

## EL RAZONAMIENTO CUALITATIVO EN INGENIERÍA

LUIS M. BOZZO

*Depto. de Ing. Construcción,  
Campus Norte UPC, 08034 Barcelona.*

### RESUMEN

El razonamiento cualitativo es un campo de investigación reciente en inteligencia artificial. Su objetivo es inferir de forma automática el comportamiento de un diseño preliminar, dada la representación declarativa de las leyes fundamentales del dominio y de la geometría y topología del diseño. Los modelos numéricos tradicionales derivan el comportamiento de un modelo representando parámetros según los números reales y siguiendo un procedimiento preestablecido como por ejemplo la eliminación de Gauss para resolver un sistema de ecuaciones lineales. Tales métodos son de poca utilidad en diseño conceptual pues requieren, generalmente, muchos parámetros que no son conocidos a priori. Además, no es fácil extrapolar resultados a partir de una única solución numérica. En contraposición, el razonamiento cualitativo representa parámetros por intervalos, y un procedimiento tipo búsqueda de soluciones determina un conjunto de soluciones cualitativas.

### SUMMARY

Qualitative reasoning is a new field of research in artificial intelligence. This new field derives the behavior of a device from a declarative representation of fundamental principles and a high level description of geometry and topology. Commonly used numeric methods derive the behavior of a model following an established procedure such as Gaussian elimination for a set of linear equations. Numeric methods are of limited use in conceptual design because they usually require many parameters which are not available at the conceptual stage of the design process and because at this stage the designer is concerned with overall and possibly undesired behavior. Besides, it is not easy to extrapolate results from a single numeric solution. In contrast, qualitative reasoning represents parameters by intervals and a search computation derives a set of possible qualitative solutions which are helpful to understand the behavior of proposed design.

### INTRODUCCIÓN

El diseño es un proceso complejo que, dadas una serie de restricciones en su función, forma, comportamiento y costo, entre otras, proporciona la descripción de un sistema o máquina. El diseño puede dividirse en diseño conceptual y diseño cualitativo. El diseño conceptual determina la descripción general, no detallada, del modelo describiendo elementos tales como, por ejemplo, la ubicación y número de muros de corte en un

Recibido: Agosto 1993

edificio. Una vez que el proyectista selecciona el diseño conceptual, un procedimiento de tipo numérico determina los valores precisos para los parámetros del modelo, tales como las dimensiones de los muros de corte o las características mecánicas de sus materiales. Existen en la actualidad procedimientos que pueden determinar dichos parámetros numéricos, incluso optimizando funciones como el peso de los materiales. El diseño conceptual, sin embargo, se realiza principalmente por ingenieros y arquitectos, pues no existen herramientas por ordenador que lo simplifiquen eficientemente.

Una propuesta para automatizar diseños innovadores emplea técnicas de sistemas expertos y soluciones cuantitativas<sup>10</sup>. Murthy y Addanki proponen una herramienta llamada PROMPT que modifica soluciones de diseño basándose en soluciones cuantitativas, orden de magnitud y reglas de modificación. Por ejemplo, si una determinada región de diseño resulta con valores de esfuerzos reducidos, una regla de modificación podría ser eliminar dicha región. Otra metodología para generar diseños óptimos emplea manipulación simbólica y leyes físicas expresadas como ecuaciones algebraicas<sup>1,3</sup>. Esta metodología obtiene las soluciones óptimas empleando técnicas de "propagación de restricciones". Su principal limitación actualmente es que se emplea en sistemas isostáticos, donde es relativamente sencillo obtener soluciones explícitas para las funciones incógnitas del modelo.

Se han propuesto además varios sistemas expertos para el diseño conceptual<sup>6,12</sup>. La experiencia, sin embargo, aunque es muy importante no es suficiente, en especial para diseños que no son rutinarios. Los sistemas expertos son útiles para seleccionar diseños que han funcionado adecuadamente en el pasado, pero la representación de conocimientos con reglas del tipo SI--ENTONCES es muy superficial. En ingeniería estructural y en otros dominios es fundamental el conocimiento de leyes físicas tales como el equilibrio o la compatibilidad durante el proceso de diseño.

La selección apropiada de diseños conceptuales es de la mayor importancia pues de ella depende, principalmente, el funcionamiento final del diseño. Por ejemplo, el diseño únicamente cualitativo de la distribución de esfuerzos en una pasarela colgante puede indicar la necesidad de una reducida cantidad de acero en los cables que la soportan, sin embargo, dicho análisis no indicará en absoluto qué pasaría si un cable se rompiera o los problemas dinámicos que pueden generarse por la excesiva flexibilidad de la estructura.

Durante el diseño conceptual el proyectista está interesado en comportamientos generales y en algún posible comportamiento problemático. Durante este proceso los datos de que dispone son normalmente incompletos, lo cual dificulta la elaboración de modelos numéricos. Aún disponiendo de suficientes datos y tiempo para la generación de un modelo numérico, es difícil razonar sobre su comportamiento conociendo únicamente dichos resultados numéricos, pues ellos son válidos, en general, sólo para los datos de entrada especificados y un cambio en los datos suele conducir a un nuevo proceso numérico. Dichos resultados numéricos son muy útiles en etapas posteriores del proceso de diseño pero no durante la etapa conceptual. El espacio de las soluciones conceptuales posibles para un problema de diseño es generalmente muy grande y es muy difícil considerar cada alternativa para su posterior elaboración detallada. De ahí la importancia de la correcta selección de un diseño conceptual que se comporte adecuadamente ante diversas solicitudes.

## EL RAZONAMIENTO CUALITATIVO

Las leyes que gobiernan el comportamiento de un sistema físico pueden ser resueltas por un proceso de tipo numérico, un proceso de tipo simbólico y un proceso de tipo cualitativo. Un procedimiento numérico o cuantitativo requiere el conocimiento preciso de diversos parámetros tales como la temperatura inicial y los coeficientes térmicos en un problema de difusión de calor. En el campo de la ingeniería estructural un procedimiento como el método de la matriz de rigidez obtiene una solución única para el sistema de ecuaciones que representa las leyes de equilibrio, compatibilidad y características del material.

Un procedimiento simbólico, como el empleado por “Máxima” y “Mathematica”, transforma las ecuaciones que representan las leyes físicas en relaciones explícitas para los parámetros incógnitas<sup>13</sup>. Por ejemplo, en un problema de difusión de calor este procedimiento determinaría la temperatura a lo largo del tiempo en función de la posición y los coeficientes térmicos, entre otros parámetros. Las principales desventajas de un procedimiento simbólico son que requiere un conocimiento preciso de las ecuaciones, además de la limitación computacional de poder emplearse sólo en modelos de reducida complejidad. Además, el comportamiento físico es difícil de explicar, basándose únicamente en las ecuaciones explícitas finales.

El razonamiento cualitativo representa las relaciones entre parámetros en un modelo y un procedimiento de búsqueda de soluciones determina los posibles valores para cada parámetro incógnita. En el razonamiento cualitativo no existe distinción entre parámetros de entrada o de salida pues todos los parámetros del modelo son igualmente representados. El espacio cuantitativo se define como la abstracción de todos los valores posibles de un parámetro en un reducido conjunto de intervalos y puntos representando los valores más característicos del parámetro. Por ejemplo, un momento concentrado tiene un número infinito de valores posibles con respecto a los números reales. Sin embargo, para el nivel de abstracción requerido en diseño conceptual se representa convenientemente por los siguientes valores cualitativos: {negativo, cero, positivo}.

La representación de conocimiento para diseños conceptuales debe retener las características más relevantes del diseño sin requerir información que pueda no estar disponible. Además, la representación debe permitir la inferencia automática de información útil para el diseño. Los valores cualitativos mencionados mantienen dichas características en muchos problemas. Por ejemplo, en el área de ingeniería estructural, informaciones útiles para el diseño durante la etapa conceptual son la dirección y el valor relativo de fuerzas, momentos, desplazamientos y giros en la estructura. Otra información útil en esta etapa es la evaluación de un posible colapso de la estructura debido a la falta de “camino de carga” alternativos.

El razonamiento cualitativo busca valores para cada uno de los parámetros incógnitas en un modelo. Por ejemplo, considérense seis parámetros con valores cualitativos desconocidos. Una búsqueda exhaustiva de las soluciones es ineficiente pues, considerando sólo dos valores cualitativos, {negativo, positivo}, existen  $2^6$  combinaciones posibles y la gran mayoría de dichas soluciones no cumplirían las leyes físicas. Existen procedimientos eficientes de búsqueda de soluciones en el razonamiento

cualitativo; sin embargo, en este punto, el objetivo es ilustrar la metodología y no el procedimiento de inferencia específico, el cual se explica brevemente más adelante.

## METODOLOGÍAS PREVIAS EN EL RAZONAMIENTO CUALITATIVO

Las metodologías previas en el razonamiento cualitativo son los modelos de componentes<sup>5</sup>, de procesos<sup>7</sup> y de restricciones<sup>9</sup>. Es conveniente indicar que todas estas metodologías buscan representar las mismas leyes físicas y la diferencia básica es cómo lograrlo, o a qué aspecto darle énfasis.

El modelo de componentes representa leyes físicas basándose en los estados cualitativos de componentes. Los valores cualitativos son: {positivo, cero o negativo}. Así la ley de flujo en una tubería se representa como tres estados cualitativos de un componente "tubería": el flujo es positivo, el flujo es negativo o el flujo es nulo.

El modelo de procesos representa leyes físicas explícitamente como agentes que determinan los estados cualitativos de los componentes. Los valores cualitativos pueden ser definidos por el usuario. Esta metodología define, además, relaciones entre las magnitudes de parámetros similares. Con esta metodología la ley de flujo en una tubería se representa como un proceso que afecta los estados cualitativos de un componente "tubería" pero no se definiría ningún estado cualitativo de un componente.

El modelo de restricciones representa leyes físicas directamente como ecuaciones cualitativas. En este modelo los valores cualitativos también son definidos por el usuario pero, a diferencia del modelo de procesos, no se definen relaciones entre parámetros. Con esta metodología la ley de flujo se representa simplemente como una ecuación válida para un determinado modelo. No se representan procesos ni componentes sino únicamente parámetros y restricciones.

Las mencionadas metodologías tienen varios inconvenientes para representar geometrías complicadas y relaciones espaciales entre componentes. Por ello, se han empleado principalmente en modelos unidimensionales para problemas de valor inicial<sup>2</sup>. Existen muchos sistemas físicos donde es más importante representar variaciones en el espacio que en el tiempo. En dichos problemas los componentes no cambian con el tiempo sino que varían sus estados cualitativos según su ubicación en el espacio. Usando estas metodologías previas es difícil representar un modelo formado por la misma clase de componente sólo ubicado en diferentes posiciones o siguiendo direcciones diferentes. La necesidad de una metodología más conveniente para dichos problemas ha sido establecida por Forbus<sup>8</sup> y más explícitamente por Cohn<sup>4</sup>.

Otro inconveniente importante de estas metodologías, cuando se aplican a sistemas espaciales, es que son muy ineficientes. Aún usando una implementación eficiente del modelo de procesos, el tiempo de cómputo para un problema simple de flujo unidimensional es de minutos. Considerando que una metodología para sistemas espaciales requiere más parámetros—en estructuras prismáticas tridimensionales existen doce parámetros en cada punto, seis fuerzas y seis desplazamientos— está claro que dichas metodologías no son computacionalmente viables en muchos problemas prácticos.

## METODOLOGÍA DEL RAZONAMIENTO CUALITATIVO ESPACIAL

Una metodología recientemente propuesta, el modelo cualitativo espacial, evita los inconvenientes antes mencionados<sup>2</sup>. La metodología es adecuada para problemas de valor frontera y hasta la fecha se ha aplicado a problemas estáticos. Igual que la metodología de componentes, las leyes físicas definidas en objetos como barras o soportes se representan según estados cualitativos. Así, por ejemplo, una barra tiene tres estados cualitativos con respecto a fuerzas axiales: la barra está en tracción, compresión o sin carga. Igual que la metodología de procesos, las leyes físicas definidas entre componentes se representan por procesos. Por ejemplo, el equilibrio en un nudo de una estructura aporticada está representado por el proceso de equilibrio, el cual determina los estados cualitativos del nudo. Esta representación evita tener que definir diferentes componentes para cada nudo formada por dos, tres, o más componentes.

El conocimiento heurístico puede usarse con el modelo espacial disminuyendo el número de estados cualitativos de los componentes o procesos y reduciendo así drásticamente el espacio de posibles soluciones. Sin embargo, como se ha indicado anteriormente, una metodología de razonamiento cualitativo no se debe basar fundamentalmente en la experiencia.

### Valores cualitativos y relaciones entre parámetros

Al igual que en la metodología de procesos, un parámetro queda representado por su valor cualitativo y por sus relaciones en magnitud con respecto a otros parámetros similares en el modelo. En contraste con las metodologías previas, el modelo espacial busca no sólo valores cualitativos sino, además, relaciones entre parámetros consistentes con las leyes físicas. Las relaciones actualmente definidas son {mayor que, igual que, menor que}.

Las relaciones adicionales entre parámetros tales como {mucho más grande, igual orden, mucho más pequeño} indican órdenes de magnitud y son comúnmente empleadas durante el diseño. Estas relaciones pueden fácilmente incorporarse al modelo espacial aunque aún no lo han sido.

### Topología y geometría

Un modelo queda representado por componentes y conexiones, las cuales pueden ser puntos, líneas o superficies. Los componentes tienen una dirección cualitativa que se representa por una de las trece orientaciones que definen un vector cualitativo en el espacio<sup>2</sup>. Por ejemplo, un vector {positivo, positivo, positivo} representa una orientación positiva según los ejes  $X, Y, Z$ .

Una transformación de ejes coordenados relaciona las leyes físicas definidas en componentes según ejes locales con leyes físicas definidas en ejes globales. Así se evita definir clases diferentes de componentes para un mismo componente únicamente orientado en otra dirección. Por ejemplo, empleando los modelos previos una viga y una columna quedan representadas por dos clases diferentes de componentes, lo cual se evita con el modelo propuesto.

## Cálculo cualitativo

Una solución cumple las leyes físicas si los valores cualitativos y sus relaciones son consistentes con respecto a las mencionadas leyes. Por ejemplo, considérense dos partículas moviéndose según la segunda ley de Newton,  $F = M A$ . Una solución cualitativa inconsistente podría indicar que las fuerzas y masas de ambas partículas son iguales pero que la aceleración de una de ellas es mayor que la de la otra.

Todas las metodologías previas generan soluciones inconsistentes, las cuales se evitan con el modelo espacial<sup>2</sup>. Para ello, el modelo usa cuatro técnicas en sucesivo orden de complejidad: 1) Operaciones básicas de suma, resta, multiplicación y división. Estas operaciones son similares a las de los números reales pero están definidas según intervalos. Así, por ejemplo, la suma de dos números positivos es otro número positivo de magnitud mayor que la de los dos sumandos. 2) Relaciones de transitividad tales como "si  $A > B$  y  $B > C$ , entonces  $A > C$ ". 3) Eliminación constante para ecuaciones lineales. Las ecuaciones lineales se expresan como la suma de parámetros y no incluyen multiplicaciones o divisiones entre parámetros incógnitas. La eliminación constante simplifica parámetros comunes entre dos ecuaciones y deriva una tercera. 4) Comprobación de consistencia entre ecuaciones no lineales. Las ecuaciones no lineales se expresan para la multiplicación y/o división de parámetros. La segunda ley de Newton, antes mencionada, es un ejemplo de una ecuación no lineal y de cómo la comprobación de consistencia puede determinar si la situación debe o no ser aceptada.

## Esquema de inferencia

El esquema de inferencia es el procedimiento usado para combinar estados cualitativos de componentes y conexiones para determinar soluciones globales. La inferencia está dividida en dos etapas, una de elaboración y otra de propagación de soluciones.

La elaboración se realiza sólo una vez al comienzo del proceso de inferencia y está motivada, pues un programa "inteligente" no debería tardar demasiado tiempo en problemas sencillos. Así, la elaboración determina valores cualitativos sin ambigüedad; por ejemplo, usando la conocida ley de Newton "reacción igual acción", una reacción se puede determinar sin ambigüedad conociendo la acción. La elaboración determina además problemas mal condicionados como la inestabilidad de un sistema estructural.

La propagación de soluciones en el modelo espacial es sumamente eficiente pues combina inducción ("backward chaining") con deducción ("forward chaining"). La propagación por inducción empieza suponiendo un estado cualitativo para un componente en el modelo. Este estado cualitativo debe tomar valores conocidos para parámetros del componente y debe satisfacer, además, las leyes físicas que gobiernan su comportamiento. A partir de los valores incorporados por la inducción, la propagación por deducción determina valores inferidos sin ambigüedad, siguiendo caminos a lo largo de conexiones y componentes. La propagación por inducción reduce el número de posibles estados cualitativos, disminuyendo notablemente la combinación "explosiva" de dichos estados.

El esquema de inferencia es conceptualmente similar al método de la flexibilidades en ingeniería estructural. La propagación por inducción separa un componente

produciendo un “diagrama de cuerpo libre” para el cual asume valores cualitativos de sus parámetros. Dichos valores cualitativos se aplican en las conexiones y la propagación por deducción infiere nuevos valores cualitativos consistentes con las leyes del equilibrio y la compatibilidad. Si el diagrama de cuerpo libre transforma la estructura en una isostática, la propagación por deducción inferirá valores para todos los parámetros. Si éste no es el caso, la propagación por inducción supondrá un nuevo estado cualitativo para otro componente del modelo. El esquema de inferencia prosigue hasta determinar valores para todos los parámetros del modelo.

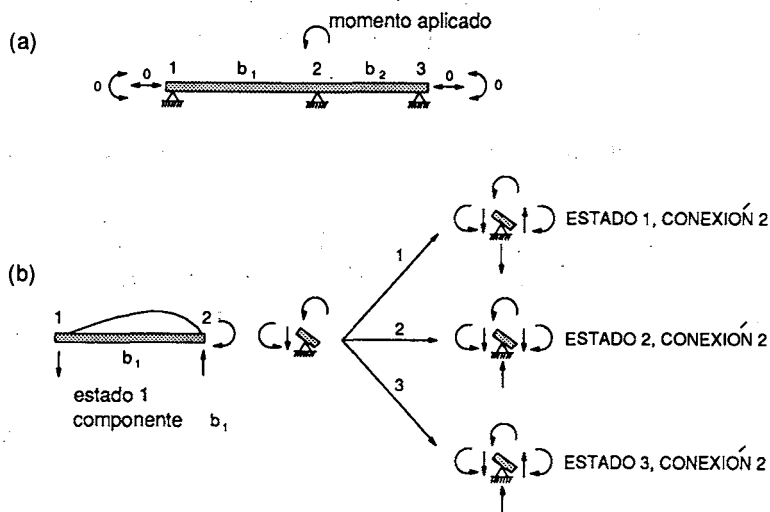


Figura 1. (a) Viga continua con un momento concentrado aplicado. (b) Estados cualitativos del componente  $b_1$  y de la conexión  $c_2$ .

La Figura 1 representa el modelo de una viga continua de dos tramos con un momento concentrado de sentido antihorario aplicado sobre el apoyo central. La elaboración determina que los momentos flectores y fuerzas axiales en las conexiones 1 y 3 son nulos. La propagación por inducción supone el estado 1 del componente  $b_1$ , presentado en la Figura 1b. La propagación por deducción determina que el momento flector para el componente  $b_2$  en la conexión 2 sigue un sentido antihorario (la Figura 1b presenta acciones aplicadas en las conexiones, y no en los componentes, que son iguales y opuestas). Seguidamente la propagación por inducción es requerida nuevamente y así se determinan los tres estados para la conexión 2 mostrados en la figura.

El resultado final del esquema de inferencia determina que la conexión 2 gira en sentido antihorario y que los momentos flectores en dicha conexión son contrarios al momento aplicado. La reacción vertical en la conexión 1 es hacia abajo y en la conexión 3 es hacia arriba. Sin conocer los valores de las longitudes o rigideces de los componentes no se puede determinar la dirección de la reacción en el apoyo central.

## Implementación

La metodología espacial ha sido implementada, para ingeniería estructural y en el dominio de estructuras prismáticas, en un programa llamado *Agrippa*, usando el lenguaje Prolog<sup>2</sup>. La información se representa según un escenario con seis metaclases: nombre del modelo, objetos, atributos de los objetos, valores de los parámetros, relaciones de los parámetros y estructuras del sistema. El nombre del modelo es un identificador para el modelo en particular. Los objetos son los componentes tales como barras, cargas y apoyos definidos en el modelo. Los atributos son la geometría y la topología. Los valores de los parámetros se almacenan usando árboles  $N + K$ <sup>11</sup>. Las relaciones entre parámetros se almacenan usando árboles AVL. Las estructuras del sistema representan información con respecto al modelo, como la clase de pórtico (plano o tridimensional).

## EJEMPLOS DE RAZONAMIENTO CUALITATIVO

Para ilustrar el tipo de información que puede ser inferida por el programa *Agrippa*, considérese el pórtico simétrico, sometido a una carga excéntrica, ilustrado en la Figura 2a. Las columnas tienen la misma longitud y están hechas del mismo material aunque no se conocen sus valores numéricos. La carga vertical está aplicada a la izquierda del centro de simetría del pórtico.

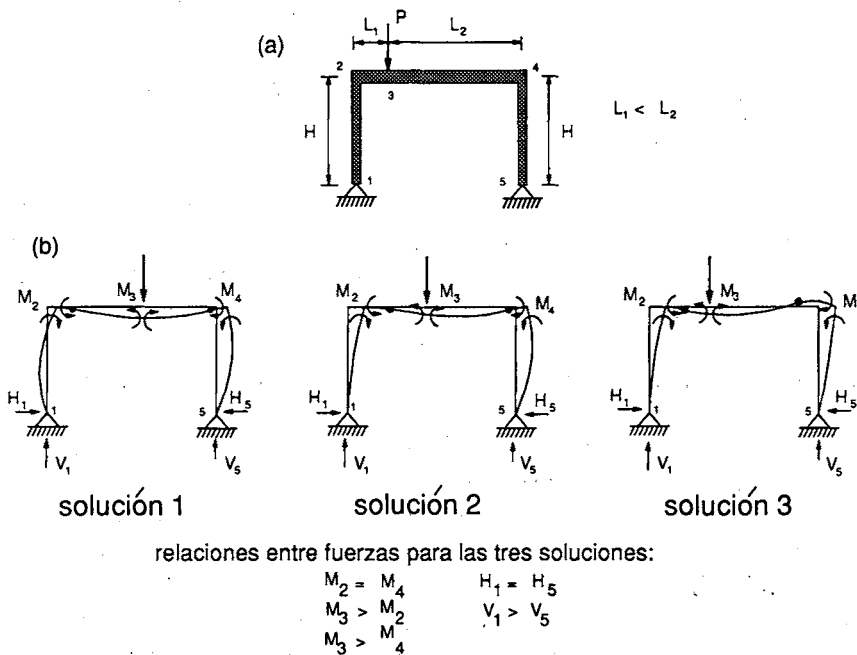


Figura 2. (a) Pórtico simétrico sometido a carga asimétrica. (b) Tres únicas soluciones cualitativas que representan el comportamiento estructural del pórtico.



*Agrippa* infiere que, con independencia de la longitud de las columnas y viga o de las propiedades del material, sólo existe una solución para las fuerzas: las columnas están en compresión aunque la fuerza de compresión en la columna izquierda es siempre mayor que en la columna derecha. Los momentos flectores en los extremos de las columnas son iguales y siguen las direcciones mostradas en la figura. El momento máximo es positivo y actúa en el punto donde se aplica la carga vertical. Las fuerzas cortantes en las columnas son iguales y opuestas, según se indica en la Figura 2b.

En relación a los desplazamientos, *Agrippa* infiere tres posibles soluciones cualitativas, según se indica en la Figura 2b. El pórtico siempre se desplazará hacia la derecha y el punto donde se aplica la carga siempre sigue la dirección de la carga.

Aún para ingenieros estructurales con experiencia, estos resultados no son fáciles de inferir; en particular la dirección en que se desplazará el pórtico con independencia del material y dimensiones. Esta información es además útil para el proyectista pues proporciona claves para la comprensión de su comportamiento.

Como segundo ejemplo, considérese el pórtico tridimensional sujeto a cargas laterales mostrado en la Figura 3a. No se conocen las características del material o las dimensiones de los componentes excepto que la estructura es simétrica tal como se indica en la figura. Este modelo representa una sección superior del viaducto Cypress (Oakland, California) que colapsó trágicamente durante el terremoto de Loma Prieta en 1989. Para viaductos cortos puede considerarse que existe un cierto apoyo longitudinal, pero para estructuras largas, como la de dicho viaducto, este apoyo es inexistente.

El razonamiento cualitativo indica que hay una solución única con respecto a fuerzas y dos soluciones con respecto a desplazamientos. La solución con respecto a fuerzas se ilustra en la Figura 3b. La solución indica que el componente  $b_1$  está siempre en compresión y su magnitud es igual a la de la reacción vertical en el apoyo móvil. El componente  $b_2$  está sometido a un estado de esfuerzos complejo incluyendo compresión, cortante biaxial, flexión biaxial y torsión. El componente  $b_4$  está en compresión y flexión biaxial constante.

Las dos soluciones con respecto a desplazamientos son iguales excepto por el giro en el extremo del apoyo móvil, el cual puede ser positivo o negativo. Para ambas soluciones los desplazamientos en el centro de simetría son negativos, respecto de los ejes  $Z$  y  $X$ . El giro en dicho punto respecto del eje  $Y$  es siempre negativo. El desplazamiento según el eje  $Z$  en la conexión  $c_3$  es negativo. Los giros según los ejes  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  son, respectivamente, positivo, negativo y positivo.

La información derivada por *Agrippa* es útil para entender los mecanismos de transmisión de cargas en el viaducto. Una evaluación de la solución indica que el diseño conceptual propuesto no es conveniente, pues el componente  $b_2$  está sujeto a un estado de sollicitaciones complejo que incluye torsión. Una evaluación posterior, usando el programa, indica que el diseño no tiene redundancia estructural pues si el componente  $b_2$  falla en torsión la estructura colapsaría debido a la falta de "camino de carga" alternativos que transmitan las cargas laterales.

En la referencia [2] se incluyen otros ejemplos para estructuras planas y en tres dimensiones, presentando con más detalle el proceso de inferencia.

Es importante, además, resaltar que el cálculo cualitativo empleado por *Agrippa* evitó la ambigüedad en todos los ejemplos considerados en la referencia [2], pues las

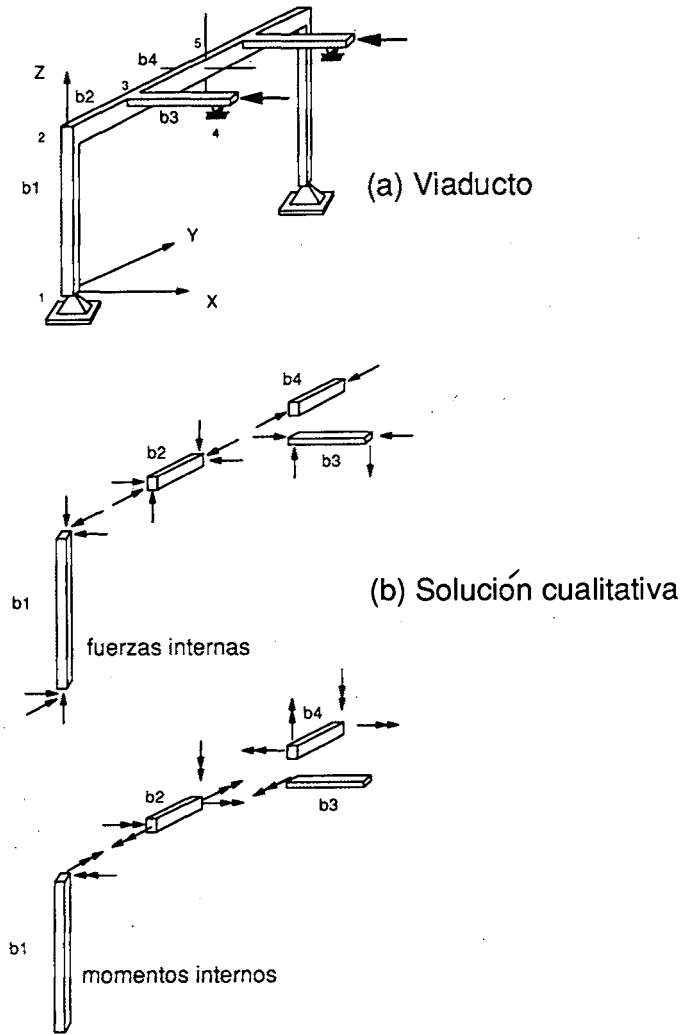


Figura 3. (a) Modelo cualitativo del viaducto Cypress. (b) Solución cualitativa única.

soluciones inferidas siempre correspondieron a soluciones físicas posibles.

## SÍNTESIS DE DISEÑO

La síntesis automática de diseños conceptuales que cumplan una serie de restricciones en cuanto a forma, función y comportamiento, entre otras, es aún un problema abierto, en particular para diseños innovadores o no rutinarios.

Las ideas y técnicas presentadas en este trabajo, pueden, sin embargo, emplearse con éxito en esta difícil área, por lo menos cuando la topología del diseño conceptual

es conocida. Para ello, debe indicarse el comportamiento deseado del modelo. La geometría se infiere entonces de acuerdo con las leyes físicas del dominio.

Considérese, por ejemplo, el problema de diseño siguiente: se desea transferir a dos apoyos una serie de cargas verticales iguales e igualmente espaciadas. Se sabe que entre cada carga existe un componente, por lo que la topología está definida por los puntos de aplicación de las cargas. El comportamiento estructural deseado corresponde a que los componentes estén solicitados únicamente por fuerzas axiales y no por momentos flectores.

La solución automatizada de este problema de síntesis de diseño puede abordarse con éxito con el razonamiento cualitativo, el cual determinará dos posibles soluciones: el diseño es o bien un arco (estructura sometida a compresión pura) o bien un cable (estructura sometida a tracción pura).

## CONCLUSIONES

El diseño es un problema muy complejo para su total automatización, aunque el razonamiento cualitativo es un paso importante hacia dicho objetivo. La representación de las leyes físicas, la geometría y la topología a un nivel de abstracción alto, pero permitiendo la inferencia de información útil para el diseño, es sumamente importante para la evaluación automatizada del comportamiento de un determinado diseño conceptual.

Este trabajo presenta una metodología para razonamiento automatizado llamada modelo espacial. La representación está basada en la abstracción de un parámetro en 1) el signo del parámetro {positivo, cero, negativo} y 2) las relaciones en magnitud, {igual que, menor que, mayor que}. El esquema de inferencia es muy eficiente, pues incorpora tanto inducción como deducción, reduciendo considerablemente la posible combinación "explosiva" de estados cualitativos de componentes.

El modelo se ha implementado en el campo de la ingeniería estructural, donde las leyes físicas son el equilibrio, la compatibilidad y las leyes del material. Dichas leyes se representan por estados cualitativos de componentes (como, por ejemplo, barras o apoyos). El equilibrio o la compatibilidad en las conexiones se representan por procesos. El programa infiere el comportamiento de un determinado diseño obteniendo la dirección y valor relativo de las fuerzas y los desplazamientos en estructuras tridimensionales de barras. Las soluciones obtenidas por el programa en muchos casos son difíciles de inferir, aún para experimentados proyectistas de estructuras.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo está basado en mi tesis doctoral realizada en la Universidad de California en Berkeley. Por ello deseo agradecer a mi director de tesis, Prof. Gregory Fenves y todos los profesores de U.C. Berkeley por su constante apoyo durante seis años.

## REFERENCIAS

1. A. Agogino y A. Almgren, "Techniques for Integration Qualitative Reasoning and Symbolic Computation in Engineering Optimization", *Engineering Optimization*, Vol. 12, pp. 117-135, (1987),
2. L. Bozzo y G. Fenves, "Qualitative Reasoning About Structural Behavior for Conceptual Design", *UCB/SEMM-92/26 report*, University of California, Berkeley, (1992).
3. J. Cagan y A. Agogino, "Dimensional Variable Expansion —A Formal Approach to Innovative Design", *Research in Engineering Design*, Vol. 3, no. 2, pp. 75-85, (1991).
4. A. Cohn, "Qualitative Reasoning", *Advances Topics in AI*, 2nd Advanced Course, ACAI'87, Nossun R. (ed.), Norway, (1987).
5. J. De Kleer y J. Brown, "A Qualitative Physics Based on Confluences", *Artificial Intelligence*, Vol. 24, (1984).
6. S. Fenves y E. Ibarra-Anaya, "A Knowledge-Based System for Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings", *Computer Utilization in Structural Engineering*, pp. 428-437, Nelson J. Jr. (ed.), ASCE, San Francisco, (1989).
7. K. Forbus, "Qualitative Process Theory", *Artificial Intelligence*, Vol. 24, (1984).
8. K. Forbus, "Qualitative Physics: Past, Present and Future", *Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems*, D. Weld y J. De Kleer (eds), Morgan Kaufmann, California, (1990).
9. B. Kuipers, "Commonsense Reasoning About Causality: Deriving Behavior from Structure", *Artificial Intelligence*, Vol. 24, (1984).
10. S. Murthy y S. Addanki, "PROMPT: An Innovative Design Tool", *Expert Systems in Computer-Aided Design*, pp. 323-347, J. Gero (ed.), Sydney, Australia, (1987).
11. R. O'Keefe, *The Craft of Prolog*, MIT Press, Cambridge, (1990).
12. M. Subramani, P. Georgeli, C. Conley, J. Abel y A. Zaghaw, "A Knowledge-Based Approach to Structural Design of Earthquake-Resistant Buildings", *report NCEER-89-0006*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, (1989).
13. S. Wolfram, *Mathematica, a System for Doing Mathematics by Computer*, Addison-Wesley, New York, (1991).