



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**



**Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona**

**GRAU EN ARQUITECTURA TÈCNICA I EDIFICACIÓ**

**BUILDING ENGINEERING**

**APLICACIONS DE LA ROBÒTICA EN LA CONSTRUCCIÓ D'ESTRUCTURES**

**TREBALL FI DE GRAU**

**Adrià Martínez Rodríguez**

**Marc Sanabra Loewe**

**Convocatòria Gener/Febrer 2018**

*“There are many ways of going forward, but only one way of standing still”.*

— Franklin D. Roosevelt.

## Resum

Aquest projecte té com a objectiu analitzar i estudiar les diferents aplicacions robòtiques que existeixen actualment per a la construcció d'estructures. La construcció d'estructures en l'actualitat segueix fent-se d'una forma molt convencional i, sent una de les fases més importants i més llargues de qualsevol obra d'edificació, la introducció de la robòtica és rellevant.

Ja sigui per a construcció on-site, com per a la construcció off-site (prefabricació), les aplicacions robòtiques poden millorar els rendiments de la construcció i obrir nous horitzons que abans no estaven a l'abast, a la vegada que cal tenir en ment que presenten diferents limitacions.

És important saber i tenir clar el significat de "robot". Es definirà el concepte i es veuran les diferents classificacions que existeixen, així com un breu resum de l'evolució de la robòtica.

Seguidament, s'exposarà què pot aportar la introducció de la robòtica a la construcció d'estructures, destacant les millores gràcies a la seva implementació, la possibilitat de construir en entorns amb condicionants, com ara edificis sinistrats, i finalment una especial menció a la reducció de riscos laborals que pot suposar.

El gruix del projecte analitzarà en forma de fitxa una selecció d'aplicacions robòtiques destinades a la construcció d'estructures que han sorgit des de la dècada dels 90 fins l'actualitat, classificant-les segons el material de construcció amb el qual treballen. La fitxa d'anàlisi es compon de diversos apartats: característiques de l'aplicació, avantatges, limitacions, funcionament de l'aplicació i aplicabilitat.

Posteriorment, es comentaran les diferents aplicacions, agrupades per material de construcció, identificant les particularitats específiques de cada grup.

Finalment, s'exposaran les conclusions a les quals s'ha arribat, comentant l'estat actual de la robòtica a la construcció d'estructures, la gran varietat i tipus d'aplicacions robòtiques i les limitacions i avantatges que presenten actualment de forma general.

## Índex

<b>Resum .....</b>	<b>3</b>
<b>Índex .....</b>	<b>4</b>
<b>Glossari.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducció.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Robot.....</b>	<b>9</b>
2.1. Definició de robot.....	10
2.2. Evolució de la robòtica .....	12
2.3. Classificacions.....	16
<b>3. Aportacions de la robòtica a la construcció d'estructures....</b>	<b>20</b>
3.1. Concepte i millores de la introducció de la robòtica.....	21
3.2. Construcció amb condicionants.....	23
3.3. Riscos laborals .....	23
<b>4. Anàlisi d'aplicacions robòtiques en la construcció d'estructures .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Aplicacions robòtiques per a treball amb maons .....</b>	<b>27</b>
4.1.1. Projecte Termes .....	28
4.1.2. ARC69 o Construcció Robòtica Aèria .....	30
4.1.3. SAM (Semi Automated Mason) .....	32
4.1.4. R-O-B.....	34
4.1.5. Hadrian X.....	36
<b>4.2. Aplicacions robòtiques per a treball amb acer .....</b>	<b>39</b>
4.2.1. New SMART System .....	40
4.2.2. RCA System .....	42
4.2.3. Projecte Mesh Mould Metal.....	44
4.2.4. Robot for positioning of heavy reinforcing bars .....	46
4.2.5. Welding Robot for Columns/Beams .....	48
4.2.6. Auto-Claw i Auto-Clamp .....	50

<b>4.3. Aplicacions robòtiques per a treball amb formigó.....</b>	<b>53</b>
4.3.1. AMURAD (Automated Building Construction System) .....	54
4.3.2. DB ROBO Simplified Concrete Distributor .....	56
4.3.3. Surf Robo.....	58
4.3.4. Gantry-Type Contour Crafting Robot.....	60
4.3.5. FreeFAB Wax .....	62
<b>4.4. Aplicacions robòtiques per a treball amb altres materials.....</b>	<b>65</b>
4.4.1. DCP (Digital Construction Platform) .....	66
4.4.2. Additive Robotic Fabrication of Complex Timber Structures ....	68
4.4.3. Spatial Timber Assemblies.....	70
4.4.4. Minibuilders .....	72
4.4.5. Robot CoGiro.....	74
4.4.6. ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17 .....	76
<b>5. Reconeixement de particularitats de les aplicacions segons el material de construcció.....</b>	<b>78</b>
<b>6. Conclusions .....</b>	<b>82</b>
<b>7. Bibliografia.....</b>	<b>84</b>
7.1. Llibres, magazines i apunts.....	84
7.2. Websites i articles digitals .....	85
<b>8. Annexos.....</b>	<b>87</b>
8.1. Acreditació 3a Llengua. Anglès .....	87

## Glossari

- **Beam:** biga.
- **Brick:** maó, totxo.
- **Clamp:** abraçadora.
- **Claw:** urpa, grapa.
- **Column:** pilar, columna.
- **Concrete:** formigó.
- **Contour Crafting:** tècnica d'impressió de contorns.
- **End effector:** dispositiu al final d'un braç robòtic, dissenyat per interactuar amb l'entorn i el material i dur a terme el treball.
- **Frame:** marc, esquelet. En aquest projecte referit al marc de treball o de suport que requereixen alguns robots per a funcionar.
- **Gantry-Type:** tipus pòrtic. En aquest projecte referit a les grues de pòrtic usades com a marc de treball per algunes aplicacions robòtiques.
- **Heavy reinforcing bar:** barra de reforç pesada. En aquest projecte referit a les barres d'acer pesades usades com a reforç de les estructures.
- **Mason:** paleta. Constructor i treballador de la pedra.
- **Mesh:** malla.
- **Mould:** motlle.
- **Off-site:** en aquest projecte referit a la construcció fora d'obra, la prefabricació.
- **On-site:** en aquest projecte referit a la construcció a l'obra, in-situ.
- **S/D:** acrònim de "sense dades".
- **Timber:** fusta. Fusta preparada per al seu ús en edificació i fusteria.
- **Wax:** cera.
- **Welding:** soldadura.

## 1. Introducció

La tecnologia, així com la ciència o la investigació mèdica, avança de manera exponencial. En molts àmbits, ens trobem en la part gairebé vertical de la corba de dita funció, deixant obsoletes algunes tècniques, mètodes i aparells en un espai de temps a vegades molt curt. Un dels factors més importants d'aquesta evolució ha estat la introducció de la robòtica en tots aquests sectors. L'increment del rendiment, la precisió i la qualitat amb la que treballen els robots i sistemes automatitzats, i sobretot la millora en la producció ha fet que molts d'aquests sectors hagin canviat i actualitzat els seus mètodes i tècniques adaptant-los a les noves tecnologies i a les opcions que presenta l'aplicació de la robòtica.

Quan parlem del sector de la construcció, però, la robòtica no està ni molt menys tant introduïda com a d'altres sectors. La major part dels processos i fases constructives segueixen basant-se en la mà d'obra humana, ajudada de màquines i eines, i en molt pocs casos es troben aplicacions robòtiques en la construcció de caràcter general, del dia a dia en una obra, sinó que cal buscar construccions molts específiques, ja sigui per la complexitat de la forma o dificultats de l'entorn, per a trobar exemples de robòtica aplicada a la construcció. La fama de ser un sector antic i amb un grau de tecnologia i industrialització baix té una argumentació sòlida. Un exemple d'aquesta fama és el fet de que el primer robot aplicat a la construcció no va aparèixer fins l'any 1983, més de dues dècades després de l'aparició del primer robot industrial al 1960.

Tot i arribar relativament tard comparat amb els primer robots industrials, la dècada dels 80-90 va suposar un gran impuls per al desenvolupament de tecnologia robòtica aplicada a l'edificació, impulsada sobretot des del Japó on els contractistes nipons van començar a invertir en robots de construcció. Va ser llavors quan els prototips de laboratori van sortir al mercat i es van donar a conèixer els primers robots de servei: robots d'acabat de formigó, de pintat de façanes o robots de treball interior que facilitaven en gran mesura el treball, milloraven el rendiment i reduïen el temps d'execució. Amb els anys, la inversió en I+D de les empreses i grups d'investigació ha fet que poc a poc hagin anat apareixent noves aplicacions robòtiques i nous conceptes en els diferents àmbits de la construcció, entre ells la construcció d'estructures.

Ja posats en situació, la construcció d'estructures es beneficia molt del potencial de les aplicacions robòtiques. La fase d'execució d'estructura permet que hi hagi molt pocs conflictes amb altres elements d'obra i amb altres industrials, a diferència d'altres fases de l'obra. Les aplicacions robòtiques per a construcció d'estructures es desenvolupen per a donar una sèrie d'avantatges de caràcter de rendiment i qualitat, així com per a obrir nous horitzons, nous mètodes constructius i la introducció de materials menys convencionals. Aquestes aplicacions, sobretot en el moment que es troba l'edificació, on és molt important la conservació dels recursos i la construcció (i també deconstrucció) sostenible, prenen especial importància per a ajustar els costos tant materials com econòmics.

També, una part de la construcció d'estructures que es beneficia molt de la introducció de la robòtica és la prefabricació, on ja es construeix de manera automatitzada, però que es pot beneficiar enormement de la introducció de la robòtica tant per a millorar el treball actual com per a avançar més enllà.

No només és un tema de rendiment i productivitat, sinó que també s'entra en l'àmbit de la reducció dels riscos laborals inherents a aquests processos d'execució de l'estructura i la construcció en entorns amb condicionants on la mà d'obra humana es troba amb més dificultats d'acció o amb perills cap a la salut física.

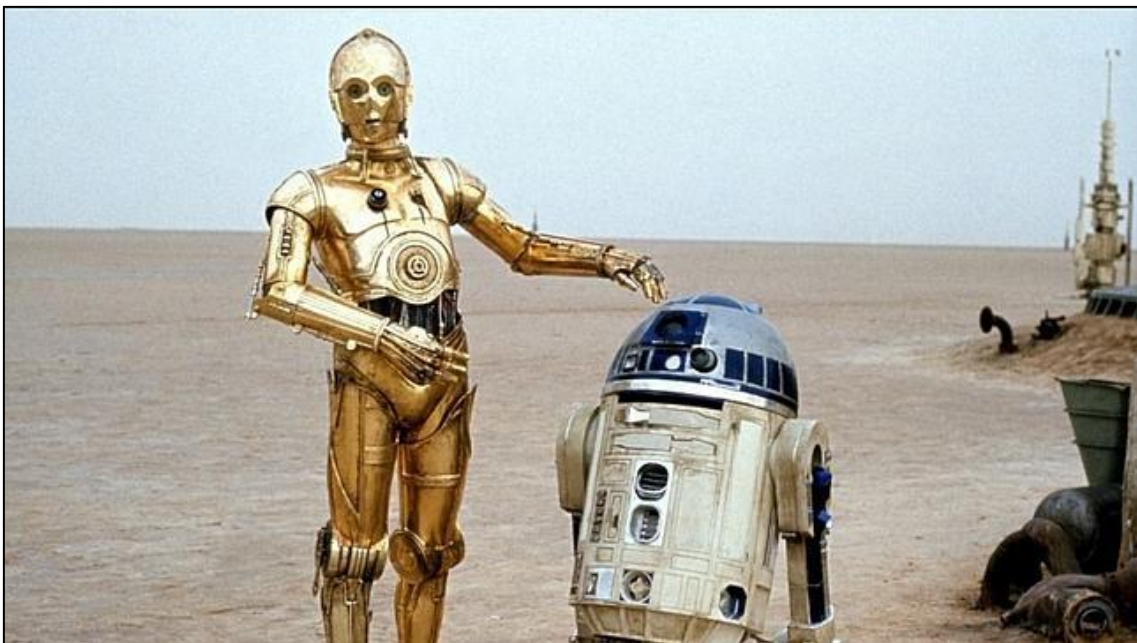
Amb l'anàlisi de les diferents aplicacions robòtiques per a la construcció d'estructures s'espera donar-les a conèixer i donar una visió actual d'aquestes aplicacions, veient a la vegada els seus avantatges i també les seves limitacions.



## 2. Robot

Hi ha moltes maneres de definir la paraula “robot”, si bé el concepte bàsic és gairebé el mateix en totes, i molts experts i associacions dirien que és molt complicat trobar una definició de robot universalment acceptada i única. Cal començar per les definicions més simples per a entendre realment què és un robot, i també, d'igual importància o inclús més, què no és un robot en l'actualitat. A partir d'aquestes definicions s'arribarà a una més completa per a definir de forma més precisa què és un robot de construcció.

En aquest sentit, la noció popular de robot fa referència a un dispositiu humanoide amb intel·ligència pròpia, que substitueix a les persones en la realització de tasques útils. Aquesta visió ha estat suscitada en gran mesura pels nombrosos relats i ficcions cinematogràfiques que esmenten als robots, com *Star Wars*, *Terminator* o *I, Robot*, però que actualment està allunyada de la realitat. En paraules de Leslie Cousineau en el seu llibre *Construction Robots, The Search for New Building Technology in Japan*, els robots “s'assemblen més a la fotocopiadora a la teva oficina que al teu veí”.



*Imatge 2.1. Fotografia de la pel·lícula Star Wars Episode IV: A New Hope. Els robots C3PO i R2D2 són un exemple de robots ficticis amb pensament propi, allunyats de la realitat actual, que han contribuït a la imatge i imaginació popular. Font: Google Images.*

La Intel·ligència Artificial és un camp en constant desenvolupament, però encara no s'ha arribat a tal nivell de capacitat dels robots. Generalment, quan es parla de robot la

imatge que pot venir al cap difereix molt d'una persona a una altre i moltes vegades la imaginació sobrepassa la realitat actual.

Tant en general com en la construcció, i en concret d'estructures, és necessari tenir clar els marges tecnològics existents, si bé és important i clau en l'evolució tenir l'ambició de posar la vista més enllà i investigar fins a arribar al següent horitzó, i així successivament.

## 2.1. Definició de robot

La manera més simple de començar a definir és consultant un diccionari. Segons l'Institut d'Estudis Catalans un robot és:

- Màquina que pot realitzar automàticament una sèrie de moviments i tasques que normalment fan persones.
- Giny programable de control no estrictament seqüencial que pot variar amb gran flexibilitat els moviments i les tasques que realitza.

Si es consulta la Real Academia Española, la definició és la següent:

- De l'anglès robot, i aquest del txec *robota* "treball, prestació personal".
- Màquina o enginy electrònic programable, capaç de manipular objectes i realitzar operacions abans reservades només a les persones.

Ambdues definicions, si bé simples, introdueixen un concepte que és fonamental en l'estudi que aquí es proposa, i és l'atribució al robot de la capacitat de fer tasques, treballs i operacions que normalment fan les persones, o que abans només feien les persones, a través de la programació electrònica i de la seva maquinària.

La següent definició és extreta de Wikipedia:

- Un robot és una entitat virtual o mecànica artificial. A la pràctica, això és en general un sistema electromecànic que normalment és conduït per un programa d'un ordinador o per un circuit elèctric. Aquest sistema electromecànic, per la seva aparença o els seus moviments, ofereix la sensació de tenir un propòsit propi.

Aquesta definició és important per a saber la realitat actual i per entendre la diferència entre un robot i una màquina normal. Els robots ofereixen “la sensació de tenir un propòsit propi”. Cal ser conscients de que és només una sensació de pensament autònom, doncs els robots responen a una programació preestablerta, i ja sigui un robot més o menys complex, faci més o menys funcions, totes es troben programades abans de fer la feina.

És la capacitat de lectura de l'entorn, la capacitat d'analitzar, computar i decidir (d'entre les funcions programades en el seu sistema) quina acció dur a terme, és a dir, capacitat d'adaptació, que li dona al robot la seva essència.

Dues bones definicions que inclouen diversos aspectes que conformen un robot són les que dona la RIA (Robot Industries Association):

- Manipulador funcional reprogramable, capaç de moure material, peces, eines o dispositius especialitzats mitjançant moviments variables programats, per tal de realitzar tasques diverses.
- Un dispositiu mecànic programable que s'utilitza en lloc d'una persona per realitzar tasques perilloses o repetitives amb un alt grau de precisió.

Tot i així, com s'ha comentat al principi de l'apartat, és difícil trobar una definició única. Per a l'objectiu d'aquest estudi, on es parla de robots de construcció i solucions específiques per a la construcció d'estructures, i per a poder diferenciar d'una manera més clara entre una màquina de construcció i un robot, la següent definició és sobre la que es gira entorn en aquest monogràfic:

- Un robot de construcció és una màquina, formada per un ordinador, una sèrie de sensors i eines mecàniques, que li confereixen la capacitat d'analitzar, decidir i actuar adaptant-se a l'entorn i la situació en que treballi a partir d'unes funcions i accions programades en el seu sistema.

Cal tenir en compte també que no hi ha un consens sobre la definició de robot de construcció, però sí que es diferencien dos tipus de tecnologies robòtiques: d'una banda es desenvolupen robots dissenyats per a la realització d'una única tasca i per l'altre sistemes de construcció automatitzada que inclouen més d'un procés de construcció.

També, i per a diferenciar un robot de construcció d'un industrial, es pot dir que la gran diferència radica en que en l'industrial el producte es mou en una línia de producció on els robots són estacionaris, mentre que en els de construcció el producte, que és l'edifici, és estacionari i els robots són els que es mouen i canvien la seva posició.

En aquest sentit els robots de construcció han de:

- Ser capaços de manipular components de pes i dimensió variable, és a dir que requereixen tenir un bon equilibri.
- Poder moure's, tenir un motor, bateries i elements motrius, o un marc de treball per on es puguin desplaçar.
- Canviar i ajustar el seu moviment en un ambient que canvia constantment com és una obra o espai de construcció.
- Aguantar i contrarestar, si fos necessari, canvis en la temperatura i humitat això com l'exposició a la pols i brutícia.
- Tenir la capacitat de dur a terme múltiples tasques, donada la varietat en una obra. La codificació de seqüències i el control digital ho fan possible.

## 2.2. Evolució de la robòtica

Al voltant de l'any 1800 es troba el començament del que es coneix com a robòtica moderna. Amb anterioritat ja s'havien inventat autòmats i enginys mecànics, des de l'antiga Grècia i Egipte, passant per Leonardo Da Vinci i els seus famosos invents, com ara el Lleó Mecànic. La gran part d'aquests invents es centrava en l'entreteniment dels nobles i seguia una mateixa pauta: la imitació dels humans i dels animals. Encara no s'havia arribat a la visió industrial que podien tenir els robots.

Les idees plasmades en aquests invents i enginys van ser recollides pels industrials del segle XVIII que es van adonar de la importància de l'automatització en la indústria. D'aquesta manera l'inici de la robòtica actual pot fixar-se en la revolució de la indústria tèxtil del segle XVIII.



*Imatge 2.2. Reproducció del Lleó de Da Vinci, per l'enginyer Mario Taddei. Font: Google Images.*

Va ser al 1801 quan Joseph Jacquard va dissenyar una màquina tèxtil programable mitjançant targetes perforades. La màquina permetia fabricar teles amb fils de diferents colors i complicats dibuixos mitjançant l'ús de targetes perforades, manejada per un sol operari. Gràcies a les innovacions de Jacquard, els fils d'ordit es movien de forma independent per aconseguir el dibuix desitjat. Aquest dispositiu es governava mitjançant un paquet de targetes de cartró perforades que es canviaven accionant un pedal, que al seu torn activaven un complex mecanisme de cordes i plantes que elevaven de forma alternativa un nombre diferent de fils per a la col·locació en la trama. Tot i que encara era necessari un operari per a canviar les targetes perforades de la màquina, el procés tèxtil si que ja era automàtic.



*Imatges 2.3 i 2.4. Reproducció del teler de Jacquard, al museu de la ciència i l'indústria de Manchester.*

*Font: Google Images.*

Des de començaments de segle XIX fins a la Segona Guerra Mundial l'aparició de grans sistemes de generació elèctrica va fer créixer la demanda de sistemes de regulació i control. Va ser en 1946 quan l'inventor americà G.C. Devol va desenvolupar el primer dispositiu controlador que podia registrar senyals elèctrics per mitjans magnètics i reproduir-los per a accionar una màquina mecànica. També certs canvis en la indústria, com el canvi d'unitats estàtiques a unitats mòbils, canvis en l'estructura de la cadena de muntatge i, sobretot, la introducció de la cinta transportadora, auguraven la revolució que estava a punt d'arribar a la indústria.

La producció en massa és un dels components més importants del que avui dia es coneix com la Segona Revolució Industrial, l'aparició de la cinta transportadora, la cadena de muntatge i la conseqüent divisió del treball són els principals elements que conformen aquest fenomen. En el primer terç del segle XX s'inicia el desenvolupament de l'enginyeria en les seves diferents branques, que permetran la construcció del que coneixem com robots moderns. La llista d'esdeveniments científics i tècnics que tenen a veure amb la robòtica no es limita a l'enginyeria sinó que involucra les matemàtiques i la física.

L'escriptor i biòleg Isaac Asimov va utilitzar per primera vegada el terme "robòtica" en els relats curts del seu llibre "I Robot" publicat al 1950. En ells es diuen per primera vegada les tres lleis de la robòtica, que són:

1. Un robot no farà mal a un ésser humà o, per inacció, permetre que un ésser humà prengui mal.
2. Un robot ha de fer o realitzar les ordres donades pels éssers humans, excepte si aquestes ordres entressin en conflicte amb la 1a Llei.
3. Un robot ha de protegir la seva pròpia existència en la mesura que aquesta protecció no entri en conflicte amb la 1a o la 2a Llei.

Posteriorment al 1982 va formular la Llei 0 de la robòtica:

0. Un robot no farà mal a la humanitat o, per inacció, permetre que la humanitat prengui mal.



Tot i el caire novel·lístic d'aquestes publicacions i de les lleis, han transcendit més enllà i en l'actualitat s'han tingut en compte. El 2011, el Consell de Recerca d'Enginyeria i Ciències Físiques (EPSRC) i el Consell d'Investigació d'Arts i Humanitats (AHRC) de Gran Bretanya van publicar uns principis ètics per als dissenyadors, constructors i els usuaris dels robots al món real, i que van sorgir, en part, a conseqüència i en base de les lleis d'Asimov.

Els avenços continuen a l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT) on es desenvolupa al 1952 una línia d'investigació sobre control numèric que culmina amb la definició del llenguatge de programació de peces tipus APT (Automatically Programmed Tooling), publicat el 1961.

Al 1960 s'introdueix el primer robot industrial, "l'Unimate", basat en la transferència d'articles programada de Devol. Es va instal·lar en una cadena de muntatge de General Motors a Nova Jersey. La màquina realitzava el treball de transportar les peces foses en motlle fins a la cadena de muntatge, on es soldaven sobre el xassís del vehicle, una tasca molt perillosa per als treballadors. L'Unimate original constava d'una gran caixa computada, unida a una altra caixa que es connectava a un braç articulat, amb un programa de tasques emmagatzemat en una memòria de tambor. Va ser el primer robot en aparèixer en la indústria automobilística.

L'any que introdueix el primer gran avenç en el disseny de la robòtica és el 1975 amb la invenció dels microprocessadors, que acabarien desenvolupant els ordinadors moderns, i que començaven a reduir en tamany, forma i preu els robots, cosa que va facilitar la total implantació dels robots en la indústria.

El Japó, que fins al moment era importador de tecnologia, va fer un gran pas endavant i va començar a invertir en la robòtica fins a convertir-se en un dels grans pioners d'aquest camp en l'actualitat. Del país nipó sorgeix el primer robot de construcció al 1983, de la firma Shimizu Corporation dissenyat per a projectar en forma d'esprai material de protecció contra el foc sobre peces d'acer. Va ser anomenat SSR-1 Fireproofing Spray Robots, i es convertia en el primer robot pròpiament dissenyat per a l'edificació.



*Imatge 2.5. L'SSR-1, del 1983 de Shimizu Corporation. Aquest robot s'ha anat actualitzant i s'usen versions noves en l'actualitat. Font: Construction Robots, The Search for New Building Technology in Japan.*

A partir d'aquest moment els avenços d'aquesta tecnologia són perceptibles dia a dia fins arribar al punt en què ens trobem amb robots de molts tipus, des de tasques de neteja domèstica, robots desactivadors d'explosius o andròides dinàmics com l'ASIMO que és capaç de caminar, entaular conversa i realitzar algunes tasques simples, així com les modernes cadenes de muntatge a les indústries, ja no només automobilística, i fins al nivell de robots de medicina capaços de realitzar operacions a pacients sense cap tipus de manipulació per part de l'home. La presència de milions de robots i tecnologia a tot el món, en sectors molt diferents, res té a veure amb les prop de 3500 unitats que funcionaven en els començament dels anys 70.

### 2.3. Classificacions

Fer una classificació única dels robots és pràcticament impossible, donat que no hi ha factors unitaris que puguin agrupar tots els robots existents. La majoria tenen característiques específiques i diferencials que impedeixen una classificació universal com a tal.



Es pot començar a fer una diferenciació discernint si són robots de llaç tancat o de llaç obert. Els de llaç tancat són aquells capaços d'interactuar amb l'entorn gràcies a alguna de les seves característiques, com ara a través dels sensors i de realitzar una acció segons la lectura que rebi. D'altra banda, els de llaç obert responen a una sèrie d'accions programades en el seu sistema, independentment de l'entorn o de la situació. Per exemple, en un sistema de rec de llaç obert, el sistema automàticament rega a una hora determinada, independentment de si ha plogut o si les plantes ja han rebut la quantitat necessària d'aigua anteriorment.

Diverses organitzacions i associacions de robòtica proposen les seves classificacions pròpies. Aquestes ajuden a discernir segons les qualitats i característiques dels robots.

L'esmentada abans RIA, dona la següent classificació segons les característiques de cada robot:

- Robots Play-back. Repeteixen una sèrie de moviments programats anteriorment.
- Robots controlats per sensors. Fan moviments segons la informació que reben pels sensors.
- Robots controlats per programa.
- Robots adaptables. Segons la informació obtinguda a través dels seus sensors, poden reprogramar les seves accions.
- Robots amb intel·ligència artificial. Aquests realitzen decisions pròpies (preprogramades) a través de la informació que reben.

La Japan Robot Association (JARA) té la seva pròpia distinció segons el nivell d'intel·ligència del robot:

- Maneig manual. Controlat per una persona.
- Seqüència arreglada. Programats per a una tasca en particular.
- Seqüència variable. L'operador pot modificar la seqüència de la màquina fàcilment.
- Regeneradors. L'operador ha de manipular el robot per a fer la tasca.
- Control numèric. El robot es programa per a la funció que hagi de realitzar perquè no necessiti l'assistència d'un humà.

- Intel·ligents. Capaços de ser programats, prendre decisions pròpies segons l'entorn i interactuar amb ell.

Per últim, també es classifiquen segons generacions. Cada generació te canvis fàcilment detectables i que permet aquesta classificació. És la següent:

- 1a generació: Robots manipuladors. A partir dels anys 50. Robots de llaç obert. Aquestes màquines són molt senzilles, no són capaços d'obtenir informació de l'exterior ni interactuar amb ell, de manera que tenen una sèrie de mecanismes programats pels quals actuen.
- 2a generació: Robots d'aprenentatge. Fins als anys 80. Robots amb parts de llaç tancat. Aquests robots són capaços d'emmagatzemar, al costat de les seves instruccions programades, informació sobre el seu entorn per poder adaptar-se a la tasca i a les dades analitzats. Poden aprendre i memoritzar seqüències amb l'ajuda i el seguiment d'un operari.
- 3a generació: Robots amb control per sensors. Anys 80 i 90. Aquests robots de llaç tancat obtenen informació sobre l'entorn per adaptar-se al mateix. Al tenir controladors i ordinadors, usen la informació que els van aportar els sensors i la visió artificial per reprogramar les seves accions a través dels llenguatges de programació preestablerts i en funció de les seves necessitats.
- 4a generació: Robots intel·ligents. Els sensors són molt més sofisticats que els anteriors i envien més informació al controlador per analitzar-la amb estratègies complexes. Aquests s'adapten completament a l'entorn, es consideren intel·ligents, i aprenen d'ell a través de mètodes d'anàlisi i obtenció de dades com el "coneixement difús" o "xarxes neuronals". D'aquesta manera hi ha un exercici de la tasca a temps real i una base d'informació sòlida i fiable.
- 5a generació: Actualitat i en desenvolupament. El sostre de la intel·ligència artificial cada cop puja més, i també la introducció de la nanotecnologia comença a tenir un gran impacte en la robòtica.

De cara als robots de construcció que s'analitzaran aquí, s'ha decidit en fer una classificació més senzilla basada en el material de construcció. D'aquesta manera és visualitza fàcilment l'impacte que poden tenir en una obra i les implicacions que poden tenir a l'hora de fer-los servir en la construcció:

- Aplicacions robòtiques per a construcció amb maons.
- Aplicacions robòtiques per a construcció amb acer.
- Aplicacions robòtiques per a construcció amb formigó.
- Aplicacions robòtiques per a construcció amb altres materials.



*Imatges 2.6 i 2.7. Logos de la RIA i de la JARA, dues de les associacions de robòtica. Font: Google Images.*

### 3. Aportacions de la robòtica a la construcció d'estructures

Tenint en ment que tecnològicament es considera una indústria conservadora, el sector de la construcció està desenvolupant aplicacions robòtiques i solucions que busquen facilitar l'execució de les tasques més complexes o perilloses dels professionals de l'edificació. Els següents factors són els punts de partida de cara a desenvolupar els robots que puguin ser usats en la construcció d'estructures:

- Augment de la qualitat en la construcció.
- Augment de la productivitat.
- Millora de la planificació d'obra.
- Augment de la precisió.
- Augment de la flexibilitat dels processos de construcció.
- Eliminació dels llocs de treball perillosos.
- Millora de l'accés a àrees complicades.
- Construcció en entorns perillosos.
- Construcció amb condicionants.

Cal tenir en compte, com ja s'ha esmentat anteriorment, que actualment la tecnologia no està en un punt en que un robot, o una sèrie de robots, puguin substituir a l'home al 100% en una construcció. En quant a la construcció d'estructures, s'ha de tenir en compte que és la fase constructiva que, juntament amb la fase de tancaments, ocupa més espai de temps i sobre la que s'articula tota la planificació i organització d'una obra. Una gran part dels recursos i materials utilitzats en la totalitat d'una construcció són emprats en aquesta fase. Per tant, la robotització dels processos d'execució d'estructures, ja sigui en la seva vessant més genèrica, més del dia a dia, com en situacions més especials i concretes, o en alguns casos perilloses, té un impacte important en el global d'una construcció.

És important fer menció que les possibilitats robòtiques que s'analitzaran i es tenen aquí en compte no són només aplicacions que afecten de manera directa en l'execució de les estructures. De manera indirecta un robot pot fer tasques igual d'importantes i necessàries en aquesta fase. És a dir l'estudi no es limita només a repassar robots que, posant per exemple, puguin soldar de manera autònoma una estructura metàl·lica, sinó

que també té en compte robots capaços d'implantar el replantejament de l'estructura de manera automàtica i precisa, o robots d'impressió 3D per a fabricar encofrats amb geometries complexes i que a més són de material reutilitzable i reciclable, i que d'altra manera s'haurien de descartar un cop utilitzats per l'execució de l'estructura en concret, donant així molta més precisió i reducció del cost global de la construcció.

També, una part de la construcció d'estructures que es beneficia molt de la introducció de la robòtica és la prefabricació. A la prefabricació se li tira en cara moltes vegades que és molt repetitiva i que és molt poc flexible amb les diferents geometries i el posterior entorn on s'ha d'emplaçar l'edificació. La maquinaria de la prefabricació, si bé té un bon grau d'automatisme, té poca variació amb les peces que fabrica. Aquesta limitació es pot veure superada àmpliament amb la introducció de la robòtica, no només millorant el treball en sèrie i de repetició, sinó també introduint la possibilitat de crear peces personalitzades i amb geometries molt més especials, tot amb una millora de la qualitat de la peça resultant i una millor adaptabilitat de les estructures a l'obra.

### **3.1. Concepte i millores de la introducció de la robòtica**

La construcció d'estructures en l'actualitat segueix encara un mètode constructiu molt tradicional, on l'operari té un paper directe en l'execució de l'estructura ajudat per màquines i eines. Actualment està en un punt on hi ha un creixement constant de defectes de construcció, baixada de la productivitat, un augment de la complexitat de l'organització de l'obra i també majors sobre costos en projectes de gran envergadura. Tot això indica que ja s'ha arribat als límits de la construcció convencional i és moment de fer el següent pas endavant amb la robotització del sector, en aquest cas ja no només parlant de les estructures, que, sent com ja s'ha comentat una de les fases més importants per no dir la que més, pren gran importància aquest desenvolupament més enllà del límit de lo convencional fins ara.

Els robots ofereixen aquest potencial més enllà del límit convencional, amb la seva capacitat de reprogramació, flexibilitat i disseny modular, i garanteixen millores en la temporalització, cost i qualitat dels productes (en aquest cas construccions i estructures). Guanyen molta importància en productes de complexitat elevada, com

podrien ser estructures amb geometries complexes que un humà o bé trigaria molt de temps i seria molt més costós o directament no seria capaç d'assolir el nivell necessari de qualitat amb la geometria complexa desitjada. Conjuntament amb la generació precisa per ordinador d'aquestes geometries el robot si que pot dur-les a terme gràcies a la seva capacitat de muntatge, tall, gravat, soldadura, i, una de les aplicacions que més s'han explorat últimament, la impressió en 2D i en 3D. També cal destacar el fet de què, teòricament, el robot no es cansa mai, i pot treballar durant moltes més hores i inclús en horari nocturn (si fos 100% autònom). Això faria també reduir la mà d'obra necessària, o si més no substituir la funció de treball humà per una funció de supervisió i control de la feina del robot. També, com a exemple, en feines de detecció de fissures, ponts tèrmics, i inclús en proves de resistència com l'esclerometria presenten una capacitat sensitiva superior a la humana.

Cal recordar en aquest punt que els robots tenen també limitacions. Aquestes poden venir donades pel robot en si o pel material. El robot moltes vegades necessita un marc de treball, un frame definit, que limita el moviment o l'abast. Això i a la vegada la capacitat de càrrega del robot fa que es limiti el tamany i el pes de les peces i materials que utilitzi, així com la distància que han de recórrer. Tanmateix, els robots que utilitzen impressió 2D i 3D han de disposar d'un dipòsit proper amb el material.

Deixant una mica de banda el Japó, on la robòtica a la construcció ja porta un gran camí fet i és una mica un món a part, a la resta del món el camí de la robòtica en la construcció ja està encetat. Cada cop més, de manera lenta però constant, s'introdueixen mètodes i aplicacions robòtiques en el sector tant per a sobrepassar limitacions humanes o per a millorar les condicions de les tasques a realitzar i deixar a l'operari amb les tasques de supervisió i control del procés. En les estructures aquesta robòtica s'aplica actualment sobretot a la construcció off-site, en la construcció modular i d'estructures complexes, on es poden fer formes i geometries amb més complexitat a la vegada que s'utilitzen materials que d'una altra manera serien molt més complicats d'implementar. El següent pas en l'evolució d'aquesta tecnologia per a les estructures és una major implementació d'aplicacions robòtiques on-site. La "factorització" de la construcció dona lloc a aquest pas: a més repetició de processos en la construcció de l'estructura, més fàcil, més òptim i més rentable és aplicar la robòtica en aquesta fase.

### 3.2. Construcció amb condicionants

Es pot entendre com a construcció amb condicionants diverses situacions:

- Construcció en edificis sinistrats, on la integritat estructural no es pot assegurar i és un risc per a les vides humanes treballar en ells.
- Construcció en terreny desfavorable, de molt difícil accés o en general amb característiques adverses per a poder construir de manera convencional i sense risc.
- Construccions d'estructures en situacions d'emergència. Ja sigui en entorns hostils on el risc de danys a la mà d'obra humana és molt elevat, com podria ser un incendi, una zona amb radioactivitat o després d'un desastre natural, o en situacions on es requereixi una actuació molt ràpida i precisa.
- Construcció a l'espai. La necessitat de tot l'equipament per a sobreviure a l'espai i les condicions de temperatura, gravetat, etc. fan que la robòtica tingui un paper important en aquest tipus de construcció.

En totes aquestes situacions, els diferents robots que podrien dur a terme aquestes tasques condicionades tenen en comú que al ser màquines mecàniques no tenen el risc de patir danys que en una persona serien greus (lesions de llarga durada, cremades i inclús la pèrdua de la vida), poden realitzar la tasca de manera precisa, òptima i amb un rendiment molt més elevat al no veure's afectats en el mateix grau que un humà.

### 3.3. Riscos laborals

La construcció en general presenta una de les taxes més grans d'accidents en tots els sectors. En el següent gràfic elaborat l'any 2016 en l'últim informe per part del Ministeri de Treball i Seguretat Social espanyol (figura 3.1) es pot apreciar com la construcció és el sector amb més casos d'accidents laborals.

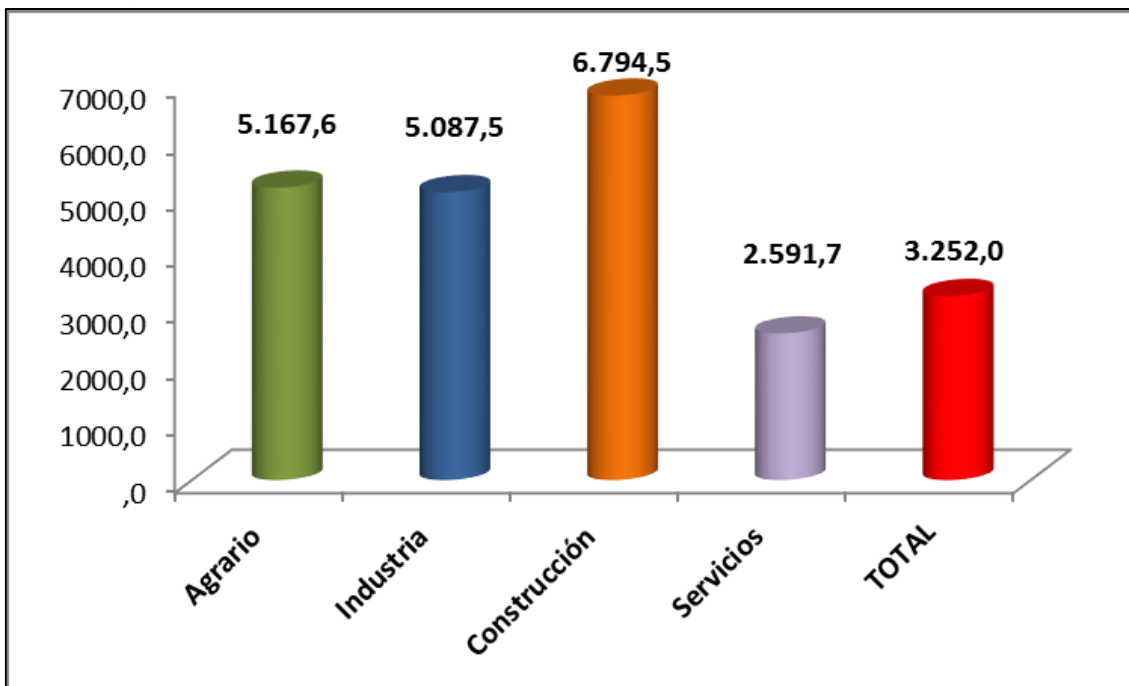


Figura 3.1. Índex d'accidents per sectors a Espanya, any 2016. Font: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

Cal ser optimistes i veure que en el transcurs dels últims 10 anys aquest índex s'ha reduït de manera substancial com es pot apreciar en la figura 3.2:

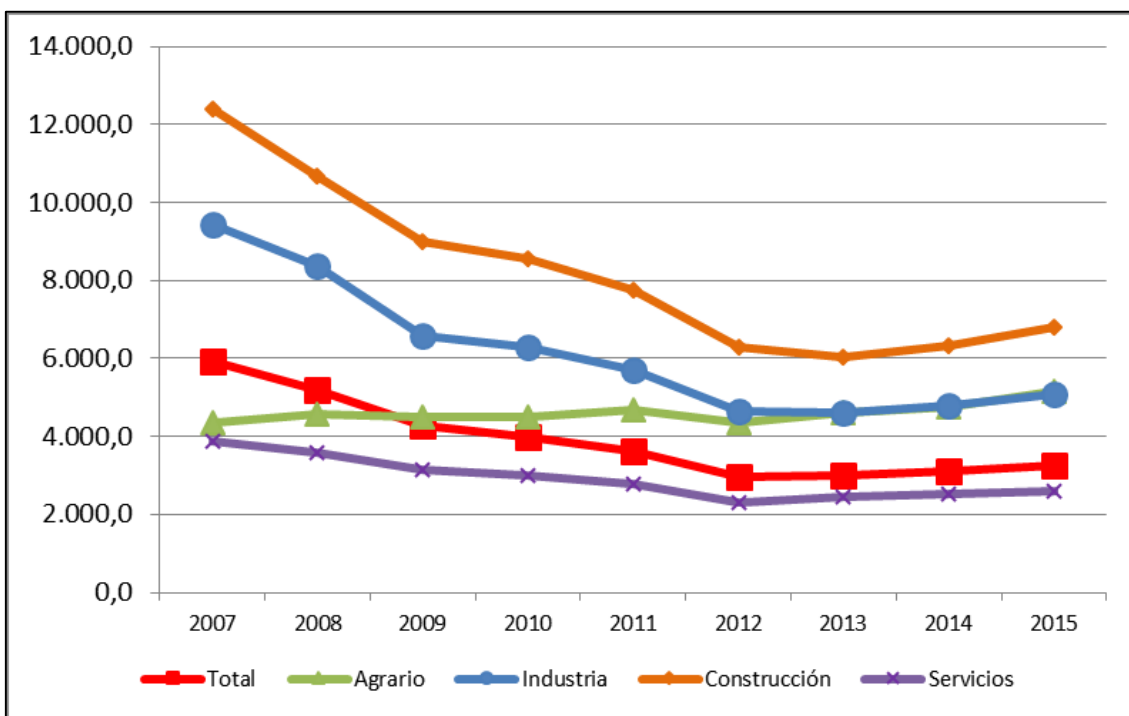


Figura 3.2. Evolució temporal dels índex d'accidentalitat sectorials. Font: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.



Específicament en la construcció d'estructures s'ha de tenir en compte que és una de les fases més llargues i importants i que representa més perills i més riscos laborals que les altres fases constructives. La relació de riscos laborals és la següent:

- Caiguda de persones a diferent nivell.
- Caiguda de persones al mateix nivell.
- Caiguda d'objectes per caiguda o afonament.
- Caiguda d'objectes en manipulació.
- Caiguda d'objectes despresos.
- Xocs i cops contra objectes immòbils.
- Xocs i cops contra objectes mòbils.
- Cops i talls per objectes o eines.
- Projecció de fragments o partícules.
- Atrapament o aixafada per o entre objectes.
- Atrapament o aixafada per gir de màquines o vehicles.
- Sobreesforços, postures inadequades o moviments repetitius.
- Exposició a temperatures ambientals extremes.
- Contactes tèrmics.
- Contactes elèctrics.
- Exposició a substàncies nocives o tòxiques.
- Contacte amb substàncies càustiques o corrosives.
- Atropellaments o cops amb vehicles.
- Exposició al soroll.
- Exposició a vibracions.
- Il·luminació inadequada.
- Càrrega mental.
- Riscos derivats de factors psicosocials o d'organització.
- Altres riscos no especificats.

A la figura 3.3 s'observen la proporció dels accidents per tipus, associats a la construcció.

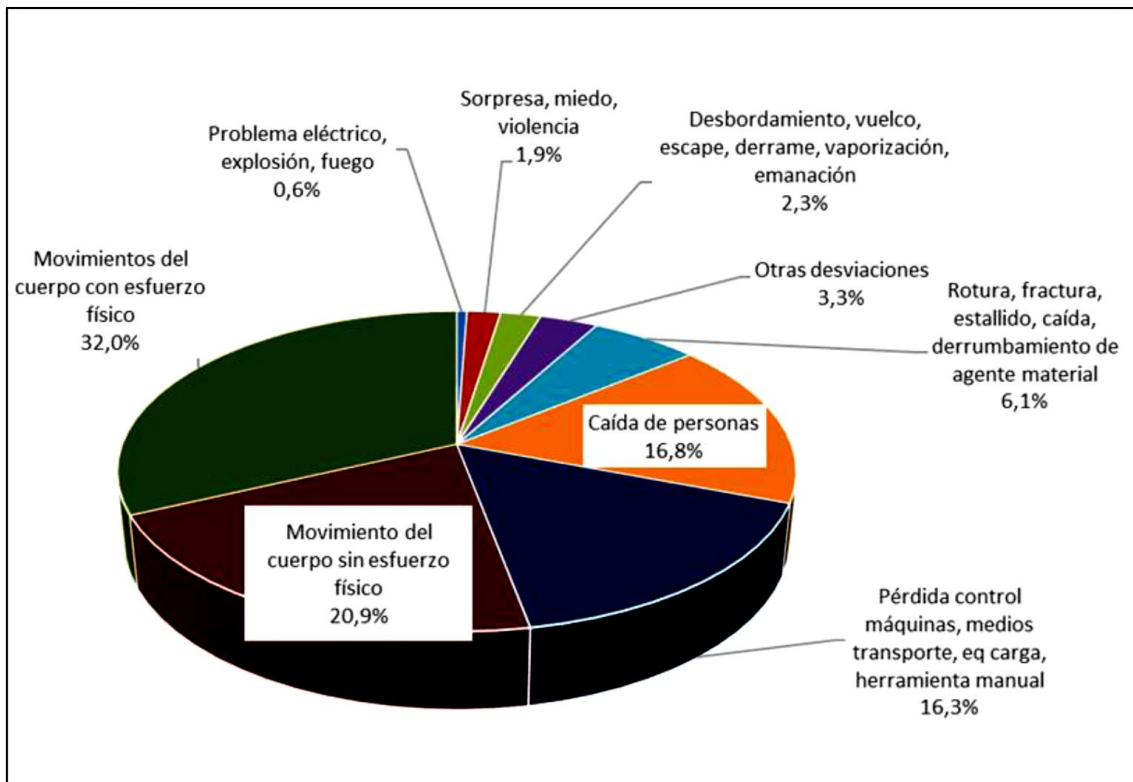
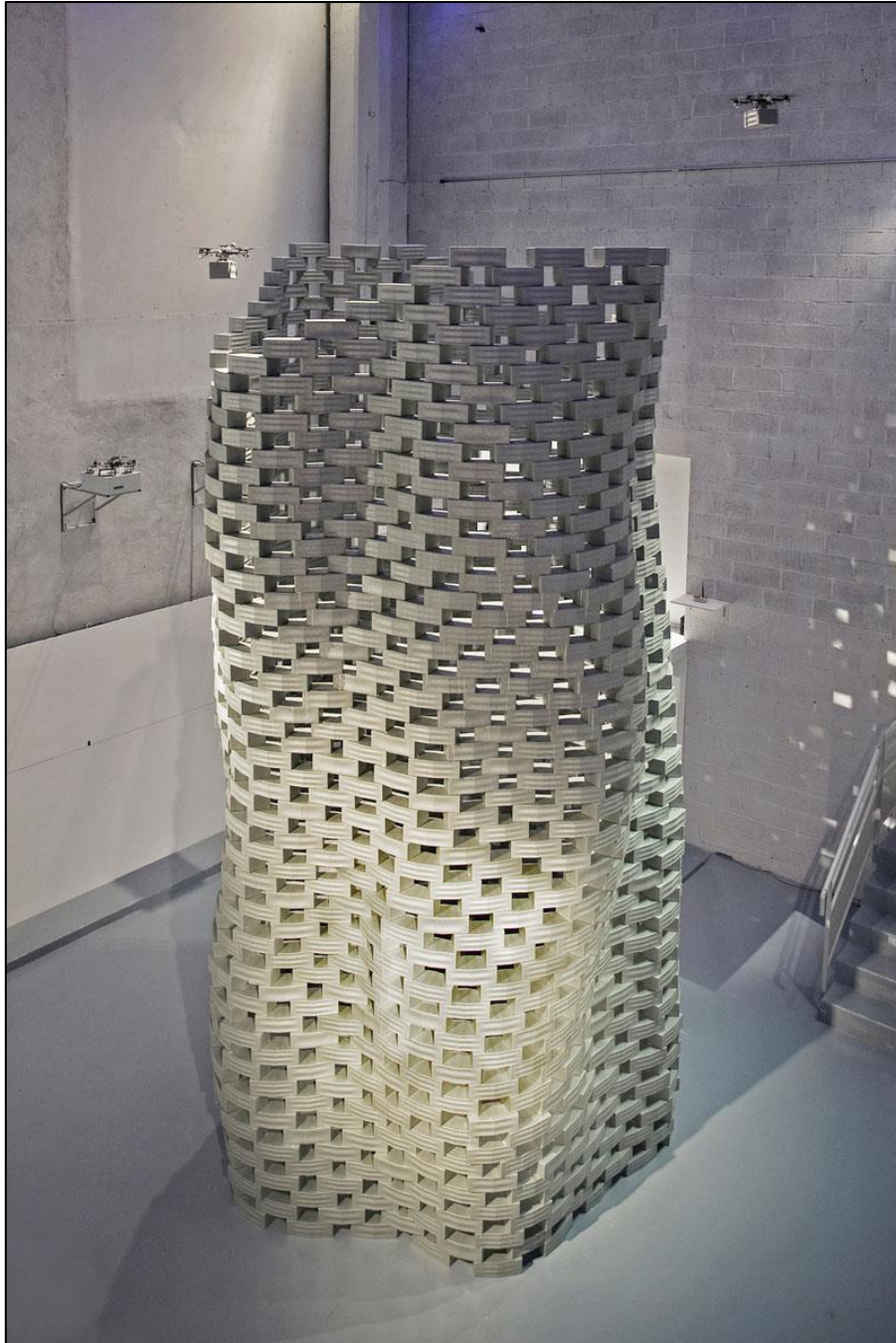


Figura 3.3. Accidents en jornada de treball amb baixa laboral. Font: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

Per tant, el fet que els robots puguin canviar la feina dels operaris a tasques de control i supervisió, o de mínima interacció i amb molt poc risc, és d'especial rellevància. La reducció de riscos laborals és de vital importància, ja no només parlant de robots, sinó en termes generals, però és clar que la introducció de les aplicacions robòtiques, ja no només en estructures (tot i que especialment en la fase d'execució de l'estructura que és on més accidents es produeixen), sinó en tots els sectors amb riscos laborals severos, s'ha de tenir molt en compte per al futur immediat.

## 4. Anàlisi d'aplicacions robòtiques en la construcció d'estructures

### 4.1. Aplicacions robòtiques per a treball amb maons



*Imatge 4.1. ARC, o construcció aèria robòtica, un dels prototips d'aplicació robòtica per a treballar amb maons i peces. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

#### 4.1.1. Projecte Termes

Desenvolupat per: **Harvard SEAS i Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering**



*Imatge 4.2. Robots del projecte Termes. El braç fa la tasca de col·locació i manipulació del maons. Font: website de la Science Magazine.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció d'estructures amb maons/peces petites.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** 17,5×11,0cm. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom, no requereix acció humana.
- **Mobilitat i energia:** robot mòbil, bateria integrada en el robot.
- **Construcció:** on-site i off-site.

#### Avantatges:

- Intel·ligència d'eixam i sincronització.
- Creació de sistema de transit segons el número de robots que treballin.
- Esmena automàtica d'errors.
- Construcció autònoma en localitzacions remotes o hostils.
- Si un robot falla o deixa de funcionar, els demás poden seguir independentment.

#### Limitacions:

- Només pot construir amb peces especials de 21,5×21,5×4,5cm.
- No fa servir morter per a les juntes.

**Funcionament de l'aplicació:**

- El sistema consta de robots mòbils simples i autònoms, usant com a material petits maons, on el robot és capaç de manipular les peces per construir les estructures. La intel·ligència d'eixam permet que tots els robots estiguin en funcionament alhora i no es destorbin entre si, sabent perfectament cadascun on ha de ser i quina acció realitzar a cada moment, així com també tenen la capacitat d'esmenar errors que es puguin cometre i evitar el col·lapse de tot l'eixam de robots.
- Els robots es regeixen per un programa informàtic que planteja instruccions senzilles i que s'adapten a les condicions de l'entorn i a les tipologies de construcció. Obtenen la informació sobre on estan els maons a través de la inspecció directa amb els sensors, ja que aquesta informació es converteix en obsoleta després de sortir de l'àrea i un altre robot modifiqui l'estructura. Una vegada que l'usuari decideix l'estructura, el software busca un conjunt de "normes de trànsit" per a la realització d'aquesta estructura.
- Cada robot repetirà la següent rutina per a la col·locació de cada maó: anirà a carregar un maó, i a continuació busca un forat lliure al primer nivell on dipositar el bloc. Un cop dipositat el bloc, retorna a la pila de blocs i reinicia el seu procés. Una mateixa estructura, pot realitzar-se de centenars de formes diferents ja que els robots no segueixen un camí establert, sinó que ve donat pel software quan es programa.



*Imatge 4.3. Robots Termes usant l'estructura construïda com escala per a pujar nivells. Font: website de la Science Magazine.*

**Aplicabilitat:**

La seva intel·ligència col·lectiva i autonomia permeten al Termes, dins de les seves limitacions, treballar en entorns hostils o en situacions específiques.

### 4.1.2. ARC69 o Construcció Robòtica Aèria

Desenvolupat per: Grup de recerca de Gramazio, Kohler i Raffaello D'Andrea



*Imatge 4.4. Dron AL3-32 S1000 Copter equipat amb un sensor d'inspecció Lidar. Font: Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció d'estructures amb maons/peces petites.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** 29x14x22cm. Pes: 3,2Kg.
- **Grau d'autonomia:** autònom, no requereix acció humana.
- **Mobilitat i energia:** robot mòbil (volador), bateria integrada en el robot.
- **Construcció:** on-site i off-site.

#### Avantatges:

- No necessita bastides o grua per a col·locar els materials gràcies a poder volar.
- Construcció de dissenys d'alta complexitat.
- Cooperació i capacitat de treballar individual o col·lectivament segons necessitat.
- Pot dur a terme diversos treballs segons l'eina que se li acobli.

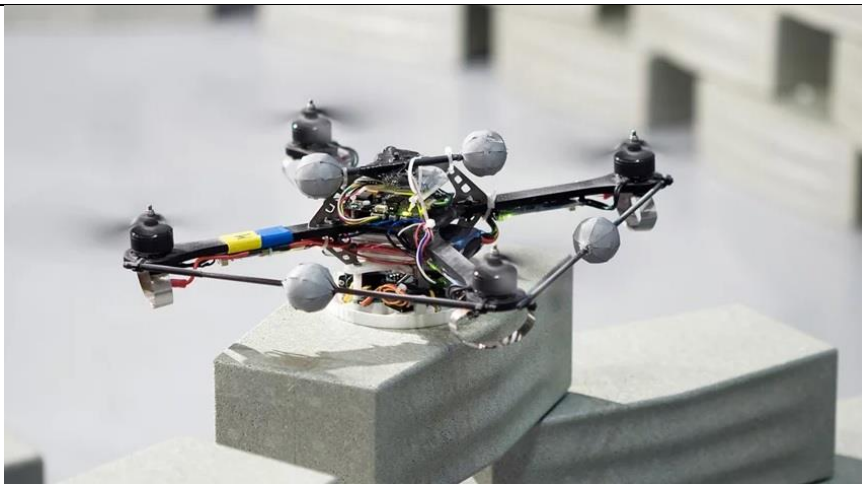
#### Limitacions:

- Capacitat de càrrega molt reduïda degut al tamany propi i de les eines.
- No fa servir morter per a les juntes.



**Funcionament de l'aplicació:**

- De manera similar als robots del projecte Termes, els drons ARC segueixen ordres dictades pel software informàtic. Recullen les peces, es desplacen fins a l'estructura, en aquest cas per l'aire sense necessitat de marcs o estructures auxiliars, i dipositen la peça al lloc designat pel programa informàtic.
- La capacitat de càrrega ve donada gràcies a una eina d'acoblament i manipulació de materials. Igual que els robots industrials, poden ser equipats amb diferents eines per transportar i manipular materials de diferents formes, com per exemple soldadors, pinces i braços extensibles.
- Les ARC poden ser construïdes d'acord a dissenys d'alta complexitat. Els robots operen sota el disseny arquitectònic digital, la qual cosa permet la disposició dels elements amb perfecta precisió. La capacitat de treball de les petites màquines és fàcilment escalable, ja que diversos robots poden operar en una mateixa estructura ja sigui de forma col·lectiva o individual. El control digital els permet comunicar-se i sincronitzar les seves accions entre si, com per exemple aixecar càrregues particularment pesades entre uns quants drons individuals.



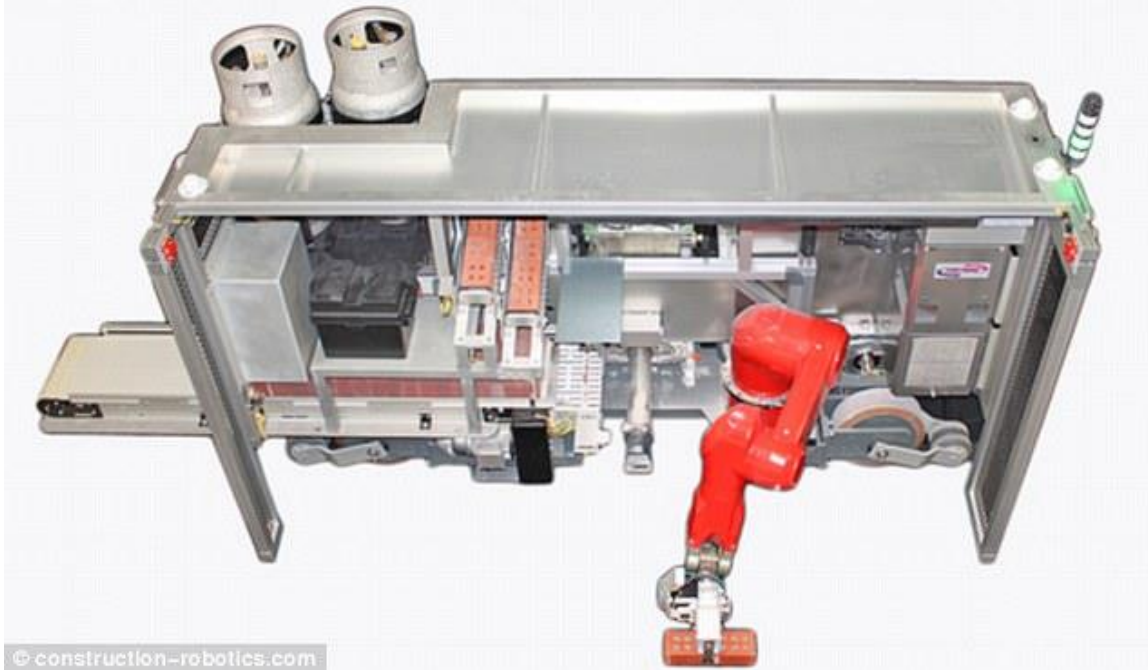
*Imatge 4.5. Dron ARC amb la pinça per a transportar maons equipada en la part inferior, i col·locant la peça a l'estructura (observable al fons de la imatge). Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

**Aplicabilitat:**

Aquesta aplicació pot utilitzar-se per a arribar a ubicacions difícilment accessibles per a la construcció convencional i realitzar modificacions a les estructures ja construïdes. Aquest drons, a part de la construcció d'estructures, també poden ser usats per a fer comprovacions de l'estructura d'una construcció i també un seguiment de possibles lesions en la mateixa.

### 4.1.3. SAM (Semi Automated Mason)

Desenvolupat per: **Construction Robotics New York**



*Imatge 4.6. Robot SAM. Font: website de Construction Robotics.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** col·locació automàtica de maons i blocs.
- **Rendiment:** 3000 maons-blocs/dia (rendiment humà: 300-400 maons-blocs/dia).
- **Dimensions i pes:** aproximadament 2,30x2,70x4,10m. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** semi-autònom, desplaçament manual a les àrees de treball.
- **Mobilitat i energia:** robot semi fixe, funcionament amb gas propà i bateria elèctrica.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- Redueix els costos laborals en un 50%.
- Redueix les tasques de càrrega de material en un 80%, reduint el risc de lesions.
- Pot posar maons durant hores sense necessitat de la intervenció d'un operari.
- Utilitza morter per a les juntes.

#### Limitacions:

- Mobilitat semi-reduïda a causa del seu pes.
- Ha de ser desplaçat mitjançant un carretó elevador.
- Requereix d'una bastida per a treballar en plantes superiors.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El SAM és un sistema semi automàtic que consta d'un braç robòtic acoblat a un xassís, que mitjançant sensors làser executa els treballs de construcció d'estructures de fàbrica de maó i de maçoneria, precarregats en la seva memòria com plantilles de CAD. També utilitza un enfocament diferent als maons de morter. Normalment el paleta posa el morter al mur i després col·loca el maó, en aquest cas el SAM posa el morter al maó abans de col·locar-lo al mur.
- La configuració in situ del SAM és un procés de tres passos que consisteix a configurar el sistema de rastreig mòbil (que triga aproximadament 30 minuts), configurar mesures per localitzar finestres i controlar juntes i finalment executar el sistema. A partir d'aquí, només cal carregar la màquina amb morter i maons.
- Un cop realitzada la tasca preprogramada espera al seu operador per desplaçar els pals de la bastida a la següent àrea de treball. El SAM augmenta la productivitat dels paletes aproximadament entre tres i cinc vegades més.



Imatge 4.7. SAM en execució d'un mur de blocs prefabricats de formigó. Font: website de Construction Robotics.

**Aplicabilitat:**

El SAM es pot aplicar gairebé a qualsevol estructura de murs de blocs o de fàbrica de maó. Degut al seu tamany i configuració, i per a rendibilitzar el seu cost (actualment costa aproximadament uns 420000€) s'empra principalment per a projectes grans, com hospitals, escoles, magatzems, on es requereixi la col·locació de grans quantitats de fàbrica de maó.

#### 4.1.4. R-O-B

Desenvolupat per: **Gramazio Kohler Research, ETH Zurich**



*Imatge 4.8. El R-O-B col·locant les primeres peces de l'estructura. S'observa el contenidor de càrrega obert, la facilitat de transport un cop tancat és un gran avantatge. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** col·locació automàtica de maons i blocs.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** aprox. com un contenidor de càrrega: 2,35x2,62x4,10m. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** treball autònom, desplaçament manual a les àrees de treball.
- **Mobilitat i energia:** robot semi fixe, requereix de generador elèctric.
- **Construcció:** on-site i off-site.

#### Avantatges:

- Precisió i alta qualitat de construcció de la prefabricació, però on-site.
- Ubicat en un contenidor de càrrega modificat, fàcil mobilitat per vies de transport.
- No està restringit a un procés de fabricació predefinit o a un material de construcció.

#### Limitacions:

- Ha de ser desplaçat amb mitjans mecànics a causa del seu pes.
- No pot treballar en plantes superiors.
- No fa servir morter per a les juntes.

**Funcionament de l'aplicació:**

- El R-O-B consta d'un robot industrial muntat sobre un eix lineal allotjat en un contenidor de càrrega adaptat però de mida estàndard. Pot ser fàcilment transportat directament al lloc de construcció on pot prefabricar amb alta precisió qualsevol tipus d'element constructiu.
- El dissenyador té la possibilitat d'intervenir i alterar el procés de fabricació a causa de les possibles modificacions que es produeixen durant l'execució de l'obra. El R-O-B mostra un enfocament radicalment diferent a la robòtica aplicada en fabricació industrial, en utilitzar el robot no només com un mitjà per a l'automatització, sinó com una eina de disseny.
- L'ús d'eines informàtiques en el procés de disseny permet fabricar elements de construcció amb formes molt específiques, que no es podrien construir manualment, que com ja s'ha comentat és una de les característiques de la construcció amb robots més interessant, a la vegada que el seu concepte permet fabricació on-site i off-site.



*Imatge 4.9. Estructures assolides mitjançant el R-O-B. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

**Aplicabilitat:**

La utilització del R-O-B en obra permet fer estructures complexes que difícilment serien assolibles per la mà d'obra humana, però el fet de no fer servir morter, el seu pes i la limitació en l'alçada de la construcció fa que la seva implementació en una obra estàndard sigui difícil.

#### 4.1.5. Hadrian X

Desenvolupat per: **FBR, Fast Brick Robotics Australia**



*Imatge 4.10. El Hadrian X amb el braç telescòpic llest per començar a executar la construcció. Font: website de Fast Brick Robotics Australia i Google Images.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** col·locació automàtica de blocs.
- **Rendiment:** 1000 blocs/hora (rendiment humà: 300-400 maons-blocs/dia).
- **Dimensions i pes:** 2,5x3,0x7,1m (Mercedes-Benz Axor 1828). Pes: 19,7T.
- **Grau d'autonomia:** autònom, només cal transportar-lo a l'obra.
- **Mobilitat i energia:** mòbil, requereix carburant per a funcionar i moure's.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- Col·locació de grans quantitats de blocs amb precisió mil·limètrica.
- Gran abast gràcies al seu braç telescòpic (fins a 20m màxim).
- Ús de grans blocs estructurals, sense necessitat de reforç d'acer.
- Transport molt fàcil a l'estar integrat en un camió.

#### Limitacions:

- No fa servir morter, tot i fer servir adhesius.
- L'extensió del braç telescòpic limita l'alçada de l'edificació.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El Hadrian X utilitza un software propi integrable amb CAD-CAM. S'executa l'estructura per capes, donant la sensació de que l'edifici creix, com si es tractes d'un arbre, des de la base fins a arribar a la seva alçada límit.
- El procés és completament automatitzat. Un cop es verifica el disseny amb el software, es carreguen els palets de blocs a la part posterior de la màquina i des d'aquest punt comença a executar l'estructura de forma automàtica i autònoma.
- Quan les parets es completen tots els canals de serveis i instal·lacions ja estan inclosos en l'estructura, accelerant de manera notable la posterior execució de les instal·lacions i la posada en servei de les mateixes.
- El sistema de posicionament del Hadrian X permet treballar en una àmplia gamma d'entorns de treball i ambientals. El moviment es compensa amb el sistema propi d'estabilització multi-eix de FBR.
- El camió inclou tots els elements del robot, com el braç telescòpic, l'estació de control digital (que s'encarrega de dirigir els moviments espacials del robot) i l'alimentació dels maons. El braç, a part de la pinça per a subjectar les peces, té diferents sensors i càmeres i un distribuïdor per a l'adhesiu.



*Imatge 4.11. Concepte 3D d'un Hadrian X executant murs. Font: website de Fast Brick Robotics Australia i Google Images.*

**Aplicabilitat:**

Donades les seves característiques, el Hadrian X té molta aplicabilitat en la construcció de cases unifamiliars amb murs de fàbrica/blocs. El seu rendiment és notable i la precisió i avantatges fan que sigui òptim per a obres d'edificació d'aquest tipus.



## 4.2. Aplicacions robòtiques per a treball amb acer



*Imatge 4.12. Projecte Mesh Mould Metal. Un braç robòtic col·loca, corba, talla i solda barres d'acer tot fent una malla que fa a la vegada de motlle. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

### 4.2.1. New SMART System

Desenvolupat per: **Shimizu Corporation**



*Imatge 4.13. Vistes exteriors de la construcció de dos edificis diferents amb el New SMART System. Es pot observar les columnes de suport i la plataforma superior de construcció. Font: website de Shimizu Corporation.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció automatitzada d'edificis de gran alçada amb estructura d'acer.
- **Rendiment:** augment de la productivitat del 20%, estalvi en el cost global del 30%.
- **Dimensions i pes:** depenen de les dimensions de l'edifici a construir.
- **Grau d'autonomia:** semi autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe, només puja d'alçada a la vegada que es construeixen les plantes. Requereix generadors d'energia elèctrica.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- La zona de treball no es veu afectada per les inclemències del temps.
- S'elimina el treball pesat i perillós per a la mà d'obra humana.
- Reducció de la mà d'obra, que passa sobretot a tasques de supervisió i control.
- Els períodes de construcció són més reduïts.
- Principalment construeix estructures d'acer, però també pot construir amb formigó.

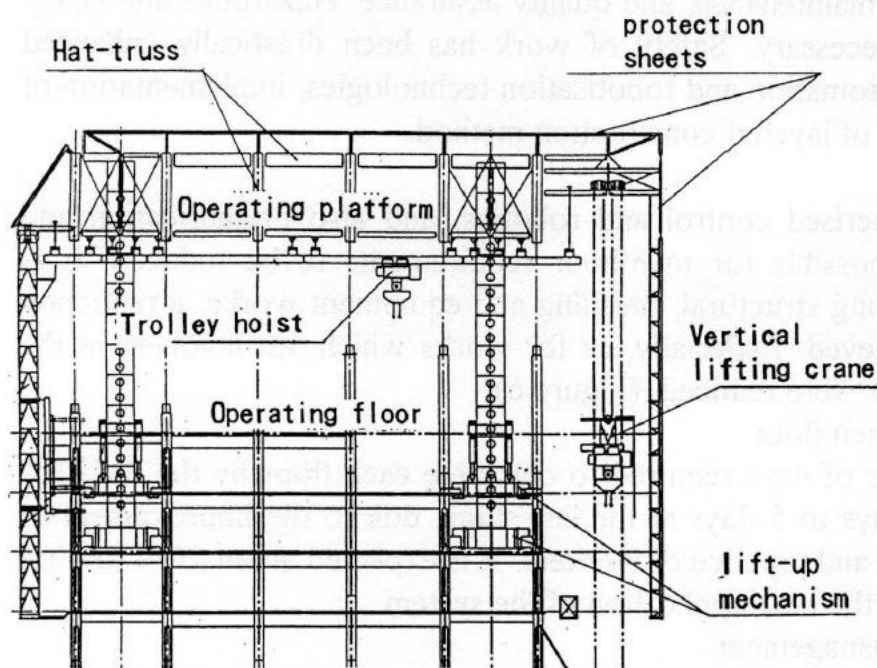
#### Limitacions:

- A causa de l'espai que ocupa, es veu molt limitat en construccions entre mitgeres.
- Tant el seu tamany com el seu cost fa que estigui limitat a la construcció d'edificis grans i de diverses alçades per a que sigui rentable.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology (SMART) és un sistema de construcció automatitzada integrada que automatitza una àmplia gamma de procediments de construcció, incloent el muntatge i soldadura d'estructures d'acer, col·locació de panells de formigó, instal·lació de mòduls de façana i instal·lació d'altres unitats, tot això sota el seu propi recobriment resistent a la intempèrie.
- En el sistema SMART la plataforma de construcció es munta per primera vegada a terra. Mentre aquesta plataforma s'aixeca pis a pis conforme es va construint l'estructura, en els nivells inferiors ja es poden anar realitzant altres treballs d'acabat. També se li poden acoblar panells protectors per a resguardar la plataforma de l'ambient i temps.
- Fa ús de cinc tecnologies diferenciades: un sistema automatitzat d'elevació, un sistema de transport de materials automatitzat, un sistema automatitzat de muntatge d'estructures d'acer, un sistema de soldadura automatitzada i finalment, un sistema de gestió de la informació i de control digital.



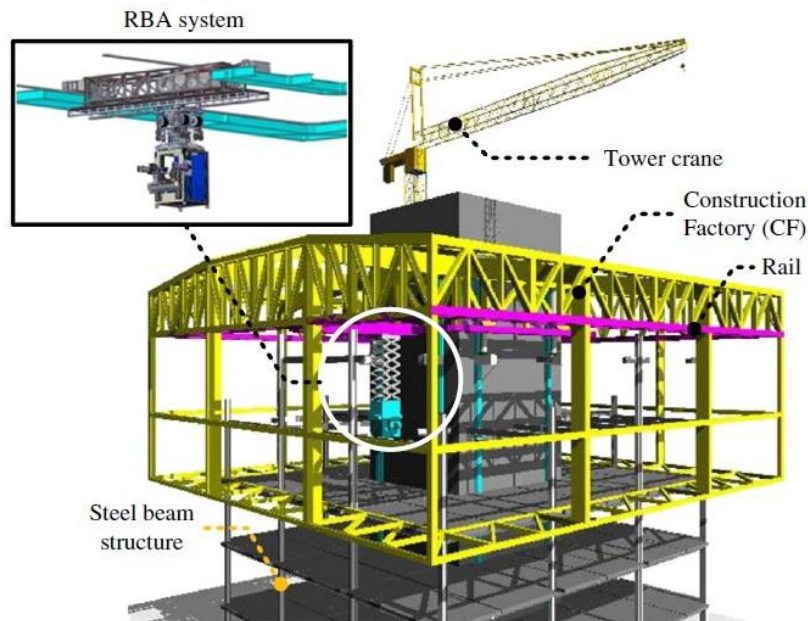
Imatge 4.14. Concepte de planta de construcció del NEW SMART System. Font: website de Shimizu Corporation.

**Aplicabilitat:**

Aquest sistema, principalment usat al Japó, presenta molts avantatges per a la construcció d'edificis de diverses alçades amb estructura d'acer. Cal recordar la limitació de les obres entre mitgeres, ja que no hi hauria espai suficient per als suports i la plataforma de construcció.

### 4.2.2. RCA System

Desenvolupat per: **Grup d'investigadors de robòtica i automàtica de Corea del Sud**



*Imatge 4.15. Concepte en 3D del RCA, amb la factoria i plataforma de construcció en color groc, suportada per l'estructura central de formigó. S'observa també el detall del sistema de transport RBA. Font: Google Images.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció automatitzada d'edificis de gran alçada amb estructura d'acer.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** depenen de les dimensions de l'edifici a construir.
- **Grau d'autonomia:** semi autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe, només puja d'alçada a la vegada que es construeixen les plantes. Requereix generadors d'energia elèctrica i una estructura central de suport.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- S'elimina el treball pesat i perillós per a la mà d'obra humana.
- Comparat amb l'SMART i altres sistemes, el seu pes és molt més reduït.
- Reducció de riscos dels operaris i treballadors de l'obra.
- Reducció del cost global de construcció.

#### Limitacions:

- Cal construir primer l'estructura central de formigó per a posar els carrils d'acer.
- A causa de l'espai que ocupa, es veu molt limitat en construccions entre mitgeres.

**Funcionament de l'aplicació:**

- El sistema RCA es compon de quatre subsistemes: sistema de seguiment i control, sistema d'acoblament, sistema de transmissió de materials (RBA) i sistema de construcció de fàbrica (CF).
- El CF és una estructura que envolta l'edifici en construcció i que inclou diversos sistemes robòtics per a automatitzar tasques. En el RCA es fixa a una estructura de nucli central de formigó de la mateixa alçada que l'edifici, prèviament construïda. Els marcs de les bigues d'acer s'acoblen al voltant de l'estructura base, on es disposen també els rails verticals al seu voltant cada un amb el seu mòdul d'elevació. El CF es recolza en aquests carrils de l'estructura nucli, i és per on es desplaça verticalment quan s'ha d'elevat al següent bloc de pisos a una velocitat de 3km/h.
- El sistema d'acoblament de l'estructura d'acer és amb perns, i es realitza amb molta precisió de forma automatitzada. El funcionament harmoniós de les eines de cargolat augmenta considerablement la productivitat i la velocitat de construcció.
- El sistema de transport robotitzat (RBA) té com a propòsit transportar el dispositiu d'emprenat robòtic a les posicions de cargolat corresponents en cada moment.



*Imatge 4.16. Detall de l'estructura central de formigó i dels rails d'acer per on es desplaça el sistema de transport automatitzat RBA. Font: Google Images..*

**Aplicabilitat:**

Semblant a l'SMART, presenta avantatges en construcció d'edificis amb alçada, però segueix limitat a les construccions d'aquest tipus, tant pel concepte de l'aplicació com pel seu cost.

### 4.2.3. Projecte Mesh Mould Metal

Desenvolupat per: **Gramazio Kohler Research, ETH Zurich**



*Imatge 4.17. Aplicació de la tecnologia Mesh Mould Metal, la unificació d'armat i encofrat en un únic sistema de material fabricat robòticament, a la DFAB House. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** corbat i soldat de malla/motlle d'acer.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** aproximadament 1,5x2,0x4,0m (tamany del robot). Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom, només cal transportar-lo a l'obra.
- **Mobilitat i energia:** robot mòbil, requereix energia elèctrica externa.
- **Construcció:** on-site i off-site.

#### Avantatges:

- Permet fer geometries complexes amb la malla d'acer.
- La malla fa a la vegada de motlle, reduint el cost del mur ja que no cal encofrar-lo.
- Per al formigonat té l'opció de fer servir formigons personalitzats.
- El sistema de detecció i computació a bord del robot permet construir la malla sense dispositius de mesura externs.

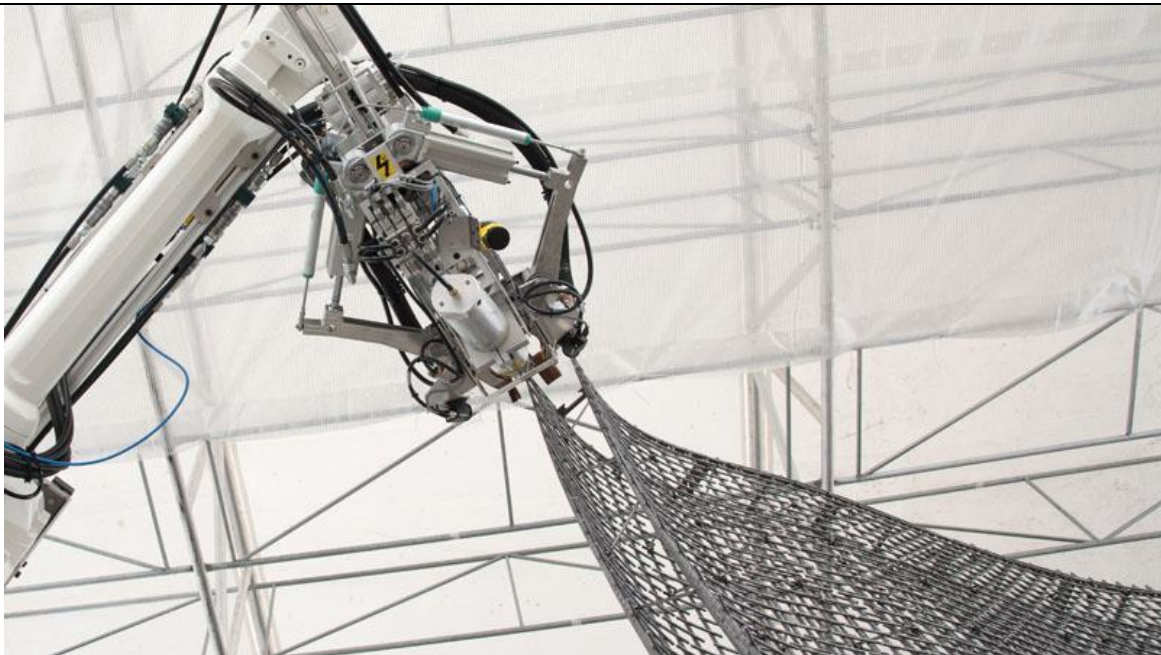
#### Limitacions:

- Només utilitza un diàmetre de barra d'acer en el mateix armat (6mm  $\emptyset$ ).
- El temps de realització és més lent comparat amb el mètode manual d'armat.



**Funcionament de l'aplicació:**

- Fruit del projecte de recerca Mesh Mould Metal, aquesta aplicació experimental permet la unificació del reforç (l'armat) i l'encofrat en un únic sistema de material fabricat robòticament.
- La "gàbia" de reforç de forma lliure es fabrica gràcies al robot de construcció mòbil IF, mitjançant el corbat i soldadura de barres de 6mm  $\varnothing$  de forma contínua en capes verticals.
- El robot IF s'orienta en relació amb la base de la paret, instal·lada prèviament i equipada amb marcadors i etiquetes digitals. Una càmera a l'end effector (l'element del robot que interactua amb el material i l'entorn i fa el treball) mesura les etiquetes per localitzar el robot i dues càmeres més monitoritzen la fabricació precisa de la malla.
- Un cop l'end effector es troba a la posició corresponent, l'alimentador li proporciona una barra d'acer de 6mm  $\varnothing$ , que procedeix a col·locar, corbar si es necessari, i soldar al seu lloc, i finalment tallar-la.



*Imatge 4.18. Detall de l'end effector del robot. Les diverses càmeres i sensors li permeten realitzar el treball de corbat i soldadura de l'acer de manera precisa. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

**Aplicabilitat:**

El concepte d'aquesta tecnologia podria aplicar-se a elements específics de l'estructura. Si es desenvolupés per a una construcció més "en sèrie" de tot l'armat i encofrat (més ràpid i amb més  $\varnothing$  d'acer), podria utilitzar-se de manera més quotidiana en construccions normals.

#### 4.2.4. Robot for positioning of heavy reinforcing bars

Desenvolupat per: **Kajima Corporation**



*Imatge 4.19. Robot de posicionament de barres d'acer pesades MR38, per a l'armat del formigó, en procés de col·locar un seguit de barres en el seu lloc corresponent abans de formigonar. Font: Kajima Corporation.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** col·locació de barres d'acer pesades per a armat de formigó.
- **Rendiment:** aproximadament 1 barra/min.
- **Dimensions i pes:** S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom, robot de playback.
- **Mobilitat i energia:** mòbil, requereix carburant.
- **Construcció:** on-site.

##### Avantatges:

- Pot col·locar fins a 20 barres i col·locar-les d'una en una al seu lloc corresponent.
- La llargada de l'end effector es pot ajustar per a que pugui manipular barres de diferents llargades i diàmetres.
- Fàcil moviment per sobre de barres ja col·locades.
- Elimina el treball pesat per als operaris, redueix riscos i redueix el cost de l'operació.

##### Limitacions:

- Al ser un robot de play-back, només repeteix una sèrie d'instruccions emmagatzemades a la seva memòria, i no té capacitat d'adaptació espontània.

**Funcionament de l'aplicació:**

- El robot consisteix en una plataforma mòbil, pràcticament igual que una excavadora, amb erugues per a poder moure's perfectament sigui en el terreny o sobre armadures ja col·locades, una zona d'emmagatzematge per a transportar el conjunt de barres a col·locar, un braç manipulador amb 5 graus de llibertat i un end effector especialitzat per a la manipulació i la col·locació de les barres.
- Un cop carregades les barres d'acer al robot, s'executa el treball. El robot segueix les ordres específiques per a cada construcció, predeterminades en la seva memòria, i col·loca d'una en una les barres al seu lloc corresponent. Les pot col·locar tant en paral·lel com entrecruades o zig-zag, segons requereixi l'operació.
- La distància entre barres també és programada, des de ¼" fins a 39" centres. També té la capacitat de col·locar les barres de manera radial, i, fins i tot, si es substitueix el braç manipulador i l'end effector, pot dur a terme la col·locació de barres verticals per a l'armat de murs de formigó.



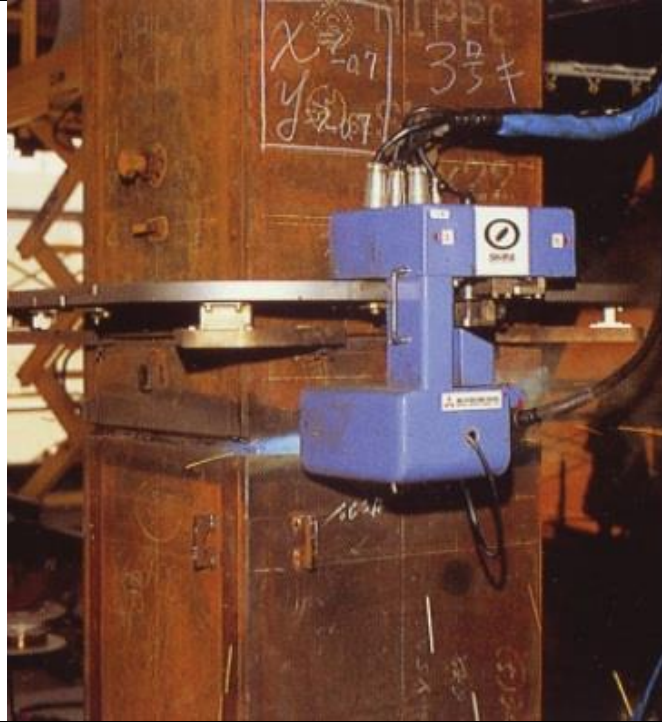
*Imatge 4.20. Vista lateral del MR38. S'observa el supervisor de peu al fons de la imatge. Font: Google Images.*

**Aplicabilitat:**

Aquesta aplicació podria ser fàcilment introduïda en construccions on cal usar barres d'acer molt pesades. Redueix els operaris necessaris a només un supervisor, quan normalment caldria un grup de treballadors per a transportar i col·locar una sola barra d'aquests tamany, amb el risc que suposa, i elimina un esforç físic potencialment lesiu, ja que parlem de barres d'acer que podrien arribar a pesar fins a 100kg.

#### 4.2.5. Welding Robot for Columns/Beams

Desenvolupat per: Shimizu Corporation



*Imatge 4.21. Robot per a soldadura de columnes de Shimizu Corporation. S'observa el cos del robot i la guia muntada a la columna. Font: Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** soldadura automatitzada de columnes i bigues d'acer.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** 29x28x36cm (tamany del robot). Pes: 19kg.
- **Grau d'autonomia:** autònom, requereix transport manual de zona a zona.
- **Mobilitat i energia:** fixe, requereix d'un generador d'electricitat.
- **Construcció:** on-site i off-site.

##### Avantatges:

- Elimina els riscos que comporta la soldadura d'estructures d'acer.
- Un operari pot manejar uns quants robots a la vegada gràcies a la facilitat d'ús.
- Pot soldar diversos tipus de perfil de columnes, com ara quadrades, cilíndriques, etc.
- El control avançat de la soldadura permet obtenir una qualitat i acabat excel·lent.

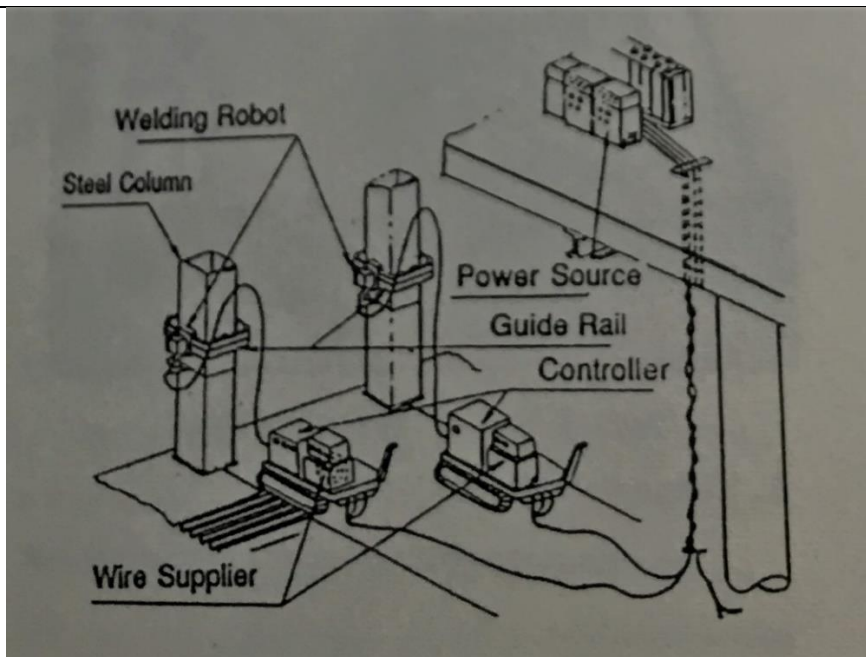
##### Limitacions:

- Requereix d'una guia fixada a la columna o biga per a desplaçar-se mentre treballa.
- Degut a la guia, requereix que es transporti d'una zona a altre manualment.



**Funcionament de l'aplicació:**

- Està formada per un robot equipat amb una eina de soldadura, uns rails desmuntables que fan de guia i que es fixen a la superfície que s'ha de soldar, un panell de control des d'on l'operari controla i supervisa tota l'operació, un alimentador que li proporciona el cordó per a la soldadura, i el generador d'energia elèctrica per al seu funcionament.
- Primer es fixen els rails que guien el robot per la columna o biga. Un cop fixats, es munta el robot sobre la guia i aquest amb els seus sensors detecta on es troba, a la vegada que comença a preescalfar l'eina de soldadura. Un cop ha establert la seva posició comença la primera capa de soldadura. Aquesta operació es repeteix segons les capes de soldadures determinades, fins a la capa final, on també repassa les cantonades de la soldadura.
- Porta incorporat un sistema de control avançat de la soldadura. La forma de la soldadura entre columnes/bigues és detectada per sensors làser, i el robot selecciona el tipus de soldadura adient de la seva base de dades, millorant així la qualitat i l'acabat.



Imatge 4.22. Esquema d'utilització del robot. El generador no té perquè estar a prop de la zona, mentre el robot pugui connectar-se a la corrent. Font: *Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan*.

**Aplicabilitat:**

Robot que es pot aplicar molt fàcilment en edificacions amb estructura d'acer. La possibilitat d'usar diversos robots a la vegada, amb el conseqüent augment de la velocitat i qualitat de la soldadura, juntament amb la reducció de riscos, el converteixen en una gran alternativa.

#### 4.2.6. Auto-Claw i Auto-Clamp

Desenvolupat per: **Obayashi Corporation**



*Imatge 4.23. Imatge de l'Auto-Claw instal·lat a una grua i procedint a la col·locació d'una biga per a estructura metàl·lica. Font: Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** col·locació automatitzada de bigues i columnes estructurals d'acer.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** S/D.
- **Grau d'autonomia:** semi autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixat a una grua estàndard. Requereix generador elèctric.
- **Construcció:** on-site.

##### Avantatges:

- Pot ser instal·lat en grues estàndard o no robòtiques.
- Simplifica el posicionament i orientació dels elements estructurals pesats.
- Millora la velocitat de construcció gràcies a la seva precisió.
- Augment de la seguretat, ja que no cal un operari prop dels elements pesats durant el posicionament i col·locació.

##### Limitacions:

- No es un robot completament autònom, cal un operari manipulant la grua.
- La capacitat de càrrega ve limitada per la capacitat d'aquest afegit a la grua.

**Funcionament de l'aplicació:**

- Tant l'Auto-Claw com l'Auto-Clamp estan basats en els mateixos principis de funcionament. La diferència entre un i altre és que l'Auto-Clamp està dissenyat per a la instal·lació d'elements més pesats que els que pot manipular l'Auto-Claw, que és més específic per a elements de menors dimensions i pes (de fins a 2T).
- En els dos casos, és un afegit a una grua normal (també podria usar-se en una robotitzada per a fer-lo 100% automàtic), un end effector que dota a la grua de propietats robòtiques bàsiques.
- Tot i no ser totalment automàtic fa més fàcil la col·locació d'aquests elements pesats d'estructura i millora la precisió. Amb tot això, augmenta la velocitat d'execució ja que els períodes de treball són més òptims, i augmenta la seguretat dels demés operaris.
- Ambdós incorporen un mecanisme anti fallida, per a evitar que pugui xocar contra altres elements o que pugui deixar anar l'element en una suposada pèrdua sobtada d'energia elèctrica de la grua.



*Imatge 4.24. En aquest cas, s'observa l'Auto-Clamp en acció, executant el posicionament d'una columna estructural d'acer. Font: Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots.*

**Aplicabilitat:**

Un dels grans avantatges que li dona una aplicabilitat molt gran és el fet de poder instal·lar-lo en grues estàndard, ja que fa que la inversió extra sigui més reduïda, a la vegada que la millora en la seguretat i velocitat d'execució optimitza el seu ús.





### 4.3. Aplicacions robòtiques per a treball amb formigó

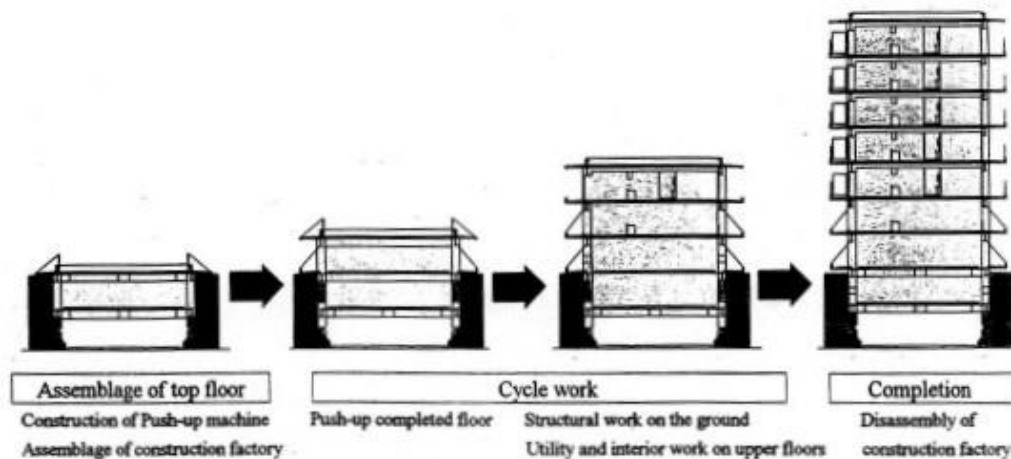


*Imatges 4.25 i 4.26. Conceptes en 3D del Gantry-Type Contour Crafting. Usable tan en construcció on-site com per prefabricació, és un mètode molt interessant de treballar amb formigó. Font: Google Images.*



**Funcionament de l'aplicació:**

- L'AMURAD és un sistema de construcció basat en la idea on la primera planta que es construeix i acaba és la planta superior, a diferència dels mètodes convencionals.
- La primera fase consisteix en la construcció de la màquina que pujarà les plantes acabades en la zona on es construirà l'edifici, i també el muntatge de tota la fàbrica de construcció. Consta de tres sistemes mecànics robotitzats diferents: el Z-UP, que fa l'acció de pujar les plantes, el Z-HAND, que s'encarrega de la col·locació de les peces prefabricades de formigó, i el Z-CARRY, que duu a terme el transport dels materials.
- A continuació es construeix el que serà la planta superior de l'edifici. Un cop l'estructura d'aquesta està acabada, s'eleva utilitzant el sistema de gats del Z-UP, i es procedeix a construir l'estructura de la següent planta, fins a arribar a la planta zero, donant la sensació que l'edifici emergeix des del terra. Mentre es va construint l'estructura d'una planta, en les ja construïdes es poden fer els treballs d'acabat i la posada a punt de les instal·lacions i serveis.
- El Z-HAND, el sistema mecànic que col·loca l'estructura prefabricada de formigó armat, té una capacitat de càrrega de fins a 5T i permet fins a set tipus diferents de moviment automatitzat per a la col·locació precisa i eficient de les peces de l'estructura.



Imatge 4.28. Esquema del funcionament del sistema AMURAD conforme es van construir les plantes de l'edifici en qüestió. Font: *Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan*.

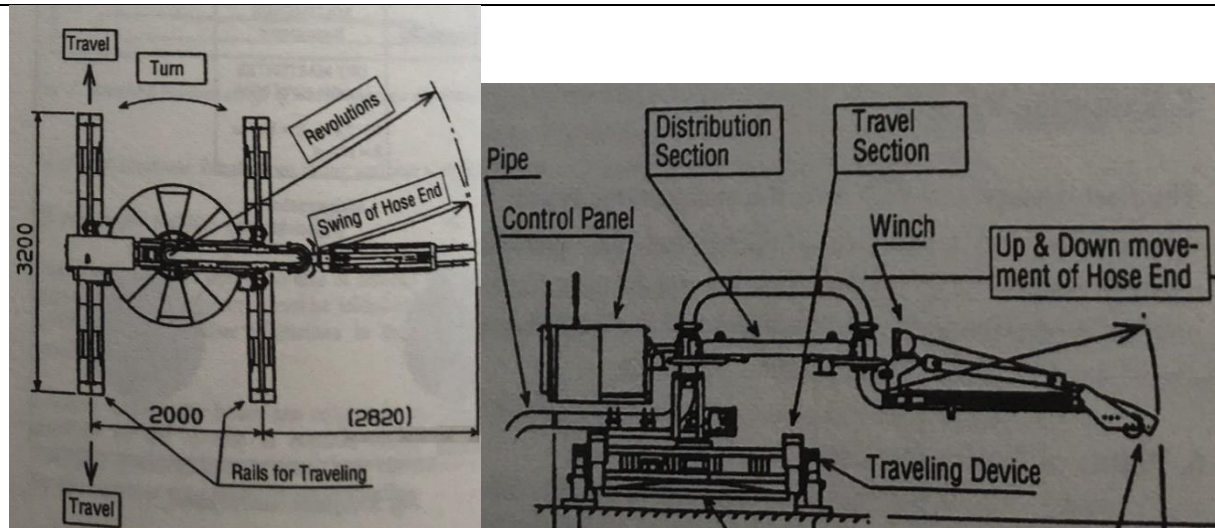
**Aplicabilitat:**

Semblant als altres mètodes comentats en l'apartat d'acer, requereix una alçada mínima per a que sigui rentable, i, tot i necessitar menys espai, presenta limitacions quan es tracta de construir entre mitgeres, tot i que aquest seria més aplicable en aquests casos.



### 4.3.2. DB ROBO Simplified Concrete Distributor

Desenvolupat per: Takenaka Corporation



Imatge 4.29. Il·lustracions en planta i alçat del DB Robo, un robot per a abocar formigó en estructures horitzontals com ara forjats. Font: Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan.

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** abocament automatitzat de formigó en estructures horitzontals.
- **Rendiment:** 40m<sup>3</sup>/hora (200m<sup>2</sup>/hora).
- **Dimensions i pes:** 3,2x5,05x1,69m. Pes: 770kg.
- **Grau d'autonomia:** autònom, només requereix moviment de zona a zona.
- **Mobilitat i energia:** mòbil, requereix generador d'energia elèctrica.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- El moviment de la mànega és automàtic, per tant s'elimina el treball pesat.
- Es pot usar en qualsevol tipus de construcció, independentment de l'escala.
- Els rails li permeten moure's i donar-se la volta per a cobrir els màxims m<sup>2</sup> abans d'haver-lo de moure manualment a la següent zona de formigonat.
- És automàtic, però també té un control remot per a resoldre problemes que puguin sorgir en el moment.

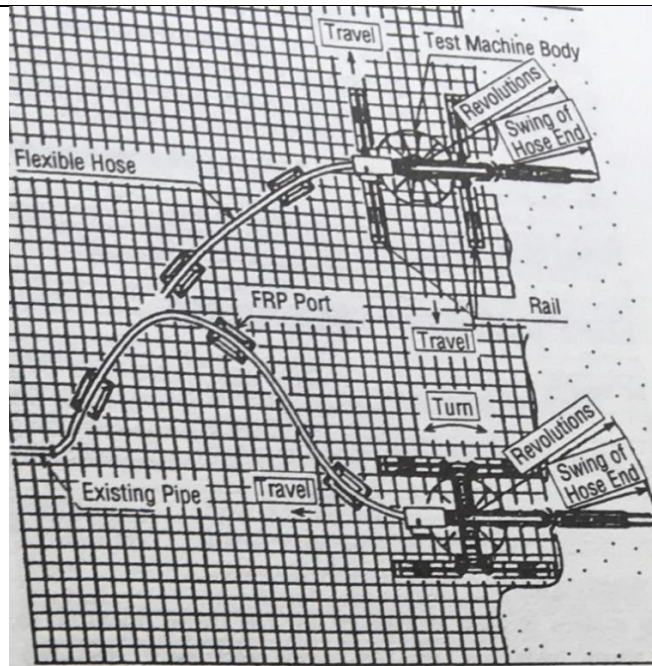
#### Limitacions:

- Un cop acaba de formigonar una zona, cal moure'l manualment a la següent.
- El moviment de zona a zona és un pel lent, ja que el mètode de moviment de zona a zona i el seu pes limiten aquest aspecte.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El formigó s'aboca fent un moviment vertical, amunt i avall, a la vegada que es fa un moviment horitzontal per a cobrir la superfície.
- El distribuïdor viatja pels rails, que poden orientar-se horitzontalment o verticalment. Un cop arriba al final del recorregut, el gat central eleva els rails del terra per a que es pugui moure fins a la següent zona de formigonat, on es tornen a situar els rails al terra per a poder seguir treballant.
- Tota l'operació és automatitzada, i l'operari corresponent pot supervisar i controlar des d'un sistema sense cables i a distància. També, i per a poder resoldre circumstàncies que es puguin donar, com per exemple quan es manipulen diversos DB Robo a la vegada, el sistema incorpora un mode semi automàtic que l'operari pot fer servir.



*Imatge 4.30. Il·lustració en planta del DB Robo formigonant una estructura. S'observa com els rails es suporten sobre la malla metàl·lica, i la mànega formigona la zona corresponent. Font: Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan.*

**Aplicabilitat:**

Aquesta aplicació té gran potencial en un gran nombre de construccions. El sistema i mètodes és senzill, i a la vegada és eficaç, ja que automatitza una tasca que requereix temps i treball pesat com es l'abocar formigó. Contra més superfície a formigonar, més importància pot adquirir aquesta aplicació. Caldria però millorar el sistema de moviment entre zones per a fer-lo més senzill i més ràpid.

### 4.3.3. Surf Robo

Desenvolupat per: **Takenaka Corporation**



*Imatge 4.31. Robot Surf Robo, per a acabat de formigó en la seva primera versió. En actualitzacions posteriors el tamany s'optimitza per a reduir el consum energètic amb el mateix rendiment. Font: Google Images.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** acabat automatitzat de formigó.
- **Rendiment:** 200m<sup>2</sup>/hora.
- **Dimensions i pes:** 2,23x1,26x1,35m. Pes: 185kg.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** robot mòbil, bateria elèctrica integrada.
- **Construcció:** on-site.

#### Avantatges:

- Eliminen la tasca manual d'acabat de formigó, que és una tasca extenuant per a l'operari, i redueix el risc de lesions per extenuació.
- Tot i que segueix sent necessària per al control i supervisió del robot, redueix considerablement la mà d'obra necessària per a aquesta tasca.
- El rendiment del robot és superior a la mà d'obra, en quant a pressió i velocitat.

#### Limitacions:

- Les seves dimensions i pes fan que sigui rentable usar-lo en superfícies grans, més que en obres amb menors superfícies.

**Funcionament de l'aplicació:**

- És el primer robot d'aquest tipus, i és bastant antic (apareix al desembre de 1986), de la mà de Takenaka Corporation. L'acabat del formigó és un dels treballs més exigents en una estructura de formigó, i potser per aquesta raó s'han dissenyat diversos robots per reduir la mà d'obra i eliminar aquesta tasca per als treballadors.
- Diverses companyies han desenvolupat robots per a aquesta tasca, com ara el Robocon, un robot més nou desenvolupat per Tokimec Construction. Els robots desenvolupats presenten característiques comunes: tots operen amb formigó i tots funcionen de forma automàtica. Difereixen en el sistema de transport i en la font d'alimentació que varia entre motor elèctric o de gasolina.
- El Surf Robo funciona normalment de forma automàtica encara que permet l'ús de forma manual. Per a començar, s'introdueixen les dimensions de la zona al tauler de control i es tria la direcció de partida.
- Durant la operació, pràcticament no hi ha necessitat que l'operador intervingui. Al llarg del temps s'han introduït millores i versions actualitzades del Surf Robo i que s'empren actualment en obra, i que encara redueixen més la intervenció de l'operador.



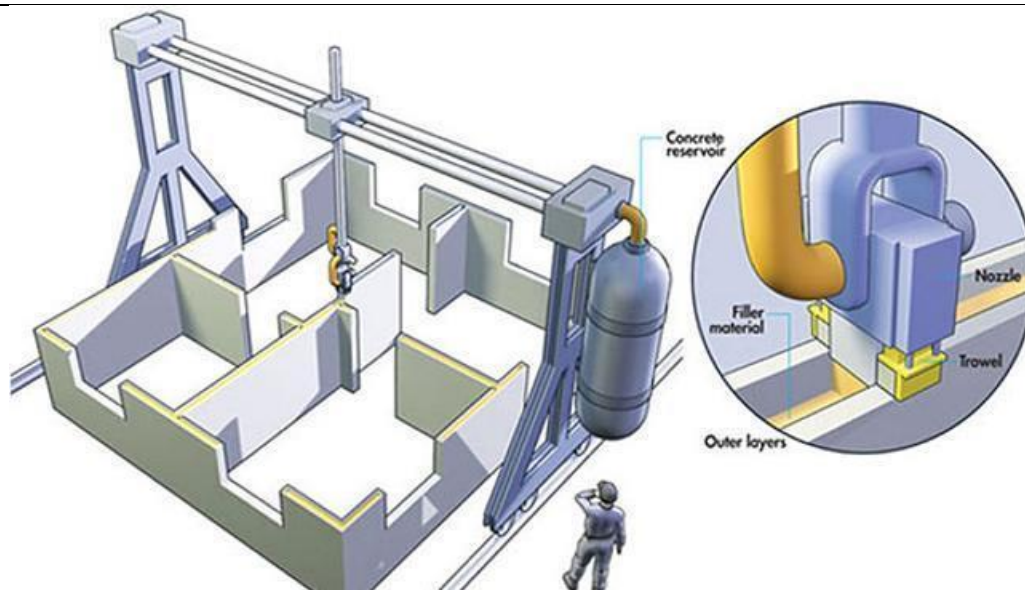
*Imatge 4.32. Imatge del Robocon, la següent generació de robots d'acabat de formigó desenvolupat per Tokimec Construction. Font: Google Images.*

**Aplicabilitat:**

Una bona aplicació, usable en gran quantitat d'obres que construeixin amb formigó. El seu funcionament poc complex i el fet de rellevar d'una tasca extenuant als operaris fa que tingui un gran potencial, especialment en construccions amb grans superfícies de formigó.

#### 4.3.4. Gantry-Type Contour Crafting Robot

Desenvolupat per: Behrokh Khoshnevis



Imatge 4.33. Concepte del Gantry-Type Contour Crafting Robot. En el detall es pot observar com les capes de formigó es "farceixen". Font: Google Images.

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** prefabricació automatitzada per capes amb formigó.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** depenent de l'edificació a construir.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** estructura mòbil, fixada a terra. Energia elèctrica requerida.
- **Construcció:** on-site i off-site.

##### Avantatges:

- La construcció de l'edificació és totalment automatitzada, només requereix supervisió d'operaris i recarregar els materials usats.
- Pot usar-se amb diferents materials a més del formigó.
- Permet construcció on-site, i de peces prefabricades off-site.
- L'estructura es pot reforçar amb armat al farciment de formigó, col·locant elements de reforç entre capes o usant materials de construcció amb fibres de reforç.

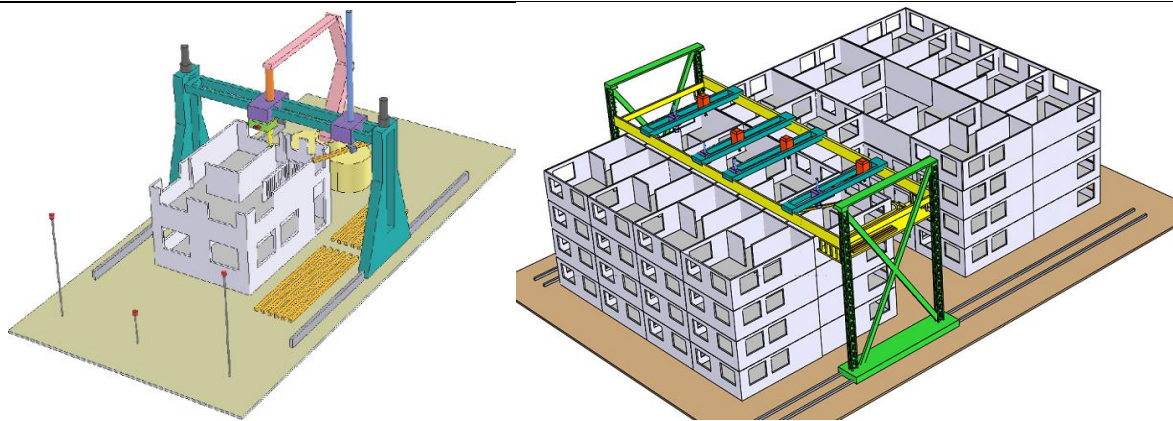
##### Limitacions:

- Com a limitació, al requerir una grua pòrtic, un marc de treball, fa que el tamany i infraestructura d'aquest depengui de l'edifici a realitzar, i viceversa.



**Funcionament de l'aplicació:**

- Aquesta aplicació funciona “imprimint” capes de formigó (o d'altres materials) tot fent els contorns de l'edificació (Contour Crafting), i que pot anar reforçat amb diverses opcions de material i diferents maneres de construir el reforç. Té diversos end effectors, d'impressió de les capes de formigó, de col·locació de reforç, etc.
- El sistema de la grua pòrtic varia segons el tipus d'edificació a construir, sigui un edifici petit, de llarga escala (com un plurifamiliar), o si es tracta d'un edifici amb una orientació més aviat vertical.
- Té diverses maneres de construir, segons el reforç, sent la principal la construcció deixant un espai entre capes que posteriorment s'omple amb formigó i armat. També pot encastar elements de reforç directament a les capes, o utilitzar una material per a les capes que ja porti incorporat un material de reforç, com ara fibres d'acer.
- Un dels elements claus de l'aplicació son els trowels (paletes) de l'end effector d'impressió, que duen a terme la pressió i compactació del farciment a la vegada que suavitzen i poleixen les superfícies visibles de l'edificació, i que permet cantonades tant ortogonals com no ortogonals. Els diferents end effectors estan dissenyats per a diversos materials i per a seccions d'estructures tant simples com més complexes.
- S'han desenvolupat també més end effector per a la inserció directa dels elements d'instal·lacions a les capes de l'estructura de l'edifici.



*Imatge 4.34. Reproduccions en 3D de dues variants d'aquest sistema, per a diferents tamanys d'edificacions.*

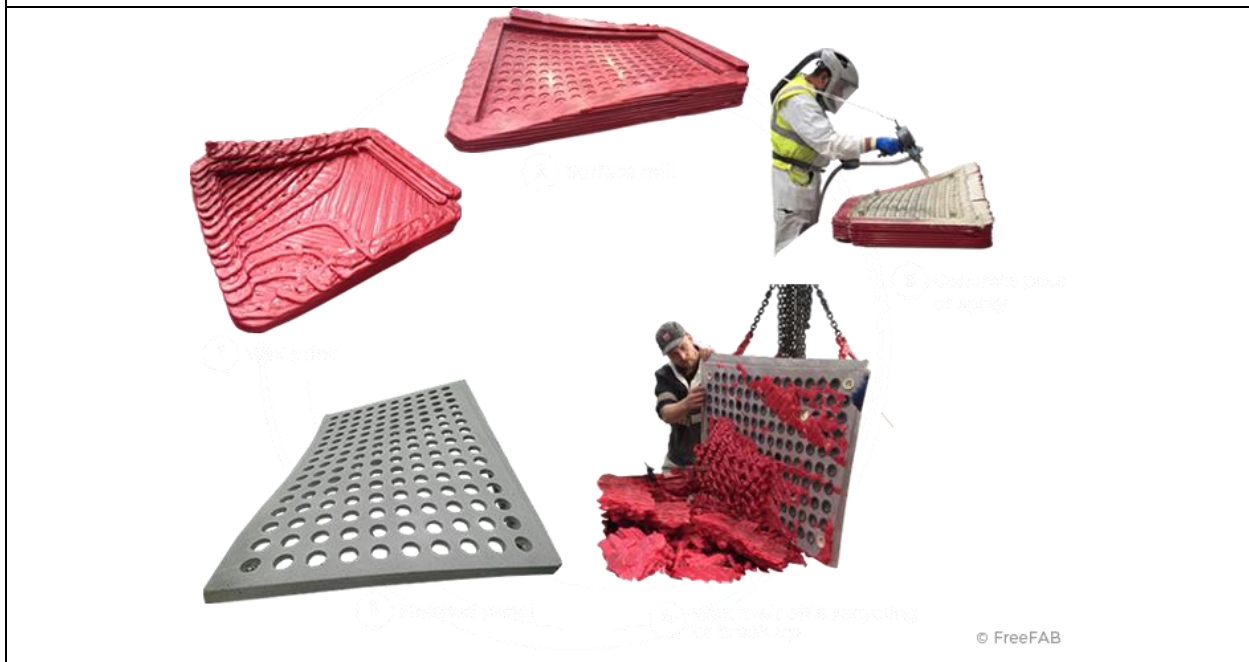
*Font: Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots.*

**Aplicabilitat:**

Tant per a edificacions fetes on-site com prefabricades off-site, aquesta aplicació presenta molts avantatges i innovació, a la vegada que rentabilitza tota la inversió en robòtica.

### 4.3.5. FreeFAB Wax

Desenvolupat per: FreeFAB England



Imatge 4.35. Un exemple d'un motlle o encofrat fet amb cera per FreeFAB. En aquest cas s'utilitza formigó GRC en esprai. Font: Google Images i website de FreeFAB England.

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** producció robotitzada de motlles i encofrats per a formigó fets amb cera.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** grua pòrtic de 30x3,5x1,5m. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe, requereix energia elèctrica.
- **Construcció:** off-site.

#### Avantatges:

- Al treballar amb disseny informàtic i execució robòtica, permet geometries molt complexes i precises.
- El fet de ser motlles de cera permet la reutilització del material tantes vegades com es vulgui, a diferència dels encofrats i motlles clàssics.
- El cost d'utilització és reduït, encara que es tracti de geometries complexes.
- La temps necessari de producció dels motlles complexos és molt curt.

#### Limitacions:

- S'utilitza una cera molt específica per als motlles i no es pot fer servir una qualsevol.

**Funcionament de l'aplicació:**

- Els motlles i encofrats de cera les fa un braç robòtic amb un end effector especial. El braç està muntat sobre un pòrtic d'acer que permet moure's en tres dimensions, que abasta un volum de 30 metres de llarg, 3,5 metres d'ample i 1,5 metres de profunditat. El sistema utilitza cera especialitzada per imprimir motlles ultra precisos que, al seu torn, s'utilitzen per a fabricar panells de formigó.
- Un cop està el motlle fet, es fa servir per a fer peces prefabricades de formigó. Per a molts motlles s'utilitza formigó GRC, ja que la geometria del mateix fa que sigui més fàcil aplicar aquest tipus de formigó.
- El sistema també fa que sigui més econòmic i ràpid fabricar motlles amb geometries complexes. Fer un motlle per a un panell de formigó que es corba a través de dos eixos diferents triga uns vuit dies, mentre que el FreeFAB Wax pot imprimir un en tres hores. Aquesta velocitat permet satisfer les demandes de disseny d'edificis més complexos.
- Els motlles i encofrats clàssics són de fusta i poliestirè, i només es poden utilitzar per produir una sola forma. Un cop acabats si no se'ls i pot donar més ús van a l'abocador. La cera especial del FreeFAB es pot fondre i reutilitzar en un nou motlle. Va ser desenvolupada durant tres anys pel Dr. James Gardiner.



*Imatge 4.36. Planta de producció de FreeFAB a Doncaster, al nord d'Anglaterra, on es fan tant peces prefabricades de formigó com els motlles i encofrats de cera. Font: Google Images i website de FreeFAB England.*

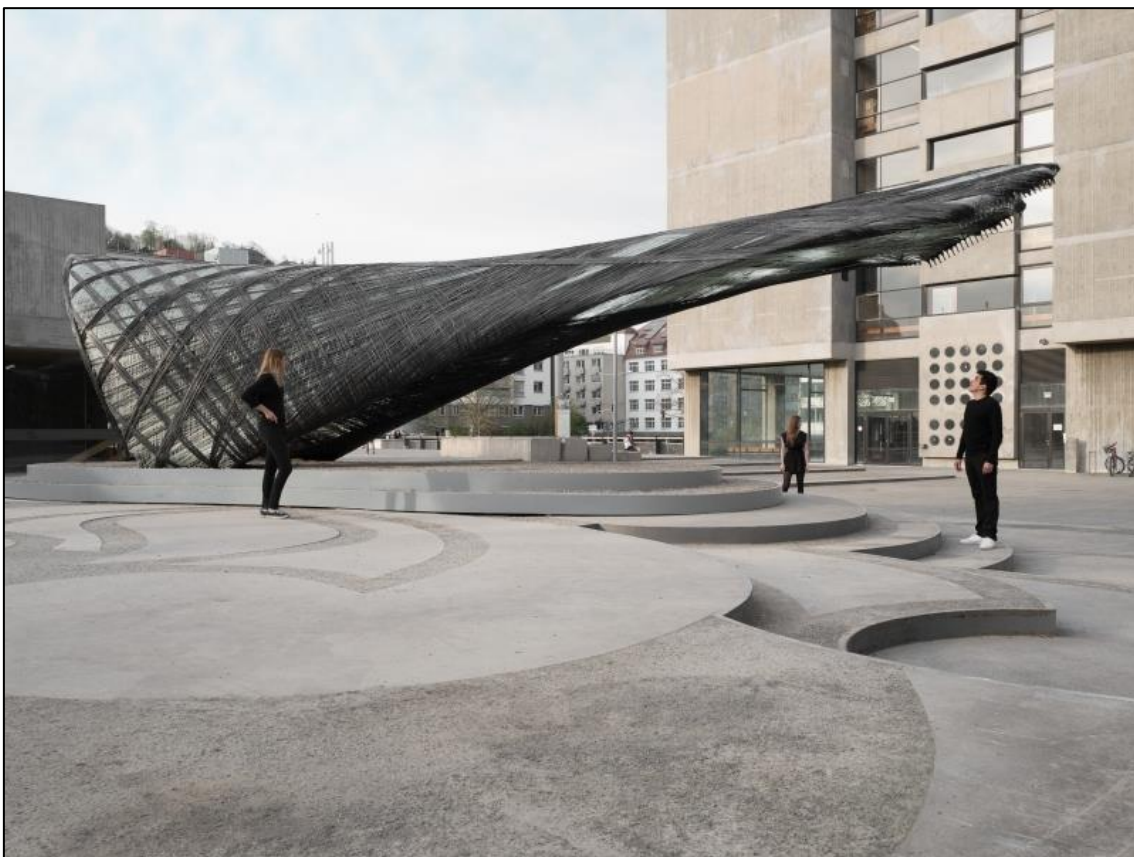
**Aplicabilitat:**

Aquest mètode presenta avantatges clars, sobretot en estructures amb geometria complexa, i la seva utilització en formigó prefabricat és una realitat.





#### 4.4. Aplicacions robòtiques per a treball amb altres materials



*Imatge 4.37 i 4.38. ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17, de la Universitat de Stuttgart. Aquest prototip de construcció de teixit o bobinat amb fils de fibra de carboni i resina ha estat possible gràcies al treball conjunt de tres robots, dos braços robòtics i un dron, tot formant un únic sistema. Font: website de ArchDaily.*

#### 4.4.1. DCP (Digital Construction Platform)

Desenvolupat per: Massachusetts Institute of Technology, MIT



*Imatge 4.39. Plataforma del DCP, amb el braç robòtic plegat. S'observa una pala excavadora acoblada per a tasques extremes. Font: website de la CBC News, Technology and Science.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** impressió 3D a escala arquitectònica.
- **Rendiment:** impressió mitjana de 1.720 m<sup>3</sup>/hora.
- **Dimensions i pes:** 3,6x1,0x2,4m braç plegat; 13,1m extensió màxima braç. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** mòbil, incorpora generador solar-elèctric.
- **Construcció:** on-site i off-site.

##### Avantatges:

- Està dissenyat per a ser independent de materials i processos.
- La velocitat de construcció del braç robòtic és molt alta.
- Incorpora una interfície ràpida de control en temps real del robot.
- Pot imprimir tant estant fixe com en moviment.
- El braç hidràulic i el robòtic poden treballar de forma conjunta o independent.

##### Limitacions:

- Tot i poder imprimir amb gran diversitat de materials, per a segons quines estructures o construccions cal afegir formigó per a donar la resistència necessària a l'estructura.

**Funcionament de l'aplicació:**

- Es compon d'un sistema d'elevació aèria Altec AT40GW de l'any 2015, amb un braç elèctric robotitzat KUKA AGRUS KR 10 R1100 Sixx WP muntat a l'extremitat de l'elevador aeri. Aquest robot tant es pot quedar fixe mentre du a terme la impressió com pot estar movent-se, augmentant el volum continu que pot imprimir.
- El prototip DCP té un abast radial de més de 10m i una capacitat de càrrega de 158kg d'elevació i de 10kg de manipulació. Dissenyat per a ser independent de materials i processos, permet fabricar amb una àmplia gamma de materials i a partir de software informàtic de disseny que s'integra al robot.
- Hi ha diversos modes de control globals per al sistema de braç compost del DCP que es poden utilitzar de forma intercanviable per a diferents tasques o fins i tot diferents segments d'una sola impressió. El mode bàsic permet el control independent del braç hidràulic i del braç petit de manera que només un sistema es desplaça durant un segment determinat de la ruta.
- L'altre mode operatiu és el moviment acoblat del braç hidràulic amb el braç robòtic. Dins d'aquest mode hi pot haver molts submodes, com ara utilitzar el petit per a l'amortiment de vibracions o per a tasques que requereixen una precisió més alta.



*Imatge 4.40. Cúpula oberta d'escuma feta amb el DCP, de 14,6 metres de diàmetre i 3,7 metres d'alçada. Font: website de la CBC News, Technology and Science. Font: CBC News, Technology and Science.*

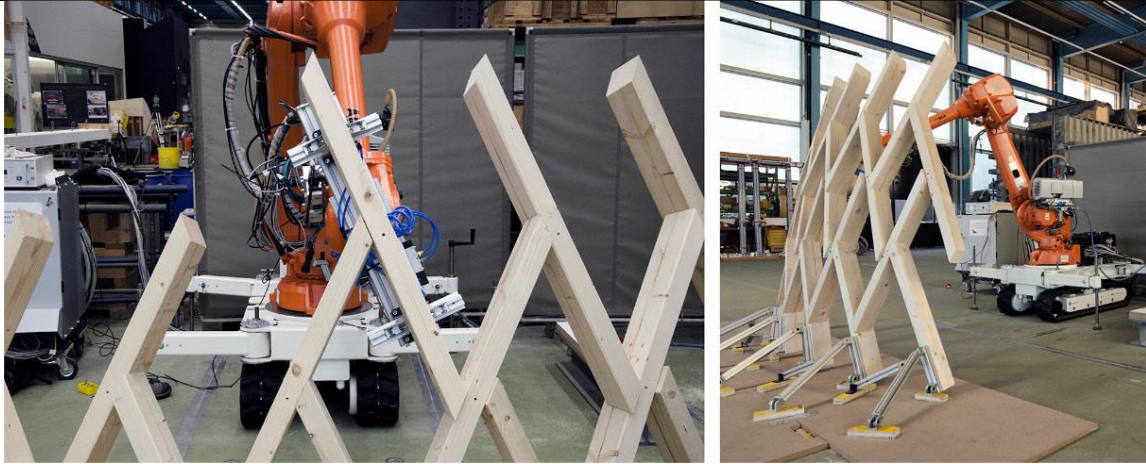
**Aplicabilitat:**

Bon prototip, aplicable a motlles per a construccions d'escala gran i amb geometries complicades, per a després ser reforçades amb formigó.



#### 4.4.2. Additive Robotic Fabrication of Complex Timber Structures

Desenvolupat per: ETH Zurich i Bern University of Applied Science



*Imatge 4.41. Prototip d'un sistema de construcció Zollinger amb fusta fabricat robòticament aplicat a una superfície doble corba. Font: ETH Zurich, Càtedra d'Arquitectura i Fabricació Digital.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** fabricació automatitzada d'entramats complexos de fusta.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** 1,13x0,86x2,5m. Pes: 2250Kg.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** mòbil, requereix energia elèctrica externa.
- **Construcció:** on-site i off-site.

##### Avantatges:

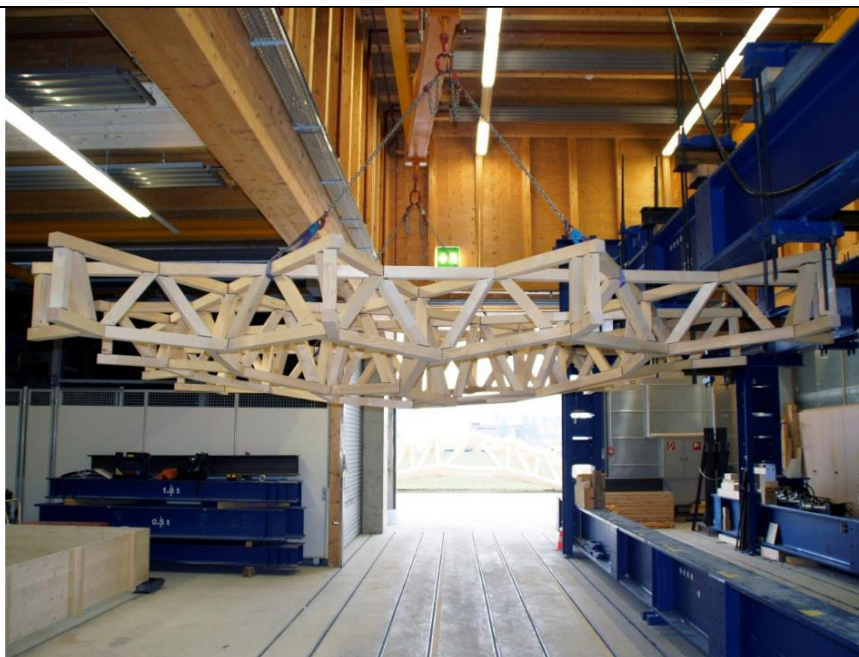
- Gran resistència a flexió i cisallament gràcies a nusos tridimensionals.
- L'expansió geomètrica dels nusos redueix la complexitat i permet un procés d'unió seqüencial senzill per al robot.
- Segueix un procediment industrial innovador amb un alt grau de precisió.
- No necessita encofrat o suports addicionals per a la seva fabricació.

##### Limitacions:

- Les unions en la tecnologia robòtica de construcció amb fusta es fan normalment amb adhesius, i requereixen pressió extra en la unió i temps per a que s'assequi, el qual és massa llarg per a una construcció seqüencial amb un sol robot, com és aquest cas.
- Les peces de fusta han de ser tallades prèviament, no ho fa el robot.
- No es pot fabricar tota l'estructura de cop, es fa per segments.

**Funcionament de l'aplicació:**

- Aquest tipus de construcció es basa en el supòsit que es poden fabricar estructures de suport lleugeres i eficients a partir de components de fusta senzills, que també poden ser de qualitat inferior, o fins i tot de residus o materials reciclats/de rebuig.
- Un cop les peces estan tallades (també amb un procés automatitzat), el braç robòtic les col·loca formant l'entramat, que prèviament ha estat dissenyat amb 3D CAD i implementat al sistema operatiu del robot.
- El fet que les unions siguin nusos de tres dimensions té dues raons. La primera és que fa que el procés d'unió de les peces sigui ràpid, en seqüència i senzill per al robot. La segona, al seu torn, és que es crea un nus amb reciprocitat estructural, que té resistència a la flexió i resistència al cisallament, tot i que en el seu sistema estàtic totes les connexions són articulades.
- Un petit contra és que, vist en les estructures de test, aquestes s'havien de dividir en segments per a la producció i posterior unió del sistema, però es podria reduir el nombre de segments fins a un nombre petit.



*Imatge 4.42. Prototip d'un sistema d'entramat multicapa de fusta realitzat robòticament. Font: Bern University of Applied Science.*

**Aplicabilitat:**

Les aplicacions robòtiques per a estructures complexes de fusta tenen gran viabilitat, gràcies a la seva precisió, qualitat i rapidesa de construcció, així com reducció de costos.

### 4.4.3. Spatial Timber Assemblies

Desenvolupat per: **Gramazio Kohler Research i ETH Zurich**



*Imatge 4.43. Estructura de fusta del pis superior de la DFAB House, a Zurich, construïda robòticament. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció automatitzada d'estructures de fusta.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** segons el tamany del marc robòtic necessari.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe. Requereix energia elèctrica externa.
- **Construcció:** off-site.

#### Avantatges:

- Prefabricació d'alta qualitat independentment de la complexitat i amb gran velocitat.
- El programa de disseny dimensiona les peces a partir dels paràmetres introduïts, com ara són parets i punts de connexió amb sistemes externs.
- El sistema té una tolerància d'error molt reduïda.
- Permeten un muntatge in situ ràpid i senzill.

#### Limitacions:

- El muntatge in situ del sistema, tot i ser senzill, segueix sent de forma manual.



**Funcionament de l'aplicació:**

- Per a aquest sistema s'ha desenvolupat un model de disseny computacional que genera les geometries de fusta basat en múltiples paràmetres d'entrada. Les dades principals són les parets representades com a superfícies individuals i punts que indiquen on es poden fer connexions amb sistemes externs, com per exemple una llosa de formigó. Un cop introduïts, el programa dimensiona les peces de fusta.
- A continuació el sistema multi-robòtic procedeix a fabricar i muntar el disseny. El robot agafa els feixos de fusta i els posiciona, i després els talla mitjançant una serra controlada per CNC. El següent pas és fer tots els forats requerits per a les connexions.
- Per últim, les bigues es munten espacialment i es collen les connexions. Les toleràncies durant la fabricació estan registrades i adaptades a un sistema de referències intern (iGPS) i sensors òptics del robot.
- En aquestes estructures les càrregues laterals es suporten amb les pròpies bigues de fusta, reduint o eliminant la necessitat de planxes de rigidesa, i això permet reduir el pes total i permet que el sistema sigui adaptable a construccions ja existents.



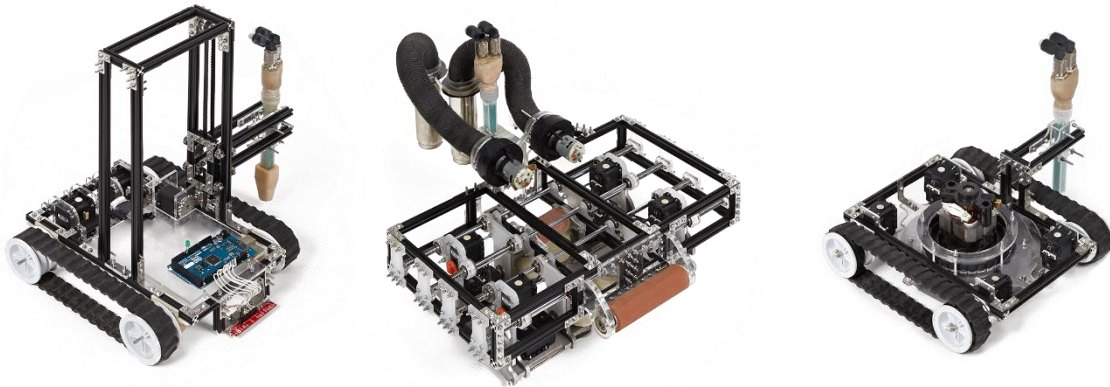
*Imatge 4.44. Una altra vista de l'estructura de fusta per a la DFAB House. S'observen els rails del sostre per on es desplacen els braços robòtics. Font: website del grup de recerca de Gramazio i Kohler.*

**Aplicabilitat:**

De manera molt similar a l'aplicació anterior, la prefabricació robotitzada d'estructures de fusta, en aquest cas marcs estructurals, és molt viable.

#### 4.4.4. Minibuilders

Desenvolupat per: IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalonia



*Imatge 4.45. Els tres diferents robots que utilitza el sistema Minibuilders de l'IAAC. El primer fa el fonament, el segon s'ocupa de les parets i el tercer reforça tota l'estructura. Font: website de l'IAAC.*

#### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** impressió 3D en paral·lel amb diversos robots.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** R1: 26x35x37cm, R2: 40x42x30cm, R3: 27x30x12cm. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** mòbil. Energia elèctrica proporcionada per l'estació de control.
- **Construcció:** on-site i off-site.

#### Avantatges:

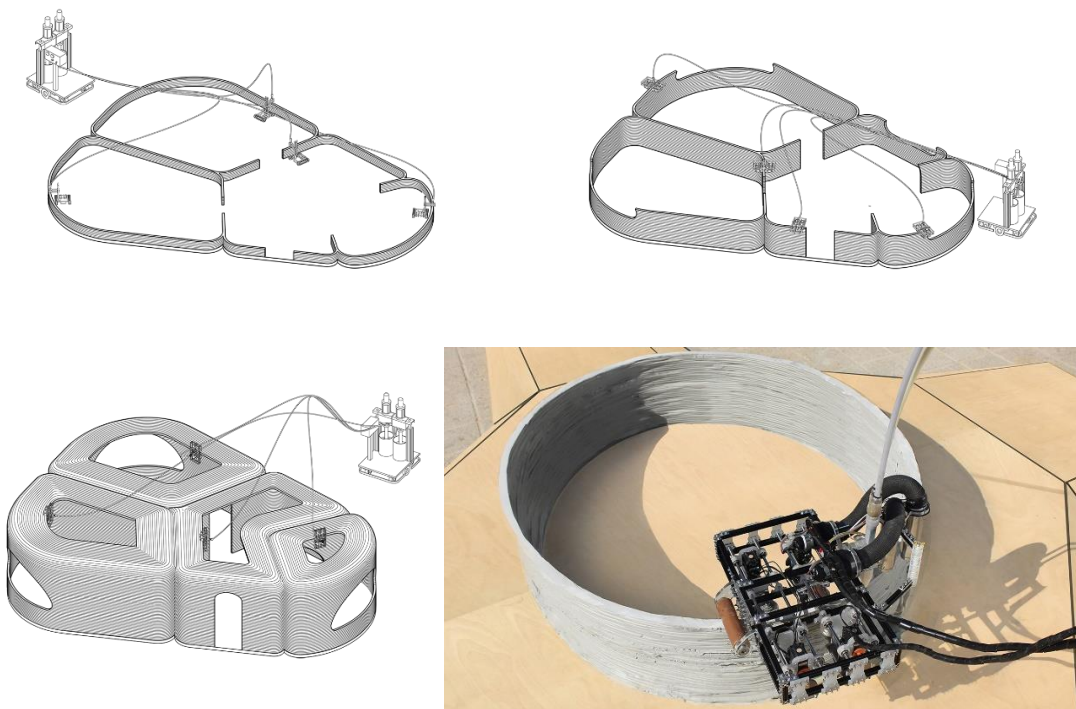
- Treball en paral·lel que augmenta considerablement la velocitat d'impressió.
- El sistema no depèn de la forma ni del tamany de la construcció, ni del material.
- El material es distribueix heterogèniament. Evitant l'homogeneïtat, que és una de les limitacions més grans de la fabricació additiva, es milloren les propietats estructurals.
- Els robots tenen una composició modular, el que els permet acoblar diferents eines i sistemes de moviment al marc del robot, segons calgui o es requereixi.
- Està controlat per un programari personalitzat, i el robot segueix una ruta predefinida, però també pot ajustar la seva ruta per corregir errors dins del procés d'impressió.

#### Limitacions:

- El sistema requereix d'estacions de control, o d'una única estació, connectades als robots per a proporcionar l'energia elèctrica i el material de construcció, per tant segons el tamany de la construcció cal proporcionar més cablejat especial.

**Funcionament de l'aplicació:**

- El primer robot, el Robot base, estableix les deu primeres capes de material com a fonament, seguint una ruta predefinida i controlada per sensors. Aquestes primeres capes son continues i en espiral. L'avantatge d'imprimir el material fent una espiral contínua és que permet un flux de material constant.
- Per a crear les parets i el sostre de l'estructura, el segon robot, el robot Grip, s'adhereix a la petjada de la base. A continuació els seus quatre corrns s'adapten a la vora superior de l'estructura permetent que es mogui al llarg del material imprès prèviament, dipositant més capes. Incorpora uns escalfadors, integrats al marc del robot, i que augmenten la temperatura per a influir en el procés de curació del material.
- Finalment, el tercer robot reforça l'estructura. S'adhereix a ella amb un generador de buit i diposita capes extra. Aquestes capes de reforç s'alineen amb la direcció de l'esforç (heterogèniament), optimitzant l'orientació i el gruix de l'estructura de reforç.



*Imatges 4.46 i 4.47. Fases de la construcció amb Minibuilders i imatge d'una impressió test de l'IAAC. Font: Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots i website de l'IAAC.*

**Aplicabilitat:**

Molt bon sistema per a construir amb impressió 3D, i que seria una bona solució en ambients hostils o per exemple en construccions fora del planeta Terra.

#### 4.4.5. Robot CoGiro

Desenvolupat per: **Tecnalia amb la col·laboració de l'IAAC**



*Imatge 4.48. Robot CoGiro desenvolupat per Tecnalia amb la col·laboració de l'IAAC. Font: website de l'IAAC.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** robot d'impressió 3D guiat per cables.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** depèn del tamany a fabricar, en aquest cas: 15x11x6m. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** semi-autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe. Requereix energia elèctrica.
- **Construcció:** on-site i off-site.

##### Avantatges:

- Només necessita uns motors, cabrestants, cables i una estructura lleugera.
- És fàcil de transportar i reconfigurar per adaptar-se al terreny i condicions de treball.
- Permet l'obtenció d'informació en temps real de l'estat de la construcció.
- Requereix menys materials, temps i consum energètic que els processos tradicionals.

##### Limitacions:

- La necessitat de tenir un marc per a construir, tot i ser fàcil de muntar i transportar, limita el tamany de la construcció.
- Per al seu funcionament, s'han de generar les trajectòries que ha de seguir el robot en el procés d'impressió, per això no es 100% autònom.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El primer pas consisteix en la generació del disseny en 3D tant de l'estructura com del procés que seguirà el robot per fabricar-la. És a dir, cal fer un disseny digital de la "ruta" i trajectòries que anirà seguint el robot mentre vagi fent la impressió. També, és el moment on es prepara el material que es farà servir. Aquest materials poden ser plàstics, argilosos o també derivats del ciment.
- Un cop preparat, el robot CoGiro passa a ser autònom, imprimint l'estructura seguint la trajectòria dissenyada anteriorment en 3D. Els cables permeten al robot moure's per tot l'espai que ocupen, en tots els eixos, de manera eficient i amb poc consum.
- La possibilitat de tenir informació en temps real de la construcció, li dona al CoGiro la capacitat de perfeccionar la cimentació aconseguint les dades tèrmiques del secat de les estructures i així pot evitar seguir posant capes de material sobre capes encara fresques i sense suficient estabilitat.
- El CoGiro és capaç d'accedir a grans espais de treball assegurant la rigidesa que garanteix la precisió de les peces a fabricar, mitjançant el control dels desplaçaments i girs que duu a terme. Això permet la creació de grans peces i fins i tot de petits edificis.



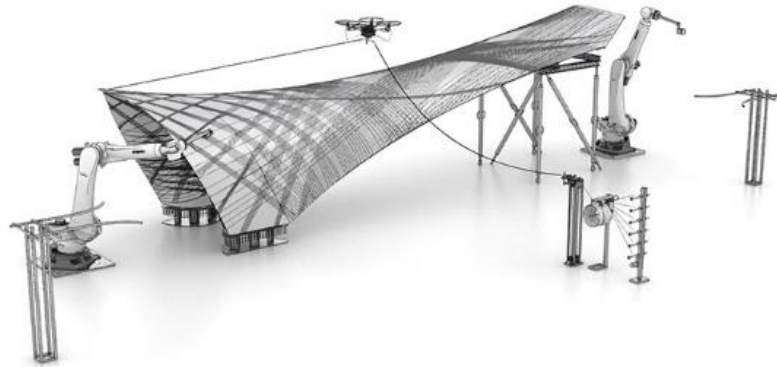
*Imatge 4.49. Estructura fabricada pel robot CoGiro a la Fira Construmat de Barcelona, al Maig de 2017. Font: website de la Fira Construmat de Barcelona.*

**Aplicabilitat:**

Útil de moment només en situacions especials o per a peces grans complexes, però encara amb les limitacions de la tecnologia d'impressió 3D en la construcció d'edificis sencers.

#### 4.4.6. ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17

Desenvolupat per: ICD-ITKE University of Stuttgart



*Imatge 4.50. Concepte 3D dels robots i dron utilitzats per a fabricar amb fibres el ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17 de la Universitat de Stuttgart. Font: website de ArchDaily.*

##### Característiques de l'aplicació:

- **Treball:** construcció amb fibres compostes espacialment.
- **Rendiment:** S/D.
- **Dimensions i pes:** depèn del tamany a fabricar, en aquest cas: àrea de 40m<sup>2</sup>. Pes S/D.
- **Grau d'autonomia:** autònom.
- **Mobilitat i energia:** fixe (braç robòtic) i mòbil (dron). Requereix energia elèctrica.
- **Construcció:** off-site.

##### Avantatges:

- Utilitza fibres compostes reforçades amb fibra de vidre o de carboni, que són molt lleugeres a la vegada que tenen gran resistència a la tracció.
- Les fibres són contínues de banda a banda i són "teixides" en múltiples direccions, millorant les capacitats estructurals.
- Permet geometries complexes, com en aquest cas concret amb curvatura.

##### Limitacions:

- L'espai necessari per fabricar depèn de les dimensions del projecte, és a dir, contra més gran, més espai es necessita, així com també cal tenir en compte el transport posterior.



**Funcionament de l'aplicació:**

- El concepte de procés de fabricació es basa en la col·laboració entre dos tipus de robots. Per una banda, dos braços robòtics fixes que s'ocupen de col·locar i tensar les fibres a cada extrem, i per l'altre un dron personalitzat, mòbil, que es desplaça de banda a banda transportant la fibra al braços. El procés és semblant a un teixit, o bobinat.
- La combinació d'aquests robots fa possible aquest mètode de fabricació, i que si fossin els robots de forma individual no seria possible d'aconseguir. Amb aquest sistema, els robots s'intercomuniquen de forma adaptativa i permeten la seva interacció. Els sensors integrats permeten als robots i al dron adaptar els seus comportaments, en temps real, a les condicions canviants durant el procés de fabricació.
- El ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17 es compon d'un total de 184km de fibra de carboni impregnada de resina. La longitud total del pavelló és de 12m, amb uns 40 m<sup>2</sup> de superfície i aproximadament 1T de pes. Amb variacions de la configuració dels robots es podria fabricar també on-site, per a estructures de fibra més llargues i grans.



*Imatge 4.51. Procés de fabricació del ICD-ITKE Research Pavilion 2016-17. S'observa el dron desplaçant-se d'una de les bandes a l'altre per a transportar la fibra de carboni al braç robòtic. Font: website de ArchDaily.*

**Aplicabilitat:**

La geometria especial del pavelló demostra les possibilitats que tenen aquests mètodes per a fabricar morfologies estructurals a través del teixit o bobinat de fibres, eliminant encofrats a través d'un marc integrat de material compost. Aquest projecte mostra l'escala i l'abast de la construcció mitjançant la integració de diversos processos de fabricació, utilitzant sistemes distribuïts, col·laboratius i adaptatius, així com del disseny computacional.

## 5. Reconeixement de particularitats de les aplicacions segons el material de construcció

L'anàlisi de les diferents aplicacions agrupades pel material amb el que treballen permet veure les seves semblances i similituds, o també, d'altre banda, si són radicalment diferents les unes de les altres inclús dins del mateix material. A la vegada, i probablement un dels punts més importants, deixa veure la seva aplicació pràctica, és a dir, la seva viabilitat per a la construcció. Com s'ha pogut constatar en les diferents aplicacions vistes una bona part d'elles es troben en fase de test o són encara prototips, si bé ja hi ha algunes que s'han implementat de forma continuada en la construcció.

### Aplicacions robòtiques per a treball amb maons

Observant les aplicacions per a treballar amb maons, o blocs/peces prefabricades, es pot dir que és un dels apartats on hi ha els extrems més marcats i on es troben aplicacions amb molt camí per recórrer i d'altres que ja estan sent usades en construcció.

D'una banda es troben aplicacions molt experimentals com són el Projecte Termes (pàg. 26) i l'ARC (pàg. 28), que si bé en aquest apartat són les que més innoven per la manera de construir i el seu concepte i exploren les noves possibilitats que permet la robotització dels processos constructius, com ara construir amb geometries complexes, es veuen limitades pel seu propi concepte en quant a pes i capacitat de construir les estructures, i en aquest moment la seva aplicació és gairebé totalment experimental.

En canvi, per l'altre extrem, existeixen robots que tenen impacte directe en la construcció actual i que, de fet, ja s'estan fent servir de manera més normalitzada, i que són les aplicacions de maçoneria SAM (pàg. 30) i R-O-B (pàg. 32), que pel seu treball i concepte més "simple" són molt senzilles d'aplicar, a la vegada que proporcionen millores de rendiment i reducció de riscos de manera directa i palpable.

Entre mig d'això està el Hadrian X (pàg. 34). Si bé proposa una aplicació molt completa i amb bon rendiment i velocitat de construcció, ell mateix s'autolimita a construccions

molt específiques (edificacions unifamiliars de màxim dues plantes), i a construir amb un tipus de bloc especial. D'aquesta manera es troba una limitació que no és del robot en si, sinó inherent al seu concepte de construcció.

### **Aplicacions robòtiques per a treball amb acer**

Els robots que treballen amb acer són les que tenen actualment més usos en la construcció ja que les seves aplicacions han sigut d'impacte més directe a la construcció i de rendiment immediat, de manera que la seva utilització s'ha estès més, sobretot al Japó, on la implantació de robots de construcció ha estat pionera des de la dècada dels 80-90, i la construcció de grans edificis d'estructura d'acer s'ha beneficiat d'aquestes aplicacions.

Sistemes de construcció automatitzada com el New SMART System (pàg. 38) i el RCA System (pàg. 40) són només dos exemples d'un concepte de construcció d'edificis de gran alçada utilitzats al Japó (i resta del món en menys mesura) i que inclouen no només processos de construcció robotitzats, amb la consegüent millora de rendiment, millora de les condicions de treball i reducció de riscos laborals, sinó també un concepte diferent de la zona de treball a l'obra. Com aquests existeixen sistemes similars desenvolupats per altres empreses nipones, com ara són el sistema T-UP de Taisei Corp., el MCCA de Maeda Corp., o el AKATSUKI 21 de Fujita Corp., introduint cadascun algunes variacions però sent molt similars en el concepte de la construcció.

A una escala més petita que aquests grans sistemes els robots de posicionament de barres d'acer molt pesades (pàg. 44), els robots de soldadura (pàg. 46), i els afegits robòtics com l'Auto-Clamp i Auto-Claw (pàg. 48), que han sigut d'aplicació molt directa a la construcció i de rendiment immediat, millorant qualitat i sobretot millorant les condicions dels operaris de la construcció en aquest àmbit, i per això el seu ús i implantació a la construcció amb acer ha estat més pronunciat.

I també es troba la part més experimental, com és el projecte Mesh Mould Metal de Gramazio-Kohler (pàg. 42), que explora les noves opcions que els robots donen a l'hora de no només fer el disseny del producte final sinó de la manera, del procés de

construcció o fabricació del mateix. Per tant es pot dir que les aplicacions robòtiques de treball amb acer cobreixen molts àmbits de la construcció, i s'usen per a millorar i automatitzar mètodes constructius convencionals a la mateixa vegada que es desenvolupen noves aplicacions per a explorar nous mètodes diferents als tradicionals.

### **Aplicacions robòtiques per a treball amb formigó**

Parlant del formigó es poden observar similituds amb les aplicacions de treball amb acer, en el sentit de que hi ha diverses aplicacions que tenen un ús molt directe i actual en la construcció, si bé aquestes no són tan extenses en nombre com les de treball amb acer. Això es veu tant en les aplicacions analitzades aquí com les demés trobades durant la recerca. El principal problema que presenta el formigó en la majoria d'aplicacions robòtiques ve donat pel material en si. Un d'ells és el temps de fraguat, que condiciona per exemple treballs en sèrie on s'ha d'esperar a que la part construïda o fabricada sigui ja resistent, a diferència de l'acer o dels maons que no requereixen aquest temps d'espera i faciliten més l'aplicació de treballs robòtics en sèrie. L'altre handicap es troba en el fet que el formigó fresc s'ha de fer arribar a l'end effector del robot, i això es veu condicionat segons la tipologia de construcció que es dugui a terme en cada cas.

Un exemple fàcil de veure i que és similar a les d'acer és el sistema AMURAD (pàg. 52) de construcció automatitzada a gran escala per a edificis de bastanta alçada, en aquest cas però per a formigó, però que la mateixa aplicació permetria també el treball amb acer. Seguidament, aplicacions de menor tamany però d'implementació molt fàcil i directa com són el distribuïdor de formigó automatitzat, el DB ROBO (pàg. 54) i el Surf Robo (pàg. 56) per a treballar l'acabat del formigó, molt senzilles però de rendiment immediat.

Anant més enllà de la construcció convencional es troba una de les aplicacions més punteres com és el Contour Crafting (pàg. 58), usable tant on-site com off-site per a prefabricació, i que està aprofitant notablement les possibilitats que la robòtica i el disseny digital ofereixen avui en dia. Cal dir que la prefabricació és un dels àmbits de construcció en la robotització del treball amb formigó té més avantatges, ja que el

caràcter modular i per peces o blocs fa que el problema de l'espera pel fraguat del formigó sigui molt menor. En aquest àmbit, els motlles fets amb cera per a formigó GRC de FreeFAB (pàg. 60), són un bon exemple de l'aplicació de robots per a treballar amb un material però sense treballar amb el material de manera directa.

### **Aplicacions robòtiques per a treball amb altres materials**

Parlant de la resta de materials es pot veure que a diferència dels ja esmentats abans, les aplicacions que es troben, si bé tenen potencial d'implementació per a construccions de caràcter normal, actualment estan més enfocades a geometries complexes i especials i sobretot específiques, ja sigui per a àmbits molt concrets o per a edificis o construccions singulars.

Un exemple d'aplicació amb el potencial comentat serien els robots per a fer frames (marcs) d'estructura de fusta (pàg. 68), que podria tenir molta sortida en edificacions de fusta prefabricada, com podria ser als Estats Units d'Amèrica. En aquesta mateixa direcció, però ja amb un sentit més específic serien els robots de fabricació d'entramats de fusta complexos (pàg. 66). Aquesta última si bé conceptualment està pensat per a estructures complexes podria adaptar-se a entramats més simples per a edificacions també més convencionals.

L'ús de robots permet donar entrada a mètodes constructius amb materials que de manera manual o bé no es podrien utilitzar o bé seria massa difícil i costós, com és el cas dels pavellons fets amb sistemes de robots teixint fibra de carboni i resina de l'ICD-ITKE a Stuttgart (pàg. 74), tot i que en aquest cas concret es tracten d'estructures molt específiques i singulars i la seva aplicació en construccions normals és fa difícil d'entreveure.

Tenint això en compte cal parlar dels robots d'impressió o extrusió 3D, un àmbit que actualment es troba en creixement i que ensenya el camí d'un concepte i mètode constructiu inexplorat anteriorment, i que si bé encara té limitacions inherents, s'està treballant per superar-les i millorar-les, com amb el DCP (pàg.64), els Minibuilders de l'IAAC (pàg. 70) i el robot CoGiro de Tecnalía (pàg. 72).

## 6. Conclusions

En primer lloc es vol destacar que la quantitat i varietat d'aplicacions robòtiques és tan gran que no es poden resumir en unes conclusions, que inevitablement són generals.

- Actualment la robòtica a la construcció d'estructures es troba en una fase molt inicial comparada amb altres sectors industrials o amb altres branques de la construcció (per exemple sistemes d'inspecció del sanejament o drons per a aixecaments). Encara que podria semblar que la construcció d'estructures no està preparada per a realitzar aquest salt tecnològic (com per a edificar amb impressió 3D directament al solar de l'obra), és un fet que ja hi ha algunes aplicacions actualment implementades, i que hi ha molta recerca i prototips. La tendència general és que vagi cada cop a més.
- Moltes de les aplicacions que s'estan desenvolupant presenten encara carències bàsiques que condicionen molt la seva utilització. Tot i així, el fet que l'estructura sigui una de les primeres fases en una edificació fa que sigui especialment propícia per al treball dels robots, ja que es minimitzen els conflictes a l'obra amb altres oficis.
- Existeixen robots de tots tipus i mides. Des de robots amb tamanys molt reduïts (per exemple els robots del projecte Termes, de 17,5×11cm) fins a sistemes tant grans com un edifici (com l'SMART o l'RCA). Tant robots que poden treballar amb materials convencionals com d'altres aplicacions que han permès fer servir amb agilitat cordons de fibra de vidre o de carboni. Una mostra de la varietat d'aplicacions i del potencial de la robòtica a la construcció d'estructures són totes les aplicacions que el Japó ja va començar a implementar fa 30 anys, i que segueix perfeccionant dia a dia a l'obra real.
- Es pot fer una distinció entre dos tipus d'aplicacions robòtiques. D'una banda aquelles aplicacions dirigides a construir amb els productes, materials i mitjans convencionals, és a dir, imitant la manera de construir d'un operari actual, on el disseny del robot fonamentalment es concentra en incrementar els rendiments. I, d'altra banda, aquelles aplicacions que funcionen amb productes, materials, i lògiques constructives noves que en alguns casos són impossibles o impensables amb els mitjans actuals (per exemple encofrats amb geometries especials impresos amb cera o resina). Aquesta mena de robots permeten projectar i construir tipus d'estructures completament nous.



- Un altre dels àmbits on la robòtica per a la construcció d'estructures obre també noves possibilitats és a la construcció off-site: la prefabricació. Fins ara la tendència ha estat fer peces iguals, mitjançant l'automatització. Això ha dut a associar la prefabricació a la poca adaptabilitat i flexibilitat geomètrica, convertint-la en repetitiva. Amb la introducció de la robòtica s'obre la possibilitat no només de millorar el treball en sèrie de la prefabricació sinó també el poder fer peces molt més customitzades, permetent a la prefabricació assolir noves fronteres.
- Els robots per a estructures actuals tenen encara limitacions significatives. Se'n poden distingir dos tipus. Per una banda, les limitacions inherents al robot per la seva composició o concepte (per exemple en robots petits o voladors (drons) la capacitat de càrrega és molt reduïda, mentre que en robots més grans amb gran capacitat de càrrega sovint el problema és la dificultat de desplaçament). I per altra banda, les limitacions que tenen a veure amb l'edificació en sí o amb l'entorn urbà on es trobi (no totes les aplicacions es poden adaptar entorns densament construïts, com ara entre mitgeres).
- Però els robots també ofereixen avantatges importants en la construcció d'estructures: a) millors rendiments; b) millor qualitat d'execució (molt importants per a garantir la seguretat en estructures); c) la possibilitat d'un treball ininterromput (dia i nit) sense minvar la mateixa qualitat ni el rendiment; d) capacitat de treballar amb molta precisió gràcies al disseny digitalitzat (per exemple per l'execució d'estructures amb geometries complexes); e) Capacitat de recopilar dades i de quantificar de forma més ràpida i detallada el procés de construcció, generant valuosos conjunts de dades, permetent ampliar i accelerar el control de qualitat (amb aplicació en estructures de formigó per a accelerar-ne l'execució, com per exemple en el descimbrat); f) la potencial reducció de riscos laborals, eliminant llocs de treball perillosos i canviant el treball dels operaris a feines de supervisió i control (cal recordar que la fase d'estructura és la que concentra majors riscos a la construcció); g) la possibilitat de treballar en entorns hostils i extrems per l'ésser humà (com ara edificis sinistrats o fins i tot en altres planetes).
- Finalment, es vol destacar que les aplicacions robòtiques analitzades en aquest treball s'han classificat pel material de l'estructura que construeixen. Cada un dels grups d'aplicacions així ordenades permet la obtenció de conclusions particulars, que no es poden recollir en aquestes conclusions generals. Veieu l'apartat 5 per a més detall.

## 7. Bibliografia

### 7.1. Llibres, magazines i apunts

- Vera Kington, Janine. *Análisis de viabilidad de la implantación de robótica en obra*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015. Treball Fi de Grau presentat a la UPC.
- Construcció III. Apunts propis i intranet UPC.
- Planificació i Organització d'Obres. Apunts propis i intranet UPC.
- Prevenció de Riscos Laborals. Apunts propis i intranet UPC.
- Back to the Future, High-tech Construction. *The Economist*. Juny 2017, pg. 71-72, Science and Technology.
- Cousineau, Leslie i Nobuyasu, Miura. *Construction Robots, The Search for New Building Technology in Japan*. Asce Press, Virginia, 1998.
- Bock, Thomas i Linner, Thomas, Technische Universität München. *Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots*. Cambridge University Press, New York, NY, 2016.
- Bock, Thomas i Linner, Thomas, Technische Universität München. *Site automation: automated robotic on-site factories*. Cambridge University Press, New York, NY, 2016.
- Bock, Thomas i Linner, Thomas, Technische Universität München. *Robotic industrialization: automation and robotic technologies for customized component, module, and building prefabrication*. Cambridge University Press, New York, NY, 2015.
- Bock, Thomas i Linner, Thomas, Technische Universität München. *Robot-oriented design: design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction*. Cambridge University Press, New York, NY, 2015.
- Venables, R. *Construction Automation and Robotics*. Journal of the industrial robot. 1994.

## 7.2. Websites i articles digitals

- <https://www.1843magazine.com/design/a-robot-revolution>, The Economist, A Robot Revolution, Jonathan Glancey, February/March 2017.
- <http://www.ahrc.ac.uk>, Consell d'Investigació d'Arts i Humanitats (AHRC).
- <https://www.archdaily.com/869450/icd-itke-research-pavilion-2016-17-icd-itke-university-of-stuttgart>, ICD/ITKE University of Stuttgart Research Pavilion.
- <http://www.buildfreeform.com>, Loughborough University, 3D Concrete Printing: an innovative construction process.
- <http://www.cbc.ca/news/technology/construction-robotics-3d-printing-mit-technology-1.4086174>, CBC News, sobre el DCP.
- <http://www.ceautomatica.es>, Comité Español de Automática.
- <http://www.citega.com>, Empresa d'aplicacions dirigides a la robòtica industrial.
- <http://www.construction-robotics.com>, Construction Robotics, New York.
- <http://www.construmat.com/>, Fira Construmat Barcelona.
- <http://www.contourcrafting.org>, Tecnologia d'impressió 3D, desenvolupada per la Universitat de Califòrnia.
- <http://www.d-shape.com>, D-Shape, Impressió 3D.
- [http://dfabhouse.ch/spatial\\_timber\\_assemblies/](http://dfabhouse.ch/spatial_timber_assemblies/), DFAB House Zurich.
- <https://www.epsrc.ac.uk>, Consell de Recerca d'Enginyeria i Ciències Físiques (EPSRC).
- <http://www.e-volucion.es/2016/12/robots-llegan-tambien-construccion-40>, Los robots llegan también a la construcción, revista digital e-volución. Diciembre de 2016.
- <https://www.experimenta.es>, Experimenta magazine.
- <https://www.fbr.com.au/view/home>, Fast Brick Robotics, Australia, Hadrian X.
- <http://www.gramaziokohler.com>, Web dels arquitectes Gramazio i Kholer.
- <https://iaac.net/>, Institute for Advanced Architecture of Catalonia. Minibuilders.
- <http://www.iaarc.org>, Associació Internacional d'Automatització i Robòtica en la Construcció.

- <https://www.iec.cat>, Institut d'Estudis Catalans, definició de robot.
- <http://www.ifac-control.org>, Federació Internacional de Control Automàtic.
- <http://www.ifr.org>, Federació Internacional de Robots.
- <http://www.jara.jp/e>, Japan Robot Association (JARA).
- <https://www.kajima.co.jp/english/welcome.html>, Kajima Corporation.
- <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/trucks/>, Camions Mercedes-Benz. Model Axor, usat en el Hadrian X.
- <http://web.mit.edu>, Massachusetts Institute of Technology MIT.
- <http://www.oect.es/portal/site/Observatorio/menuitem.88888a9742719027d4617410060961ca/?vgnnextoid=411cc7233ee43110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>, Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Gobierno de España. El Observatorio.
- <http://www.rae.es>, Real Academia Española de la Lengua, definició de robot.
- <https://www.robotics.org>, Web de la RIA (Industrial Robot Automation).
- <http://robotics.sciencemag.org/content/2/5/eaam8986.full>, DCP (Digital Construction Platform) Massachusetts Institute of Technology MIT, Science Robotics Magazine.
- <https://www.schweighofer-prize.org/winners>, Guanyadors Premi Schweighofer.
- <https://www.shimz.co.jp/english>, Shimizu Corporation.
- <http://www.shimz-global.com/sg/en/services/construction>, Shimizu Corporation Global, New SMART System.
- [http://www.takenaka.co.jp/takenaka\\_e/index.html](http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/index.html), Takenaka Corporation.
- <https://www.tecnalia.com/es/>, Tecnalia. Robot CoGiro.
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Robot>, Wikipedia, definició de robot.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Termite-inspired\\_robots](https://en.wikipedia.org/wiki/Termite-inspired_robots), Wikipedia, Projecte Termes.
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Tres\\_leyes\\_de\\_la\\_robotica](https://es.wikipedia.org/wiki/Tres_leyes_de_la_robotica), Wikipedia, Lleis de la robòtica d'Asimov.
- <http://www.worldrobotics.org>, Estadístiques, anàlisi, pronòstics i estudis d'inversions en robòtica.

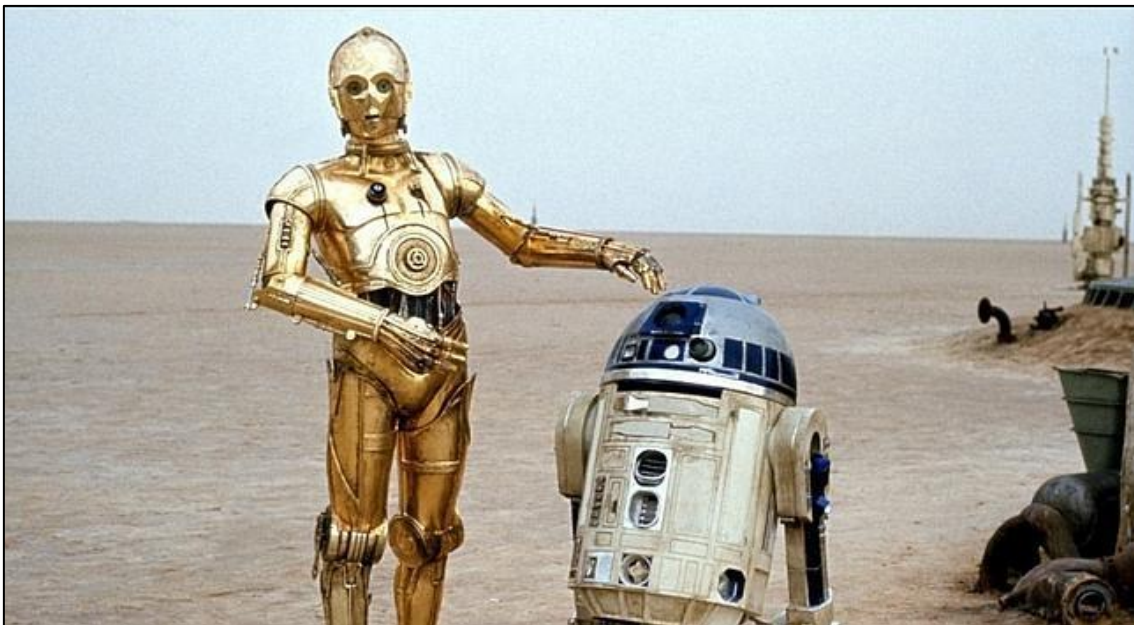
## 8. Annexos

### 8.1. Acreditació 3a Llengua. Anglès

#### 2. Robots

Although the main idea in almost all of them is the same, there are many ways to define the word 'robot', and there are a lot of experts and associations that would say that it is really complicated to find a unique and universally accepted robot definition. We should start with the most simple definitions, so that we really understand what a robot is, and also equally or even more important, to answer what a robot is not nowadays.

In this sense, the popular robot notion refers to a humanoid robot with its own intelligence, which replaces people on their useful tasks. To a large extent, this perception has been aroused by the large amount of stories and action movies, in which robots appear (such as Star Wars, Terminator or I, Robot) even though this idea is currently far away from reality. According to Construction Robots, The Search for New Building Technology in Japan from Leslie Cousineau, robots 'are more alike to your office's photocopier than to your neighbor.'



*Image 2.1. Frame from Star Wars Episode IV: A New Hope. Robots C3PO and R2D2 are examples of fictional robots with their own intelligence, far away from present reality, which have contributed on the popular imagination and image of the robots that we have nowadays. Source: Google Images.*

Artificial intelligence is a field in permanent development, but we have still have not reached that robot ability level. When we talk about robots the mental image we normally have really differs from one person to another and, most of the times, imagination surpasses present day's reality.

Both in general and in construction (especially in structures' construction) we need to know the existing technologic limits, but looking at them with ambition and trying to think and investigate new ways is important for its evolution.

## 2.1. Robot's definition

The best way to start defining is searching in a dictionary. According to the Institut d'Estudis Catalans (Institute of Catalan Studies) a robot is:

- A machine that can make a series of automatic movements and tasks normally carried out by humans.
- Not strictly sequential control programmable device that can change with great flexibility both movements and tasks that it carries out.

If we look at the Royal Spanish Academy (Real Academia Española), we find out these definitions:

- From the word in English 'robot', and this one from the Czech robota 'work, personal presentation.'
- Machine or programmable electronic device able to manipulate objects and make things that were only done by people in the past.

Both definitions, a part from their simplicity, introduce a basic concept fundamental for this study, and it is the conferring of tasks, work and operations that a robot can perform and that are normally held by humans, or that it was normally done by humans through electronic programming and its machinery.



The next definition we have is from Wikipedia:

- A robot is a virtual being or artificial mechanism. In practice, this is in general an electromechanic system, normally leaded by a computer's program or an electrical circuit. This electromechanical system gives us the feeling of an own purpose because of its appearance or movements.

This definition is important so that we get to know the current reality and to understand the difference between a robot and a normal machine. Robots offer the 'feeling of an own purpose.' We should be aware that this is only a feeling of autonomous thinking, just because robots respond to a pre-established programming. Whether if it is a simple or a complex robot, regardless how many functions it has, all of them are pre-established before any kind of task.

The essence of a robot is given by its ability for reading the environment, the ability to analyze, calculate and decide (among all its programmed functions on its system) what task it has to do, its ability to adapt.

RIA (Robot Industries Association) gives two good definitions of robots:

- Reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools or specialized devices through variable programmed motions for the performance of a variety of tasks.
- A programmable, mechanical device used in place of a person to perform dangerous or repetitive tasks with a high degree of accuracy.

As we have mentioned in the beginning of this part, it is difficult to find a unique definition. For this study's goal, in which we are going to talk about construction robots and specific solutions for structure constructions, and so that we can clearly distinguish between a construction machine and a robot, this monograph is going to revolve around the next definition:

- A construction robot is a machine formed by a computer, a series of sensors and mechanical tools that give it the ability of analyzing, deciding and act, adapting to the environment and the situation in which it works based on some programmed functions and actions on its system.

We should also take into account that there is no consensus on the definition of construction robots, but we differentiate between two types of robot technologies: on one hand, there are robots developed designed for a single task. On the other hand, there are automated construction systems that include more than just one construction process.

To distinguish a construction robot from an industrial one, we could also say that the biggest difference is that in an industrial robot the product moves in a production line in which robots are stable. On the other hand, in a construction robot the product (the building) is stable and the robots are the ones moving and changing their positions.

Accordingly, construction robots have to be able:

- To manipulate weight and variable dimension parts. That means that they need to be balanced.
- To move, to have a motor, batteries and motor elements, or a work frame where it can move.
- To change and adapt its movement in a changing environment as a construction or a building space.
- To hold up and counter, if necessary, temperature and humidity changes, as well as dust and dirt exposure.
- To carry out multiple tasks because of the duty's variety in a construction. Both coding sequences and digital control make it possible.

## 2.2. Robotics evolution

The beginning of what we now know as modern robotics appeared around 1800. Robots and mechanical devices had already been invented before that; from Ancient Greece and Egypt, to Leonardo Da Vinci's famous inventions such as his mechanical lion. Most of these inventions were made for nobility entertainment and all followed the same standard: the imitation of animals and humans. We still did not have an industrial robot vision.

The ideas embodied in these inventions and devices were collected by industrialists during the 18th century who noticed the importance of industries' automation. In this way, we can set the beginning of present day robotics in textile industrial revolution in the 18th century.



*Image 2.2. Da Vinci's mechanical lion reproduction from the engineer Mario Taddei. Source: Google Images.*

In 1801, Joseph Jacquard designed a programmable textile machine by punched cards. The machine allowed to make fabrics with different color threads and difficult drawings by using these punched cards, manipulated by just one worker. Thanks to Jacquard's innovations, threads moved independently so that the wanted drawing was achieved. This device was managed by few punched cardboard cards that were changed by activating a pedal, which at the same time activated a complex rope mechanism which elevated alternately a different number of threads so that the weave was created. Although a worker who changed the machine punched cards was still necessary, the textile process was already self-winding.



*Images 2.3 and 2.4. Reproduction of Jacquard's loom in Manchester Museum of Science & Industry.*

*Source: Google Images.*

From the beginning of the 19th century until the Second World War, electrical generated systems appearance made grow regulation and control systems' demand. In 1946, the American inventor G.C. Devol developed the first controller device that was able to record electrical signals by magnetic means and reproduce them to power up a mechanical machine. Some industrial changes such as the change from static units to mobile units, changes in the assembly line structure, and especially, conveyor belt's introduction, predicted the revolution that was about to reach the industry.

Mass production is one of the most important components of the nowadays known as the Second Industrial Revolution. The conveyor belt's appearance, the assembly line and the consequent division of labor are the main elements that make up this phenomenon. During the first third of the 20th century, the development of engineering different branches started, which would lead to the construction of what we now know as modern robots. The list of scientific and technical events about robotics is not limited just by engineering, but it also includes mathematics and physics.

Isaac Asimov, writer and biologist, used for the first time on his book 'I Robot' of short stories, published in 1950, the word 'robotics'. We can find on them for the first time the Three Laws of Robotics, which are:

1. A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm.
2. A robot must obey orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law.
3. A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

Later on, in 1982, he formulated the Zeroth Law of Robotics:

0. A robot may not harm humanity, or through inaction allow humanity to come to harm.

Despite the novelty of these publications and laws, these have transcended beyond and they are currently taken into account. In 2011, the Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) and the Arts and Humanities Research Council (AHRC) from the United Kingdom published some ethical principles for designers, builders and users of robots in the real world, and they appeared, in part, as a consequence and based on Asimov's laws.

Progresses continued at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) where a research line about numerical control research was developed in 1952, which reached its highest point with the programming language definition of APT (Automatically Programmed Tooling) pieces, published in 1961.

In 1960, the first 'Unimate' industrial robot was introduced, and it was based on scheduled articles' transfer from Devol. It was installed in a General Motors' assembly line in New Jersey. The machine transported molded castings up to the assembly line, where they were welded on the chassis of the vehicle, a very dangerous task for the workers. The original Unimate consisted of a large computer box, linked to another box that was connected to an articulated arm with a task program stored in a drum memory.



1975 was the year when the first major breakthrough in robotics design was introduced with the invention of microprocessors, which would end up developing modern computers, and began to reduce the size, form and price of robots. This facilitated the complete introduction of robots in industry.

Japan, that was a technology importer country until that moment, made a big step forward and started investing in robotics until becoming one of the greatest pioneers in this field nowadays. The first construction robot emerged in Japan from Shimizu Corporation in 1983, designed to project fire protection material in spray on steel pieces. It was called SSR-1 Fireproofing Spray Robot, and it became the first robot specially designed for building.



*Image 2.5. 1983 Shimizu Corporation's SSR-1 image. This robot has been updated and nowadays we use new versions of it. Source: Construction Robots, The Search for New Building Technology in Japan.*

From this point, advances on this technology are perceptible day-to-day up to the point where we have currently many types of robots, from housekeeping tasks' robots, to explosive deactivating robots, or dynamic androids such as ASIMO, able to walk, striking up a conversation and performing few simple tasks, as well as industries' modern assembly lines (no longer only automobile), up to medical robots level able to operate on patients without any kind of human handling. The existence in very different sectors

of millions of robots and technology all around the world, has nothing to do with the nearly 3500 units that worked in the early 1970s.

### 2.3. Classification

Making a unique robots' classification almost impossible, since there are no unitary factors that can group together all of the existing ones. Most of them have specific and differential characteristics, which impede a universal classification.

We can start by distinguishing if they are closed-loop or open-loop robots. The closed-loop ones are those able to interact with the environment, thanks to some of their characteristics, for example through sensors, and performing an action according to the reading they receive. On the other hand, open-loops respond to a series of programmed actions in its system, regardless of the environment or the situation. For example, in an open-loop irrigation system, at a determined time it automatically irrigates, regardless of whether it has rained or if the plants have already received previously the necessary amount of water.

Diverse organizations and robotic associations propose their own classifications. These help to discern according to robots' qualities and characteristics. The aforementioned RIA gives the following classification according to each robot's characteristics:

- Play-back Robots. They repeat a series of previously programmed movements.
- Robots controlled by sensors. They make movements according to the information received by the sensors.
- Program controlled robots.
- Adaptable robots. According to the information obtained through their sensors, they can reprogram their own actions.
- Robots with Artificial Intelligence. These make their own decisions (preprogrammed) through the information they receive.

The Japan Robot Association (JARA) has its own distinction according to the intelligence level of the robot:

- Manual handling. Controlled by a person.
- Fixed sequence. Scheduled for a particular task.
- Variable sequence. The operator can easily modify the sequence of the machine.
- Regenerators. The operator has to manipulate the robot so that it makes the task.
- Numerical control. The robot is programmed for the function that has to perform, so that it does not require the assistance of a human.
- Intelligent robots. They are able to be programmed, make decisions based on the environment and interact with it.

Lastly, robots are also classified according to generations. Each generation has easily detectable changes and these makes possible this classification:

- 1st generation: manipulative robots. As of the 1950s. Open-loop robots. These are very simple machines that are not able to obtain information from outside or interact with it. That is the reason why they do have a series of programmed mechanisms from which they act.
- 2nd generation: Learning robots. Until the 1980's. Robots with closed-loop parts. These robots are able to store, along with their programmed instructions, information about their environment, so that they are able to adapt to the task and data analyzed. They can learn and memorize sequences with an operator's help and monitoring.
- 3rd generation: Robots with sensor control. Between the 1980s and the 1990s. These closed-loop robots get information about the environment and they adapt to it. Thanks to both controllers and computers, they use the information provided by sensors and their artificial vision to reprogram their actions through the pre-established programming languages, depending on their needs.

- 4th generation: Intelligent robots. The sensors are much more sophisticated than the ones on previous robots and send more information to the controller to analyze it through complex strategies. These robots are completely adapted to the environment. They are considered to be intelligent, and learn from their environment through analysis' methods and data acquisition, such as 'diffusive knowledge' or 'neural networks'. In this way, there is a real-time task exercise and a solid and reliable information base.
- 5th generation: New and developing. Artificial Intelligence's peak increases more and more. The introduction of nanotechnology begins to have a great impact on robotics

With regard to the construction robots that we are going to talk about in here, we have decided to make a much simple classification based on the construction material. In this way, it is simple to visualize the impact that robots can have on a construction and the implications that they can have when it comes to using them in the construction sector:

- Robotic applications for brick construction.
- Robotic applications for construction with steel.
- Robotic applications for construction with concrete.
- Robotic applications for construction with other materials.





*Images 2.6 and 2.7. RIA and JARA logos, two of the robotics associations. Source: Google Images.*



### 3. Robotics' contribution to the construction of structures

Bearing in mind that it is technologically considered a conservative industry, the construction sector is developing robotic applications and solutions that seek to facilitate the execution of the most complex or dangerous tasks of building professionals. The following elements are the starting points for robots' development, which can be generally used in construction:

- Increase in construction quality.
- Productivity rise.
- Improvement of work planning.
- Accuracy growth.
- Elimination of hazardous jobs.
- Improve the access to complicated areas.
- Construction in dangerous environments.
- Determining constructions.
- Flexibility of the construction processes increase.

We should take into account, as we have already mentioned above, that technology is not currently at a point where one or a series of robots can completely replace a human in a construction. When talking about the construction of structures, we should take into account that, together with the finishing phase, this constructive phase is the one that takes most of the time, and also the one in which all the planning and organization of a construction is assembled. A large part of both the resources and the materials used in the whole construction are used during this phase. Therefore, either if we are talking about generic situations, day-to-day situations, or more special and specific situations, the robotization of processes for structures' execution, has an important impact on whole construction.

It is important to mention that all the robotic possibilities that will be analyzed and taken into account in here not only are applications that affect the execution of structures directly. Indirectly, a robot can perform tasks which are just as important and necessary

in this phase. That is to say, the study is not just to review robots that, for example, can independently weld a metal structure, but also takes into account robots that are able to implement the restatement of a structure automatically and accurately. Or 3D print robots to manufacture formwork with complex geometries and which are also made of reusable and recyclable material, and should otherwise be ruled out once they were used for the execution of the structure they were working in, giving much more precision and reduction of the overall cost of the construction.

Also, a branch of the construction of structures that benefits greatly from the introduction of robotics is prefabrication. Prefabrication is often faced repetitive and that it is very little flexible with the different geometries and the later environment where the construction will be located. The prefabrication machinery, although it has a good degree of automatism, has little variation with the pieces it manufactures. This limitation can be largely outgrown with the introduction of robotics, not only improving the work in series and repetition, but also introducing the possibility of creating custom pieces and with much more special geometries, all with an improvement in the quality of the resulting piece and a better adaptability when placing the structures on the work site.

### **3.1. Concept and improvements of the introduction of robotics**

The construction of structures today is still a very traditional construction method, in which the operator has a direct role in the execution of the structure helped by machines and tools. It is currently at a point where there is a constant growth of construction imperfections, a decrease in productivity, an increase in the organization of work complexity, and also greater extra charges in great projects. All this indicates that conventional construction limits have already been reached and it is time to make the next step forward to the robotization of the sector, not only speaking about structures, which, as we have already mentioned, are one of the most important phases (or even the most important one), this development takes great importance beyond conventional limits.

Robots offer this potential beyond conventional limits, thanks to their capacity for reprogramming, flexibility and modular design, and they also guarantee timing, cost and quality improvements of the products (constructions and structures in this case). Robots take a lot of importance in high complexity products, such as complex geometries' structures that would take a lot of money and time for a human, or would not even be able to achieve the necessary quality level with the desired complex geometry.

Along with the computer-specific generation of these complex geometries, robots are able to carry out all the work thanks to their mounting, cutting, engraving and welding capacity. One of the most recently explored applications has been printing in 2D and 3D. We should also stand out the fact that, theoretically, robots never get tired, so they can work for many hours (even during night hours if they were 100% autonomous.) This fact would also reduce the required workforce, or at least replace human labor supervision and control of the robots' work function. We can take as examples, detecting cracks, thermal bridges, and even in resistance tests (such as sclerometry), in which robots have also higher sensitivity ability than humans.

At this point, we should also remember that robots have limitations that can be given by the robot itself or by the material. The robot often needs a work framework, a defined framework which limits its movement or power. All this and, at the same time, the robot's load capacity creates a limitation in size and weight of the pieces and materials used, as well as the distance they have to move. However, robots that use 2D and 3D printing must have a near tank with the material they use.

Leaving Japan aside, where robotics have already taken a long way in construction, in the rest of the world robotics in construction has just started. Slowly growing, robotic applications and methods are introduced in the sector, both to overcome human limitations, or to improve tasks' conditions to be performed, so that operator just has to supervise and control the process.

Nowadays, this robotics is mainly applied in structures in off-site construction, modular construction and complex structures, where more complex forms and geometries can be made, while using materials that would otherwise be much more complicated to implement. The next step in the evolution of this technology for structures is to have a

greater implementation of robotic applications on-site. Construction 'factorization' leads to this step: the more processes' repetition during the construction of the structure, the more easy, optimal and profitable will be to apply robotics in this phase.

### 3.2. Construction subjected to constraints

There are several situations in which we can talk about construction subjected to constraints:

- Construction in damaged buildings, where structural integrity cannot be ensured and it is a risk for human lives to work on them.
- Construction in an unpromising land, with a very difficult access or, generally, with adverse characteristics so that it is possible to construct in a conventional way and without any risk.
- Constructions of structures in emergency situations. Whether it is in hostile environments where damage human labor force risk is very high, or as in a fire, a radioactive area, an area after a natural disaster, or in situations where it is required a very fast and accurate action.
- Outer space constructions. All the equipment needed to survive out in the space and temperature and gravity conditions, make robotics play an important role in this type of construction.

In all these situations, all the different robots that could carry out these constrained works have some things in common: as they are mechanical machines, they do not run the risk of suffering damages that a person would (long-lasting injuries, burns or even loss of life); and that they can perform accurately, optimally and more efficiently the task, as they are not affected in the same level as a human would.

### 3.3. Occupational risks

In general, construction has one of the highest accident rates in all sectors. In the following graph from 2016 that was included in the last report by the Spanish Ministry

of Labor and Social Security (figure 3.1) we can see how construction is the sector with the highest amount of accidents at work.

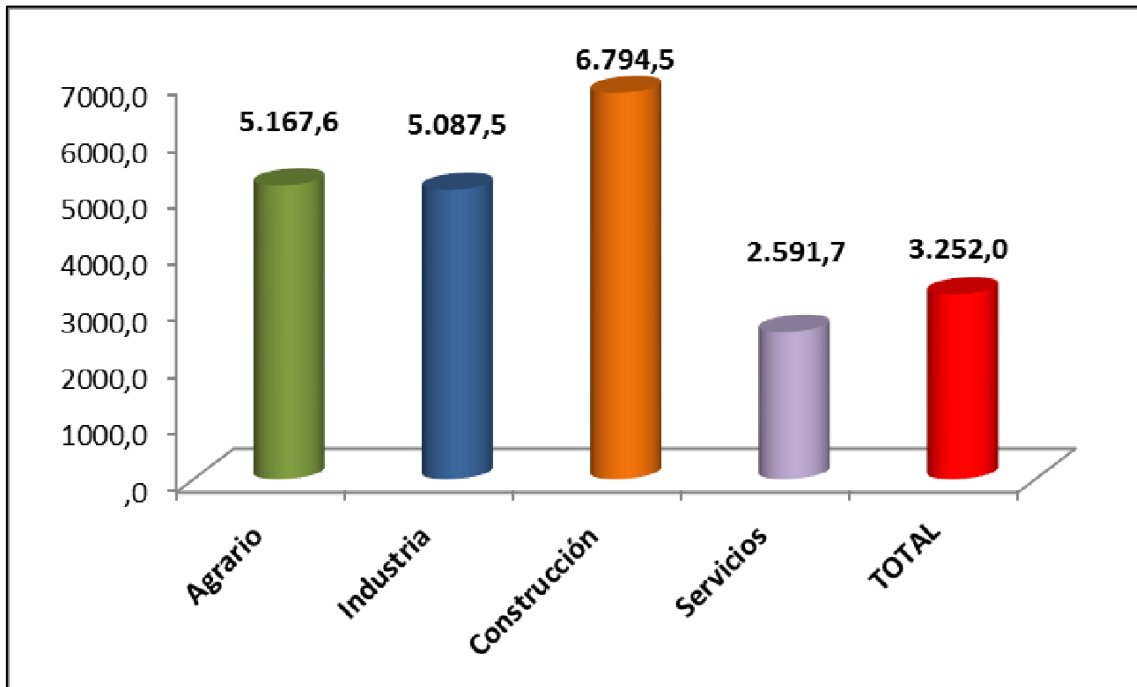


Figure 3.1. Accidents by sectors in Spain index during the year 2016. Source: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

We should be optimistic and realize that over the past 10 years this index has been substantially reduced as we can see in figure 3.2:

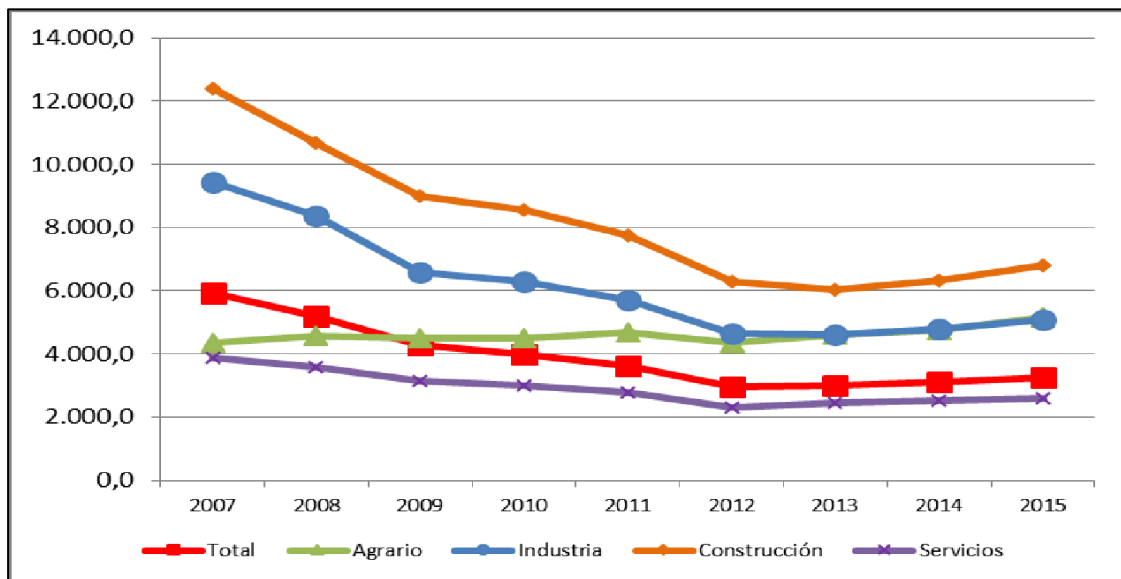


Figure 3.2. Temporary evolution of the sectorial accident rate. Source: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

Specifically in the construction of structures, it should be taken into account that it is one of the longest and most important phases that represents more hazards and more occupational risks than other constructive phases. The relation of occupational risks is the following one:

- Downfall of people from different levels.
- Downfall of people from the same level.
- Objects' downfall by fall or collapse.
- Downfall of objects in manipulation.
- Downfall of detached objects.
- Crashes and blows against immobile objects.
- Crashes and blows against moving objects.
- Blows and cuts caused by objects or tools.
- Projection of fragments or particles.
- Catch or crush because of or between objects.
- Pinch or crush by the rotation of machines or vehicles.
- Over exertion, inappropriate postures or repetitive movements.
- Extreme environmental temperatures' exposure.
- Thermal contacts.
- Electrical contacts.
- Exposure to harmful or toxic substances.
- Caustic or corrosive substances contact.
- Collisions or crashes with vehicles.
- Exposure to noise.
- Exposure to vibrations.
- Unsuitable lighting.
- Mental load.
- Risks originated with psychosocial or organizational factors.
- Other not specified risks.



In figure 3.3 we can see the percent of accidents per type, associated to construction.

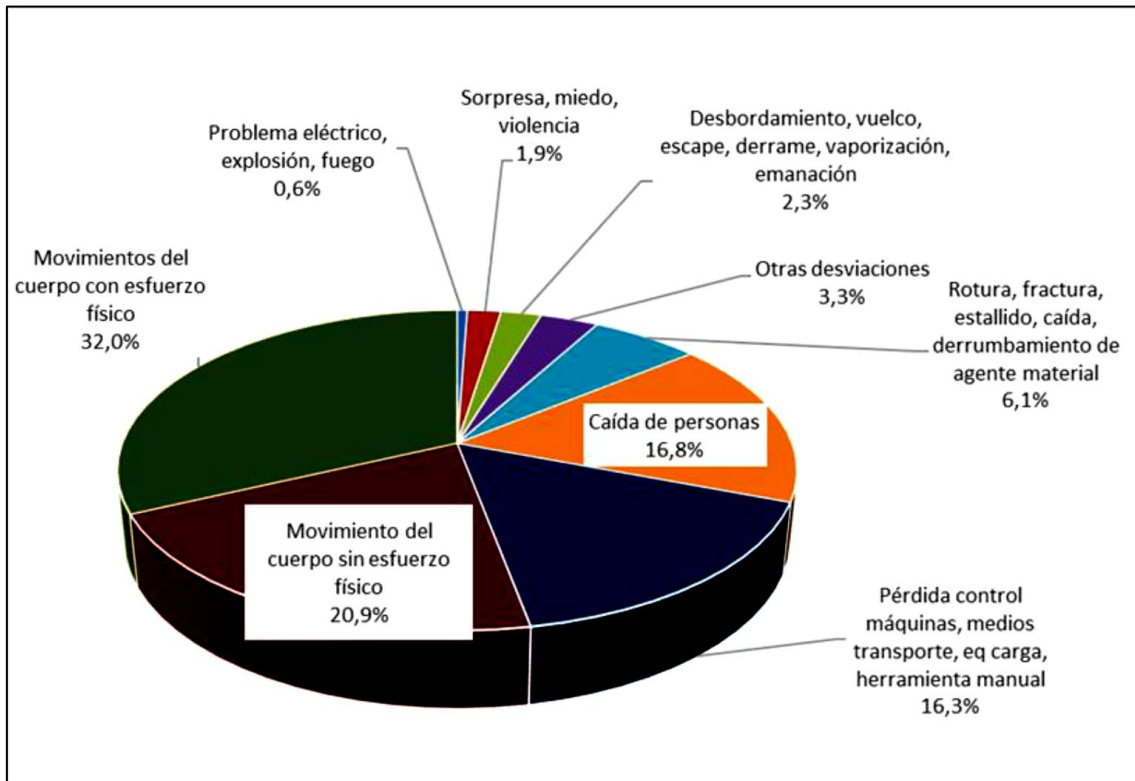


Figure 3.3. Work-related accidents with time off from work. Source: Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

Therefore, the fact that the robots can switch the work of the operators to tasks of control and supervision, or of minimum interaction and with very little risk, is of special relevance. The reduction of occupational risks is of vital importance, not only speaking of robots, but in general terms, and it is clear that the introduction of robotic applications, not only in the construction of structures (although especially in the execution phase of the structure that is where most accidents occur), but in all sectors with severe occupational hazards, should be taken into account for the immediate future.