

Anàlisi comparativa de l'empremta de carboni d'una nau industrial projectada estructura prefabricada de formigó i una d'estructura metàl·lica

Claudia Carrascón Martí

Enginyeria mecànica
EPSEVG - UPC

Resum

Aquest treball es contextualitza dintre de la creixent importància de tenir en compte els criteris de sostenibilitat en el desenvolupament dels projectes. L'objectiu és proposar una metodologia per a comparar el cost i l'empremta de carboni entre dues solucions estructurals per una mateixa nau industrial. Es tenen en compte els materials empleats, el sistema constructiu i el manteniment durant la seva vida útil. Com a resultat es dona una valoració econòmica i l'empremta de carboni obtinguda i s'exposen les conclusions de l'anàlisi.

1. Introducció

La sostenibilitat avui en dia és un objectiu que està agafant molta importància en el món de la construcció. La sostenibilitat té tres vessants o potes: l'ambiental, l'econòmica i la social. El vessant econòmic és el primer que es va desenvolupar pel mateix interès de les empreses. Des de fa alguns anys ha tingut un gran desenvolupament el vessant ambiental i molt més recentment ha començat a tenir-se en compte el vessant social.

El vessant ambiental se centrarà en un dels impactes més rellevants com és l'empremta de carboni que es produeix en qualsevol activitat. El vessant econòmic tractarà del cost inicial i durant la vida útil de l'activitat i, per últim, l'aspecte social es tindrà en compte en la seguretat de les persones i els béns en cas d'incendi.

Les estructures tenen un pes específic rellevant en la construcció de qualsevol edificació tant residencial com industrial. El treball es basarà en l'anàlisi i comparació de la sostenibilitat de les estructures d'edificació.

De les diferents tipologies d'estructures utilitzades més sovint en el camp industrial s'opta per una estructura metàl·lica i una prefabricada de formigó. Per això, necessitem dues estructures que continguin els materials esmentats i siguin el semblant possible. Tindran materials en comú, però l'importat serà l'estructura interior i que l'espai disponible per a treballar en el seu interior no canviï d'una a l'altra.

Els objectius principals del treball són la comparativa de l'empremta de carboni i el cost econòmic entre les dues

tipologies d'estructura, inclòs no únicament la fase de construcció sinó també el manteniment de les mateixes durant la seva vida útil.

2. Estat d'art i metodologia

A causa de la creixent importància que es dona a la sostenibilitat en la nostra societat, s'han començat a utilitzar de manera generalitzada diferents eines per l'avaluació d'aquestes característiques en l'àmbit de la construcció. Les eines d'avaluació més usades, avui en dia, són l'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) i l'Anàlisi del Cost de Cicle de Vida (ACCV). Aquestes permeten comparar diverses opcions o alternatives per seleccionar-ne la més convenient des del punt de vista mediambiental o econòmic, respectivament.

Es defineix com a cicle de vida: "és una eina metodològica que serveix per mesurar l'impacte ambiental d'un producte, servei, procés o sistema al llarg de tot el seu cicle de vida (des que s'obtenen les matèries primeres fins a la seva fi de vida i la seva gestió posterior). Es basa en la recollida i l'anàlisi de les entrades i sortides del sistema (recursos naturals, emissions, residus i subproductes) per obtenir dades quantitatives dels seus impactes ambientals potencials, amb l'objectiu de poder determinar estratègies per a la seva minimització o reducció" [1].



Fig. 1. Fases principals d'un bé o producte

En una valoració econòmica feta amb anàlisi de costos del cicle de vida, l'element principal per la presa de decisions és el cost econòmic, mentre que en una anàlisi ambiental

del cycle de vida, s'avaluen els impactes ambientals potencials que generen les diferents alternatives. Ambdues metodologies contemplen els factors que apareixen al llarg del cycle de vida d'un producte o servei determinat, i són utilitzades per donar suport a la presa de decisions. Realitzar un ACV i un ACCV a un producte/servei implica conèixer de manera directa els seus fluxos materials, energètics i monetaris.

Fonamentalment, aquestes eines tenen un caràcter holístic i es basen en la idea que totes les parts d'un sistema no poden ser determinades o valuades de manera individual, perquè és necessària la integració total de tots els aspectes i components que participen en el CV complet del sistema. La forma més completa dels ACV i ACCV integra els tres pilars de la sostenibilitat: ambiental, econòmic i social (LCSA - Life Cycle Sustainability Assessment). En aquests casos, l'avaluació es completaria al tenir en compte els impactes socials pels actors del cycle de vida.

Això no obstant, els impactes i aspectes socials generalment estan fora de l'abast dels estudis ACV i ACCV; reduint-se el seu àmbit als pilars ambiental i econòmic. Això és degut al fet que encara no hi ha consens internacional en aquest aspecte, reduint-se únicament el seu estudi a l'àmbit acadèmic. D'altra banda, el que sí que es considera és la combinació entre les metodologies ACV i ACCV.

L'anàlisi del Cycle de Vida: es un procés per definir les càrregues ambientals inherents d'un producte, procés o activitat, en el qual s'han d'identificar i quantificar, d'una banda, l'ús de matèria i energia i, d'altra, els abocaments a l'entorn, per calcular-ne l'impacte al medi ambient i per avaluar i posar en pràctica estratègies de millora ambiental.

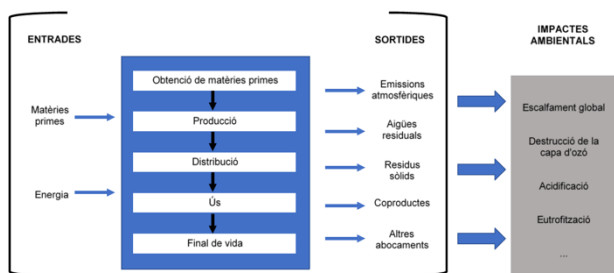


Fig. 2. Impacte ambiental del producte

L'ACV:

- És una eina que s'utilitza per estudiar, identificar i quantificar els impactes ambientals potencials directament atribuïbles a un producte, procés, servei o sistema, al llarg de tot el seu cycle de vida.
- Es basa en una ordenació i sistematització dels procediments (inventari d'entrades i sortides del sistema, avaluació dels potencials impactes ambientals associats i interpretació dels resultats de les fases d'inventari i d'impacte amb relació als objectius de l'estudi) per obtenir uns resultats que donin els seus impactes ambientals potencials, amb la finalitat de reduir-los.
- Permet identificar, des d'un punt de vista ambiental, els punts crítics o impactes de cadascuna de les fases que constitueixen un procés productiu.

• Es tracta d'una eina s'usa per comparar productes o serveis existents, detectant aspectes de millora dels productes existents o ajudar en el disseny d'altres de nous. Llavors l'ACV reporta una sèrie de beneficis per al seu destinatari, els quals es poden resumir en els següents:

- Mediambientals (reducció d'impactes).
- Reducció de costos (estalvis en la utilització de primeres matèries i energia).
- Innovació (recerca de noves solucions).
- Compliment de la legislació.
- Millora de la imatge de l'empresa.
- Augment de la qualitat i del valor del producte.

S'exposa un resum dels aspectes i conceptes principals de la metodologia general d'ACV. Segons la normativa, l'ACV consta de quatre etapes o fases ben distingides:

- Definició de l'objectiu, l'abast i els límits del sistema.
- Anàlisi d'Inventari del Cycle de Vida (ICV).
- Avaluació d'impacte del Cycle de Vida (EICV).
- Interpretació.

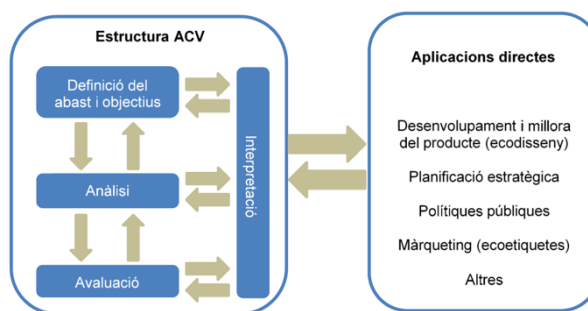


Fig. 3. Etapes d'un ACV des d'una concepció holística

Aquestes fases no són simplement seqüencials, perquè es fan normalment diverses iteracions per incrementar el nivell de detall.

El càlcul de l'Anàlisi del Cost del Cycle de Vida s'ha utilitzat tradicionalment per empreses i organismes públics durant la fase inicial de planificació i d'estudis de viabilitat de projectes; principalment com a tècnica d'anàlisi econòmica per a la presa de decisions sobre grans inversions mitjançant l'avaluació a llarg termini de diferents alternatives, on aquestes difereixen no només en els costos inicials sinó també en els operatius posteriors, respecte dels quals tradicionalment només s'han considerat els costos rellevants directament assumits per la propietat.

És, per tant, un mètode d'avaluació idoni, ja que considera tots els costos presents i futurs en què s'incorre al llarg del cycle de vida complet del bé objecte d'adquisició, en lloc de cercar una rendibilitat immediata considerant únicament la inversió inicial, és a dir, el preu de compra. Es tracta, així, d'identificar l'opció de menor cost a llarg termini per a una inversió que alhora satisfaci les prestacions que es requereixen.

A més, tot bé o producte suposa un preu o cost, i el preu d'adquisició només és un dels elements del cost global del procés integral d'adquisició, utilització i eliminació (menys el seu valor residual). En aquest context, s'entén

per ACCV el resultat del càlcul i de la valoració de tots els costos associats a un producte o servei determinat, que són sufragats directament per un o diversos agents al llarg del cicle de vida complet.

Aplicat, entre altres àmbits, al de l'obra civil i de l'edificació, una anàlisi de ACCV global incorpora tots els costos i les inversions produïts des de l'adquisició o la disposició del terreny: els estudis de viabilitat del seu desenvolupament futur; la gestió de l'obtenció de tota mena d'autoritzacions administratives necessàries; els honoraris tècnics de projecte, direcció d'obra, gestió integrada i altres intervencions professionals; els costos fiscals i financers generats per la construcció i els costos intrínsecs d'aquesta; els costos de manteniment, funcionament, rehabilitació i substitució d'elements i sistemes durant la seva vida útil i, finalment, s'han d'incorporar els costos i les inversions necessaris per a la demolició, la gestió de residus i, si escau, la reutilització dels elements recuperables.

Al corrent de fluxos oposats es comptabilitzen els ingressos generats durant la vida útil que realment es produiran o seran susceptibles de produir-se en el futur. Finalment, cal estimar el valor residual actual d'aquells elements i sistemes que siguin recuperables o reutilitzables, que determinarà la depreciació del cost d'inversió inicial o del cost de substitució, durant el cicle de vida útil d'aquests elements o sistemes.

Els objectius d'un ACCV són:

- Avaluar els costos relatius als fluxos monetaris del cicle de vida d'un producte/servei i aquells directament lligats als diferents actors (usuaris, gestors, etc.).
- Comparar els costos de diferents alternatives de productes, incloent-hi els processos i serveis relacionats.
- Registrar o estimar millores d'un sistema al llarg del seu cicle de vida, inclosos canvis en els processos, innovacions, canvis de subministradors, taxes, etc.
- Identificar, en combinació amb un ACV, situacions win-win (menor cost i menor impacte) i possibles traspassos de costos o impactes entre fases del cicle de vida d'un producte.

Els mètodes de càlcul del ACCV són tècniques basades en principis d'anàlisi econòmica i estan dirigides a seleccionar l'alternativa més efectiva des del punt de vista dels costos, entre diverses que s'ajusten a l'objectiu d'un projecte i el nivell de beneficis se suposa igual per a totes. En l'anàlisi dels costos es consideren tots els rellevants al llarg del cicle de vida del producte segons les diferents alternatives i no només les inversions inicials.

L'abast i la finalitat de les anàlisis dels costos del cicle de vida poden variar significativament, depenent del tipus de cost que es pretengui analitzar, les fases del cicle de vida que s'inclouguin o del punt de vista del dit estudi (fabricant, consumidor, societat en general, etc.).

En comparar els costos del cicle de vida de les diferents alternatives, en què els costos es donen en diferents instants, no seria apropiat simplificar comparant la suma dels costos totals durant el període complet sense tenir en compte el moment temporal en què es produeix cadascun. Per això, els costos s'han de transferir a un moment comú en el temps, generalment l'inici del període d'anàlisi, per

permetre'n la comparació. Això s'aconsegueix descomptant al valor inicial (n=0) els costos successius anuals que es van succeint al llarg del període considerat, depenent del factor «taxa de descompte» i de l'any «n» en què es produeix.

El resultat que s'obté per a cadascuna de les alternatives és un valor expressat en una unitat monetària determinada a partir del Valor Actualitzat Net (VAN) del cost total de tots els fluxos financers del cicle de vida complet del producte. El ACCV ha d'entendre's llavors com un model en què s'introdueix una sèrie de dades o valors d'entrada i, després d'una sèrie de càlculs, se n'aconsegueix el resultat en forma de

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

sent:

- N: Període d'anàlisi o horitzó temporal sobre el qual s'avalua el cost total [en anys]. Es tracta d'establir la durada o vida econòmica del producte; qüestió fonamental en un mètode basat en l'anàlisi dels efectes del transcurs del temps en el valor dels diferents fluxos de costos i beneficis. La normativa europea recomana per les seves estructures períodes no inferiors a 50 anys.
- C_n: cost anual net de l'any «n» [en unitats monetàries; per exemple, en euros]. Fluxos anuals financers de costos, descomptant-ne els beneficis.
- n: Any en què es produeix el Cost C_n, dins del període d'anàlisi N [en anys].
- i: Taxa de descompte o actualització financera [en tant per un]. Se'n considera el valor «net», és a dir, la diferència entre els interessos esperats i la inflació. Considerant que es tracta d'un futur pronòstic, cal tenir en compte els valors mitjans dels darrers anys. Així, per exemple, la taxa de descompte mitjana considerada a la Metodologia METrP (Methodology for Ecodesign of Energy-Related Products) de la UE és del 4% (interessos - inflació). Tot i això, per a projectes públics de llarga vida útil, com les estructures, la taxa de descompte sol ser de l'ordre del 2%.

3. Definició de l'estructura a comparar

Una estructura és el conjunt d'elements resistents convenientment vinculats entre si que accionen i reaccionen sota els efectes de les càrregues a les quals són sotmeses. La seva finalitat tracta de resistir i transmetre les càrregues de l'estructura als fonaments mantenint la forma sense patir cap deformació important. Les càrregues més comunes es poden classificar en:

- Pes propi: pes de l'estructura.
- Sobrecàrregues d'ús: càrregues que actuen sobre l'estructura. Per exemple persones, maquinària, mobiliari...
- Altres sobrecàrregues: suportar les pitjors condicions del vent, neu, incendis, sismes...Els elements fonamentals trobats a les estructures són dos. Les bigues de directriu que normalment treballen a flexió i els pilars que treballen

a compressió o en alguns casos a flexo-compressió segons el vinclament.

La geometria decidida per l'execució de la nau serà rectangular, amb una superfície de 630 m². L'amplada serà de 18 m per una llargada de 35 m. L'alçada de les parets laterals serà de 7,2 m en el cas d'estructura metàl·lica i 7,7 m en el cas de l'estructura prefabricada de formigó, mentre que l'alçada total trobada al llarg del centre de la nau serà de 8,35-8,9 m en funció del tipus d'estructura.

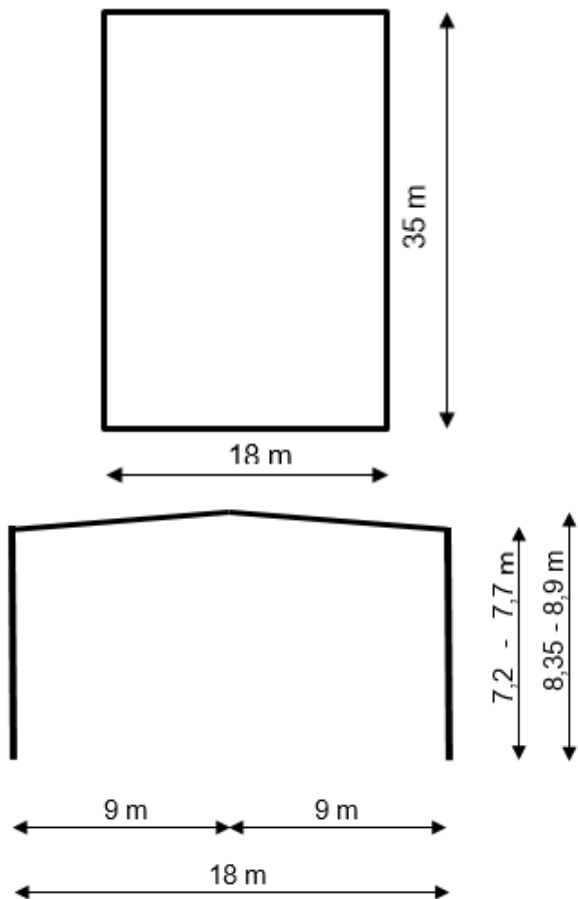


Fig. 4. Principals mides de la planta i frontal de la nau

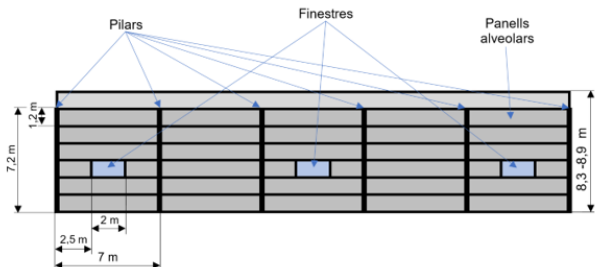


Fig. 5. Principals mides de l'alçat lateral de la nau

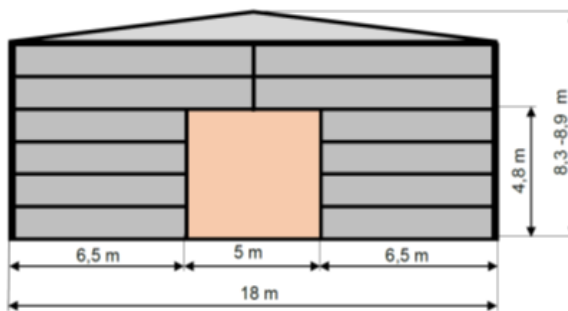


Fig. 6. Principals mides del frontal de la nau

La fonamentació són el conjunt d'elements estructurals que connecten i transmeten les càrregues de les estructures al sòl. Segons el terreny i les diferents cotes de subjecció, s'ha de triar entre diferent tipus.

En aquest treball s'utilitzaran sabates centrades i connectades amb bigues de trava.

4. Descripció de l'estructura de formigó

L'estructura principal de la nau industrial es basa en els productes de l'empresa Prefabricats Pujol [2] (pilars, bigues de coberta, corretges i tancaments exteriors). Els elements de formigó armat que compondran l'estructura prefabricada de formigó són una sèrie de pilars i bigues que formaran pòrtics a dues aigües, separats una distància de 7 m i una llum entre eixos de pilar de 18 m.

L'alçada lliure interior, mesurada entre paviment i biga de coberta serà de 7 m, amb una alçada total de la nau de 8,90 m.

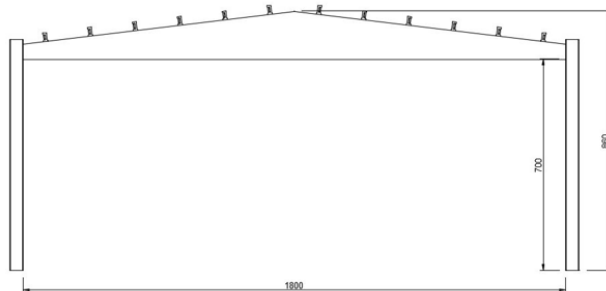


Fig. 7. Principals mides del pòrtic de l'estructura de formigó

Per a la coberta es disposaran elements com bigues de pendent variable (biga Peraltada), corretges preteses (VP-22), un tancament de coberta tipus sandvitx (acer zincat i nucli aïllant) i plaques translúcides pels lucernaris de la nau.

Els tancaments exteriors de la nau es formaran amb plaques prefabricades de formigó.

La fonamentació està composta per sabates aïllades de formigó armat (HA-25/B/20/XC2) connectades per una biga centradora o de trava. L'ancoratge dels pilars a la sabata es farà mitjançant una sabata de calís. Per regularitzar el terreny omplirem els pous, per a les sabates i bigues de connexió, amb 10 cm de formigó de neteja HL-150/B/20.

5. Descripció de l'estructura d'acer

L'estructura principal de la nau industrial es basa en els perfils d'acer normalitzats a Europa (pilars, bigues de coberta i corretges). Els elements d'acer que compondran l'estructura prefabricada són una sèrie de pilars i bigues que formaran uns pòrtics a dues aigües, separats una distància de 7 m i una llum entre eixos de pilar de 18 m. Com a sistema de trava, s'ha utilitzat una creu de Sant Andreu amb cordó superior entre els dos últims pòrtics de cada extrem.

L'alçada lliure interior, mesurada entre paviment i biga de coberta serà de 7, amb una alçada total de la nau de 8,35 m, incloent-hi panell de sandvitx de coberta.

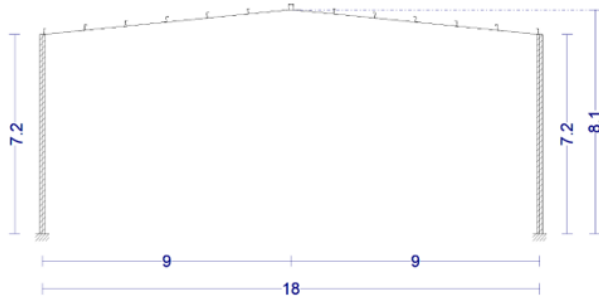


Fig. 8. Principals mides del pòrtic de l'estructura d'acer

Per a la coberta es disposaran elements com bigues IPE 450 i IPE 500 amb cartel·les, corretges Z, un tancament de coberta tipus sandvitx (acer zincat i nucli aïllant) i plaques translúcides pels lucernaris de la nau.

Els tancaments exteriors de la nau es formaran amb plaques prefabricades de formigó.

La fonamentació està composta per sabates aïllades de formigó armat travades per una biga. Es fa servir un ancoratge de pilars a la sabata mitjançant una placa d'ancoratge.

6. ACV i ACCV de les estructures

En el present treball, no es consideren o no s'avaluen totes les etapes del Cicle de Vida per diferents raons que es justifiquen a continuació.

En primer lloc, l'etapa A5 referent al procés de construcció / instal·lació es considera, però no s'avalua, les dues estructures són prefabricades, a excepció de les fonamentacions que són "in situ", i el sistema de muntatge a l'obra és pràcticament equivalent en impactes i costos. En ambdós casos s'utilitzen unes grues per la col·locació de pilars, jàsseres, corretges, coberta i panells de tancament i en quantitat i hores de muntatge equivalent. Les operacions addicionals en l'estructura metàl·lica (soldadura, caragolament de perns, etc.) equival a les de l'estructura prefabricada de formigó.

L'etapa B1 d'ús de l'edifici no es considera perquè és menyspreable en els edificis industrials. En el cas d'edificació residencial o administrativa és important l'aïllament del contorn de l'edifici en qüestions de consum energètic per climatització i il·luminació.

L'etapa B2 de manteniment de l'estructura si s'avalua, considerant només un manteniment a l'estructura d'acer relacionat a la renovació de la pintura intumescent a la meitat de la vida útil de les estructures que es considera

de 50 anys. El manteniment de l'estructura de formigó es considera menyspreable en condicions normals de funcionament.

Les etapes B3 a B5 no es consideren perquè són menyspreable en els edificis industrials i només es produïrien en cas d'accions accidentals com un incendi o canvi d'ús de l'edifici industrial.

Les etapes C1 a C4 es consideren, però no s'avaluen, les dues estructures són completament reciclables, incloent-hi les fonamentacions de formigó. El formigó es recicla (com àrid per fabricar més formigó, matèria primera per a la fabricació de ciment i en material granular per bases i subbases de paviments) i l'acer com matèria primera per fabricar més acer.

7. Materials principals utilitzats

Per les dues estructures s'han utilitzat materials diferents.

Estructura de formigó:

MATERIAL BÀSIC	UNITAT D'ÚS
Formigó HP-40	Corretges
Formigó HA-40	Pilars, bigues de coberta
Formigó HM-35	Reblert dels calis dels pilars
Formigó HA-25	Sabates i bigues de trava / centradores
Formigó de neteja	Sabates i bigues de trava / centradores
Acer B500S armats passius	Sabates, bigues de trava / centradores, pilars, bigues de coberta, corretges
Acer Y1670C armats actius	Corretges

Taula 1. Material bàsics i on s'utilitzen a l'estructura de formigó

Estructura d'acer:

MATERIAL BÀSIC	UNITAT D'ÚS
Acer 275	Perfils HEB, IPE, R, SHS
Acer 235	Corretges Z
Formigó HA-25	Sabates i bigues de trava / centradores
Formigó de neteja	Sabates i bigues de trava / centradores
Acer B500S armats passius	Sabates, bigues de trava / centradores

Taula 2. Material bàsics i on s'utilitzen a l'estructura d'acer

Tancaments laterals i coberta:

MATERIAL BÀSIC	UNITAT D'ÚS
Formigó HA-40	Panell façana
Acer B500 S	Panell façana
Lluerna	Coberta lluernna
Easy cub 5GR	Coberta

Taula 3. Material bàsics i on s'utilitzen a la coberta i tancaments laterals

8. Conclusions

Les conclusions que es poden treure d'aquest treball respecte a l'estructura portant obtingudes en la comparativa de les dues solucions proposades són:

- Globalment, la nau amb tipologia d'estructura portant prefabricada de formigó té una empremta de carboni durant la seva vida útil un 34% menor que la de tipologia amb acer.

- El pes de les emissions de CO2 entre estructura portant i fonamentació es mantenen similars.

- Globalment, la nau amb tipologia d'estructura portant prefabricada de formigó té un cost durant la seva vida útil un 48% menor que la de tipologia amb acer.

- El pes del cost entre estructura portant es mantenen similars en les dues solucions. A pesar de que la fonamentació de l'estructura d'acer té un cost més elevat que la solució per l'estructura de formigó, es produeix un efecte enganyós en el pes de la fonamentació per l'estructura d'acer (que és molt menor que en el cas del formigó), degut al cost del control de qualitat que és molt més elevat en el cas de l'acer.

Les conclusions que es poden treure d'aquest treball respecte als tancaments laterals i coberta obtingudes són:

- El tancament lateral de formigó suposa un 77% de l'empremta de carboni de l'envoltant de la nau.

- Respecte a l'estructura complerta, l'empremta de carboni dels tancaments laterals de formigó representa un 53% en el cas d'estructura de formigó i pràcticament la meitat de les emissions en el cas d'estructura d'acer.

Les conclusions que es poden treure d'aquest treball respecte a l'estructura complerta obtingudes en la comparativa de les dues solucions proposades són:

- Globalment, la solució amb nau d'estructura de formigó té una empremta de carboni durant la seva vida útil un 11% menor que la solució amb nau d'estructura d'acer.

- Globalment, la solució amb nau d'estructura de formigó té un cost durant la seva vida útil un 30% menor que la solució amb nau d'estructura d'acer.

La recomanació des de el punt de vista de les emissions de CO2 és la solució amb estructura de formigó.

La recomanació des de el punt de vista del cost és també la solució amb estructura de formigó.

Degut a l'alta empremta de carboni dels tancaments laterals de formigó, es recomana utilitzar un tancament

alternatiu amb panells sandvitx en tota l'envoltant de la nau. L'estalvi en l'empremta de carboni per utilitzar panell sandvitx de tancament en comptes de panell de formigó és del 63% per metre quadrat (65 kg CO2/m2). Això, comporta un augment del cost total de la nau d'un 8% en el cas d'estructura de formigó i un 6% en el cas d'estructura d'acer.

9. Agraïments

Agrair al meu professor de TFG, Jordi Figuerola, per acceptar la meua proposta de projecte, per la paciència infinita que ha tingut i l'ajuda constant que m'ha ofert durant la durada d'aquest projecte.

Agrair també la col·laboració al director de IECA de Tecnologia, Sergio Carrascón, per la seva ajuda durant la durada que ha tingut aquest treball.

Agrair a totes les persones i entitats que han col·laborat en aquest projecte, aportant la informació necessària.

Agrair a la meua família i amics que han estat al meu costat m'han donat el seu suport constant durant la realització del treball.

Referencies

- [1] Anàlisi de Cicle de Vida. https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/estrategia_ecodisseny/eco_disseny/eines/eines_av/acv/
- [2] Prefabricats Pujol. <https://www.prefabricatspujol.com/ca/>