

Análisis energético en la fabricación de materiales de producción nacional

VIRGINIA CASAÑAS

PALABRAS CLAVE

MATERIALES NACIONALES; PROCESO PRODUCTIVO; CICLO DE VIDA; EMISIONES DE CO₂; ENERGÍA INCORPORADA

Arquitecta (FARq-Udelar).
Magíster en Construcción de Obras de Arquitectura (Maestría Interinstitucional UFRGS-Udelar).
Profesora Adjunta (actualmente, profesora Agregada subrogante) del Instituto de Tecnologías. Integrante de los comités académicos de los siguientes diplomas de FADU (Udelar): Especialización y Maestría en Construcción de Obras y Especialización en Diseño de Estructuras. Responsable de proyectos del Plan de Obras de Mediano y Largo Plazo (POMLP-Udelar). Coordinadora de ejecución de proyectos del POMLP (Udelar) entre 2017 y 2022.

Resumen

El consumo energético es uno de los temas ambientales más importantes que enfrenta la sociedad contemporánea. La energía usada en los edificios proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles que contribuyen a la contaminación atmosférica.

La industria de la construcción a nivel mundial es responsable del 50 % de los recursos naturales y del 40 % del consumo de energía, considerando el ciclo de vida de la edificación. La demanda energética de los edificios se ha incrementado en un 4 % desde el 2020, y el mayor aumento se registró en los últimos diez años. Las emisiones de CO₂ procedentes de la operación de edificios, sumadas a las emisiones provenientes de la fabricación de materiales, representan cerca del 37 % de las emisiones globales del 2021.

El uso de la energía permite evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida de la edificación mediante la estimación de consumos energéticos. Los métodos de Análisis de Ciclo de Vida Energético [ACVE] en las edificaciones utilizan la energía como medida del impacto ambiental y permiten presentar índices de energía incorporada.

En este contexto, la investigación se centró en la estimación de la energía incorporada en dos materiales de producción nacional: ladrillo y acero. Una vez estimada la energía incorporada, fue posible obtener conclusiones que permiten contribuir al abordaje de la sustentabilidad en la industria a nivel local. De los

dos materiales analizados, el ladrillo produce menor impacto ambiental, ya que el consumo de energía proviene de fuentes renovables y las emisiones son menores. Las cantidades de energía requerida y de emisiones son mayores para el acero: el transporte tiene una influencia significativa, se incrementan los valores de energía incorporada y, por lo tanto, los impactos generados en el ambiente.

Introducción

La demanda de materiales de construcción lleva a la necesidad de extraer y procesar gran cantidad de materias primas con un alto costo energético. El inminente agotamiento de los recursos vuelve prioritaria una búsqueda de conocimiento profundo sobre cómo actuar para reducir el impacto en nuestro entorno a través del ahorro de energía.

El consumo mundial de materias primas se duplicará en el año 2060 con el crecimiento de la economía mundial, lo que profundizará la sobrecarga ambiental (OCDE, 2019).

Las estrategias de eficiencia de materiales aplicadas en edificios tienen un inmenso potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [GEI], según el Panel Internacional de los Recursos (Naciones Unidas, 2020). El uso de materiales reciclados o de baja energía incorporada podría reducir un alto porcentaje de las emisiones de GEI procedentes del ciclo de materiales de edificios residenciales en el año 2050 (Naciones Unidas, 2022).

La industria de la construcción es uno de los motores que impulsa y sostiene el desarrollo social y económico, y es uno de los sectores más intensivos en el uso de recursos. Los materiales utilizados en la industria de la construcción son obtenidos mediante la extracción de materias primas a través de procesos industriales que alteran el medio ambiente. Estas materias primas se transforman y necesitan una considerable cantidad de energía obtenida de fuentes primarias basadas en combustibles fósiles, lo cual genera grandes cantidades de residuos que regresan al medio ambiente a través de residuos líquidos, emisiones tóxicas y residuos sólidos, generando una considerable emisión de GEI con nocivas repercusiones locales y globales (Huang et al., 2019).

Los materiales de construcción tienen un significativo impacto ambiental y son parte importante de los procesos desarrollados a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones. Tanto las actividades propias de extracción, transformación y transporte de las materias primas como la actividad en el sitio de la obra, las actividades de mantenimiento y las de demolición implican el consumo de materiales y tienen consecuencias ambientales considerables (Rivera García, 2020). Uno de los impactos más importantes es la incorporación de GEI a la atmósfera durante los procesos previamente mencionados. Es posible cuantificar estos impactos mediante la energía incorporada.

La investigación intenta poner de relieve la importancia del consumo de energía en el sector de la industria desde una perspectiva integradora, focalizándose

en el ciclo de vida de la producción de los materiales de construcción —de la cuna a la puerta—; es decir, teniendo en cuenta la extracción y fabricación de las materias primas, el transporte y el producto acabado pronto para su uso en la obra.

Sustentabilidad y construcción

La importancia dada a los factores ambientales no es nueva en la historia de la arquitectura, pero fue en la década de 1970 cuando las preocupaciones ambientales cobraron fuerza. La crisis del petróleo y la amenaza de problemas ambientales a gran escala cuestionaron el modelo de desarrollo basado en el consumo ilimitado de la energía fósil, colocando la reducción del consumo y la problemática ambiental en la agenda de las discusiones (Tavares, 2006; CIB, 1999).

El informe *Nuestro futuro común*, de la Comisión Brundtland, define el desarrollo sustentable como «aquel modelo de desarrollo que tiende a la satisfacción de las necesidades sociales e individuales presentes, sin comprometer la posibilidad que las futuras generaciones puedan satisfacer las suyas» (WCED, 1987, p. 42).

La satisfacción de las necesidades de una sociedad se produce a través de la provisión de bienes y servicios generados por el sistema, utilizando y transformando recursos obtenidos de la naturaleza. Tanto la extracción de materias primas como su transformación en productos generan residuos que se dispersan en el medio, acelerando el proceso de degradación.

La sustentabilidad nos obliga a tener una mirada más amplia —en tiempo y espacio, así como en costos a largo plazo— de la que solíamos tener en la construcción tradicional. La construcción sustentable debe ser abordada desde un pensamiento holístico en cuanto a construcción y gestión del ambiente construido, con una perspectiva de ciclo de vida. Los materiales de construcción no solo deben ser producidos de forma sustentable, sino también dar respuesta a las nuevas exigencias que se derivan de condiciones ambientales, incorporando la sostenibilidad económica y social (CIB, 1999).

Ciclo de vida

Toda actividad humana requiere del uso de materiales para poder desarrollarse. Estos materiales se extraen del medio natural —produciendo impactos ambientales asociados y una consecuente disminución de sus reservas— y regresan nuevamente al medio ambiente como residuos que producen contaminación. Esta dinámica compromete la viabilidad del modelo de desarrollo, haciendo imprescindible asumir la necesidad de un modelo de producción compatible con la sustentabilidad, que garantice la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (Societat orgánica, 2005).

La incidencia de los materiales de construcción en el medio ambiente se da a lo largo de su ciclo de vida, desde su primera fase de extracción y procesamiento

de materias primas hasta el final de su vida útil; es decir, hasta su tratamiento como residuo, pasando por las fases de producción o fabricación del material y por la del empleo o uso racional de estos materiales (Arenas, 2008).

Para poder evaluar al sector de la construcción es necesario reconocer, cuantificar y calificar los recursos utilizados en las diferentes etapas del proceso constructivo. Existen diversos métodos para el análisis ambiental de todo el ciclo de vida de la edificación, caracterizado por las etapas de extracción, fabricación, transporte, construcción, uso y mantenimiento, y demolición. A esto se suman métodos de análisis ambiental específicos del ciclo de vida de los materiales de construcción, ya que cada etapa del ciclo de vida está relacionada con determinados impactos ambientales. Una de estas metodologías evalúa los impactos ambientales asociados en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, servicio o proceso, y se conoce como Análisis de Ciclo de Vida [ACV]. Un estudio de ACV comprende un inventario de energía y materiales involucrados en toda la cadena de valor del producto, y permite una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales (González Calderón y Guerrero Baca, 2022).

La metodología del ACV, establecida en las normas ISO 14040/43 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 1997), es considerada una herramienta efectiva y confiable. Permite cuantificar impactos ambientales asociados a un producto o servicio desde su origen —extracción de la materia prima— hasta su disposición final —residuo—, realizando un inventario completo del consumo de recursos y emisiones asociados al ciclo de vida de un producto.

Del análisis sobre resultados de ACV surge como denominador común que los impactos relativos al consumo de energía son significativos. El ACVE permite realizar en forma simplificada la evaluación de impactos mediante la estimación de consumos energéticos requeridos para transformar las materias primas en productos; es lo que denominamos «energía incorporada» (González Calderón y Guerrero Baca, 2022).

El gasto energético se expresa en megajoules [MJ] o en su equivalente kilovatio-hora [kWh], siendo 1 kWh equivalente a 3,6 MJ. El consumo de energía se puede traducir en emisiones de dióxido de carbono [CO₂], recurso útil para valorar la repercusión ambiental de las diferentes fuentes implicadas en los procesos.

En nuestro país, la producción de materiales responde a parte de los impactos ambientales generados por la industria de la construcción, lo que justifica la necesidad de profundizar en el conocimiento de todos los aspectos medioambientales que afecten al ciclo de vida de los productos de construcción elegidos y producidos en Uruguay; y caracterizar parte del ciclo de vida de la producción de dichos materiales, desde la etapa de extracción de la materia prima hasta el producto acabado pronto para su uso.

Energía incorporada

Los impactos relacionados con la producción de materiales se corresponden estrechamente con la energía incorporada en los materiales. La industria del cemento es la mayor emisora de dióxido de carbono [CO₂], óxidos de nitrógenos [NO_x], dióxido de azufre [SO₂] y materiales en suspensión en el aire —polvo—. Las industrias del cerámico y del acero utilizan alto porcentaje de fuentes no renovables y son grandes consumidoras de energía.

El primer consumo energético que debemos considerar es la energía invertida en la fabricación de materiales con los que construimos nuestras edificaciones. Cada material sufre un proceso de extracción de materias primas, transporte hacia los centros de transformación, procesos de conformación, transporte hacia los centros de distribución y nuevamente transporte hacia el lugar de la ejecución de la edificación. Cada paso implica un consumo de energía, siendo los procesos de extracción y transformación los más significativos desde el punto de vista energético (Cuchí, 2003).

La energía incorporada [EI] en los materiales es el conjunto de insumos energéticos directos o indirectos, necesarios para la fabricación y distribución en las etapas preoperacionales de su ciclo de vida (Treolar, 2001, citado en Tavares, 2006).

La cuantificación de la EI requiere mirar a largo plazo el proceso completo de fabricación; conlleva, además, un gran número de variables potencialmente significativas, lo que hace complejo su cálculo a la hora de obtener cifras exactas. Las cifras exactas no son necesarias para tomar decisiones sobre materiales de construcción a utilizar. Lo que los diseñadores necesitamos es reconocer las diferencias de potencial en relación con la energía relativa incorporada, para tomar decisiones sabias sobre el material y los sistemas a elegir (Mumma, 1995) y así desarrollar proyectos más sustentables.

El método más simple para el análisis de la energía incorporada es el conocido como «análisis de procesos». Se basa en el análisis detallado de todas las etapas de un proceso de fabricación, discriminando —en cada etapa— los consumos energéticos directos e indirectos (Tavares, 2006).

El análisis de proceso de los materiales consiste en establecer las entradas de energía directa para un proceso en una fábrica y luego encaminar las entradas de materias primas al proceso. La norma ISO/TS 14040 (ISO, 2006) indica cómo elaborar una planilla con todos los eventos significativos e informaciones relativas a la realización de un inventario de datos. Para cada evento significativo será relevado su respectivo consumo energético, hasta el subnivel de EI posible.

Metodología

INSTRUMENTOS, MÉTODO DE CÁLCULO

La investigación tuvo como objetivo identificar el consumo energético de materiales de producción nacional en las diferentes etapas de la producción, obteniendo un consumo por kilogramo de material y definiendo su valor de energía incorporada.

El abordaje se centró en una o dos industrias representativas de cada material analizado. Si bien en Uruguay —en el caso del acero— no existe otra alternativa local más allá de la estudiada, no es así para el caso de las ladrilleras, que están localizadas en todo el país y solo se eligieron dos en la región sur, respondiendo a la alta demanda en esa zona.

La elección de estos materiales responde a que ambos tienen mayor incidencia relativa en 1 m² de construcción tradicional.

En la caracterización de cada caso de estudio, se destacaron aspectos arquitectónicos, así como las características y propiedades del material. Además, se estudió la industria de cada uno de los materiales en el medio local, para luego definir el proceso de producción y su caracterización.

La información recogida en cada planta fue suministrada por un funcionario con experiencia y amplio conocimiento respecto del proceso de producción, la energía consumida y la obtención de la materia prima requerida en el proceso.

Los instrumentos utilizados para recoger los datos fueron: un cuestionario con preguntas específicas referidas a los consumos de energía en cada etapa del proceso; la observación directa del proceso de producción durante la visita a la planta; un relevamiento fotográfico; y el análisis de documentos suministrados por las empresas.

El cuestionario genérico fue adaptado a cada caso siguiendo la citada ISO 14040.

ENTRADAS		SALIDAS
Materias primas	EXTRACCIÓN MATERIA PRIMA	Emisiones a la atmósfera
Procesos	TRANSPORTE	Residuos sólidos / líquidos
Recursos e insumos	MANUFACTURA DE PRODUCTO	Subproductos
		Otros desechos

FIGURA 1. EVALUACIÓN POR CICLO DE VIDA DE ACUERDO A LA NORMA ISO 14040 (ISO, 2006).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Materias primas:

- enumeración; ubicación de depósitos potenciales para su extracción —canten-
ras—; modo de extracción; característica del transporte; fuentes de energía.

Procesos:

- fuentes de energía; transporte y distancias; combustible utilizado.
- tipo; combustible.

Recursos e insumos:

- energía de la planta; almacenamiento; transporte.

Los materiales fueron analizados energéticamente, obteniendo la EI inicial en la producción de materiales, por el método de análisis de proceso. El método se basó en un análisis detallado de todas las etapas del proceso de fabricación, discriminando los eventos de consumo energético directos e indirectos, en cada una de las etapas. Los consumos energéticos obtenidos para cada material se cuantificaron en MJ/kg y en kWh/kg.

Según Tavares (2006), la discriminación de los insumos energéticos en fuentes específicas y la generación correspondiente de CO₂ son importantes para la interpretación de un análisis energético. Por lo tanto, es posible establecer un parámetro más directo de sustentabilidad a partir del CO₂ incorporado en la construcción. Las emisiones de CO₂ se calcularon a partir del desglose del consumo de energía y de factores relacionados con la generación de CO₂. Se consideraron, además, las reacciones específicas de los procesos de fabricación de los materiales de construcción elegidos.

Con los datos obtenidos, se estableció un valor de EI en los dos materiales de producción nacional elegidos como caso de estudio.

Ladrillo de campo

En Uruguay, la utilización del ladrillo está presente en gran parte de la producción de la arquitectura de la segunda mitad del siglo XX; algunos ejemplos de ello son las obras de Eladio Dieste, Payssé Reyes y Rafael Lorente Escudero, en las que el ladrillo trasciende el rol del elemento constructivo para incorporar componentes conceptuales vinculados a movimientos culturales propios del periodo.

El ladrillo de campo es el producto de cerámica roja que más se produce en Uruguay, constituido por tierra arcillosa y materia orgánica cocida en el horno de campo. Adquiere las propiedades deseadas mediante la aplicación de calor. El combustible utilizado para la quema de los elementos cerámicos es la leña.

El estudio se realizó en dos industrias ladrilleras en la región sur del país: ladrillera L1 —Montevideo— y ladrillera L2 —San Carlos, Maldonado—. Ambas tienen el mismo procedimiento de producción, con variaciones en la composición de la mezcla según cantidades e ingredientes y en la cantidad de piezas producidas anualmente, siendo la producción de la ladrillera L1 de 700.000 piezas al año y la producción de la ladrillera L2 de 2.000.000 de piezas año.

El proceso productivo es artesanal con bajo nivel de mecanización, secado natural y utilización de hornos tipo *clamp*. Consiste en: extracción de materia prima arcilla y transporte a la ladrillera; preparación de la pasta o liga; moldeado de la pieza; secado; quemado o cocción; almacenamiento.

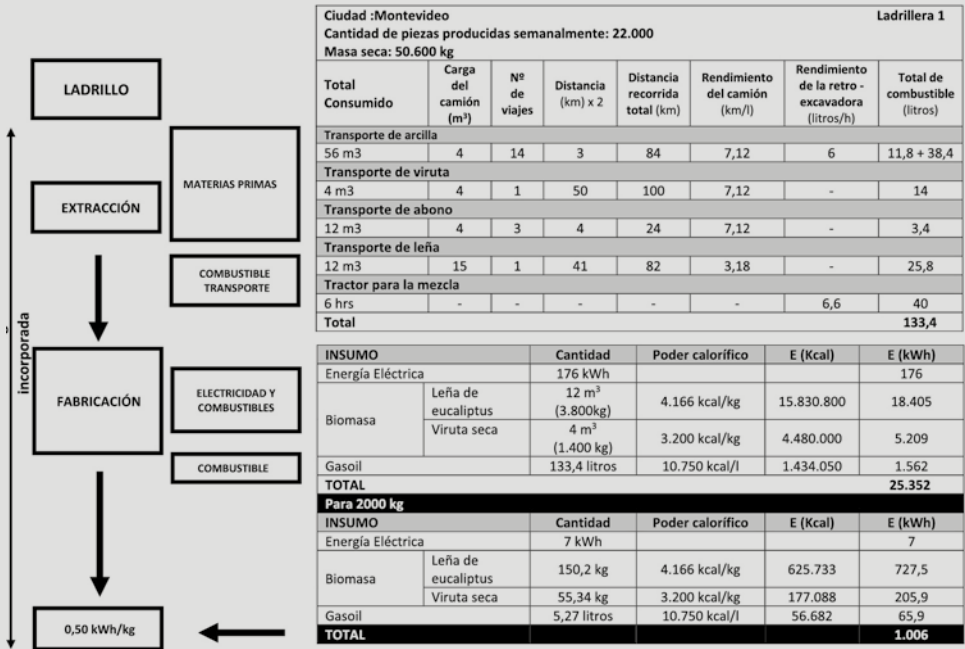


FIGURA 2. GASTOS TOTALES DE ENERGÍA EN LADRILLERA L1 MONTEVIDEO.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estimación de la energía incorporada

En el proceso de cálculo fueron considerados: a) la energía eléctrica utilizada en la planta en general; b) los gastos de extracción y transporte de la arcilla y otras materias primas utilizadas en la mezcla; c) la energía utilizada en la fase de preparación de la mezcla con tractor o batidora; d) la energía utilizada en equipos de bombeo; y e) la energía utilizada en el transporte de la leña.

Los gastos totales de energía se presentan en las Fig. 2 y Fig. 3.

Las Fig. 2 y Fig. 3, respectivamente, recogen los gastos totales de energía verificados para las ladrilleras L1 y L2.

El ítem biomasa incluye insumos energéticos como leña, aserrín, viruta seca y cáscara de arroz. En el cálculo de consumo de gasoil, fueron considerados los gastos de transporte de materias primas e insumos, el gasto de la retroexcavadora para la extracción de arcilla y el gasto del tractor para mezcla.

A partir de los datos obtenidos de los insumos energéticos, la energía estimada fue convertida en poder calorífico. Esta conversión fue realizada según la Tabla 1.

En el caso de la leña, existen variaciones en el poder calorífico, dependiendo de la especie del árbol y de la humedad de la madera. Ambas ladrilleras utilizan leña de eucaliptus.

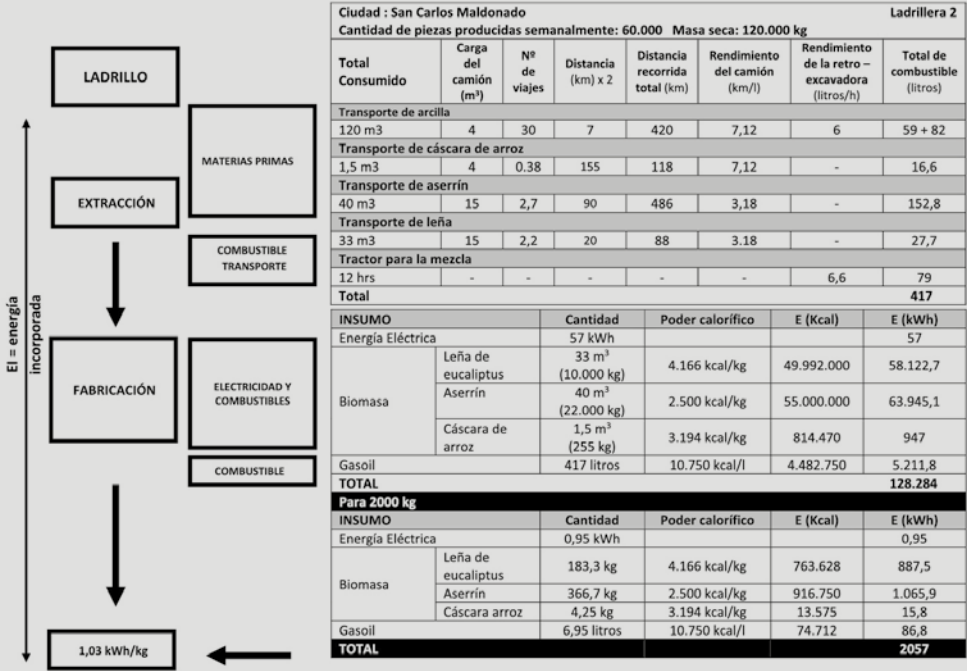


FIGURA 3. GASTOS TOTALES DE ENERGÍA EN LADRILLERA L2 SAN CARLOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 1. VALORES DE PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES MATERIALES.

ENERGÍA	PESO ESPECÍFICO (kg/m²)	PODER CALORÍFICO	FUENTE DATOS PODER CALÓRICO
Gasoil	852	10.750 kcal/l	Brasil 1997, <i>apud</i> Sperb, 2000
Leña eucaliptus	303.1	4.166 kcal/kg	Pereira et al., 2000, <i>apud</i> Manfredini
Aserrín seco	550	2.500 kcal/kg	Manfredini, 2003
Cáscara de arroz	170	3.194 kcal/kg	Sánchez - Ramírez Programa de energía ITDG Perú / FAO 2011, Departamento de Agricultura
Viruta seca	250-450	3.200 kcal/kg	Dato de la empresa

FUENTE: ADAPTADO DE MANFREDINI (2003)

Para el transporte, el consumo energético adoptado se obtuvo a partir de los valores de productividad de camiones ligeros —el tipo de camión más utilizado en las carreteras nacionales uruguayas (MTOP, 2007)— y tractor con semirremolque de dos ejes (Reis, 1999, citado en Sperb, 2000), así como de los valores actualizados de masa específica y poder calorífico del gasoil.

TABLA 2. GASTOS ENERGÉTICOS DE TRANSPORTE DE CARGA.

VEHÍCULO	CARGA LÍQUIDA (t)	RENDIMIENTO Km/litro	PRODUCTIVIDAD (litro/t.km)	GASTO ENERGÉTICO (MJ/kg.km)
Camión Ligero*	4.2	7.12	0.033	1.282×10^{-3}
Tractor semirremolque*	14.3	3.18	0.022	0.843×10^{-3}

* Valores obtenidos a partir de camiones cargados 100% de su capacidad útil.

FUENTE: ADAPTADO DE SPERB (2000)

Para posibilitar la comparación entre los gastos de energía de las dos ladrilleras, se calculó la energía consumida para la confección de 2000 kg de producto acabado, que corresponde, aproximadamente, a 1000 piezas, obteniendo luego el consumo energético —en kWh y MJ— de 1 kg de producto acabado.

Los resultados de la energía incorporada se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3. VALORES DE EI OBTENIDOS PARA LAS LADRILLERAS.

Datos obtenidos en casos de estudio para 1 kg de material	MJ/kg	kWh/kg
Ladrillera 1	1,8	0,5
Ladrillera 2	3,7	1,03

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Acero

En el siglo XVIII se comenzaron a construir invernaderos, puentes y naves de almacenaje, que dieron protagonismo a la arquitectura de hierro propiamente dicha. Los cambios técnicos propiciados por la revolución industrial hicieron factible la disposición del hierro como material para la arquitectura (Frampton, 1989). Poco a poco, el hierro se fue incorporando a la arquitectura en Uruguay, con la construcción del Mercado del Puerto, el Hipódromo de Maroñas y el Teatro Solís.

Los metales se clasifican en dos grupos en cuanto a su composición: los ferrosos, compuestos básicamente por hierro, y los no ferrosos. El mineral de hierro representa la materia prima básica para los procesos industriales siderúrgicos, mediante los cuales se obtiene una variada gama de productos de hierro y aceros. El acero estructural es la aleación del hierro con una cantidad de carbono variable —entre 0,1% y 2,1%— y pequeñas cantidades de otros elementos que le aportan características específicas. El acero mantiene las características metálicas del hierro, mejorando las propiedades mecánicas. El porcentaje de carbono del acero es determinante para esas propiedades.

El acero se puede obtener a partir de la producción en yacimientos de mineral que son removidos con maquinaria y explosivos —produciendo diferentes impactos ambientales— o bien a partir de chatarras férricas en hornos eléctricos.

A pesar de que el proceso de reciclado tiene un consumo muy alto de energía eléctrica, una tonelada de acero producida con chatarra consume un tercio de la energía que utiliza para generar la misma cantidad de acero a partir de mineral de hierro. El tipo de materia prima condiciona el proceso de fabricación.

La industria del acero tiene aspectos positivos, si lo que se obtiene es a partir del reciclaje; a su vez, tiene aspectos negativos, si lo que se obtiene es a partir de la extracción del mineral a cielo abierto. La gran ventaja del reciclaje es evitar las perforaciones de las canteras y los gastos de energía en la fase de reducción del mineral metal, así como el transporte de grandes volúmenes (Cempre, 1998).

El reciclaje de cualquier material permite la renovación cíclica en forma indefinida. El proceso técnico supone que el material base tiene un suficiente nivel de pureza y compatibilidad como para que, una vez separado de impurezas, pueda renovarse. El acero permite su reciclaje sin cambiar las características técnicas del material obtenido de ciclo en ciclo, reduciéndose la energía de fabricación.

Admitiendo que la totalidad de las materias primas provienen de la recolección de chatarra, el número de ciclos de reciclaje puede ser infinito, y con ello el divisor al que deben someterse las cargas ambientales de la primera fabricación, lo que tenderá a cero. (Wadel, 2009).

El estudio se centró en la empresa Gerdau Laisa [GL], dedicada a la producción de acero partiendo de chatarra como materia prima que se transforma en diversos tipos de barras comerciales, gracias a la tecnología de los hornos de arco voltaico.

La fabricación del acero a partir de un 100% de chatarra es posible gracias a la tecnología de los hornos de arco voltaico. En la actualidad, toda chatarra recolectada en Uruguay es procesada por la industria GL.

Los insumos utilizados en el proceso de producción son: a) carbón mineral; b) ferroaleaciones; c) cal; d) agua destinada a los sistemas de refrigeración de las diferentes operaciones; e) combustibles, como el fueloil y el gas natural; f) oxígeno, utilizado en el proceso de aceración; g) energía eléctrica.¹

PROCESO DE PRODUCCIÓN A PARTIR DE 100% DE CHATARRA

Colecta y selección de chatarra ferrosa, fundición, solidificación, conformación, transfrío y almacenamiento.

ESTIMACIÓN DE ENERGÍA INCORPORADA EN EL ACERO

En el proceso de cálculo fueron considerados: a) el transporte de la chatarra al lugar de procesamiento; b) la energía de las prensas móviles; c) la energía de la prensa con imán que separa impurezas; d) la energía de las grúas; e) la energía del horno eléctrico; f) el transporte de las ferroaleaciones, del O_2 , de la cal y del carbón mineral; g) la energía aportada por el O_2 y el carbón mineral; h) la energía del horno de recalentamiento; i) la energía eléctrica utilizada en la planta, en general.

1. Los datos fueron suministrados por la empresa Gerdau Laisa.

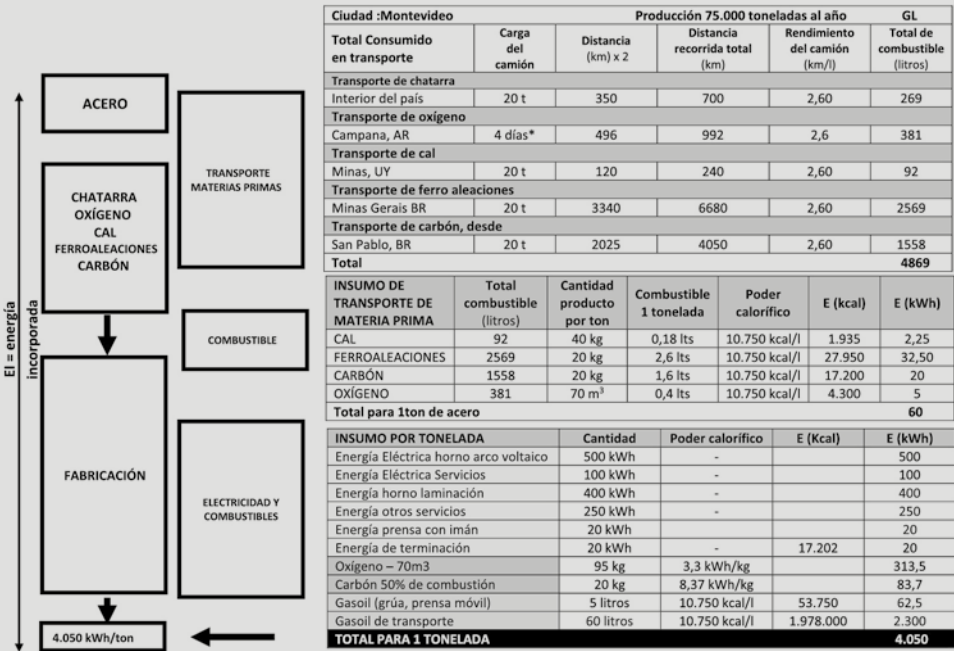


FIGURA 4. GASTOS TOTALES DE ENERGÍA EN GL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los datos obtenidos de la planta fueron analizados en kWh, para una tonelada de producto acabado. Luego, los resultados obtenidos fueron transformados a MJ/kg.

Los gastos totales de energía se presentan en la Fig. 4.

A partir de los insumos energéticos, la energía estimada fue convertida en poder calorífico [Tabla 4] según datos obtenidos en la propia planta u obtenidos de la bibliografía.

TABLA 4. VALORES DE PODER CALORÍFICO.

ENERGÍA	PESO ESPECÍFICO (kg/m³)	PODER CALORÍFICO		FUENTE DATOS PODER CALÓRICO
		kWh/kg	kcal/l	
Gasoil	852		10.750	Brasil 1997, <i>apud</i> Sperb, 2000
Carbón mineral		8.37		Dato de la empresa
Oxígeno	1,354	3.3		Dato de la empresa
Gas natural			9.50	UNS

FUENTE: ADAPTADO DE SPERB (2000) Y DATOS DE EMPRESA GL

TABLA 5. GASTOS ENERGÉTICOS DE TRANSPORTE DE CARGA.

VEHÍCULO	CARGA LÍQUIDA (t)	RENDIMIENTO Km/litro	PRODUCTIVIDAD (litro/t.km)	GASTO ENERGÉTICO (MJ/kg.km)
Camión semirremolque*	20	2,60	0,019	0,737 x 10 ⁻³
Camión 3 ejes semirremolque* 3 ejes ** tanque	26,4	2,60	0,018	0,692 x 10 ⁻³

* Valores obtenidos a partir de camiones cargados 100% de su capacidad útil.

FUENTE: ADAPTADO DE SPERB (2000)

TABLA 6. VALORES DE EI OBTENIDOS PARA EL ACERO.

GL	CONSUMO ENERGÉTICO	
	kWh	MJ
1 t de material	4.050	14.580
1 kg de material	4.05	14,58

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para el transporte, el consumo energético adoptado es obtenido a partir de los valores de productividad de camiones semirremolque, camiones semi-rremolque con zorra, camiones tanque (Reis, 1999, citado en Sperb, 2000), que —según datos obtenidos por GL— son el tipo de camiones que se utilizan para el transporte de los insumos utilizados en la empresa.

Los resultados de la energía incorporada se muestran en la Tabla 6.

Resultados

LADRILLO

Analizando la energía total consumida para la fabricación de ladrillos se destaca la utilización de biomasa como principal fuente de energía. El promedio de las dos ladrilleras muestra que el 94,4% de la energía es generada a partir de la biomasa; el 5,2%, de energía diesel; y el 0,38%, de energía eléctrica.

Tanto la extracción de la arcilla como el transporte de otros insumos utilizados en el proceso son realizados por máquinas y camiones que utilizan gasoil. El gasoil derivado del petróleo es un recurso no renovable.

EMISIONES DE CO₂, SEGÚN FUENTES UTILIZADAS

La energía invertida en el proceso de producción proviene de la biomasa: leña, aserrín, cáscara de arroz, viruta, abono. Todos recursos renovables.

Este tipo de energía, en la quema, libera emisiones de CO₂. Las emisiones de CO₂ producto de la combustión de la biomasa se asumen nulas, ya que el gas emitido en la quema es previamente secuestrado de la atmósfera por la biomasa viva y, en algún momento luego de su liberación, vuelve a ser absorbido, cerrando el ciclo.

Para el transporte de materias primas para la producción de ladrillos, se utiliza transporte de carga carretero a gasoil, que posee altas emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógenos y material particulado. El transporte tiene un elevado aporte a las emisiones de CO₂, principalmente debido al consumo de gasoil en el transporte carretero. El uso del gasoil del transporte genera material particulado, CO₂, SO₂, NO_x, provocando calentamiento global y polución (Lyle, 1994).

ACERO

Analizando la energía total consumida para una tonelada de acero, se destaca la utilización de la energía eléctrica como principal fuente de energía en el proceso de fabricación —un 32%— sin ser el mayor insumo energético, ya que el transporte se transforma en una componente importante, alcanzando el 60%. Esto se debe a que el traslado de insumos necesarios en el proceso —carbón, oxígeno y ferroaleaciones— recorren distancias importantes que alcanzan un promedio de 1950 km.

Se consideró la peor situación, en la cual el camión, una vez que descarga el insumo, vuelve vacío a su lugar de origen. El transporte de los insumos representa unos 8,28 MJ/kg adicionales para el acero, cuya energía de fabricación es de 6,3 MJ/kg, lo que implica multiplicar por 1,3 la energía de fabricación y mecanización, aumentándola un 30%. En este caso en que el material es reciclable, el transporte significa un porcentaje muy alto en la energía incorporada en el material. A pesar de esto, el valor obtenido de energía incorporada para el acero es 14,58 MJ/kg, similar a los obtenidos en otros países para acero reciclado. Y, si comparamos el valor del acero producido a partir de la explotación y extracción de materia prima —que según la bibliografía estudiada es de 35 MJ/kg—, sigue siendo un valor óptimo.

EMISIONES DE CO₂, SEGÚN FUENTES UTILIZADAS

La fusión de chatarra genera emisiones gaseosas y material particulado compuesto por óxidos metálicos, anhídrido carbónico generado en la combustión, óxidos nitrosos provenientes del aire involucrado y materiales orgánicos que se evaporizan en el proceso. Los residuos sólidos que se generan son captados en filtros y algunos de ellos constituyen residuos a ser dispuestos en el relleno de seguridad que posee la empresa en un predio vecino. Otros se trasladan a la usina Felipe Cardozo.

- El 9%: residuos no ferrosos de la prensa, a la usina Felipe Cardozo.
- El 10%: escoria, a la usina Felipe Cardozo.

- El 5%: polvo seco, proveniente del sistema de extracción de humos, al relleno de seguridad, ubicado en el padrón vecino a la planta, propiedad de GL.
- El 8%: laminillo —óxido ferroso— es comercializado a las cementeras.
- El residuo ferroso vuelve al proceso de producción.

El transporte tiene un elevado aporte a las emisiones de dióxido de carbono, principalmente debido a que es el principal insumo energético.

Discusión

De los dos materiales analizados, la producción de ladrillo tiene menor impacto ambiental que la producción de acero. La producción de ladrillo consume energía que proviene de fuentes renovables, y las emisiones son menores. La producción de acero requiere grandes cantidades de energía, y las emisiones producidas son mayores, con un incremental aporte de emisiones provenientes del transporte, que hace aumentar el valor de energía incorporada.

La fabricación de ladrillos genera impactos sobre la calidad del aire y sobre la morfología del terreno y el paisaje, debido a las emisiones procedentes de los hornos en la etapa de cocción, que causan efectos directos e indirectos sobre la salud humana, la flora, la fauna y el agua, contribuyendo al cambio climático global.

La explotación de las canteras sin un manejo adecuado produce excavaciones que no solamente afectan al paisaje, sino también a la estructura y configuración del suelo.

Las distancias entre las ladrilleras y la extracción de la arcilla son menores a 7 km, lo que minimiza el impacto del transporte; pero otros insumos se encuentran a distancias superiores a 100 km.

Durante el proceso de producción no se generan efluentes, pero sí residuos inertes constituidos por escombros cerámicos provenientes de los productos rechazados por rotura o deficiente cocción que puede alcanzar hasta un 15% y ser incorporados al proceso de producción, cerrando así el ciclo.

El acero tiene un alto potencial para ser reciclado. El 100% de los desechos de acero pueden ser reintroducidos en el proceso productivo. Sus propiedades metálicas permiten que esto sea físicamente viable usando imanes que separan el metal del resto de los residuos. Las características técnicas del material no cambian mientras se reduce la energía de fabricación. El ahorro de recursos obtenidos de la corteza terrestre, combinado con una menor cantidad de energía que la implicada en la fabricación de acero convencional, produce una doble mejora ambiental.

El cierre del ciclo de los materiales es condición del desarrollo sostenible, retornando a la calidad de recursos los residuos producidos por su uso (Cuchí, 2003); la obtención del acero a partir de chatarra permite una aproximación significativa a esta demanda.

La escoria generada en el proceso de producción del acero también puede ser reciclada, introduciéndola en el proceso o utilizándola en la industria del

cemento. Esta reutilización de los residuos en el proceso es beneficiosa, ya que significa una reducción de las emisiones de CO₂ y de la escoria residual.

El transporte tiene un peso significativo en el valor obtenido, por lo que se debería intentar reducir el flujo de transporte, trabajando con insumos locales o más cercanos, o utilizar medios de transporte más eficientes, con una optimización de los flujos de cargas que evite la circulación de camiones sin carga.

Conclusiones

Los impactos ambientales pueden ser caracterizados en cada etapa del ciclo de vida de la producción de cada uno de los materiales estudiados.

La elección de materiales a partir de principios ambientales puede estimular a la industria a producir materiales más sustentables. De los dos materiales caracterizados, el ladrillo es el que produce menor impacto ambiental, ya que consume menos energía en su producción y las emisiones de CO₂ —producto de la combustión de la biomasa— se suponen nulas.

La producción de ladrillo tiene como inconveniente que la extracción de arcilla deja al suelo sin capacidad productiva, carente de nutrientes, alterando las escorrentías superficiales. El análisis de este problema es inconmensurable —no se resuelve con una única y simple comparación energética— y debería involucrar una discusión mayor, que incluya la totalidad del problema.

En el sector del acero, más del 90 % de los insumos energéticos provienen de fuentes no renovables. La incidencia del transporte es significativa, lo que genera impactos a nivel local y regional, por emisiones. Se debería pensar, desde una mirada amplia, en la incorporación de transporte cuya fuente energética sea renovable como el transporte eléctrico, evitando emisiones.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten iniciar una reflexión sobre la construcción en Uruguay respecto a sus variables ambientales.

Referencias bibliográficas

- Arenas Cabello, F. J. (2008) Los materiales de construcción y el medio ambiente. *Medio Ambiente & Derecho. Revista electrónica de derecho ambiental*, (17). <https://huespedes.cica.es/gimadus/>
- Cempre. (1998). *Resíduos sólidos urbanos. Manual de Gestão Integral*. Montevideo: Cempre. Disponible en: <https://cempre.org.uy/manual-girsu/>
- CIB [Conseil International du Bâtiment]. (1999, julio). *Agenda 21 on sustainable construction* [Programa 21 sobre construcción sostenible] (Informe n° 237 del Consejo Internacional de la Construcción [CIB, por sus siglas en francés]). Rotterdam: CIB. Recuperado de <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB4675.pdf>
- Cuchí, A. (2003). *Los ciclos de materiales en la edificación. Materiales y tecnologías respetuosas con el medio*. Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas.

- Frampton, K. (1989). *Historia crítica de la arquitectura moderna*. Barcelona: Gustavo Gili.
- González Calderón, A.J. y Guerrero Baca, L. F. (2022). Bajareque tecnificado. Evaluación de energía incorporada y emisiones de CO₂ en comparación con la edificación convencional. Universidad de Guadalajara. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (11), 9–21. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/6651/665170661001/html/>
- Huang, B., Chen, Y., Mcdowall, W., Türkeli, S., Bleischwitz, R. y Geng, Y. (2019). Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai [Emisiones GEI incorporadas a los materiales de construcción en Shanghai]. *Journal of Cleaner Production*, (210), 777–785.
- Lyle, J. T. (1994). *Regenerative design for sustainable development* [Diseño regenerativo para el desarrollo sostenible]. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Manfredini, C. (2003). *Impactos ambientais causados pelas indústrias de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul* [Impactos ambientales causados por las industrias de cerámica roja en Río Grande del Sur]. (Tesis de maestría, Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Rio Grande del Sur [UFRGS], Porto Alegre, Brasil). Repositorio institucional de la UFRGS: <http://hdl.handle.net/10183/117391>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2007). *Anuario estadístico de transporte*.
- Mumma, T. (1995). Reducing the Embodied Energy of Buildings [Reducción de la energía incorporada de los edificios]. *Home Energy*, 12(1).
- Naciones Unidas. (2020). Panel Internacional de los Recursos. Recuperado de <https://www.resourcepanel.org/es/>
- Naciones Unidas. (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction* [Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022]. <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>
- OCDE [Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico]. (2019). *Estrategia de Competencias de la OCDE 2019. Competencias para construir un futuro mejor*. <https://doi.org/10.1787/e3527cfb-es>
- Organización Internacional de Normalización. (1997). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia* (ISO 14040). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Organización Internacional de Normalización. (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia* (ISO/TS 14040).
- Rivera García, F. (2020). *Carbono incorporado en la construcción: estimación de emisiones asociadas a nuevas viviendas de interés social y prioritario en Bogotá, 2020- 2030*. (Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia).
- Rodríguez, C. (2010, 15 de setiembre). La Cámara de la Construcción en Uruguay. *El País*.
- Societat orgànica. (2005). Ecomateriales: estrategias de economía circular para materiales de construcción.
- Sperb, M. (2000). *Avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção* [Evaluación de tipologías de vivienda a partir de la caracterización de impactos ambientales relacionados con los materiales de construcción]. (Tesis de maestría, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Federal de Río Grande del Sur, Porto Alegre, Brasil).

- Tavares, S. (2006). *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras* [Metodología para analizar el ciclo de vida energético de edificios residenciales brasileños]. (Tesis de doctorado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil).
- Wadel, G. (2009). *La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda*. (Tesis de doctorado, Programa de doctorado Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente en Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España).
- WCED [World Commission on Environment and Development]. (1987). *Our Common Future* [Nuestro futuro común] (Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo [WCED, por sus siglas en inglés]). <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- Yin, R. (2002). *Case study research. Design and methods* [Investigación de estudio de caso. Diseño y método]. Thousand Oaks (California): SAGE.