

Los aislamientos térmicos naturales: construcción ecológica y eficiencia energética.

Mercier, David (1); Dutil, Yvan (2), Rouse, Daniel (3); Pronovost, Francis (4); Boudreau, Dominique (5); Hudon, Normand (6); Castonguay, Mathieu (7)

(1) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
david@t3e.info

(2) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
yvan@t3e.info

(3) Chaire de recherche industrielle t3e, École de technologie supérieure, Montréal, Canada
daniel@t3e.info

(4) Centre de l'environnement Écobâtiment, Québec, Canada
fpronovost@centreenvironnement.org

(5) EkoHabitat Construction inc., St-Adrien, Canada
dboudreau@ekohabitat.com

(6) Hudon Julien Associés, Québec, Canada
info@hudonjulien.com

(7) Hudon Julien Associés, Québec, Canada
info@hudonjulien.com

Resumen:

Un factor determinante en la eficiencia energética de un edificio es, sin duda, el diseño y la calidad en la fabricación de la fachada o envolvente. El aislamiento térmico de dicha fachada es uno de los componentes que tiene mayor impacto sobre la eficiencia energética. Como parte de la preocupación por el medio ambiente, los aislamientos térmicos naturales se están convirtiendo en una alternativa, cada vez más atractiva, para cualquier país. Al elegir un material aislante natural es común que, además de criterios térmicos, se quieran considerar criterios medioambientales. El aislamiento térmico tiene como principal objetivo reducir el consumo de energía, pero ¿Qué pasa con el balance de energía de ese mismo aislamiento? El edificio debe ser visto como un conjunto que relacione materiales eficaces y técnicas de construcción eficientes.

Palabras claves: Eficiencia energética, aislamiento natural, construcción, energía incorporada, casa pasiva

Natural thermal insulations: green building and energy efficiency.

Abstract:

A determining factor in the energy efficiency of a building is, without doubt, the design and manufacturing quality of the facade or enclosure. The thermal insulation of the facade is one of the components that has the greatest impact on energy efficiency. As part of the concern for the environment, natural thermal insulations are becoming an alternative, increasingly attractive to any country. When choosing a natural insulating material is common, in addition to thermal criteria, you may want to consider environmental criteria. Thermal insulation has as main objective to reduce energy consumption, but what about the energy balance of this insulation? The building should be seen as a set that relates effective materials and efficient construction techniques.

Keywords: Energy efficiency, natural insulation, construction, embodied energy, passive house

NOMENCLATURA

Símbolos:

RSI : Resistencia térmica, SI, $m^2 K/W$

R : Resistencia térmica, imperial, $h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F/Btu$

Letras griegas:

λ : Conductividad térmica, W/mK

Siglas:

PH : Casa pasiva

PSI : Paneles estructurales aislados

OSB : Tablero de fibras orientadas

MDF : Tablero de fibras de densidad media

Introducción

Tener un techo, no es solamente para protegerse del sol o la lluvia, constituye una necesidad esencial. Con el tiempo, los métodos de construcción y los materiales utilizados han evolucionado y ofrecen mejores rendimientos y una mayor comodidad. Durante mucho tiempo, las propiedades térmicas de los materiales de aislamiento han sido el único criterio considerado en el diseño de un edificio, seguido de cerca por las limitaciones de costos. Actualmente nuevos materiales, en su mayoría minerales y sintéticos, han aparecido en el mercado. Sin embargo, dada la escasez de los recursos no renovables se están buscando soluciones alternativas. Por otra parte, el costo de los materiales sintéticos hace que su uso, a menudo, esté reservado para aquellos países que cuentan con los medios para su integración en los códigos nacionales de construcción.

Finalmente, los efectos negativos del amianto y de la espuma de urea-formaldehído sobre la salud han llevado a los investigadores a estudiar los riesgos para los trabajadores y los ocupantes, debido a su utilización en determinados materiales de construcción.

En el siglo 21, estas cuestiones ocupan cada vez más importancia en el proceso de diseño del edificio. Por lo tanto, es importante conocer la naturaleza y las propiedades de los aislamientos naturales.

Los aislamientos naturales

Con la popularidad de la construcción ecológica y sostenible, que continúa creciendo, se encuentran en el mercado un número cada vez mayor de aislamientos térmicos fabricados con materiales naturales. Dichos materiales provienen principalmente del reino vegetal y animal, y de materiales reciclados.

Reciclaje

La Celulosa, compuesta principalmente de periódicos reciclados y triturados, es probablemente el aislamiento natural más utilizado en la actualidad. Se utiliza bajo la forma de aislamiento soplado o colchoneta semirígida. El aislamiento de mezclilla es otro tipo de aislamiento de reciclado, pero es mucho menos conocido y disponible. Los residuos de mezclilla, procedentes de los productores de ropas, son transformados y compactados en forma de colchonetas como un aislamiento tradicional. Técnicamente, se trata también de un aislamiento a base de celulosa, ya que está hecho de fibra de algodón.

Animales

La materia prima animal proviene de las pieles o de las plumas de los animales. La lana de oveja y la pluma de pato son los ejemplos más comunes.

Se encuentra el aislamiento a base de lana bajo la forma de colchoneta y de sogas. Este aislamiento posee excelentes propiedades térmicas y acústicas. Sin embargo, en su fabricación se une a fibras de poliéster lo cual degrada sus cualidades medioambientales. El aislamiento con pluma de pato tiene características esencialmente similares.

Cabe señalar que los aislamientos de origen animal tienen una tendencia natural a ser higroscópicos. A pesar de que se degraden muy poco sus propiedades aislantes, su uso no está recomendado en entornos de alta humedad.

Debido a que la fuente de estos aislamientos es de origen animal, su producción se realiza solamente cerca de una gran manada. Además, la producción de estos aislamientos tiene sentido, desde el punto de vista del medio ambiente, si la materia prima es un subproducto de la ganadería.

Vegetal

Los aislamientos de origen vegetal son, sin duda, los más importantes en términos de cantidad. Pueden ser producidos a partir del cáñamo, del lino, del algodón, del bambú, del coco, del corcho, de la madera, de la totora y de otras muchas fuentes. Una parte de las materias primas se procesan para extraer las fibras y luego se compactan en forma de tableros o colchonetas. Por su parte, la paja proveniente de diversos cereales (trigo, cebada, arroz, avena, lavanda y muchos otros) se cosecha y se utiliza la mayor parte del tiempo en forma de fardos.

Impacto medioambiental

El potencial de suministro

El impacto ecológico de un material aislante se extiende a lo largo de su ciclo de vida. Al inicio se encuentra el suministro de materia prima. Los consumidores están cada vez más sensibilizados con el uso de materias primas renovables. Además, se debe tomar en consideración la abundancia. El aumento del consumo de un producto, aunque este sea renovable, tiene un efecto directo sobre la disponibilidad del mismo.

Por ejemplo, el corcho que se encuentra en un territorio determinado y cuyo ciclo de crecimiento varía de 8 a 10 años carece de la capacidad de renovación de la paja, la cual se cosecha anualmente [1]. Así, según el Consejo Internacional de Cereales, la producción mundial estimada para 2010-2011 es de 1725 millones de toneladas, incluyendo todos los cereales [2]. Se estima que la cantidad de paja cosechada corresponde entre el 60-80% de la masa de cereales, lo que equivale a por lo menos mil millones de toneladas de paja disponibles cada año. Son muy pocas las materias primas que pueden servir como aislamiento y que se producen en tan grandes cantidades.

La Proximidad

Existen sin duda muchos beneficios en la globalización de los mercados, pero el impacto medioambiental del transporte a larga distancia no forma parte de dichos beneficios. En este sentido, es evidente que para un mismo producto el medio de transporte utilizado y la distancia recorrida, entre el lugar de origen y la planta de procesamiento hasta el distribuidor y finalmente el consumidor, aumentarán su impacto ecológico [3]. En el caso de los aislamientos naturales que son menos densos y, por tanto, requieren más vehículos de transporte para la misma masa de material, se produce un impacto ecológico negativo con relación a la transportación de otros materiales más densos.

La transformación y la adición de aditivos

Entre la materia prima y el producto final, listo para su uso, se encuentra el proceso de transformación. De acuerdo con el estado, la forma inicial y el material utilizado, el proceso constará de más o menos etapas y consumirá más o menos agua y energía.

La energía utilizada para la transformación, también conocida como energía gris o incorporada, está relacionada con el proceso utilizado por el fabricante y, en la mayoría de los casos, tiene una relación directa con el balance de las emisiones de CO₂. Sin embargo, generalmente es difícil acceder a la información sobre la energía consumida en la fabricación de los aislamientos. Algunos análisis presentan tendencias en relación con la transformación de aislamientos naturales específicos y permiten realizar comparaciones cualitativas entre ellos [4]. Por ejemplo, se puede comparar la paja cosechada, empaquetada y lista para ser utilizada con la lana de oveja que debe ser lavada, enjuagada, secada, tratada y transformada [5].

Los aislamientos naturales requieren el uso de aditivos para conferirles características ignífugas, insecticidas y fungicidas [6]. El aditivo (considerado seguro) más utilizado es el bórax y sus derivados. Las concentraciones y proporciones utilizadas varían según el material y el fabricante.

Deshacer los aislamientos naturales

Una vez culminada la vida útil de los aislamientos naturales, como cualquier otro material, se deben deshacer los residuos generados durante su remoción. Existen varias opciones posibles: el reciclaje, la incineración, el enterramiento o una combinación de ellos [7].

Dependiendo de la composición del aislamiento, ya sea el material natural, los aglutinantes y aditivos, ciertos métodos serán más adecuados. En efecto, un aislamiento que contenga un alto porcentaje de material ignífugo difícilmente podrá ser utilizado como combustible y podría causar problemas si se entierra. El estado del material y sus propiedades degradadas o no, también se tendrán en cuenta. Si la resistencia térmica se redujo, el reciclaje para la fabricación de aislamiento no es tal vez la mejor solución.

El aire y el medio ambiente

La planta haciendo reaccionar el CO₂, el agua absorbida y la energía del sol, produce carbohidratos que servirán a su desarrollo y el oxígeno que será liberado a la atmósfera. Los vegetales secuestran de esta manera el CO₂. Por esta razón y debido a su bajo consumo de energía incorporada, para una misma resistencia térmica, el balance de las emisiones de CO₂ del aislamiento natural con respecto al aislamiento sintético será necesariamente inferior [5].

En cuanto a la emisión de compuestos orgánicos volátiles, que afectan la calidad del aire interior de los edificios, los valores obtenidos con los aislamientos naturales en comparación con los aislamientos inorgánicos son del mismo orden de magnitud [8].

Impacto energético

Energía incorporada

Los diferentes factores que intervienen en el balance de la energía incorporada relacionada con un material pueden diferir de un cálculo a otro. El aspecto más importante es la propia transformación, pero el transporte, envasado, almacenamiento y los residuos resultantes pueden contribuir de manera significativa al balance general. Sin embargo, ya que cada aislamiento deberá ser transportado, envasado y almacenado, en condiciones relativamente similares, es la etapa de transformación la de mayor importancia en el balance final.

En su función principal, un aislamiento tiene un potencial de ahorro de energía considerable. La figura 1 muestra el estado del potencial de ahorro de energía para la calefacción y la climatización de una edificación en comparación con la energía incorporada del aislamiento. Esta evaluación se realiza asumiendo una vida útil de 100 años [9].

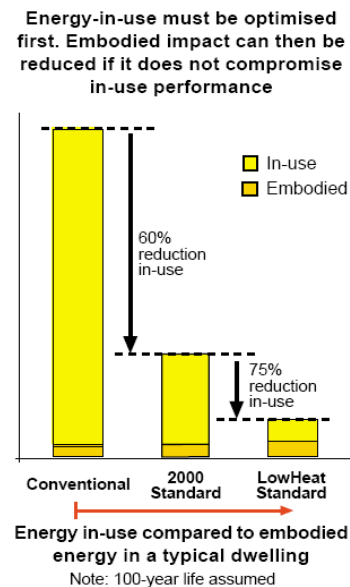


Figura 1: Energía de la edificación y energía del aislamiento [9]

En una construcción de tipo convencional la parte que representa la energía incorporada del aislamiento es mínima en comparación al potencial de ahorro. Al aumentar la cantidad de aislamiento, según lo exigen normas de mayor eficiencia como la norma 2000 y LowHeat, es posible reducir el consumo energético del edificio. Es entonces que la porción de energía incorporada del aislamiento, que no cambia en términos absolutos, alcanza una mayor importancia en términos relativos.

Eficiencia Energética

En Quebec, como promedio, el 60% del consumo energético de un edificio residencial está vinculado con la carga de calefacción [10]. La principal forma de reducir esta parte del consumo de energía, manteniendo al mismo tiempo un mínimo de confort térmico, es aumentar la resistencia térmica del edificio y reducir las infiltraciones de aire. La utilización de materiales como la celulosa o la lana, cuya densidad es superior a la de los aislamientos convencionales, puede contribuir a la reducción de las infiltraciones por la fachada [11]. Además, dichos materiales aumentan la inercia térmica del edificio, lo que permite un mejor confort.

La resistencia térmica de los aislamientos es la variable más explícita en cuanto a su rendimiento. Como ocurre en la mayoría de los aislamientos, la resistencia térmica de los materiales naturales varía en función del material, su densidad, su espesor y del porcentaje de humedad que contienen [12]. En razón de estas distintas variables el coeficiente de conductividad térmica λ , que se encuentra en la literatura para los aislamientos naturales, varía de forma significativa (Tabla 1). No obstante, sus rendimientos son similares a los de los aislamientos sintéticos.

Para un rendimiento equivalente, no son ni el aislamiento natural ni el aislamiento convencional los elementos que influirán en la eficiencia energética de los edificios, sino más bien el método y la calidad de la construcción.

Tabla 1: Coeficientes de conductividad térmica

Material	λ (W/mK)	Fuente
Celulosa	0,038-0.040	[9]
	0,041-0.050	[6]
	0,040	[5]
	0,045	[13]
Paja	0,037	[9]
	0,045	[13]
	0,053-0,061	[14]
Lino	0,037	[9]
	0,035-0,075	[6]
	0,042	[5]
Lino y Cafamo	0,033-0,060	[6]
Cafamo	0,040-0,094	[6]
Lana de oveja	0,040	[9]
	0,034-0,067	[15]

Con el objetivo de mejorar cada vez más la eficiencia energética de una edificación, se han establecido diversas normas destinadas a reducir el consumo de energía. Estas normas difieren entre países y regiones. El clima y la envergadura de los ahorros deseados son, sin lugar a dudas, las variables importantes que hacen que las normas sean más o menos rigurosas. El estándar de “casa pasiva” es uno de las más efectivos y está ganando una popularidad cada vez mayor.

Casa pasiva

El concepto

Casa pasiva, en alemán Passivhaus, es un estándar de construcción dirigido a la reducción del consumo energético. Este concepto nació en Alemania y se ha desarrollado grandemente en muchos países de Europa central, integrándose poco a poco al mercado norteamericano.

Para garantizar su funcionamiento, la edificación debe cumplir con criterios específicos para la certificación. El concepto se aplica a edificios de viviendas, remodelaciones y a edificios comerciales e institucionales. El objetivo principal es de aumentar el confort de los ocupantes manteniendo una reducción del consumo de energía. Para lograrlo, la fachada debe estar muy bien aislada térmicamente y la infiltración de aire debe reducirse a un mínimo. La energía utilizada para la calefacción del edificio proviene principalmente del Sol, en forma pasiva, y de ganancias internas de calor. Los ocupantes y equipos, tales como la iluminación, la cocina, las computadoras, constituyen algunos ejemplos de ganancias internas de calor [16]. Un diseño riguroso y elaboración minuciosa de la fachada permiten reducir considerablemente el consumo de energía, asociado a la calefacción.

La Certificación “casa pasiva” es uno de los más altos estándares en materia de eficiencia energética en edificaciones. Los criterios más importantes para la obtención de una certificación “casa pasiva” son:

- La energía utilizada para la calefacción y / o climatización debe ser menor o igual a $15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$.
- La energía primaria consumida, incluyendo la calefacción, debe ser menor o igual que $120 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$.

- A una presión diferencial de 50 Pa, la tasa de renovación del volumen de aire interior por hora debe ser menor o igual a 0,6.

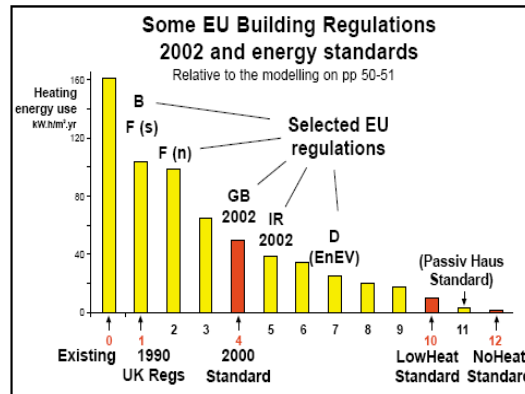


Figura 2: Carga de calefacción de acuerdo a varias normas europeas [9].

A modo de comparación, la certificación Novoclimat exige, para la misma presión diferencial, una tasa de renovación del volumen de aire por hora menor o igual a 2,5, o sea, 4 veces menos exigente que la certificación “casa pasiva” [10, 17].

La figura 2 muestra el consumo de energía para la calefacción de una casa, de acuerdo a diferentes normas de construcción europeas [9].

La norma “casa pasiva” está representada por la columna 11, lo que la hace formar parte de las dos normas más eficientes. La columna 12 representa un edificio de energía neta cero, cuya característica es la autosuficiencia energética a través del uso de fuentes renovables de energía. Cabe señalar que los edificios de energía neta cero pueden tener un consumo total de energía, durante su vida útil, más elevado que una casa pasiva debido a la mayor utilización de materiales con alto contenido de energía [18-19], lo cual tienden a pasar por alto algunos estudios.

Las edificaciones “casa pasiva” representan verdaderos potenciales de ahorro de energía. Hay que recordar, sin embargo, que un aislamiento superior, la excelente hermeticidad, las ventanas y la recuperación de calor de alta eficiencia son inútiles si los ocupantes no son conscientes de las buenas prácticas en materia de ahorro de energía. La educación representa una parte preponderante en la eficiencia energética real de la vivienda.

Casa pasiva y la paja

El Ministerio Federal de Transporte, Innovación y Tecnología de Austria (BMVIT), ha desarrollado un programa tecnológico para el desarrollo sostenible. Este programa está dividido en tres sub-programas: los edificios del futuro, los sistemas de energía del futuro y las empresas del futuro [20]. La Figura 3 muestra el plan de acción para el programa de los edificios del futuro.



Figura 3: Plan de acción utilizado por el programa de "Casa del futuro" www.hausderzukunft.at [20]

Ha sido siguiendo esta lógica que los austríacos llegaron a construir casas pasivas aisladas con la paja de cereales. La elección de los materiales y métodos de construcción representan la temática principal de varios estudios vinculados al programa [21]. Diferentes fachadas pueden ser utilizadas en una construcción con estructura de madera aislada con paja. Una de ellas consiste en sellar la paja con yesos fabricados con arcilla, arena, tierra, cemento y cal. Otra puede emplear materiales convencionales, tales como: OSB (tableros de fibras orientadas), tableros de fibras de madera, MDF (tableros de fibras de densidad media) y otros. Una variante de este último método se basa en los ISP: paneles estructurales aislados.

Los ISP son módulos prefabricados muy herméticos al aire [22]. Por esta razón, ellos favorecen el uso de paja reduciendo los riesgos de condensación asociados a los puentes térmicos [23]. Este enfoque también tiene la ventaja de ser fácilmente integrable a una construcción de tipo más convencional.

Las construcciones pasivas se caracterizan por un espesor de pared considerable. En el caso de una construcción con paja, el espesor de la pared estará determinado por el espesor de los fardos. Para un fardo de 45X35X90 cm³ y con un coeficiente de conductividad térmica de 0,041 W·m⁻¹·K⁻¹ [24], se obtiene una resistencia térmica de aproximadamente RSI-8,5 (R-48), solamente por el aislamiento. De aquí se deduce que mientras más aumente el espesor de pared, más aumentará el espesor de aislamiento y con ello la resistencia térmica [25].

Conclusiones

Durante la selección de un aislamiento natural se deben considerar varios factores. La disponibilidad, el costo, la aplicación, el impacto ecológico y energético son tan importantes como su rendimiento térmico. Tratar los distintos aspectos individualmente no permite justificar la selección de un aislamiento natural con respecto a un aislamiento convencional. Es mejor considerar todos los factores en su conjunto y ver los beneficios y repercusiones a más largo plazo, a través de un análisis del ciclo de vida de los materiales empleados. La participación de los fabricantes en el desarrollo de herramientas de selección, teniendo en cuenta todos los aspectos ecológicos y energéticos, sería sin duda un elemento muy beneficioso para los usuarios.

El punto esencial a subrayar es que, poco importa si el aislamiento elegido es natural o no, son el método y la calidad de la construcción los que harán toda la diferencia en el rendimiento del producto terminado.

En el marco de un proyecto de investigación que realiza el primer autor de este trabajo, se pretende estudiar el uso de la paja en una construcción de tipo "casa pasiva". El objetivo es evaluar la viabilidad de este método de construcción en un clima tan extremo y variable, en términos de variación y de tasa de cambio de temperatura y humedad, como el de Quebec.

Las primeras pruebas tuvieron lugar en febrero de 2011 en el Centro de Investigación Industrial de Quebec y los primeros resultados serán presentados próximamente.

Posteriormente, un conjunto de módulos serán sometidos al clima de Quebec durante un ciclo de cuatro estaciones. Estos módulos se instalarán en la casa "Écologique" de la École de technologie supérieure, la cual fue construida para el "Solar Decathlon en 2007" y está actualmente situada en el parque Jean-Drapeau de Montreal. La adquisición de datos permitirá determinar el rendimiento térmico y la evolución higrométrica.

Actualmente estamos buscando socios en los países del sur para poner en práctica nuestra investigación en climas totalmente diferentes a los climas nórdicos.

Referencias bibliográficas

- [1] FERREIRA, A., LOPES, F. et PEREIRA, H., Caractérisation de la croissance et de la qualité du liège dans une région de production, *Annals of forest science*, Lisbonne, Portugal, pp. 187-193, (2000).
- [2] CIC, Marché des céréales, *Le Conseil international des céréales*, Londres, Angleterre, p. 3, (2010).
- [3] PANYAKAEW, S. et FOTIOS, S., Life Cycle Energy Analysis of Thermal Insulation: Agricultural waste materials in Thailand, *School of Architecture - the University of Sheffield*, Sheffield, Angleterre, p. 5, (2009).
- [4] LATIF, E., WIJEYSEKERA, D. C., NEWPORT, D., et al., Potential for research on hemp insulation in the UK construction sector, *University of East London, School of Computing, Information Technology and Engineering*, Londres, Angleterre, pp. 143-150, (2010).
- [5] MURPHY, R. J. et NORTON, A., Life Cycle Assessments of Natural Fibre Insulation Materials, *National Non-Food Crops Centre - NNFCC*, Londres, Angleterre, p. 79, (2008).

- [6] KYMÄLÄINEN, H.-R. et SJÖBERG, A.-M., Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations, *University of Helsinki - Department of Agrotechnology*, Helsinki, Finlande, pp. 1261-1269,(2008).
- [7] SCHMIDT, A., JENSEN, A., CLAUSEN, A., et al., A comparative Life Cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax, *Springer Berlin / Heidelberg*, Berlin, Allemagne, pp. 53-66, (2004).
- [8] KOIVULA, M., KYMÄLÄINEN, H.-R., VIRTA, J., et al., Emissions from thermal insulations--part 2: evaluation of emissions from organic and inorganic insulations, *Department of Agricultural Engineering and Household Technology - University of Helsinki*, Helsinki, Finlande, pp. 803-814, (2005).
- [9] WEBB, R., *Insulation for Sustainability - a Guide*, XCO2, Londres, Angleterre, p. 83, (2002).
- [10] AEE, *Le guide Constructo - Bâtir vert*, Agence de l'Efficacité Énergétique, Québec, Canada, pp. 63-74, (2006).
- [11] NICOLAJSEN, A., Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material, *Department of Building Technology and Productivity - Danish Building and Urban Research*, Horsholm, Danemark, pp. 907-914, (2005).
- [12] MCCHESENEY, I., COX-SMITH, I. et AMITRANO, L., Status report on thermal insulation in New Zealand homes, *Beacon Pathway Limited et Foundation for Research, Science and Technology*, Auckland, Nouvelle Zélande, p. 57, (2008).
- [13] WIMMER, R., HOHENSINNER, H., JANISCH, L., et al., Heat Insulation Performance of Straw Bales and Straw Bale Walls, *GrAT - Center for Appropriate Technology - Vienna University of Technology*, Vienne, Autriche, p. 1, (2000).
- [14] PRUTEANU, M., Investigations Regarding the Thermal Conductivity of Straw „Gheorghe Asachi” *Technical University, Jassy, Department of Civil and Industrial Engineering*, Iasi, Roumanie, pp. 9-16, (2010).
- [15] YE, Z., WELLS, C. M., CARRINGTON, C. G., et al., Thermal conductivity of wool and wool-hemp insulation, *John Wiley & Sons, Ltd.*, pp. 37-49, (2006).
- [16] SCHNIEDERS, J., CEPHEUS – measurement results from more than 100 dwelling units in passive houses, *European Council for an Energy Efficient Economy - Time to turn down energy demand*, Vienne, Autriche, pp. 341-351, (2003).
- [17] PHI, Certification as "Quality Approved Passive House" - Criteria for residential use *Passive Houses Passive House Institute*, Vienne, Autriche, p. 7, (2009).
- [18] FEIST, W., Life-cycle energy balances compared: low-energy house, passiv house, self-sufficient house, *Proceedings of the International Symposium of CIB W67*, Vienne, Autriche, pp. 183-190, (1996).
- [19] FEIST, W., Life cycle energy analysis: comparison of low-energy house, passiv house, self-sufficient house, *Passive House Institute*, Vienne, Autriche, (1997).
- [20] BMVIT, Austrian Program on Technologies for Sustainable Development, *Austrian Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology*, Vienne, Autriche, p. 3,
- [21] Unger, J., Tagungsband Strohbau Symposium 2001 - Stroh als Baustoff Zu schade zum Verheizen!, *GrAT – Gruppe Angepasste Technologie an der TU Wien*, Vienne, Autriche, p. 147, (2001).
- [22] SCHL, La maison Avalon Discovery 3 : murs à panneaux structuraux isolés doubles, *Société canadienne d'hypothèques et de logement*, Ottawa, Canada, p. 4, (2010).
- [23] SCHL, Comprendre la perméance à la vapeur et la condensation dans les murs, *Société canadienne d'hypothèques et de logement*, Ottawa, Canada, p. 6, (2009).
- [24] BECK, A., HEINEMANN, U., REIDINGER, M., et al., Thermal Transport in Straw Insulation, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Wurtzbourg, Allemagne, (2004).
- [25] SCHL, Assemblage mural de forte épaisseur de la Maison netzéro Riverdale, *Société canadienne d'hypothèques et de logement*, Ottawa, Canada, p. 4, (2009).