

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE CONFORT EN TÚNEL DE VIENTO

Mario Eduardo De Bortoli

Doctor en Ingeniería, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería de la UNNE, Resistencia, Argentina.

Es profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNNE desde 1989. Trabaja en programas de investigación y consultoría en el área de estructuras. Es Vice-decano de la Facultad de Ingeniería, UNNE. Publica regularmente en revistas y congresos científicos.

Jorge Omar Marighetti

Magister en Mecánica Aplicada, UNNE, Resistencia, Argentina.

Ingeniero Mecánico, UNNE, Resistencia, Argentina.

Desde 1992 trabaja en la Facultad de Ingeniería de la UNNE, donde ingresó como Auxiliar de 1º en Investigación. Actualmente es Profesor Adjunto con dedicación exclusiva. Trabaja en programas de investigación y actividades de consultoría de ingeniería de viento. Publica regularmente en revistas y congresos científicos.

Adrián Roberto Wittwer

Doctor en Ingeniería, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Ingeniero Mecánico, UNNE, Resistencia, Argentina.

Desde 1993 trabaja en la Facultad de Ingeniería de la UNNE, donde ingresó como becario de posgrado. Actualmente es Profesor Adjunto con dedicación exclusiva. Trabaja en programas de investigación y actividades de consultoría de ingeniería de viento. Publica regularmente en revistas y congresos científicos.

Resumen

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías, en muchas ciudades de nuestro país se construyen edificios de gran altura. Estas construcciones usualmente se elevan en zonas suburbanas, donde la altura promedio de las construcciones vecinas es inferior a 7 metros. Así, es común que se produzcan situaciones de viento adversas en áreas de circulación, pasajes y zonas abiertas, que comprometen la correcta utilización de estos lugares y eventualmente pueden poner en riesgo la seguridad de los usuarios.

Estas situaciones pueden preverse de manera adecuada mediante estudios de confort a través de ensayos en túnel de viento. La evaluación de las condiciones de viento previstas a nivel de los peatones actualmente se realiza utilizando criterios probabilísticos. En el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE se cuenta con un túnel de viento de capa límite y el instrumental requerido para implementar este tipo de ensayos.

En este trabajo se realiza una descripción de las dificultades para realizar este tipo de estudio, los criterios usados para el análisis y los procedimientos para evaluar este tipo de problemas, a partir de ensayos en túnel de viento, teniendo en cuenta la evolución de la Ingeniería de vientos y los estudios actualizados que están realizando.

Abstract

The development of technology has permitted built in our country higher buildings. These constructions usually are in suburban terrain where the high of the surrounding are about 7 m. In this situation is normal that region with adverse flow is produce between construction or open areas where the spatial correct utilization is compromised or eventually could happen dangerous situations for the .

These situations could be analysed adequately with comfort wind test using wind tunnel test. The evaluations of the wind conditions are realized using probabilistic criteria. The UNNE Aerodynamic Laboratory has a boundary layer wind tunnel and the adequate instrumental of this characteristics study.

This work presents a description of the main difficulties for these studies, the criteria and procedure for the evaluations problems in wind tunnel test, considering the actual evolutions in this area.

1. Introducción

La construcción de edificios altos modifica la estructura turbulenta del flujo de viento atmosférico e introduce alteraciones en el medio ambiente de las ciudades. En algunos casos, la presencia de este tipo de edificación origina áreas no confortables y, en algunos casos, condiciones de viento peligrosas a nivel del suelo. Como consecuencia, se debieron plantear criterios de aceptabilidad para los niveles velocidad de viento en áreas públicas, agregándose una nueva condición de diseño a las futuras construcciones de edificios.

Básicamente, la situación se produce porque las velocidades relativamente altas que normalmente se producen a gran altura, al incidir sobre las construcciones elevadas son desviadas a nivel del suelo, originando estas situaciones imprevistas. Como caso particular, en Japón, donde en los últimos años aumentó considerablemente la concentración de población en áreas metropolitanas y se comenzó a construir cada vez más edificios de gran altura, los peatones comenzaron a tener grandes dificultades para caminar en días ventosos en muchas ciudades. Cuando los edificios están contruidos en áreas residenciales, además pueden producirse fuertes vibraciones en construcciones de madera, rotura de techos de teja, ráfagas invadiendo zonas comerciales, etc.

En muchos casos existen disputas judiciales de los residentes para denegar la autorización de la construcción de nuevos departamentos y este tipo de situación ha aumentado en los últimos años, originando preocupación en la industria de la construcción. Siendo que los daños son varios y numerosos, debieron adecuarse las normas para construcciones en altura y las áreas de protección. En casos extremos, para disminuir las disputas judiciales y evitar el pago de indemnizaciones en concepto de daños y perjuicios, se redactaron reglamentaciones. Como ejemplo, se menciona el "Construction Guidance Requirement", que establecía que las construcciones que tienen más de 5 pisos, con un área techada superior a 300 m² deben acompañar el derecho de construcción con un ensayo en túnel de viento. A esta reglamentación se opusieron algunos academicistas, y como alternativa se establecieron una serie de criterios para la predicción de fuertes vientos.

Las experiencias y mediciones realizadas en escala natural fueron ampliamente confirmadas por ensayos en túneles de viento con modelos a escala reducida,

verificándose que condiciones de vientos fuertes a nivel del suelo son más frecuentes en edificios significativamente más altos que su entorno.

Existen diversos mecanismos que conducen a este tipo de situación. El flujo que se aproxima a una construcción se bifurca hacia la parte superior y a los laterales del edificio. La separación del flujo con los bordes angulosos generalmente ocurre en los bordes frontales. La presencia de un gradiente vertical de la presión dinámica local en un flujo de capa límite turbulenta induce a un flujo descendente a lo largo de la cara frontal por debajo del punto de estancamiento. El flujo descendente incrementa las velocidades del viento en los lados laterales cerca de la base de la construcción y, además, origina un flujo inverso y causa condiciones ventosas en la base frontal del edificio. Para edificios relativamente anchos hay una tendencia para la formación de vórtices organizados en la base de la construcción. Finalmente, en la estela, las condiciones de flujo son de menor velocidad media, siendo áreas que generalmente reciben mayor protección.

Los ensayos en túnel de viento mostraron que, cuando se generan pasajes o espacios entre pares de edificios o grupos de edificios altos para ciertas orientaciones, se ponen de manifiesto vientos importantes. Las velocidades a nivel del suelo debidas a los gradientes horizontales de presión son particularmente graves para edificios altos ya que la presión en la estela es más o menos dependiente de la velocidad en la parte superior del modelo y entonces la presión diferencial se incrementa.

2. Dificultades en el estudio de problemas de confort en túnel de viento

Básicamente los efectos del viento sobre peatones pueden ser mecánicos y térmicos, y en ambos casos el modelado en túnel de viento es dificultoso. En primer lugar, modelar el cuerpo humano es muy difícil y resulta casi imposible reproducir su comportamiento mediante un modelo mecánico. En el caso de los efectos térmicos, aparece la dificultad de considerar la pérdida de calor que experimenta el cuerpo humano.

Los cambios de velocidad y, especialmente, la turbulencia relacionada con frecuencias de 1.0 a 0.3 Hz provocan gran influencia sobre el cuerpo humano. Es muy difícil reproducir vientos turbulentos asociados a estas frecuencias en túneles de viento convencionales. Para el estudio de los efectos de viento sobre peatones es necesario complementar ensayos sobre modelos del cuerpo humano y sobre personas en túnel de viento, así como experimentos realizados con viento natural [Murakami, 1982].

La aplicación del túnel de viento para analizar este tipo de problema tuvo un gran impulso durante la década del '70. Diferentes métodos de estudio fueron implementados en esa época permitiendo establecer criterios de confort más generales. Se realizaron estudios en grandes túneles sobre personas caminando en diferentes situaciones sometidas a flujos uniformes y no uniformes con pantallas de protección. Mediante el uso de balanzas se midieron fuerzas de arrastre sobre personas. Los efectos térmicos se evaluaron sometiendo a personas a la acción del viento durante periodos largos y estableciendo el grado de enfriamiento.

Simultáneamente, se realizaron experimentos sobre personas bajo la acción del viento natural. Un número importante de peatones elegidos al azar y las condiciones

al caminar fueron observadas y analizadas para establecer grados de irregularidad y de balance [Murakami et al., 1979].

En la actualidad se siguen realizando estudios en túnel de viento para mejorar los criterios vinculados a confort y seguridad con relación al viento. Recientemente, fue reportado un estudio realizado a partir de ensayos en el túnel de viento “Jules Verne”, Nantes, Francia, evaluando la respuesta de un individuo sometido a un cambio brusco de velocidad de viento [Jordan et al., 2008]. En Japón, se realizaron estudios en túnel de viento para establecer la relación entre la densidad de las construcciones y la velocidad de viento promedio a nivel de peatones en zonas residenciales [Kubota et al., 2008].

3. Criterios de aceptabilidad para vientos a nivel de peatones

Uno de los primeros intentos para definir un criterio para niveles de viento fue realizado por el almirante Beaufort en 1806, estableciendo una escala absoluta que aún hoy se usa en navegación. Para efectos de viento sobre personas, diferentes criterios de aceptabilidad han sido sugeridos en los últimos 30 años. Penwarden reinterpretó la escala Beaufort para vientos a nivel de peatones incorporando el concepto de ráfaga promedio. El criterio de Davenport, para peatones y actividades al aire libre en general, establece las velocidades usando la escala de Beaufort. Cada grado de la escala está relacionado a su probabilidad de excedencia usando tiempos de recurrencia de una semana, un mes y un año.

Otro tipo de criterio utiliza la velocidad de viento instantánea máxima diaria, estableciendo el valor de 10 m/s y límites de probabilidad de excedencia de 10, 22 y 35 % de acuerdo al tipo de área en relación a los efectos de viento [Murakami, 1982]. Es importante mencionar la utilización del parámetro de Nuisance v en muchos de los trabajos. La expresión adimensional de este parámetro es:

$$v = \frac{U + \gamma \sigma_u}{U_0 + \gamma \sigma_{u0}} \quad (1)$$

donde U_0 y σ_{u0} son valores de referencia de la velocidad media y la desviación estándar del viento, mientras que U y σ_u son los valores medidos en cada punto. El coeficiente γ valora la turbulencia y puede variar de acuerdo a diferentes autores de 1 a 3.5 [Gandemer, 1982].

En general, los criterios se expresan para uno o más de las siguientes condiciones:

1. Confortable por largos periodos.
2. Confortable por periodos cortos.
3. Confortable para caminar.
4. Inconfortable para caminar.
5. Peligroso o inaceptable.

Es importante mencionar que las categorías 1 a 4 expresan un límite superior, mientras que 5 es un límite inferior.

3.1 El concepto de promedio equivalente

Un determinado lugar o espacio puede ser ventoso cuando el viento promedio es elevado, existen ráfagas, o bien, se producen picos de ráfagas aisladas. La mayoría de los criterios usan solo uno o dos de estos tres tipos de velocidad de viento que pueden afectar la confortabilidad de una actividad determinada. La velocidad promedio es, en general, un promedio horario. La ráfaga efectiva es el promedio U más el coeficiente γ multiplicado por el valor rms de las fluctuaciones en torno a U . Finalmente, la ráfaga pico es el máximo de 2 a 3 segundos de duración en el periodo de una hora, un valor extremo que no siempre se puede obtener a partir del promedio o del valor rms.

Durgin [1990, 1997] propuso utilizar un promedio equivalente que tiene en cuenta los efectos del promedio, el rms y el pico de ráfaga del viento. Con este fin definió el promedio equivalente (PE) como el mayor valor de:

- El viento promedio dividido por 1.103.
- La ráfaga efectiva (con $\gamma = 1.5$) dividido por 1.434.
- El pico de ráfaga dividido por 1.875.

Cuando en un lugar determinado, la intensidad de turbulencia es menor al 20%, PE generalmente queda determinado por el valor promedio, mientras que en zonas donde la intensidad de turbulencia supera el 20%, PE estará definido por el valor de ráfaga efectivo o el valor pico.

Usando el concepto de PE aplicado a 900 puntos medidos en ensayos en túnel de viento, Durgin determinó que si solo se consideran las condiciones 4 y 5, en el 95% de los casos el valor de viento promedio definirá el PE. Para las categorías 1 y 2, referidas a actividades que implican permanecer en el lugar durante un cierto periodo, la ráfaga efectiva y el pico tienden a ser más críticos.

3.2 Criterio probabilístico basado en el promedio equivalente

En general, los criterios de confort actuales establecen que un valor de velocidad determinado no debe ser excedido más que un cierto porcentaje de tiempo. En un gráfico que represente la velocidad de viento versus la probabilidad de excedencia, esto define un punto. Estos gráficos pueden aproximarse mediante la distribución de Weibull, definida como:

$$P(U > U_0) = \exp[-(U_0 / U_R)^k] \quad (2)$$

Siendo $P(U > U_0)$ la probabilidad de excedencia de la velocidad U respecto a la velocidad U_0 en consideración, U_R la velocidad de referencia, y k el exponente cuyo valor es aproximadamente 2.

Durgin [1997], con datos de diferentes autores, calculó U_R para las categorías 1 a 5, definidas anteriormente, que son parte de cualquiera de los criterios utilizados por

los autores cuyos valores utilizó para el análisis. Utilizando $k = 2.0$ en la expresión de Weibull, se obtiene:

$$U_R = U_0 / [-\ln P(U > U_0)]^{0.5} \quad (3)$$

Si bien U_R tendrá valores distintos para velocidad promedio, ráfaga efectiva y valor pico, usando el concepto de PE esas diferencias se eliminan en gran medida. Examinando críticamente los valores obtenidos, Durgin sugiere los siguientes valores promedio:

Tabla 1. Valores promedio sugeridos para el criterio.

Categoría	Valores sugeridos para U_R
1	2.00
2	2.85
3	3.70
4-5	5.10

Utilizando estos valores para U_R , mediante la expresión de Weibull, es posible trazar las curvas que delimitan las 5 categorías. La Figura 1 muestra las curvas que indican la distribución de probabilidad de los vientos horarios promedio equivalentes propuestos. Se incluyen además, los valores de otros autores que corresponden a otros criterios y que se usaron para obtener U_R , pero que previamente fueron “corregidos” al promedio equivalente para su comparación, verificándose una buena correspondencia.

Es importante mencionar que el criterio cubre las 5 categorías comúnmente usadas para definir actividades de peatones y que el valor $k = 2.0$ en la expresión de Weibull es una simplificación que puede introducir errores, aunque los mismos pueden ser acotados.

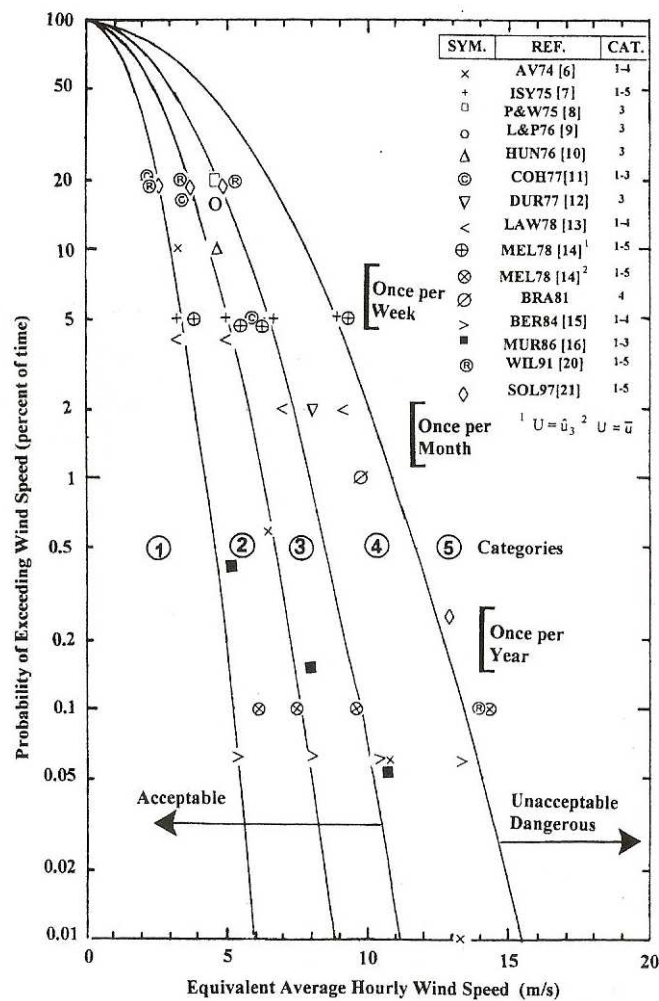


Figura 1. Distribución de Probabilidad de vientos horarios promedio equivalente propuestos [Durgin, 1997].

4. Estudios de confort a nivel de peatones en túnel de viento

Los criterios descritos anteriormente, normalmente se aplican a partir de datos obtenidos de ensayos en túnel de viento. Siendo común este tipo de análisis en casos de edificios altos, es necesario utilizar modelos a escala 1/200 a 1/1000, de acuerdo a las dimensiones de la cámara de ensayos. Las velocidades de viento generalmente son medidas a alturas muy bajas que corresponden a aproximadamente 2 metros en el en el prototipo.

Existen una serie de exigencias particulares para este tipo de ensayo. En este trabajo, se tratarán tres tópicos particulares que son; la instrumentación para medición de velocidades, la escala de tiempo y las direcciones de viento a ser analizadas. Si bien no se tratará el aspecto relacionado a la simulación de viento natural en el túnel de viento, es importante aclarar que necesariamente estos ensayos deben realizarse con flujos que reproduzcan las características de los vientos en la capa límite atmosférica.

Es importante señalar que, dado que se pretende desarrollar este tipo de estudios en el túnel de viento "J. P. Gorecki" de la UNNE, desde hace aproximadamente 10

años se viene trabajando con diferentes simulaciones de viento natural aplicadas al análisis de cargas de viento sobre estructuras.

4.1 Consideraciones sobre la instrumentación

Este tipo estudio requiere medir velocidad de viento locales para un número de direcciones de viento diferentes. Las mediciones se realizan normalmente en torno a 2 m sobre el piso a escala real, es decir, que en modelos en túnel de viento cuya escala es 1/200 a 1/500 implica alturas de 4 a 10 mm. La desventaja de este tipo de medición es la alta turbulencia que puede ocurrir en los puntos de análisis y que puede ser un límite de acuerdo al tipo de sensor de velocidad.

Uno de los instrumentos que se puede usar es el anemómetro de hilo caliente. Este tipo de equipamiento tiene alta sensibilidad y velocidad de respuesta. La principal desventaja es que la sonda de hilo caliente debe ser orientada de acuerdo a la dirección del flujo en el punto de medición, lo cual puede ser un problema aún cuando a alturas muy bajas la componente vertical es prácticamente despreciable.

Este problema se puede solucionar usando una sonda cilíndrica tipo filme (hot-film probe), que si bien tiene menor velocidad de respuesta, es suficiente para estudios de viento a nivel de peatones. Ambos tipos de sonda tienen en común el problema del costo y las dificultades de posicionamiento cuando se requiere analizar muchos puntos.

Posiblemente los sistemas de medición más usados son los que utilizan sondas de presión omni-direccionales. La principal ventaja de los métodos de presión es que los equipos actuales permiten medir rápidamente presiones en diferentes puntos. Básicamente, el sensor posee dos tubos concéntricos que son las tomas de presión “dinámica” y “estática” [Irwin, 1982]. El sensor se monta en el piso del túnel y el tubo interior sobresale un altura de entre 5 y 10 mm de acuerdo a la escala del modelo. Las tomas se conectan de forma diferencial a un transductor electrónico de presión. La calibración se realiza estáticamente a diferentes velocidades medias en el punto de medición de la toma “dinámica”.

El laboratorio de Aerodinámica de la UNNE cuenta con un anemómetro de hilo caliente y con transductores de presión Honeywell, de manera tal que ambas técnicas de medición pueden ser implementadas en el túnel de viento “J. P. Gorecki” para el estudio de problemas de confort de peatones.

4.2 Adquisición de datos y escala de tiempo

Siendo que los valores de análisis que se usan normalmente son basados en velocidades de viento promedio horarias, es necesario establecer la duración de la muestra en el túnel de viento, de acuerdo a la escala del modelo y la velocidad en el túnel, equivalente a una hora en escala real. En la mayoría de los túneles de viento se usan muestras cuya duración es equivalente a una hora en escala real, donde se ubica la depresión del espectro de Van der Hoven que permite “separar” características macro y micro-meteorológicas.

Para velocidades medias y valor rms, la duración de la muestra no es crítica. No obstante, para la medición de valores pico hay que considerar la naturaleza aleatoria

de los mismos. En estos casos es importante tener cuidado en la determinación de la escala de tiempo entre el modelo y el viento atmosférico.

Para obtener la escala de tiempo, generalmente se utiliza el periodo de tiempo adimensional TU/L , siendo T periodo de muestreo, U la velocidad promedio y L una dimensión característica. Este parámetro de semejanza debe tener el mismo valor en modelo y prototipo, y conociendo la relación de velocidades y la escala geométrica, se puede calcular la escala de tiempo. Esta determinación de la escala de tiempo que solo considera valores medios, debería ser revisado para análisis de ráfagas de corta duración y picos, como así también, debería incluirse el filtrado de la señal fluctuante para medición de ráfagas de cierta duración.

4.3 Direcciones de viento

Generalmente, los estudios se realizan considerando para cada punto 16 direcciones de viento incidente de acuerdo a la rosa de los vientos. Esto se debe principalmente a la estimación exacta de la probabilidad de excedencia de la velocidad en el punto de medición. La dificultad de analizar tantas direcciones llevó a algunos autores a realizar estudios que señalan que una estimación correcta es posible utilizando solamente 8 direcciones de viento incidente.

Los resultados se presentan con las velocidades adimensionalizadas mediante un valor de referencia y utilizando un gráfico polar para cada punto, que permite indicar los valores correspondientes a cada dirección y facilita el análisis de datos.

5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es el análisis del estado del arte relacionado al confort de peatones respecto al viento para poder desarrollar este tipo de estudios en el túnel de viento “J. P. Gorecki” de la UNNE.

Las dificultades que se presentan con relación a los diferentes efectos del viento sobre las personas y la seguridad de los peatones hacen que sea un tema actualmente en vigencia en el mundo y en particular en nuestro país debido al desarrollo en la construcción de edificios de altura.

Las técnicas y requerimientos actuales hacen necesaria la implementación de métodos probabilísticos para poder realizar estudios de este tipo acordes al estado del arte en Ingeniería de vientos. Su aplicación requiere ciertos cuidados con relación a la escala de tiempo que vincula los valores medidos en el túnel de viento con los que se producen a escala natural, en particular cuando se realizan análisis de ráfaga y valores pico. Con respecto a la reproducción del viento atmosférico en el túnel de viento y al instrumental requerido para realizar este tipo de ensayos, en el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE, en los últimos años se ha simulado diferentes vientos de capa límite e implementado sistemas de medición actualizados que anemometría de hilo caliente y transductores electrónicos de presión.

Bibliografía

Durgin, F. [1990], “Use of the equivalent average for evaluating pedestrian level winds”, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 36, pp. 817-828.

Durgin, F. [1997], "Pedestrian level wind criteria using the equivalent average", J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 66, pp. 215-226.

Gandemer, J. [1982], "Simulation and measurements of the local wind environment", Wind tunnel modeling for civil engineering applications, Ed. by T. Reinhold, Cambridge Univ. Press, pp.504- 521.

Irwin, P. [1982], "Instrumentation considerations for velocity measurements", Wind tunnel modeling for civil engineering applications, Ed. by T. Reinhold, Cambridge Univ. Press, pp.546- 557.

Jordan, S., Johnson, T., Sterling, M., Baker, C. [2008], "Evaluating and modelling the response of an individual to a sudden change in wind speed", Building and Environment 43, pp. 1521-1534.

Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y. Mochida, A. [2008], "Wind tunnel test on the relationship between building density and pedestrian level wind velocity", Building and Environment 43, pp. 1699-1708.

Murakami, S. [1982], "Wind tunnel modelling applied to pedestrian comfort", Wind tunnel modelling for civil engineering applications, Ed. by T. Reinhold, Cambridge Univ. Press, pp.486-503.