

**APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS:
ESTADO DEL ARTE**

JAVIER ORLANDO REYES RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS:
ESTADO DEL ARTE**

JAVIER ORLANDO REYES RAMÍREZ

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO CIVIL**

Director

OSCAR JAVIER BEGAMBRE

Ingeniero Civil, M. Sc, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. JUSTIFICACIÓN.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GENERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
2.3. ALCANCE:.....	18
3. CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA	19
3.1. ROBOTS PARA FINALIZADO DE SUPERFICIES EN CONCRETO	20
3.1.1. Aplicación.....	21
3.1.2. Evaluación.	23
3.2. ROBOTS PARA PINTADO DE MUROS	23
3.2.1. Aplicación.....	24
3.2.2. Evaluación.	26
3.3. ROBOTS PARA LA INSPECCIÓN DE BALDOSAS	26
3.3.1. Aplicación.....	27
3.3.2. Evaluación.	29
3.4. MANIPULADORES DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	30
3.4.1. Evaluación.	30
3.5. SISTEMAS INTEGRADOS	31

3.5.1. Dos Ejemplos De Éxito En Sistemas Integrados.	32
3.5.1.1. Sistema Constructivo Autónomo De Edificios (ABCS).....	32
3.5.1.2. Sistema Big-Canopy.	35
3.6. ROBOTS ALBAÑILES	37
3.6.1. ROCCO: Sistema de Ensamble Robótico para Construcciones Integrada por Computador.	37
3.6.2. SAM: Maquina de Albañilería Semiautónoma.....	38
3.6.2.1. Rendimiento.....	39
3.6.3. Hadrian.	40
3.7. EXOESQUELETO METÁLICO	41
3.8. ROBOT WR PARA ENSAMBLE DE VIGAS DE ACERO	42
3.9. CONTOUR CRAFTING (CC)	42
3.9.1. Estado Actual de Investigación y Desarrollo De CC.	44
3.9.2. Diseño de la Máquina de CC.	44
3.9.3. Desarrollo de la Mezcla de Mortero y su Fuerza de Compresión.	45
3.9.4. Fabricación.	46
3.9.6. Resultados.	48
3.9.7. Rendimiento.....	48
3.10. TERMES	49
3.10.1. Enfoque.....	49
3.10.2. Escalada.	50
3.10.3. Navegación.	50
3.10.4. Manipulación.....	50

3.10.5. Demostración Constructiva	50
3.10.6. Rendimiento	52
4. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS	53
4.1. VENTAJAS	53
4.2. DESVENTAJAS	54
4.3. SUMARIO DE LOS SISTEMAS ROBÓTICOS TRATADOS	55
5. CONCLUSIONES	57
CITAS	59
BIBLIOGRAFIA.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados de pruebas de fuerza a la compresión.	46
Tabla 2. Sumario sistemas robóticos tratados.	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Robot de finalizado de concreto “Kote-King” .	21
Figura 2. Robot de finalizado de concreto “Surf-Robo”	22
Figura 3. Robot de finalizado de concreto “Flat-kun” .	22
Figura 4. Robot finalizador de concreto de Obayashi.	23
Figura 5. Robot pintor de Shimizu.....	25
Figura 6. Robot de pintado “KFR-2”	25
Figura 7. Robot de pintado “TPR-02”	26
Figura 8. Robot de inspección de baldosas de Kajima.	28
Figura 9. Robot de inspección de baldosas de Takenaka.	28
Figura 10. Robot de inspección de baldosas de Obayashi	29
Figura 11. Robot de inspección de baldosas de Taisei.....	29
Figura 12. Robot manipulador Tokyu para materiales livianos.	30
Figura 13. Sección de corte del sistema integrado de construcción autónomo ABCS.....	33
Figura 14. El sistema ABCS construyendo el edificio NEC en Tamagawa.	34
Figura 15. El sistema ABCS ahorra 6 meses de tiempo en una construcción de 40 pisos.....	34
Figura 16. El sistema ABCS muestra cuan consistente es en cuando a precio con respecto a sistema tradicionales.....	35
Figura 17. El sistema Big-Canopy provee un mejor sistema de transporte de material, así como un mejor ambiente laboral.	36
Figura 18. El sistema Big-Canopy usa una técnica de construcción con módulos prefabricados.....	36
Figura 19. La productividad se incrementa al menos un 30% usando el sistema Big-Canopy.	37
Figura 20. Robot de ensamble de ladrillos, Proyecto ROCCO.	38

Figura 21. Robot de ensamble de ladrillos, SAM.....	39
Figura 22. Robot de ensamble de ladrillos, HADRIAN.....	40
Figura 23. Un ejemplo de un robot armadura en desarrollo (exoesqueleto) para la ayuda de procesos de carpintería.	41
Figura 24. Robot móvil WR de fundición de columnas.	42
Figura 25. Mecanismo de llenado (amarillo) y de extrusión (verde).....	43
Figura 26. Boquilla Unitaria CC (a) y múltiples conjuntos de boquillas (b).....	44
Figura 27. Máquina CC para la fabricación de un muro de concreto.	45
Figura 28. Formaleta de Concreto fabricada por la máquina de CC.....	47
Figura 29. Llenado de concreto capa por capa.....	47
Figura 30. Muro de Concreto hecho por la máquina de CC.....	48
Figura 31. Resumen del sistema.	51
Figura 32. Instantáneas en el proceso de construcción autónoma de una estructura de diez bloques.	52

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS: ESTADO DEL ARTE.*

AUTOR: JAVIER ORLANDO REYES RAMÍREZ.**

PALABRAS CLAVES: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN, APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN, RENDIMIENTO, CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.

DESCRIPCIÓN:

La industria de la construcción es una empresa dinámica que debe enfrentar circunstancias únicas en casi todos los proyectos y sitios de construcción. La naturaleza de cada obra, el clima, las dificultades y riesgos de trabajos temporales son grandes problemas que debe enfrentar la robótica cuando se emplea a la construcción. Además hay que realizar una gran inversión inicial. A pesar de lo anterior, se han realizado grandes progresos en la aplicación de la robótica en la industria de la construcción.

En esta revisión se abordan y discuten los principales procedimientos, técnicas y aplicaciones de la robótica en la industria de la construcción haciendo énfasis en sus aplicaciones en la construcción de vivienda. En este contexto, el rendimiento y las consideraciones económicas de la implementación de la robótica en la industria de la construcción son discutidos, además de la comparación del factor de rendimiento de los sistemas robóticos tratados contra el de la mano de obra humana al desarrollar la misma función con el fin de apreciarlo de manera cuantitativa.

Gran parte de las aplicaciones robóticas de la construcción de vivienda se ven limitadas a ciertas tareas simples pero intensivas como son el trabajo en concreto, pintado de muros, o el levantamiento de objetos pesados.

La mayoría de la información dentro de esta revisión corresponde a la investigación, desarrollo, e implementación de los robots y robótica en la industria de la construcción ha sido realizada por los japoneses.

*Proyecto de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director. M. Sc, PhD. OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARILLO.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF ROBOTICS IN BUILDING CONSTRUCTION: STATE OF ART.*

AUTHOR: JAVIER ORLANDO REYES RAMÍREZ.**

KEYWORDS: Construction industry, application of robotic in construction, performance, economic considerations.

DESCRIPTION:

The construction industry is a dynamic enterprise that has to face unique circumstances on nearly every project and site of construction. The nature of each construction site, the weather, the difficulties and hazards presented by temporary works are big problems that robotic has to face when using it on construction. There is also a huge initial investment needed. Despite the above, huge progress has been made in the application of robotic in construction.

In this review will be approach and discuss the main procedures, techniques and applications of robotic in the construction industry focusing in its application on housebuilding. The performance and economic considerations of the implementation of robotic in the construction industry are discussed, in addition will be made a comparing of the performance factor of robotic systems treated versus the human labor when they develop the same function in order to appreciate it quantitatively.

Most of the robotic applications of house building are limited to certain intensive simple tasks such as concrete work, wall painting, or heavy objects manipulation.

It should be noted that most of the information concerning robots and robotics research, development, and implementation in construction industry in this review has been performed by the Japanese.

*Research Project.

**Faculty of physical and mechanical engineering. School of Civil Engineering. Director. M. Sc, PhD. OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARILLO.

INTRODUCCIÓN

Hasta hace muy poco, la industria de la construcción fue uno de los campos con menor Investigación y Desarrollo (I&D) en cuanto a robótica y automatización, a pesar del hecho que esta industria es una de las más antiguas y grandes representantes del sector económico. La construcción hecha por esta industria aporta al PIB de los países alrededor del 7-10% [1]. Este valor es comparable a la de la industria de la manufactura. Pero en este último, la inversión en I&D es del doble que en el caso de la construcción [2].

El nivel tecnológico de la industria de la construcción durante épocas antiguas fue muy avanzado para sus correspondientes periodos históricos. Las civilizaciones antiguas construyeron estructuras que han perdurado muchísimo tiempo como Catedrales, Acueductos, Acrópolis, Pirámides. Ellos usaron procesos y materiales innovadores para los estándares normales que se registraron en sus épocas. Aun así, algunos procesos constructivos hoy en día han cambiado muy poco.

Como ejemplo, la construcción de un edificio ha cambiado muy poco en los últimos ochocientos años [3]. Las viejas herramientas han sido sustituidas por unas más avanzadas. Estas aun siendo más sofisticadas, usan los mismos principios de trabajo: control manual, reacción por parte de un operador humano. Los únicos elementos que han cambiado son: maquinaria a base de electricidad o gasolina como reemplazo de fuerza humana y estructuras metálicas en reemplazo de elementos en madera. Estos dos avances permiten incrementar la velocidad de construcción, y rentabilidad, pero la filosofía de la construcción como tal ha cambiado muy poco [3].

En años recientes, la industria de la construcción se ha convertido en una de las áreas más importantes de investigación en cuanto a robótica como aplicación de la misma. La principal dificultad del uso de la Robótica en la Construcción (RC) está relacionada con la naturaleza del ambiente de trabajo, el cual es pocamente estructurado. Trabajar en este ambiente envuelve manejar objetos pesados, elementos hechos con grandes tolerancias, bajos niveles de estandarización, niveles medios de industrialización y prefabricados, en adicción a la intervención de numerosos actores no coordinados (arquitectos, constructores, proveedores) [4].

Es por ello que se necesita un gran esfuerzo para incrementar el nivel de automatización y mejorar la productividad de este importante sector.

Durante los años 1990 las actividades de I&D en el campo de RC fueron lideradas por compañías y universidades japonesas, y fueron centradas en el desarrollo de nuevos sistemas robóticos (la mayoría de ellos tele-operados) y en la automatización de la maquinaria existente [5]. Esta robótica trato de automatizar multitud de procesos en la construcción de vivienda y en la construcción civil. Algunos ejemplos fueron: finalización de interiores de edificios, posicionamiento de ladrillos (albañilería), construcción modular industrializada de edificios, pavimentación a base de sensores guiados, excavación controlada, inspección de infraestructura, construcción de puentes y túneles entre otros [5].

La crisis en Japón así como otros factores tales como la insatisfactoria aceptación de la RC redujeron enormemente la inversión en las actividades de investigación durante los últimos años, solo algunos robots de construcción han sido un éxito en su camino hacia el mercado. Aun así la situación está cambiando ahora y nuevos campos de investigación de RC se han lanzado en la industria. Las actividades actuales de I&D están centradas más en Software y en Tecnologías de Información (TI) [3]. No está limitado solo a software pues también incluye

hardware, pero no en el sentido de maquinaria como tal. Se incluyen sensores in-situ para obtención de información y procesamiento de la misma, seguridad y protección en campo para los operadores humanos, procesadores y monitoreo basados en controladores de computadora e inventarios automatizados entre otros [6]. A continuación se presenta, un estado del arte de la robótica en la construcción centrado en vivienda.

1. JUSTIFICACIÓN

Aplicaciones de la automatización y la robótica son citadas como parte de la solución para mejorar la productividad, calidad, condiciones de trabajo y atajos en los trabajos en la industria de la construcción.

Un área potencial de importancia es la rehabilitación de infraestructuras. Ya que los ingenieros civiles jugamos un papel importante en la construcción y en la rehabilitación de infraestructuras; es por ello que emplear técnicas de automatización de la construcción y la robótica se ha vuelto una necesidad contemporánea.

La industria de la construcción es una labor intensa y es conducida en situaciones peligrosas, cada año en países como Estados Unidos 400.000 trabajadores resultan gravemente heridos o muertos mientras desarrollan la labor de la construcción. Y el desperdicio de material es también un gran problema en los métodos de construcción convencional, la construcción de una sola casa genera entre 3 o 7 toneladas en flujo de residuos. Pero tecnologías robóticas aplicadas al campo de la construcción pueden eliminar los riesgos laborales y reducir en gran medida los desperdicios generados en las obras civiles.

Aplicaciones y actividades en torno a la robótica empezaron a principio de los 90s apuntando a la optimización de las operaciones de los equipos, aumento de la seguridad, mejoramiento de la percepción del espacio de trabajo y el aseguramiento de la calidad del ambiente de los habitantes de los edificios.

Los robots son ampliamente usados para ayudar a los trabajadores en los sitios de construcción. Este muestra un enfoque descentralizado, autónomo, flexible, simple y adaptativo de la construcción.

Es por ello que, la robótica se ha ido convirtiendo en una interesante investigación para la industria de la construcción.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión crítica sobre las técnicas, procedimientos y aplicaciones de la robótica en la industria de la construcción.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar, clasificar y determinar las técnicas y procedimientos de la robótica en la construcción.
- Identificar aplicaciones de la robótica en diferentes áreas de la construcción.
- Clasificar las aplicaciones de la robótica con sus ventajas y desventajas.

2.3. ALCANCE:

- Las ventajas y desventajas de las aplicaciones de la robótica en el campo de la construcción abarcan únicamente los factores de: rendimiento y precisión.
- Las estructuras de estudio serán edificaciones de vivienda en concreto o acero.

3. CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA

Las principales actividades de investigación de RC en la década pasada están divididas acorde a aplicaciones en dos grandes grupos: infraestructura civil y construcción de vivienda. Generalmente las aplicaciones robóticas en la infraestructura civil son la automatización de construcción de vías, túneles, puentes y estudio de suelos. En el grupo de la construcción de vivienda, las principales aplicaciones incluyen la construcción, ensamblado de la estructura, compactación de concreto, terminación de interiores [7].

La operación de terminación de interiores en edificios es una tarea que consume mucho tiempo, y requiere un alto grado de precisión. Existen varios manipuladores móviles que permiten realizar una variedad de operaciones como extender, compactar y controlar la anchura en el piso de concreto, pintado y la de proteger mediante esparcimiento de sustancias las vigas de acero contra el calor, así como el ensamblaje de los muros interiores y techos, entre otros. La mayoría de la robótica implicada en estas operaciones es tele-operada y desarrolla solo operaciones sencillas [8]. A continuación se tratan en forma detallada los siguientes sistemas robóticos:

- Robots para finalizado de superficies en concreto.
- Robots para pintado de muros.
- Robots para inspección de baldosas.
- Manipuladores de materiales de construcción.
- Sistemas Integrados.
- Robots albañiles.
- Exoesqueleto metálico
- Robot WR para ensamble de vigas de acero.

- Contour Crafting (CC).
- TERMES.

3.1. ROBOTS PARA FINALIZADO DE SUPERFICIES EN CONCRETO

La finalización de los pisos de concreto es una de las tareas físicamente más demandantes en la construcción, y se necesita trabajar largas jornadas para mantenerse con el curado del concreto.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por [9] al comparar y examinar cuatro robots mostrados en las Figuras 1, 2, 3, 4 diseñados para el finalizado de los pisos en concreto.

La meta de su desarrollo fue:

- Mantener la calidad de la obra.
- Reducir la mano de obra humana.
- Aliviar a los trabajadores de trabajo en exceso pesado.

Características comunes de los cuatro robots incluyen:

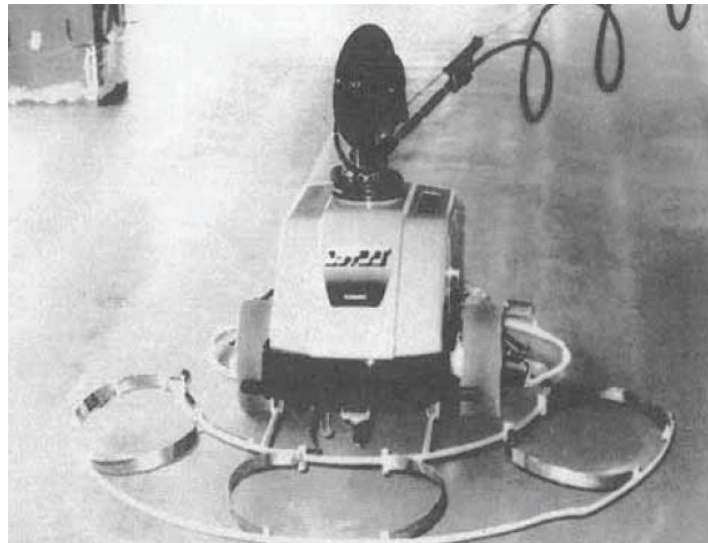
- Todos operan sobre concreto.
- Todos operan automáticamente en todas direcciones sin necesidad de límites.
- Todos excepto (Flat-Kun) requieren de instrucciones simples del área de trabajo.
- Todos utilizan palas de acero para efectos de finalizado.

Diferencias entre estos robots son:

- El vehículo de movimiento y las palas de finalizado pueden ser separadas o integradas.
- La fuente de poder puede ser por motor eléctrico o a base de gasolina.
- La interfaz de uso humano puede ser automática o a control remoto.
- Las tareas son programadas digitalmente o en secuencias manuales.
- La navegación es controlada a través de giroscopio o por detección laser.
- Los obstáculos puede ser evitados ya sea automáticamente (pre-programados) o deteniéndose conforme se detectan.
- Los robots viajan a través de rodillos o neumáticos de baja presión.

3.1.1. Aplicación. Los robots de finalización de concreto son más adecuados para edificios con pisos de grandes áreas ($500-600m^2$ por operación) y con pocos obstáculos como columnas, muros y grandes aberturas.

Figura 1. Robot de finalizado de concreto "Kote-King".



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 2. Robot de finalizado de concreto “Surf-Robo”.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 3. Robot de finalizado de concreto “Flat-kun”.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 4. Robot finalizador de concreto de Obayashi.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

3.1.2. Evaluación. La calidad del finalizado de los cuatro robots es igual o mejor que la de cualquier trabajador especializado. Todos los robots fueron de 3 a 8 veces más rápidos que un trabajo especializado haciendo la misma labor. Por ejemplo, un trabajador especializado puede hacer un acabado de $100\sim 120m^2$ por hora, mientras que el robot hace el mismo acabado de $300\sim 800m^2$ por hora. [9]

3.2. ROBOTS PARA PINTADO DE MUROS

Tradicionalmente, los pintores trabajan en góndolas atadas a los techos. Muchas veces, las alturas de elevación son muy grandes lo que expone al trabajador a muchos riesgos.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por [10] al comparar y examinar tres robots mostrados en las Figuras (5, 6, 7) usados para pintar paredes exteriores.

La meta de su desarrollo fue:

- Liberar a los trabajadores de trabajo peligroso.
- Mejorar el ambiente laboral.
- Mejorar la productividad.
- Mejorar la calidad de la obra.
- Reducir el uso de mano de obra humana.

Características comunes de los tres robots incluyen:

- Todos los robots pintan mediante spray, usando variedad de pistolas de aire.
- Todos los robots pueden ser operados vía automática (secuencia) y a control remoto.

Diferencias entre estos robots son:

- Los robots viajan automáticamente a lo largo de los muros vía góndola o por sistema de succión.
- El recorrido del pintado es programado, ya sea vía digital o por secuencia de control.
- La uniformidad del acabado es conseguida por pistolas rotativas o ajustando la velocidad del atomizado.

3.2.1. Aplicación. Esta clase de robots pintores son más eficientes en áreas donde la superficie tiene o sobrepasa los $2000m^2$, como grandes almacenes o plantas de poder.

Figura 5. Robot pintor de Shimizu.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 6. Robot de pintado "KFR-2".



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 7. Robot de pintado “TPR-02”.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

3.2.2. Evaluación. Con la excepción de la instalación del equipo en el techo, los trabajadores humanos se libran del trabajo a grandes alturas. Cada robot tiene un sistema para contener la pintura atomizada, eliminando la posibilidad de pintar zonas no deseadas.

Se encontró que los robots pueden pintar de $100\sim 200m^2$ por hora, 2 a 8 veces más rápido que si fuera hecho como labor manual, dependiendo del tipo de pintura. Las fluctuaciones en el espesor de la pintura varía de 850~2100 micrones por robot, algo mejor que un trabajador humano especializado. [10]

3.3. ROBOTS PARA LA INSPECCIÓN DE BALDOSAS

Muchos de los edificios en Japón tienen sus fachadas con baldosas de cerámica. Es por ello que la inspección de las mismas es de gran importancia para prolongar la vida de los edificios además de prevenir daño por la caída de estas.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por [11] al comparar y examinar cuatro robots mostrados en las Figuras (8, 9, 10, 11) diseñados para la inspección de baldosas.

La meta de su desarrollo fue:

- Incrementar la seguridad en los resultados de inspección de baldosas.
- Liberar a los trabajadores de trabajo peligroso, pesado y monótono.

Características comunes de los cuatro robots incluyen:

- Todos los robots viajan sobre la superficie de las baldosas.
- Todos los robots evalúan la condición de la unión de la baldosas a través del sonido.
- Todos los robots tienen dispositivos de prevención de caída.

Diferencias entre estos robots son:

- La detección de fallas es programada por secuencia, digitalmente o por control remoto.
- Los robots están colgados mediante cables o pegados al muro por sistema de succión.
- Los robots son impulsados ya sea por motor de DC o AC.
- La condición de la unión de las baldosas es detectada ya sea por golpes con martillo o por ultrasonido.

3.3.1. Aplicación. Esta clase de robots de inspección se les dificulta su proceso de operación en condiciones adversas de clima como lluvia o fuertes vientos por lo cual no se deben usar bajo esas circunstancias. [11]

Figura 8. Robot de inspección de baldosas de Kajima.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 9. Robot de inspección de baldosas de Takenaka.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 10. Robot de inspección de baldosas de Obayashi



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

Figura 11. Robot de inspección de baldosas de Taisei.



Fuente: C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan" [9].

3.3.2. Evaluación. Para todos los robots, las zonas más peligrosas de inspección son reemplazadas por trabajo analítico. Dado que los resultados son mostrados gráficamente, no se requiere de entrenamiento para interpretar las áreas que necesitan arreglo. [11]

3.4. MANIPULADORES DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los manipuladores de materiales han sido desarrollados como soluciones prácticas para la ubicación de componentes grandes y pesados dentro del área de la construcción como el mostrado en la Figura 12.

Figura 12. Robot manipulador Tokyu para materiales livianos.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Estos sistemas están generalmente guiados manualmente, pero también hay manipuladores guiados de manera autónoma que han sido adaptados exitosamente para el uso en proyectos constructivos, proveyendo transporte autónomo de componentes del edificio a su apropiado lugar de montaje [9].

3.4.1. Evaluación. Los manipuladores de materiales tienen una capacidad de levantamiento de entre 150-500kg, así como de reducir el tiempo de instalación de cielo raso a 2,5 minutos por tablero comparado a los 3-4 minutos hecho por personal humano. La mano de obra humana también es reducida a un trabajador contrario al sistema convencional donde se usa un equipo de dos personas [9].

3.5. SISTEMAS INTEGRADOS

En esta sección se presentan el análisis detallado obtenido por [12] sobre los sistemas integrados para la construcción de edificios.

Muchas constructoras japonesas han encontrado que los sistemas de construcción integrados son una opción estratégica atractiva en orden de encontrar mayor competitividad.

Los sistemas de construcción integrados consisten fundamentalmente de cuatro elementos:

- Una plataforma temporal de trabajo cubierta y un sistema de elevación.
- Un sistema de entrega de piezas estructurales y componentes de ensamble conforme se vayan necesitando.
- Un sistema automatizado para la manipulación de materiales de construcción
- Un sistema centralizado de control integrado en el centro de control.

La plataforma temporal de trabajo completamente cerrada provee un ambiente tipo fábrica en el cual todos los manipuladores de material y sistemas constructivos automatizados pueden operar. Además la estructura cerrada provee protección de posibles condiciones de ambiente adverso y reduce el impacto de la construcción en la naturaleza circundante. La plataforma entera es construida sobre gatos hidráulicos y cada que un piso completo es terminado, estos pueden ser activados para elevar la plataforma de trabajo a un nivel adecuado para completar el siguiente piso.

Miembros estructurales y componentes de ensamble prefabricados son entregados solo cuando se necesitan. Estos son identificados mediante el uso de código de barras y luego estos son automáticamente transportados de la zona de

descarga (nivel de suelo) a su posición final dentro de la estructura (plataforma de trabajo). Los manipuladores de material de construcción luego orientan y posicionan los componentes de ensamble y miembros estructurales.

Un sistema central de manejo de información monitorea y coordina el proceso de construcción. El sistema mantiene un inventario a tiempo real de los componentes estructurales, planos de trabajo, programación y su respectivo progreso.

3.5.1. Dos Ejemplos De Éxito En Sistemas Integrados. Dos de los más exitosos sistemas autónomos de construcción integrada son los del Sistema Constructivo Autónomo de Edificios de la corporación Obayashi (ABCS) y el sistema Big-Canopy [12].

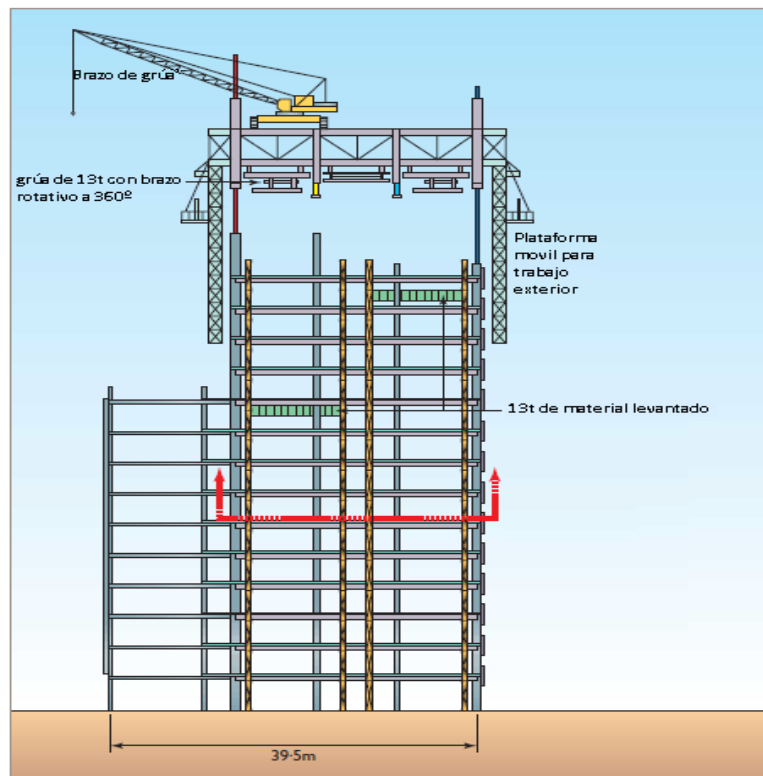
3.5.1.1. Sistema Constructivo Autónomo De Edificios (ABCS). El ABCS integra fabricación autónoma con operaciones de proyectos constructivos y ello permite continuar trabajando independientemente de si las condiciones del clima son adversas. De manera paralela un sistema de transporte se encarga de mover los componentes estructurales de forma vertical y horizontal del área de recepción a la zona de operación de la construcción.

La Figura 13 muestra una vista en corte de una fábrica típica de construcción ABCS y en la Figura 14 se observa la construcción del edificio NEC a través de este sistema. El almacén de la fábrica que se encarga de soportar la grúa y los materiales levantados consisten de acero estructural que luego será usado como techo para la estructura finalizada.

El mecanismo de alzado descansa en una estructura alterna de columnas de aceros y la parte más superior de cada columna es equipada con un sistema de cerradura de gato hidráulico. El sistema entero, incluyendo grúas y materiales movilizados pesa aproximadamente 2200 toneladas.

La corporación Obayashi expone que la programación de construcción para una estructura de 30 pisos puede ser reducido en tres meses y para una estructura de 40 pisos puede ser reducido en seis meses. La Figura 15 compara las programaciones de tres proyectos de gran altura de construcción convencional y tres proyectos de gran altura usando este sistema. La Figura 16 muestra una comparación en unidades de trabajo requeridas para la construcción de cuatro proyectos realizados por la compañía Obayashi. Los primeros dos proyectos usaron técnicas convencionales y los dos finales usaron el sistema ABCS [12].

Figura 13. Sección de corte del sistema integrado de construcción autónomo ABCS.



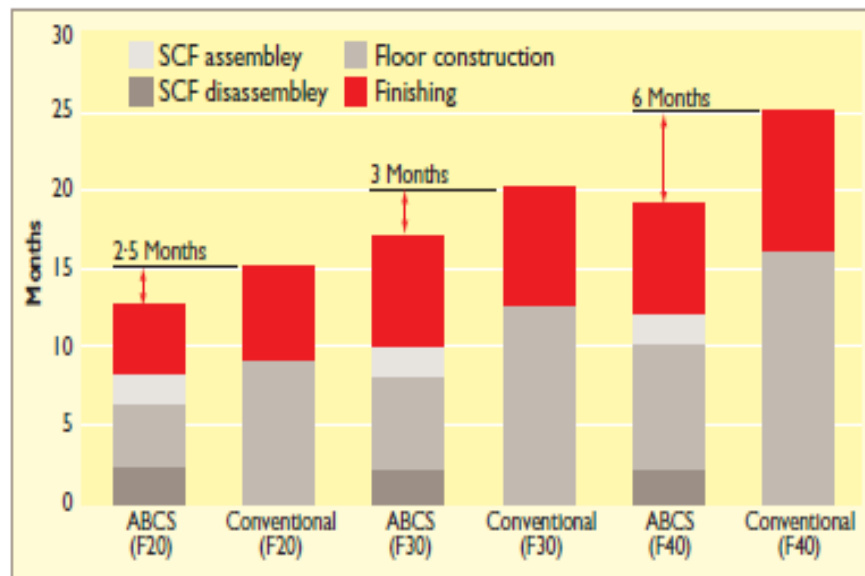
Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Figura 14. El sistema ABCS construyendo el edificio NEC en Tamagawa.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Figura 15. El sistema ABCS ahorra 6 meses de tiempo en una construcción de 40 pisos.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Figura 16. El sistema ABCS muestra cuán consistente es en cuando a precio con respecto a sistema tradicionales.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

3.5.1.2. Sistema Big-Canopy. El sistema Big-Canopy usa una combinación de concreto prefabricado e in-situ con subcomponentes de ensamble mostrado en la Figura 17. Los componentes prefabricados incluyen columnas, vigas, losas, y elementos de muros interiores. Adicionalmente la fábrica incluye tuberías de drenaje verticales y horizontales, así como ductos de aire acondicionado. La Figura 18 muestra el sistema de construcción de módulos prefabricados usados en conjunto con el sistema Big-Canopy.

El sistema consiste en una súper góndola de 13 toneladas que sirve para levantar materiales de manera vertical y grúas automatizadas para el transporte horizontal de los elementos estructurales y su respectivo posicionamiento. La rotación causada por el viento y la inercia son controlados.

El peso total de la estructura metálica en el techo, el mecanismo de alzado, y las grúas es de aproximadamente 600 toneladas. La estructura del techo esta levantada dos pisos cada vez, a un ritmo de 300 mm/min.

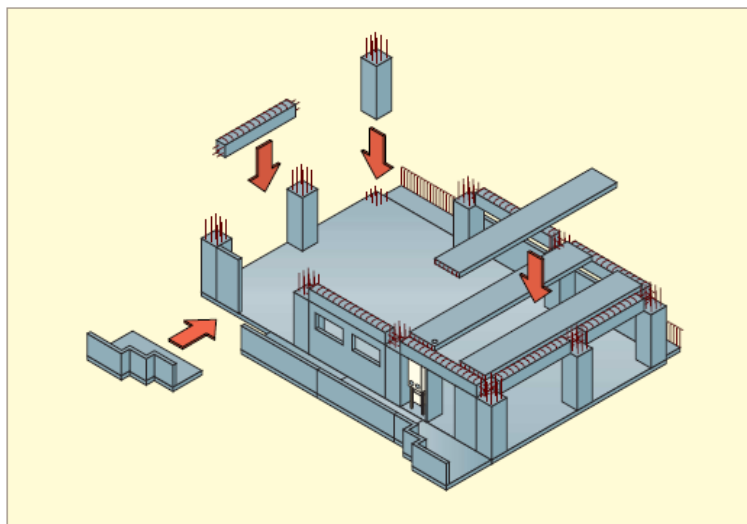
La Figura 19 compara los días-hombre por m^2 de área de suelo necesaria para la superestructura mediante medio convencional contra medio alternativos de construcción. El ambiente de trabajo también es mejorado mediante la reducción de la temperatura de la superficie de los operativos y de su ambiente laboral. [12]

Figura 17. El sistema Big-Canopy provee un mejor sistema de transporte de material, así como un mejor ambiente laboral.



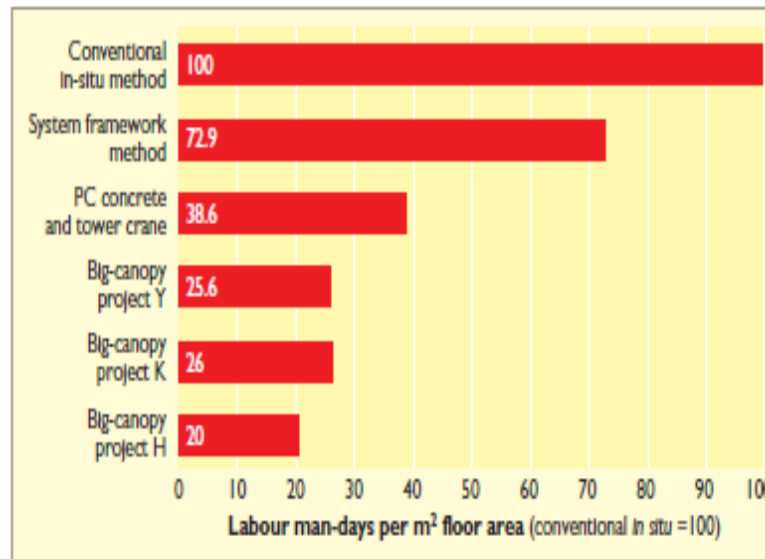
Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Figura 18. El sistema Big-Canopy usa una técnica de construcción con módulos prefabricados.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

Figura 19. La productividad se incrementa al menos un 30% usando el sistema Big-Canopy.



Fuente: M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan" [12]

3.6. ROBOTS ALBAÑILES

3.6.1. ROCCO: Sistema de Ensamble Robótico para Construcciones Integrada por Computador. Las últimas dos décadas han presenciado el desarrollo de gran variedad de robots para el ensamble automático de edificios. Un esfuerzo ha sido hecho en la postura de elementos prefabricados para la realización de muros de mampostería.

El proyecto Europeo ROCCO mostrado en la Figura 20 desarrolla un largo rango de (6 m de alcance) y un poder de levantamiento (hasta de 1000 kg) para el ensamble de ladrillos. El robot está equipado con un láser telemétrico de auto-rastreo en la punta en orden de desarrollar grandes precisiones en el ensamble de los ladrillos [13]. El robot desarrolla la secuencia de ensamble obtenida por un

software de planeación y necesita de una orden de iniciación para empezar el proceso de ensamble. [14]

Figura 20. Robot de ensamble de ladrillos, Proyecto ROCCO.



Fuente: E. Gambao, C. Balaguer, A. Barrientos, R. Saltaren, y E.A. Puente, “Robot assembly system for the construction process automation” [13]

3.6.2. SAM: Máquina de Albañilería Semiautónoma. SAM es un sistema semiautónomo con fines albañiles que originalmente fue previsto en 2006 por la compañía Construction Robotics [15].

Para su uso se debe instalar un andamio en la zona de área designada para la construcción del muro en mampostería. Adicionalmente, se carga el sistema con dibujos computarizados para propósitos de guía. Luego se carga la maquinaria con ladrillos y mortero. Cuando el sistema encuentra algún tipo de obstáculo no previsto simplemente se detiene en espera de asistencia humana [16].

Figura 21. Robot de ensamble de ladrillos, SAM.



Fuente: ARIS; “Brick Laying Robot Delivers Productivity, Quality & Worker Health Benefits” [15]

Los componentes físicos de SAM son construidos por la fábrica Suiza de robótica Staubli. El software de SAM tiene la habilidad de ajustar el espaciado entre ladrillos y las cantidades de mortero necesario para poder alcanzar el espaciado perfecto para la construcción del muro [15].

3.6.2.1. Rendimiento. Actualmente, la velocidad máxima del sistema SAM es igual que la de los mejores albañiles. Pero dado que el sistema no se fatiga, supera drásticamente las capacidades humanas. Los albañiles más hábiles son capaces de colocar de 400-500 ladrillos por día, mientras SAM coloca de 1400-1500 ladrillos por día (un 3 a 1 de ventaja productiva). De acuerdo con la oficina de estadísticas laborales de USA, el promedio por el pago por hora para un albañil es de US\$22.50. A la tasa actual de rendimiento de SAM 3 a 1 (1500 vs 500 ladrillos por día), el sistema SAM solo necesitaría costar menos de US\$360 por día para ser más rentable que la mano de obra humana (SAM + 1 Operador vs 3 albañiles). Teniendo el mismo costo en el mortero, ladrillos, etc. Esto podría ser fácilmente alcanzado si SAM reemplazara dos trabajadores al tiempo, resultaría en ahorros de hasta US\$90.000 por año (2 albañiles*US\$22.50 por hora * 8 horas * 5 días por semana * 50 semanas). [15]

3.6.3. Hadrian. Ingenieros en Perth, Australia han creado una maquina completamente funcional que puede construir el armazón de mampostería de una casa completa en solo dos días, trabajando 20 veces más rápido que el más hábil de los albañiles. [17]

El robot alcanza su máxima velocidad a los 1000 ladrillos por hora, lo que equivale a la totalidad de la mampostería de 150 casas al año.

HADRIAN consta de un brazo telescópico articulado de 28 m (92 pies). El sistema se monta encima de una retroexcavadora como se muestra en la Figura 22. Aunque se plantea que la versión final este montada encima de un camión, permitiéndole moverse más rápido de un lugar a otro. El brazo se autocorrigue hasta 1000 veces por segundo para prevenir interferencias debido a vibraciones. El concepto es similar al proceso de manufactura usado por las impresoras 3D. [17]

El Sistema HADRIAN reduciría el tiempo de construcción de un hogar promedio en aproximadamente 6 semanas dijo (Mike Pivac CEO de Fastbrick Robotics).

Figura 22. Robot de ensamble de ladrillos, HADRIAN.



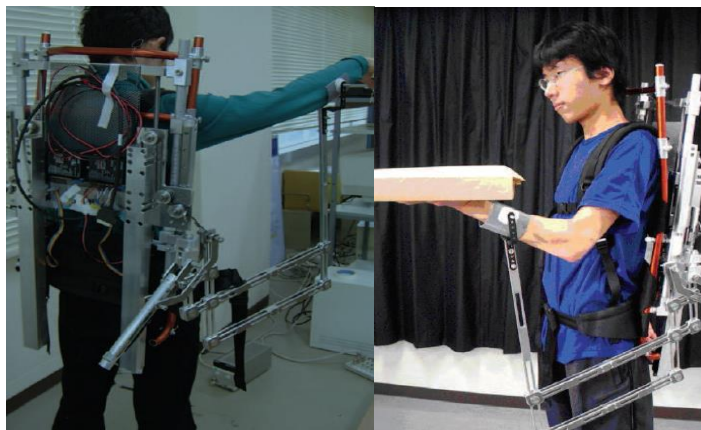
Fuente: N. David; “Brick-laying robot can build a full-sized house in two days” [17]

3.7. EXOESQUELETO METÁLICO

Durante los últimos años ha habido una tendencia a desarrollar trajes robóticos para diferentes aplicaciones. El primer punto de vista de estos trajes robóticos fue en el área militar, la idea era proveer a los soldados con poderosos exoesqueletos para les permitieran manejar cargas pesadas y resistir periodos más largos de tiempo sin llegar a la fatiga. La principal limitación de esta tecnología es la fuente de poder, pero en los sitios de construcción esto no debería ser un problema, ya que el traje podría estar conectado alguna fuente de poder mientras el operario la usa. [18]

Un traje exoesqueleto da al usuario una mayor fuerza que la de los límites naturales y le permite manejar objetos pesados durante actividades de construcción como son carpintería, levantar tablero de techos y demás, ya que estos requieren de mucho poder muscular. El prototipo desarrollado en [18] mostrado en la Figura 23 es un ejemplo de dicha aplicación.

Figura 23. Un ejemplo de un robot armadura en desarrollo (exoesqueleto) para la ayuda de procesos de carpintería.



Fuente: J. Naito, G. Obinta, A. Nakayama y K. Hase; “Development of a Wearable Robot for Assisting Carpentry Workers” [18]

3.8. ROBOT WR PARA ENSAMBLE DE VIGAS DE ACERO

El ensamble de edificios a base de vigas de acero es llevado a cabo mediante fundición, como son las juntas (nodos) columna a columna y viga a columna.

El robot móvil japonés WR mostrado en la Figura 24 realiza una gran variedad de fundiciones de columna a columna. Las columnas de acero pueden ser de hasta 100 mm de grosor, pueden ser redondas, cuadradas o de forma H, también como del tipo de caja hueca. Para la fundida de columna a viga, hay una combinación del tipo fundidor/transporte que puede moverse a través de plataformas. [19]

Figura 24. Robot móvil WR de fundición de columnas.



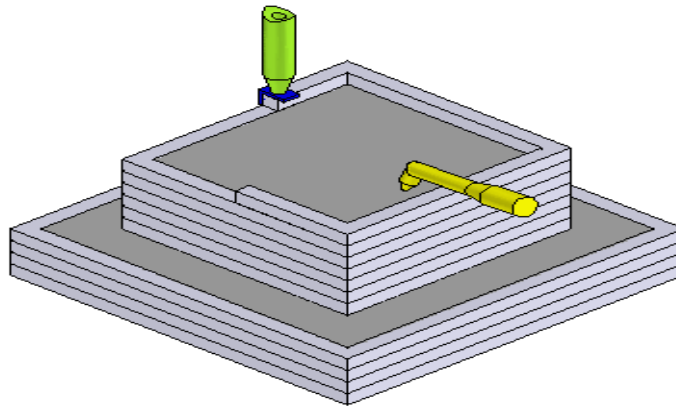
Fuente: B. Rajgor. J. Pitroda; “Automation: A New Millenium Technology for Construction Industries” [19]

3.9. CONTOUR CRAFTING (CC)

Este nuevo proceso patentado por el Doctor Behrokh Khoshnevis de la Universidad del Sureste de California es una tecnología que sirve para la rápida fabricación de grandes edificios con formas complejas y acabados lisos [20]. El proceso de CC está basado en el proceso de extrusión y llenado ilustrado en la

Figura 25. El proceso de extrusión forma los objetos con superficies lisas mediante la contracción del flujo extruido en las direcciones vertical y horizontal mediante el uso de paletas. Una vista esquemática de extrusión usando dos paletas puede observarse en la Figura. 26a. La orientación de la dirección de estas paletas es cambiada dinámicamente para mejorar la unión de la superficie de cada capa. [21]

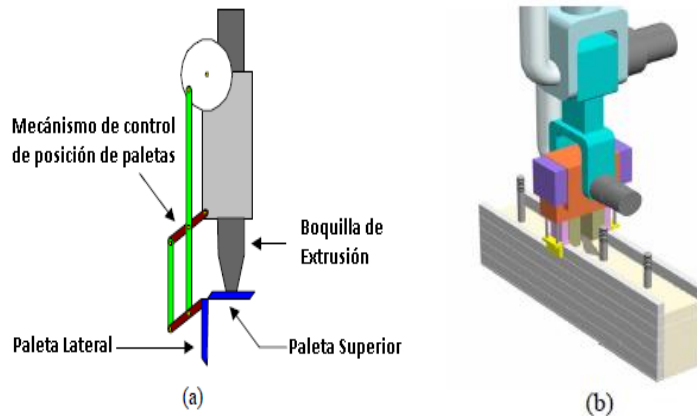
Figura 25. Mecanismo de llenado (amarillo) y de extrusión (verde).



Fuente: H. Doil, K. Behrokh; "Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting" [21]

Las paletas direccionales permiten desarrollar materiales más gruesos mientras se mantiene excelentes superficies de acabado. El depósito de material grueso reduce el tiempo de manufactura, lo que es esencial para la construcción de edificios a gran escala. El límite del grosor posible está limitado por la talla de las paletas. Mientras la boquilla de extrusión se mueve de acuerdo a la ruta preestablecida por cada capa, los anillos (superficie lisa exterior y superior de los bordes) son creados por primera vez. La calidad de la superficie exterior de cada capa es determinada por las paletas laterales. El acabado de la capa superior es importante ya que determina cuán fuerte será la unión con la siguiente capa superior. Una vez que las uniones entre las capas son creadas, el proceso de llenado comienza y el material es inyectado para llenar el volumen interno. [21]

Figura 26. Boquilla Unitaria CC (a) y múltiples conjuntos de boquillas (b).

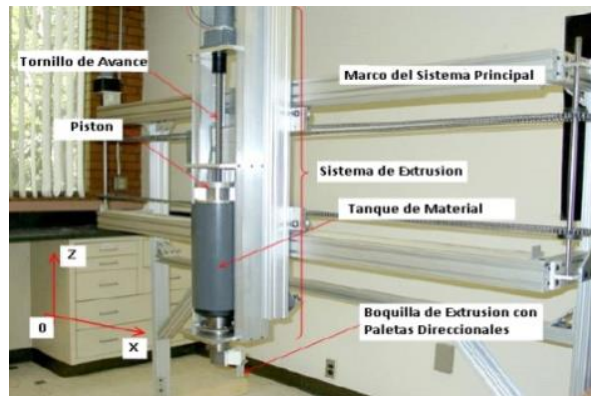


Fuente: H. Doil, K. Behrokh; "Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting" [21]

3.9.1. Estado Actual de Investigación y Desarrollo De CC. Contour Crafting ha sido foco de investigación intensiva por parte del laboratorio de prototipo rápido de USC (University of Southern California). El laboratorio ha estado mejorando la capacidad superior de creación de superficies, velocidad y diseños de boquillas de CC. Varios materiales de investigación han sido probados y evaluados a la fecha. Se requiere de rápidos avances en este campo si se quiere considerar CC como una opción viable para la automatización de la construcción. [21]

3.9.2. Diseño de la Máquina de CC. Un sistema simple y especializado de boquillas de CC con tres ejes de control de movimiento fue desarrollado para la construcción de una demostración a escala completa. El nuevo sistema de CC, mostrado en la Figura. 27, consiste en un sistema de extrusión que transmite un mortero mezcla desde el depósito de material y lo deposita en cantidades controlables y en la forma deseada. Un pistón está unido e impulsado por el tornillo de avance que gira a velocidades de rotación constantes para extrudir la mezcla. Tan pronto el mortero deja la boquilla de extrusión, la maquina mueve la boquilla de ensamble en la dirección X a una velocidad especifica. [21]

Figura 27. Maquina CC para la fabricación de un muro de concreto.



Fuente: H. Doil, K. Behrokh; "Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting" [21]

Una vez que el sistema completa un ciclo de capa, todo el sistema de extrusión se mueve verticalmente a una distancia equivalente a la altura de la siguiente capa. El ciclo se repite hasta que la forma final del límite es establecido. La estructura principal soporta y guía todo el sistema de extrusión durante la fabricación. El marco de la maquina tiene dos carriles con perfiles forma V que guían el sistema de extrusión. El sistema actual permite la extrusión solo en las direcciones X y Z, por lo tanto limita los objetos 3-D que pueden ser creados. [21]

3.9.3. Desarrollo de la Mezcla de Mortero y su Fuerza de Compresión. La extrusión de la mezcla de mortero denso a través de una boquilla de agujero pequeño es difícil. El óptimo ratio de mezcla de cemento, arena y agua necesaria para la fabricación del concreto depende de su aplicación. Es por ello que a través de varios experimentos de prueba y error, se encontró una mezcla característica adecuada para la nueva máquina de CC de la siguiente manera:

- Cemento Hidráulico Portland Tipo II: 9.5 lb
- Arena: 10.5 lb
- Plastificante: 0.8 lb
- Agua: 4.8 lb

Para verificar su fuerza a compresión, fueron hechos tres especímenes cilíndricos para pruebas de 5 cm X 10 cm (2" X 4") y fueron curados por 7 días a temperatura ambiente. [22]

Los análisis realizados en el laboratorio de pruebas estructurales de Ingeniería Civil de la USC arrojaron los resultados mostrados en la Tabla 1. Los resultados indicaron que la fuerza a la compresión de los tres especímenes fue tanto consistente como adecuada para su uso permanente como componentes estructurales del muro de concreto. [22]

Tabla 1. Resultados de pruebas de fuerza a la compresión.

Cilindros	Fuerza a la Compresión (PSI)
Espécimen 1	2,786
Espécimen 2	2,830
Espécimen 3	2,606
Promedio	2,741

Fuente: H. Doil, K. Behrokh; "An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)" [22]

3.9.4. Fabricación. La mezcla de mortero fue preparada usando unas paletas mezcladoras impulsadas por un taladro eléctrico y se cargó en el tanque que transporta el material. La velocidad del sistema de extrusión en la dirección horizontal fue puesta en 20 mm/seg con un flujo establecido de extrusión continua por la boquilla de CC. Una vez que un lote completo de mezcla de mortero cargado dentro del tanque de almacenado es usado, el sistema de CC se pausa hasta que otro lote de mortero es cargado y la extrusión continua. Un lote de mortero es consumido en aproximadamente 10 minutos y produce una estructura de concreto de aproximadamente 64 mm (2.5") de altura. Para completar la geometría destinada fueron necesarios nueve lotes. La forma final del muro de

concreto por el sistema de CC excedió la altura de 60 cm (2 pies) y se muestra en la Figura 28. [22]

Figura 28. Formaleta de Concreto fabricada por la máquina de CC.



Fuente: H. Doil, K. Behrokh; “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)” [22]

Se finaliza con el llenado del volumen interno capa por capa ilustrado en la (Figura. 29) para aplicaciones de CC, el ratio de llenado de menos de 13 cm/hora (5”/hora) permitirán levantamientos verticales de muros de concreto de 3 metros (10 pies). [22]

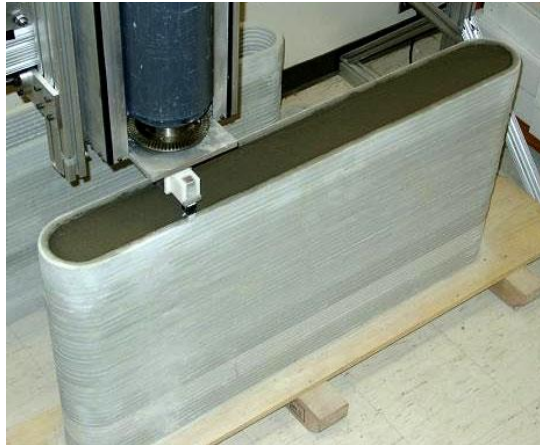
Figura 29. Llenado de concreto capa por capa.



Fuente: H. Doil, K. Behrokh; “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)” [22]

3.9.6. Resultados. La Figura. 30 muestra el muro terminado. La fuerza a compresión de este muro variara dependiendo del tipo de concreto escogido. [22]

Figura 30. Muro de Concreto hecho por la máquina de CC.



Fuente: H. Doil, K. Behrokh; “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)” [22]

3.9.7. Rendimiento. La tecnología de CC tiene características únicas [23]:

- Reduce el costo de construcción en 30% al costo actual.
- Acelera el proceso de construcción por un factor de apenas 50 veces.
- Reduce los accidentes y muertes en la construcción (400.000 y 6.000 por año, respectivamente, en USA y más severamente en países en desarrollo).
- Provee refugios de emergencia para los más de 37 millones de víctimas anuales de la guerra y desastres naturales.
- Provee vivienda digna a la población pobre del mundo.
- CC elimina los residuos de construcción debido a que los materiales necesarios son precisados por computador conforme se vayan necesitando.
- Reduce dramáticamente la energía usada en la construcción (un 90%) y la emisión de CO₂ (un 70%).

- CC fabrica a un ratio de 5 cm por hora sobre un área de 30 metros cuadrados, a una profundidad de hasta 2 metros. Trabajando de seguido, puede producir $30m^3$ de estructura de edificio por semana.

3.10. TERMES

La Escuela de Ingeniería y Sistemas Aplicados de Harvard en conjunto con el Instituto Wyss, especializado en ingeniería con inspiración biológica han diseñado pequeños robots inspirados en termitas los cuales pueden realizar tareas de construcción [24]. Ellos pueden construir estructuras sin supervisión, incluso sin roles predeterminados. Se necesitaron cuatro años de investigación para el desarrollo de TERMES, el equipo de pequeños robots que pueden construir estructuras 3D a partir de ladrillos de espuma. Se planea usar sistemas robóticos similares como este para proyectos en los que enviar personal humano puede ser demasiado riesgoso [24].

3.10.1. Enfoque. La meta es un sistema de robots autónomos que colecten material de construcción y lo usen para construir una estructura específica en una zona plana libre de obstáculos como se muestra en la Figura 31. El enfoque está inspirado por las descentralizadas y robustas construcciones realizadas por las colonias de termitas, donde varios insectos simples trabajan simultáneamente para construir estructuras a gran escala. Los robots del sistema son idénticos, independientes y actúan solamente en base a información local. Para el material básico de construcción, se optó por bloques cuadrados prefabricados; estos son más fáciles para manipular por los robots y para usar en la construcción de estructuras rectilíneas como las comunes en la construcción humana [25].

3.10.2. Escalada. El principal criterio en diseñar la efectividad del robot para escalar fue el ser capaz de subir bloques tan alto como fuera posible, de manera que una estructura de cierta altura requiriera menos bloques. [25].

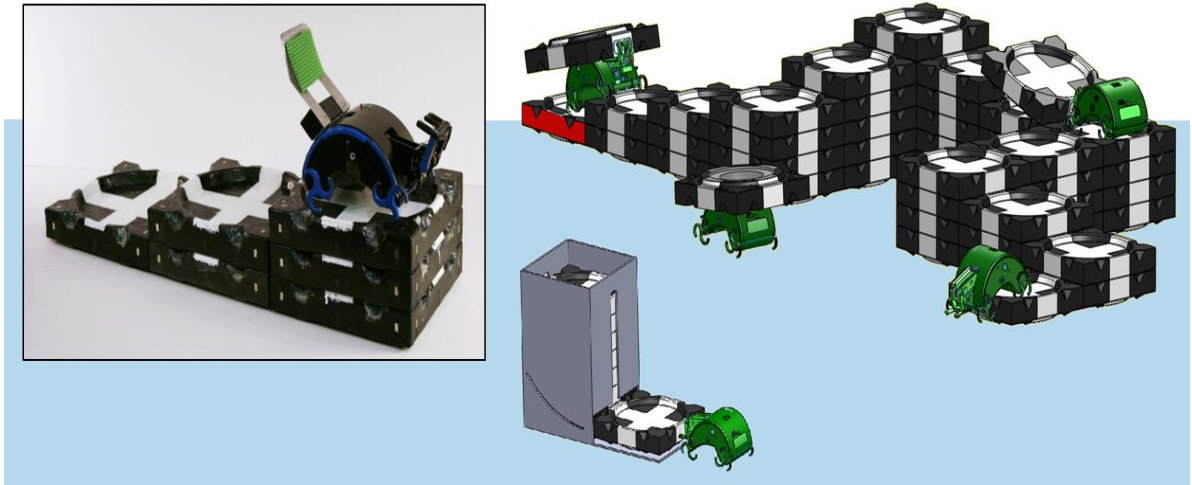
3.10.3. Navegación. La tarea de navegación requiere que el robot pueda maniobrar encima de la estructura, incluyendo girar, y escalar-descender, mientras mantiene un rastro adecuado de su posición y orientación respecto a la estructura. [25].

3.10.4. Manipulación. Para construir una estructura, el robot debe ser capaz de recoger los bloques, cargarlos mientras navega por la estructura existente, y los une en la posición deseada. Es por ello que el robot está equipado con brazos y pinzas, y características mecánicas pasivas en los bloques para ayudar al robot a poder agarrarlo, alinearlos y asegurarlos a la estructura. [25].

3.10.5. Demostración Constructiva. Se demostró la habilidad del sistema para construir autónomamente estructuras no triviales a través de dirigir el robot para construir una escalera de 10 bloques como se muestra en la Figura 32. Esa tarea unifica la habilidad separadas del robot para escalar, navegar y manipular bloques. Una línea inicial de bloques y una estación de carga son colocadas a mano; el robot es puesto en el primer bloque de cara a la estación de carga y nuevos bloques son adicionados manualmente a la estación de carga conforme sea necesario. El proceso de construcción es de otra manera enteramente autónomo. La mayoría del software del robot se corre en su propio procesador, con un código aún más avanzado corriendo en un laptop aparte para facilitar la depuración y la comunicación con el robot vía bluetooth. El robot puede ser programado con premisas de alto nivel (mover un bloque adelante, girar a la izquierda o derecha 90°, alzar o unir un bloque). Esta clase de edificios impresos podría ofrecer un vislumbre de lo que sería el futuro de la construcción de edificios, pero debido a lo frágil de sus partes, los edificios deben ser impresos con soportes en sus

estructuras para prevenir que colapsen sobre la propia construcción. El soporte puede ser luego removido una vez que el concreto de llenado ha sido adicionado [26].

Figura 31. Resumen del sistema.

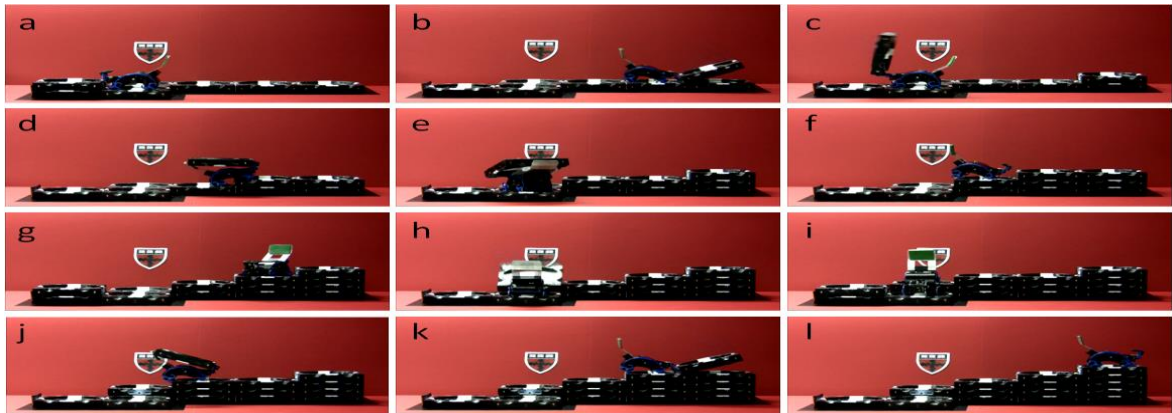


Fuente: P. Petersen, N. Radhika, W. Justin; “TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction” [25]

Recuadro: un robot arriba de una estructura de seis bloques. Imagen exterior: interpretación de la meta final del sistema, donde múltiples robots colectan bloques de un alijo y los usan para construir una estructura especificada por el usuario. La construcción comienza con un bloque marcado (marca roja), que provee un punto de referencia único.

Figura 32. Instantáneas en el proceso de construcción autónoma de una estructura de diez bloques.

El robot colecta bloques de la estación de carga a la izquierda, donde nuevos bloques son adicionados a mano conforme la construcción prosigue.



Fuente: W. Justin; “Collective Construction with Robot Swarms” [26]

Actualmente, el proceso ha tenido un costo estimado de 5 millones de euros, pero en constante caída conforme la tecnología es refinada [24].

3.10.6. Rendimiento. La tecnología de TERMES tiene las siguientes características:

- Alto costo debido a su fase temprana de desarrollo [24].
- No requieren de vigilancia central ni comunicación coordinada.
- Pueden construir edificaciones mucho mayores que su propio tamaño.
- Se podrían emplear para proyectos en los que enviar personal humano puede ser demasiado riesgoso. [25]

4. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS

4.1. VENTAJAS

- Se reemplaza operadores humanos en tareas que involucran trabajo físico pesado o monótono.
- Se reemplaza la mano de obra humana en tareas que se desarrollan en ambientes peligrosos como lugares con temperaturas extremas, radioactivas o atmósferas tóxicas en general.
- Los robots pueden realizar tareas más allá de la capacidad humana de forma más sencilla. Como son el levantamiento de objetos muy pesados o de gran extensión y manipulación de objetos de dimensiones minúsculas.
- La construcción es generalmente más rápida y las labores de costo menores por hora de trabajo que el equivalente en operaciones manuales.
- Procesos automatizados para la verificación de calidad son incorporados lo que reduce la tolerancia en medidas a la hora de construir.
- Mejoramiento económico. La automatización sirve como catalizador para el mejoramiento de la economía de empresas o sociedades. Por ejemplo, el producto interno bruto y el modo de vida en general en Alemania y Japón mejoró dramáticamente en el siglo 20, debido en gran parte a la adaptación de la robótica no solo en el sector de la construcción sino también en los sectores automovilísticos, de textiles y armamentista entre otros [27].
- Los sistemas robóticos pueden trabajar de ser necesario 24 horas al día.

4.2. DESVENTAJAS

- Limites tecnológicos. La tecnología actual es incapaz de automatizar todas las tareas deseadas. Algunas labores no pueden ser fácilmente automatizadas en el campo de la construcción, como son el ensamble de piezas de tamaños inconsistentes o el mantenimiento del propio equipo robótico.
- Limites económicos. Algunas tareas costarían más de ser realizadas por equipo robótico o automatizados que elaborados manualmente. La automatización es típicamente mejor en procesos repetitivos, consistentes y de gran volumen.
- Costos de desarrollo impredecibles. Los costos de investigación y desarrollo de la robótica implicada para la realización de una tarea son difícilmente predecibles de antemano. Dado que ese costo puede tener un gran impacto en la rentabilidad, es posible que al terminar de automatizar un proceso mediante la robótica se descubra que no es económicamente viable hacerlo. Aunque con el constante mejoramiento y crecimiento de líneas de producción, y estimaciones más acertadas con base en proyectos anteriores estos precios disminuirán [27].
- Los costos iniciales son relativamente altos. El uso de la robótica en la construcción requiere de un inmenso capital inicial. El costo puede ser muchas veces prohibitivo para construcciones personalizadas en lo que muchos sistemas no serían óptimos en términos de tiempo-costo [27].
- Se requiere de personal capacitado para realizar las labores de mantenimiento y supervisión de los sistemas robóticos. De fallar el mantenimiento podría resultar en la errónea construcción de elementos o en el daño de los sistemas aplicados.

4.3. SUMARIO DE LOS SISTEMAS ROBÓTICOS TRATADOS

A continuación se presenta la Tabla 2 que corresponde al sumario de los sistemas robóticos tratados con enfoque en su rendimiento en comparación a la mano de obra humana. De la Tabla 2 se puede afirmar que los mayores rendimientos de cada sistema robótico aplicado con respecto a la mano de obra humana son: para el robot de finalizado de superficies de concreto Flat-Kun es de 100-200%, para el robot Shimizu para pintado de muros es de 240-480%, para el robot Obayashi para inspección de baldosas es de 333-666%, para el manipulador de materiales livianos Light Weight es de 300%, para el sistema ABCS es de 60%, para el robot albañil HADRIAN es de 2000-2400%, para el sistema Contour Crafting es de 5000% y finalmente para el exoesqueleto, el robot para fundición se columnas y el sistema TERMES no fue posible hacer una comparación debido a falta de información en los estudios.

Tabla 2. Sumario sistemas robóticos tratados.

Sistema Robótico	Referencia	Rendimiento		Precisión
		Robótico	Humano	
Finalizador de superficies [9]	Kote-King	500 m^2/h	100-200 m^2/h	0.1 mm
	Surf-Robo	300 m^2/h	100-200 m^2/h	0.1 mm
	Flat-Kun	800 m^2/h	100-200 m^2/h	0.1 mm
	Obayashi	500 m^2/h	100-200 m^2/h	0.1 mm
Pintado de muros [10]	Shimizu	120 m^2/h	25-50 m^2/h	850-2100 μm
	KFR-2	90 m^2/h	25-50 m^2/h	850-2100 μm
	TPR-02	100 m^2/h	25-50 m^2/h	850-2100 μm
Inspección de baldosas [11]	Kajima	60 m^2/h	15-30 m^2/h	N.E
	Takenaka	70 $m^2/día$	15-30 m^2/h	N.E
	Obayashi	100 m^2/h	15-30 m^2/h	N.E
	Taisei	700 $m^2/día$	15-30 m^2/h	N.E
Manipulador de materiales [9]	Light Weight	120 kg	40 kg [28]	N.E
Sistemas Integrados [12]	ABCS	19 meses (40 pisos)	25 meses (40 pisos)	N.E
	Big-Canopy	25,6 días por piso	100 días por piso	N.E

Sistema Robótico	Referencia	Rendimiento		Precisión
		Robótico	Humano	
Robots Albañiles	ROCCO [13]	1000 kg	400-500 ladrillo/día	N.E
	SAM[15]	1400-1500 ladrillo/día	400-500 ladrillo/día	N.E
	HADRIAN[17]	1000 ladrillo/h	400-500 ladrillo/día	Se corrige 1000 por segundo
Exoesqueleto [18]	Naito	N.E	40 kg [28]	N.E
Robot WR [19]	WR	N.E	N.E	Columnas grosor no mayor a 100 mm
Contour Crafting [23]	CC	30m ³ / semana	1/50 del rendimiento de CC [23]	0% residuos de construcción.
TERMES [24]	TERMES	5 mill euro/casa	N.E	N.E

Nota: N.E = No Encontrado

5. CONCLUSIONES

En el presente, la mayoría de la robótica se ve limitada a ciertos usos y aplicaciones en la industria de la construcción. Los robots están limitados a tareas simples pero intensivas como son el trabajo del concreto, pintado de muros, o el levantamiento de objetos pesados. Estas limitaciones son debido a restricciones tecnológicas y económicas en la robótica, pero el potencial de crecimiento es inmenso.

Los esfuerzos en investigación y desarrollo continúan para producir nuevas ideas y usos de la robótica en la construcción, con nuevos desarrollos ocurriendo prácticamente día a día.

Como se nota en este trabajo, la mayoría de investigación, desarrollo, e implementación de los robots en la industria de la construcción ha sido realizada por los japoneses.

Esta revisión contribuye a mejorar los conocimientos en la aplicación de la robótica en la industria de la construcción, tanto en términos de literatura así como en el análisis de la información investigada.

Esta revisión además establece una base para promover investigación adicional en la aplicación global de la robótica en el campo de la construcción; en términos de expandir el alcance y metodología de esta revisión.

En la mayoría de los sistemas robóticos tratados, como se aprecia en la Tabla 2, aplicados en el sector de la construcción el rendimiento fue significativamente

mejor que su contraparte humana en un promedio de 200%-1400% con excepciones como TERMES, esto debido a su fase temprana de desarrollo [24].

CITAS

[1] Eurostat annuaire, 1999. Disponible: <http://europa.eu.int/comm/eurostat>) [citado 2 de Noviembre de 2015].

[2] ACEA report, 1999; y Euroconstruct report, 1998. Disponible: <http://www.euroconstruct.org/> [citado 6 de Noviembre de 2015].

[3] C. Balaguer, A. Mohamed; "Trends in Robotics and Automation in Construction"; InTech, Madrid, España; 2008; pp.1-5.

[4] C. Balaguer, "Open issues and future possibilities in the EU construction automation", en Proc. IAARC Int. Symp. Robotics and Automation (ISARC'00), Taipei, Taiwan, 2000, pp. 21-32.

[5] C. Balaguer, "EU FutureHome projects results", 20th International Symposium on Robotics and Automation in Construction (ISARC'03), Eindhoven (Países Bajos), 2003.

[6] M. Abderrahim; "Robotics and Automation in Construction", I-Tech, Vienna, Austria; 2008; pp. 10

[7] E. Gambao, C Balaguer., "Robotics and Automation in Construction", IEEE Robotics and Automation magazine, vol. 9, nº 1, 2002; pp 4.

[8] C. Balaguer; "Nowadays Trends in Robotics and Automation in Construction Industry: Transition from Hard to Soft Robotics", Robotics Lab, University Carlosl III of Madrid, España, 2004; pp. 3

- [9] C. Leslie, N. Miura; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan"; ASCE Press, Reston, Virginia; 1998; pp. 22-23, 25 y 36.
- [10] G. Takuya, T. Masayuki; "Development of Wall Painting Robot"; Sumio Fukuda Tokyu Construction Co. ,Ltd, Tokyo, Japón; 2014; pp.4, 7.
- [11] F. Inoue, S. Doi, T. Okada, Y. Ohta; "Development of Automated Inspection Robot and Diagnosis Method for Tile Wall Separation"; Instituto de Investigación Técnica Corporación Obayashi, Tokyo, Japón; 2009; pp.2, 8.
- [12] M. Taylor, W. Sam, S. Ian; "Automated construction in Japan"; Proceedings of ICE, Edimburgo, Escocia; 2003; pp 5-7.
- [13] E. Gambao, C. Balaguer, A. Barrientos, R. Saltaren, y E.A. Puente, "Robot assembly system for the construction process automation", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA' 97), Albuquerque, NM, 1997, vol. 1, pp. 46-51.
- [14] B. Thomas; "Automation and Robotics in Building Construction"; Technische Universität München, München, Alemania; 2000; pp. 3-4
- [15] ARIS; "Brick Laying Robot Delivers Productivity, Quality & Worker Health Benefits"; Disponible: <http://www.arisplex.com/analysis/brick-laying-robot-delivers-productivity-quality-worker-health-benefits/>, 2014. [citado 22 de Noviembre de 2015].
- [16] P. Scott, B. Bod; "SAM, the Robotic Bricklayer"; Disponible: <http://www.dynamicsofmasonry.com/content/sam-robotic-bricklayer>, 2014. [citado 1 de Diciembre de 2015].

- [17] N. David; "Brick-laying robot can build a full-sized house in two days"; GIZMAG: Robotic Research Magazine. Disponible: <http://www.gizmag.com/hadrian-brick-laying-robot-fastbrick/38239/>, 2015. [citado 4 de Diciembre de 2015].
- [18] J. Naito, G. Obinta, A. Nakayama y K. Hase; "Development of a Wearable Robot for Assisting Carpentry Workers"; International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 4, No. 4, 2007, pp. 431-436.
- [19] B. Rajgor. J. Pitroda; "Automation: A New Millenium Technology for Construction Industries"; Global Research Analysis International; 2013, vol. 2, pp. 2-3.
- [20] K. Behrokh; "Contour Crafting. Robotic Construction System"; USC University of Southern California; Disponible: <http://www.contourcrafting.org/>, 2014. [citado 12 de Diciembre de 2015].
- [21] H. Doil, K. Behrokh; "Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting"; University of Southern California, Los Angeles, California; 2004; pág.2
- [22] H. Doil, K. Behrokh; "An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)"; Ferrara, Italia; 2005; pp.4-5.
- [23] K. Behrokh; "Robotic Building Construction by Contour Crafting"; Los Angeles, California. Estados Unidos; 2014. pp. 3.
- [24] J. Jone; "Future Construction Technologies and Techniques"; Construction Global; Disponible: <http://www.constructionglobal.com/equipmentit/219/Future-Construction-Technologies-and-Techniques>, 2014. [citado 1 de Enero de 2016].

[25] P. Petersen, N. Radhika, W. Justin; “TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction”; Inglaterra, Reino Unido; 2011; pp.2-5.

[26] W. Justin; “Collective Construction with Robot Swarms”; Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA; 2014. pp 19.

[27] Frank; “Advantages and Disadvantages of Automation” The Automation Primer; Disponible: <http://automationprimer.com/2014/02/16/advantages-and-disadvantages-of-automation/>, 2014. [citado 9 de Enero de 2016].

[28] R. John; “Manejo Manual de Materiales de Construcción”; CivilGeeks; Disponible: <http://civilgeeks.com/2011/12/03/manejo-manual-de-materiales-de-construccion/>, 2011. [citado 14 de Enero de 2016].

BIBLIOGRAFIA

ACEA report, 1999; y Euroconstruct report, 1998.[en línea] [citado 6 de Noviembre de 2015]. Disponible: <http://www.euroconstruct.org/>

ARIS; “Brick Laying Robot Delivers Productivity, Quality & Worker Health Benefits”; [en línea] [citado 22 de Noviembre de 2015].Disponible: <http://www.arisplex.com/analysis/brick-laying-robot-delivers-productivity-quality-worker-health-benefits/>, 2014

B. THOMAS; “Automation and Robotics in Building Construction”; Technische Universität München, München, Alemania; 2000; pp. 3-4

BALAGUER C., “EU FutureHome projects results”, 20th International Symposium on Robotics and Automation in Construction (ISARC’03), Eindhoven (Países Bajos), 2003.

BALAGUER C., “Open issues and future possibilities in the EU construction automation”, en Proc. IAARC Int. Symp. Robotics and Automation (ISARC’00), Taipei, Taiwan, 2000, pp. 21-32.

BALAGUER C., MOHAMED A.; "Trends in Robotics and Automation in Construction"; InTech, Madrid, España; 2008; pp.1-5.

BALAGUER C.; “Nowadays Trends in Robotics and Automation in Construction Industry: Transition from Hard to Soft Robotics”, Robotics Lab, University Carlosl III of Madrid, España, 2004; pp. 3

C. LESLIE, N. MIURA; "Construction Robots The Search for New Building Technology in Japan"; ASCE Press, Reston, Virginia; 1998; pp. 22-23, 25 y 36.

EUROSTAT ANNUAIRE, 1999. [en línea] [citado 2 de Noviembre de 2015]. Disponible: <http://europa.eu.int/comm/eurostat>)

FRANK; "Advantages and Disadvantages of Automation" The Automation Primer; . [en línea] [citado 9 de Enero de 2016]. Disponible: <http://automationprimer.com/2014/02/16/advantages-and-disadvantages-of-automation/>, 2014

GAMBAO E., BALAGUER C., BARRIENTOS A., SALTAREN R., Y PUENTE E.A., "Robot assembly system for the construction process automation", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA' 97), Albuquerque, NM, 1997, vol. 1, pp. 46-51.

GAMBAO E., C BALAGUER., "Robotics and Automation in Construction", IEEE Robotics and Automation magazine, vol. 9, nº 1, 2002; pp 4.

H. DOIL, K. BEHROKH; "Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting"; University of Southern California, Los Angeles, California; 2004; pág.2

H. DOIL, K. BEHROKH; "An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)"; Ferrara, Italia; 2005; pp.4-5.

INOUE F., S. DOI, T. OKADA, Y. OHTA; "Development of Automated Inspection Robot and Diagnosis Method for Tile Wall Separation"; Instituto de Investigación Técnica Corporación Obayashi, Tokyo, Japón; 2009; pp.2, 8.

J. JONE; "Future Construction Technologies and Techniques"; Construction Global; [en línea] [citado 1 de Enero de 2016]. Disponible:

<http://www.constructionglobal.com/equipmentit/219/Future-Construction-Technologies-and-Techniques>, 2014.

J. NAITO, G. OBINTA, A. NAKAYAMA Y K. HASE; "Development of a Wearable Robot for Assisting Carpentry Workers"; International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 4, No. 4, 2007, pp. 431-436.

K. BEHROKH; "Contour Crafting. Robotic Construction System"; USC University of Southern California; [en línea] [citado 12 de Diciembre de 2015] Disponible: <http://www.contourcrafting.org/>, 2014..

K. BEHROKH; "Robotic Building Construction by Contour Crafting"; Los Angeles, California. Estados Unidos; 2014. pp. 3.

M. ABDERRAHIM; "Robotics and Automation in Construction", I-Tech, Vienna, Austria; 2008; pp. 10

M. TAYLOR, W. SAM, S. IAN; "Automated construction in Japan"; Proceedings of ICE, Edimburgo, Escocia; 2003; pp 5-7.

N. DAVID; "Brick-laying robot can build a full-sized house in two days"; GIZMAG: Robotic Research Magazine. [en línea] [citado 4 de Diciembre de 2015]. Disponible: <http://www.gizmag.com/hadrian-brick-laying-robot-fastbrick/38239/>, 2015.

P. SCOTT, B. BOD; "SAM, the Robotic Bricklayer"; [en línea] [citado 1 de Diciembre de 2015]. Disponible: <http://www.dynamicsofmasonry.com/content/sam-robotic-bricklayer>, 2014.

PETERSEN P., N. RADHIKA, W. JUSTIN; "TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction"; Inglaterra, Reino Unido; 2011; pp.2-5.

R. JOHN; "Manejo Manual de Materiales de Construcción"; CivilGeeks; [en línea] [citado 14 de Enero de 2016]. Disponible: <http://civilgeeks.com/2011/12/03/manejo-manual-de-materiales-de-construccion/>, 2011.

RAJGOR B.. PITRODA; J. "Automation: A New Millenium Technology for Construction Industries"; Global Research Analysis International; 2013, vol. 2, pp. 2-3.

TAKUYA G., MASAYUKI T.; "Development of Wall Painting Robot"; Sumio Fukuda Tokyu Construction Co. ,Ltd, Tokyo, Japón; 2014; pp.4, 7.

W. JUSTIN; "Collective Construction with Robot Swarms"; Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA; 2014. pp 19.