el tipo de junta así: (1) junta a tope directo con múltiples pases, (2) junta tope indirecto con barras como

elemento de unión con 8 cordones por junta y un solo pase por cordón, y (3) junta a tope indirecto con ángulo como elemento de unión (material D), con 4 cordones por junta y un solo pase por cordón.

I Identificación del fabricante y temperatura de precalentamiento: A, B (100°C) y C.

K Número del espécimen de prueba, que diferencia a cada una de las probetas del resto en un grupo de muestras iguales.

PROBETA No	RESISTENCIA AL IMPACTO {kg/mm/cm ²	
	VALORES	PROMEDIO
1A - 1	7.69	7.68
1A - 2	7.67	
1B - 1	8.14	7.40
1B - 2	6.67	
1C - 1	6.37	6.64
1C - 2	6.90	

Tabla No. 3 Resistencia al impacto en la ZAC de juntas a tope directo

Cumpliendo con lo especificado en los códigos AWS D1.4 e Icontec 2057, todas las barras de refuerzo soldadas soportaron a la tracción por lo menos el 125% del mínimo punto de fluencia entre los elementos unidos. Los aceros ASTM A615 grado 60 y ASTM A 706, poseen un esfuerzo de fluencia de 42 Kg/mm^2 lo cual implica que deben tener una resistencia a la tracción de 53 Kg/mm^2 ; comparando este último valor con los promedios calculados en la tabla 2, se observa que los diferentes tipos de junta cumplen a cabalidad el requisito.

Si analizamos ahora los resultados de la resistencia al impacto encontramos que: para el material A, aumentó la tenacidad en la ZAC en un 120%, el material B presentó una leve disminución de la tenacidad en la ZAC, del 11% aproximadamente, en tanto que el material C disminuyó en un 47%. Es importante observar que las probetas de material de base C presentaron la mayor deformación plástica y el máximo valor de tenacidad hallado en los materiales base. Por otro lado, la deformación y la tenacidad de la ZAC no son inferiores en gran proporción con respecto a la ZAC de los otros materiales en estudio.

La mayor parte de las probetas sometidas a macroataque presentaron fusión completa entre el metal base y el metal de aporte, para los tres tipos de juntas. Además, penetración completa en el pase de raíz para el caso de las uniones a tope directo.

En cuanto a la granulometría (ASTM E-112) de los materiales base se encontró que para los materiales A, B y C los tamaños correspondientes son N° 7, N° 5 y N° 8 respectivamente. Para el material D, se encontró una estructura propia de laminación.

El análisis metalográfico de la ZAC, reveló zonas de precalentamiento caracterizadas por la presencia de granos con tamaños que llegaron a N° 3 y N° 4 según la norma ASTM E-112, y con estructuras ferrítico-perlíticas.

También se detectó la presencia de estructuras ferrítico-perlíticas con afinamiento del tamaño de grano original.

El control de dureza, presentó resultados satisfactorio, ya que de acuerdo con el código AWS D1.1-88 se plantea como límite de dureza, al utilizar electrodos de bajo hidrógeno, un valor de 400 Vickers, y considera que con valores inferiores a éste no se presentarán estructuras frágiles ni ocurrirá agrietamiento en la ZAC.

CONCLUSIONES

- Que los aceros fabricados por las siderúrgicas A, B y C cumplieron con las propiedad mecánicas y los rangos de composición química especificados en las normas ASTM- A 706 y ASTM-A 615.
- Que los materiales A, B, C y D presentaron una buena aptitud para ser soldados, de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, tenacidad,

dureza y metalografía. Además todas las muestras presentaron un índice de carbono equivalente, menor o igual a 0.55%, con el cual no se necesita precalentamiento a excepción del material B, sin embargo tanto éste como en los demás conservaron sus propiedades de ductibilidad y resistencia después de haber sido soldados.

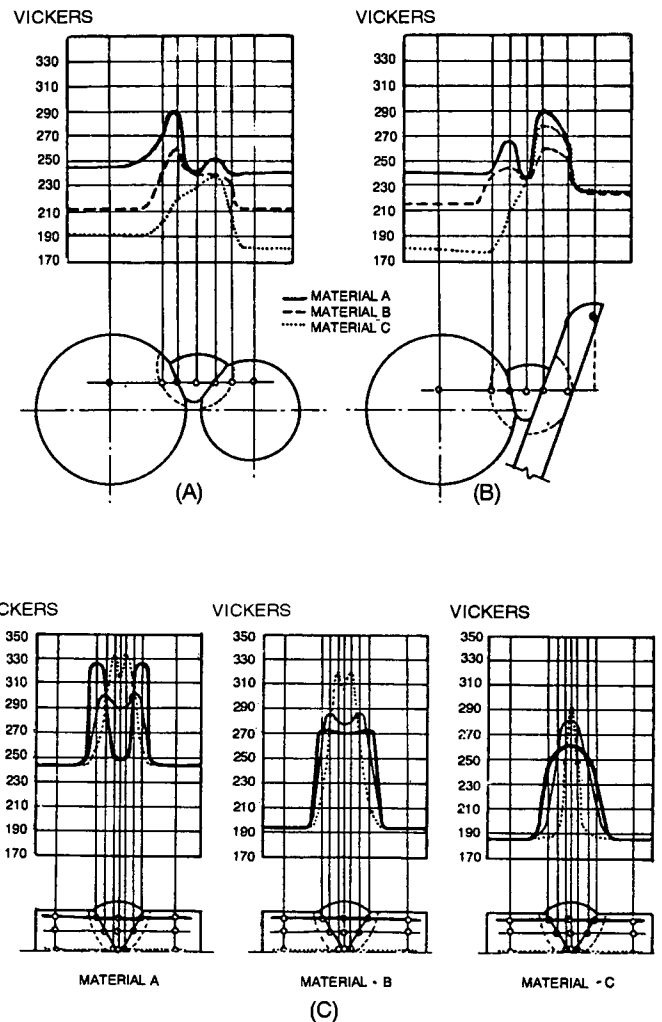


FIGURA 1
Perfiles de Dureza en las Juntas a Tope

Que no hay necesidad de precalentar las barras, cuando al conocer el índice de carbono equivalente este valor sea menor o igual al mínimo establecido por la norma para el diámetro de la barra y tipo de acero a usar.

- Que aunque la especificación estándar para varillas ASTM A615 establece claramente que la "soldabilidad no es parte de esta especificación", no se encontraron limitantes en los elementos químicos que afecten en gran medida la soldabilidad de estos aceros. Sin embargo, es indispensable antes de efectuar cualquier proceso de soldadura sobre estas ba-

rras contar con un informe sobre composición química de las mismas, el cual asegure que el procedimiento de soldadura es compatible con la química de estas varillas.

- Que las varillas que cumplen con la especificación ASTM A706 satisfacen las restricciones sobre la composición química que limitan el carbono equivalente a 0.55%.
- Que todas las juntas a tope directo o indirecto, sometidas al ensayo de tracción, presentaron ruptura dúctil sobre la barra a una distancia no menor de 2 diámetros de la junta, y cumplieron con el requisito de resistencia última exigido por el código AWS D1.4.
- Que el electrodo AWS E-9018G empleado, presenta óptima operatividad y en cuanto a su composición química cumple con lo especificado por la norma de electrodos de bajo hidrógeno de esta referencia.
- Que el depósito de soldadura nunca presentó durezas superiores a 400 Vickers, que es la máxima dureza que permite el código AWS D1.1/88, sección 11, cuando se utilizan electrodos de bajo hidrógeno.
- Que teniendo en cuenta los cuidados mínimos necesarios de secado y de mantenimiento con los electrodos revestidos de bajo hidrógeno se consiguen porcentajes de humedad del orden de 0.12%, con el cual no hay presencia de poros y grietas.
- Que después del ensayo de tracción, el material de aporte no presentó defectos o deformación apreciable.
- Que a pesar de la gran diferencia existente entre la tenacidad de los diferentes materiales base estudiados, la tenacidad que presenta la Zona Afectada por el Calor, ZAC de los mismos, soldados al tope directo, es muy similar; en promedio la tenacidad de la ZAC es $7.24 \text{ Kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$.
- Que en las juntas a tope directo (múltiples pases), la dureza en el depósito aumenta a medida que hay proximidad al cordón de raíz, a pesar del recocido que sufren los cordones de soldadura al ser aplicado otro cordón sobre ellos. Las mayores durezas al nivel del cordón de la raíz, se producen porque en esta zona hay una mayor dilución entre el metal base y el metal de aporte, y en consecuencia una mayor difusión de elementos tales como carbono y manganeso, los cuales contribuyen al aumento de la dureza.
- Que para las juntas a tope indirecto (un solo pase), el metal de aporte siempre presentó el mismo nivel de dureza (240 Vickers).
- Que las juntas a tope indirecto siempre, y en todas las zonas generadas por el proceso de soldadura presen-

taron menores durezas que en las juntas a tope directo.

- Que el material C, a pesar de su especificación en donde no incluye la soldabilidad, presentó la mejor disposición y propiedades finales al ser soldado, gracias a su composición química, tenacidad y resistencia mecánica.
- Que las juntas a tope indirecto con ángulo como elemento auxiliar, mostraron: la mayor facilidad de montaje, por ser autoalineante, el menor tiempo de elaboración, por su velocidad de enfriamiento y menor número de cordones, y la mayor facilidad de aplicación de la soldadura, por tener cuatro cordones en la misma cara.
- Que en la zona de sobrecalentamiento se presentan tamaños de grano grande (entre N° 4, N° 5), lo cual promueve formación de estructuras frágiles, debido a que un tamaño de grano grande desplaza hacia la derecha el punto de velocidad crítico de enfriamiento en los diagramas TTT. Como consecuencia, si la velocidad de enfriamiento del material a soldar es superior a la velocidad crítica de enfriamiento se formarán estructuras de tipo Widmanstaetten y/o Bainíticas, las cuales irán en detrimento de la ductilidad de la junta en esta zona. De acuerdo con lo anterior, se requiere que los materiales en lo posible presenten un tamaño de grano fino, lo cual se puede conseguir mediante la adición de elementos refinadores de grano, tales como Vanadio y Niobio.
- Que para las juntas a tope indirecto con ángulo como elemento auxiliar, se presentaron en éste las mayores durezas a nivel de la zona sobrecalentada como consecuencia de su contenido de Vanadio (0.1%) y de un enfriamiento más rápido, debido al efecto disipador de calor de la aleta del ángulo. Se debe aclarar que a pesar de lo anterior, no se presentaron niveles críticos de dureza.
- Que las inclusiones de escoria tienden a producir estructuras frágiles de forma columnar en su contorno, por lo cual una escoria atrapada puede llegar a ser un concentrador de tensiones localizadas haciendo posible el inicio de una grieta. Estas inclusiones son más críticas a nivel del cordón de la raíz porque sumadas a la alta dureza de esta zona, se presentan estructuras frágiles poco deseables.

RECOMENDACIONES

Crear programas de fomento, de ayuda a las universidades, de divulgación entre profesionales y de asesoría de proyectos específicos sobre estructuras soldadas, con concursos, publicaciones técnicas y divulgación en general, con el fin de entrenar a los ingenieros y arquitectos en el uso de la soldadura en las estructuras civiles.

Mantener y/o mejorar la composición química de las barras estructurales estudiadas, que permiten la utilización de procesos de soldadura en construcciones civiles. En especial se recomienda mantener bajo el nivel de Carbono (máximo 0.33%) y de Manganeso (máximo 1.2%), aumentando los niveles de Niobio, Vanadio y Molibdeno, los cuales mejoran la soldabilidad del acero.

Hacer estudios sobre el efecto del envejecimiento de las juntas estructurales, el efecto de la fatiga, y las técnicas de mantenimiento y reparación de las estructuras deterioradas.

Ejecutar un pase en caliente sobre el cordón de raíz para mejorar los niveles de dureza, generados inicialmente en éste.

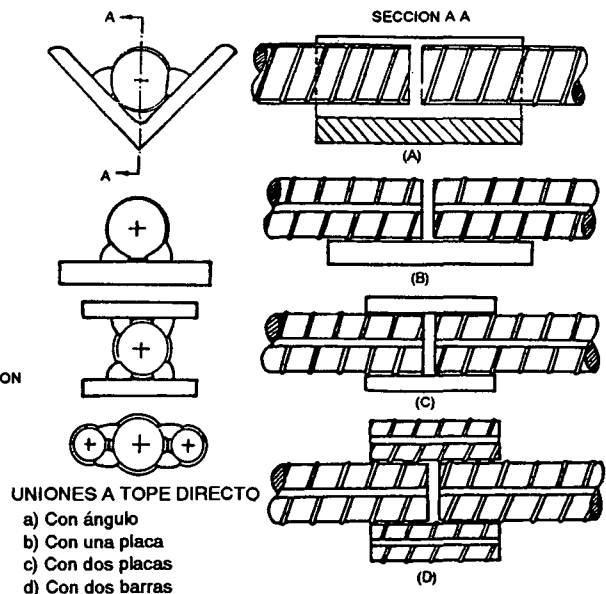
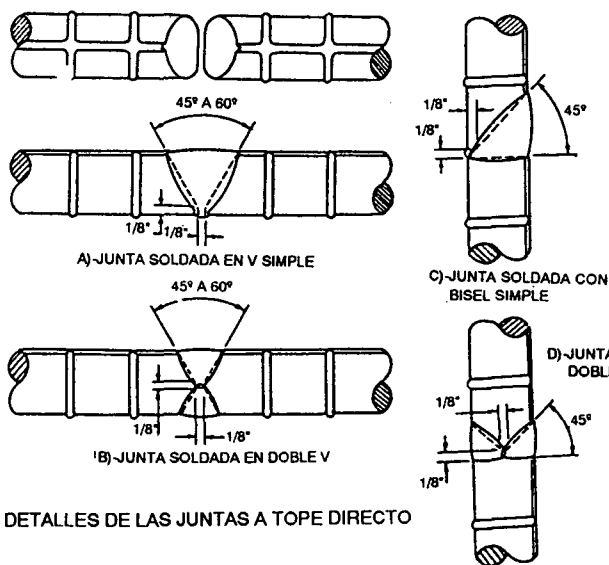
Realizar otros estudios sobre las juntas a tope directo e indirecto para posiciones de soldadura diferentes a la ya estudiadas y para diferentes procesos de soldadura.

Normalizar el ensayo de doblez para las juntas con barras estructurales de refuerzo soldadas y diseñar el dispositivo correspondiente.

Crear un código colombiano para soldar barras de refuerzo.

Desarrollar un estudio, para las juntas a tope directo, en el cual se analice la influencia de cada fase de soldadura en la microestructura y dureza de la junta soldada.

Se debe evitar la aplicación de puntos de soldadura o salpicaduras en la unión y en la zona externa a ella. Debido a que estos puntos producen un temple drástico localizado y como consecuencia se generan estructuras muy frágiles, las cuales actúan como concentradores de esfuerzos permitiendo el posible inicio de falla. Se recomienda iniciar el arco en una platina externa a la junta.



BIBLIOGRAFIA

BOLETIN TECNICO CONARCO No. 95, Noviembre de 1989. Introducción al proyecto de las Construcciones Metálicas Soldadas pp2.-44.

BOLETIN TECNICO CONARCO No. 84, Junio de 1986. Patología de la Unidad Soldada en los Aceros. pp.7-28.

STRUCTURAL WELDING CODE-REINFORCING STEEL, AWS D1.4-88 American Welding Society. Miami, Florida (1988)

CODIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMORRESISTENTES. Decreto 1400 de Junio de 1984.

ESTUDIO METALURGICO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ESTRUCTURAL AL C/Mn DE ALTA RESISTENCIA ASTM A815-80. Arroyo R. Tesis de Grado, U, VALLE. Cali 1987.

EVALUACION DEL PRECALENTAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES NACIONALES. Bejarano J. y Cuéllar G. Tesis de Grado, U. Nacional Bogotá 1990.

INFLUENCIA DEL MANGANESO EN LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICAS DEL DEPOSITO TIPO AWS E8018-C1. Aguilar Y. Tesis de Grado. U. Valle Cali 1987.

RECOMENDACIONES PARA SOLDAR VARILLAS DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO. De Buen Oscar, Publicación 293 del Instituto de Ingeniería, UNAM (1971) pp 387-402.

SIDERURGICALATINOAMERICANA, Varilla de Acero de Alta Ductilidad, Soldable, para la Construcción en Zonas Sísmicas Mexicanas No. 329, Septiembre de 1987 pp42-48.

SIMESA. Guia para los Ingenieros Calculistas y Constructores de Estructuras de Concreto. 7 ed. Medellín 1988 pp 2-6.

SOLDABILIDAD DE ACEROS ESTRUCTURALES DE ALTA Y BAJA RESISTENCIA PRODUCIDOS EN COLOMBIA, Escobar A. Tesis de Grado U. Nacional. Bogotá 1980.