

Projecte Final d'Estudis Enginyeria de Materials:

Utilització de materials compostos com a elements
estructurals en la construcció

Jaume Fíguls
Enginyeria de Materials
ETSE (UAB)
Juny 2008

Índex

- 1- Introducció.
 - 1.1- Conceptes i definicions.
 - 1.2- Tipus de resines
 - 1.2-1. Termoplàstiques
 - 1.2-2. Duroplàstiques
 - 1.2-3. Elastòmeres
 - 1.3- Tipus de fibres
 - 1.3-1. Fibres de carboni
 - 1.3-2. Fibres de vidre
 - 1.4- Característiques principals
 - 1.4-1. Menys pes
 - 1.4-2. Translúcidesa
 - 1.4-3. Aïllant tèrmic
 - 1.4-4. Gruix
 - 1.4-5. Resistència al medi
 - 1.4-6. Baix mòdul elàstic
 - 1.4-7. Canvi de propietats
 - 1.4-8. Resistència al foc
 - 1.4-9. Aïllant acústic

- 2- Cronologia històrica dels composites en la construcció.

- 3- Tècniques de producció.
 - 3.1- Desenvolupaments previs i paral·lels amb altres materials
 - 3.2- Tècniques de treballat per a cobertures
 - 3.2-1. Procediments manuals
 - 3.2-2. Procediments semimecànics
 - 3.2-2.1. Procediments de dispersió de fases
 - 3.2-2.2. Processos mecànics d'injecció i de buit
 - 3.2-2.3. Processos de bufat
 - 3.2-3. Procediments mecànics
 - 3.2-3.1. Premsa en calent
 - 3.2-3.2. Premsa en fred
 - 3.2-3.3. Mètode de cobertura
 - 3.2-3.4. Poltrusió
 - 3.2-3.5. Procediment per a fer plataformes laminades
 - 3.2-3.6. Fabricació d'estructures de bigues
 - 3.2-4. Conclusions
 - 3.3- Tècnica d'unions
 - 3.3-1. Unions tancades
 - 3.3-2. Unions encolades
 - 3.3-3. Unions de composite amb composite
 - 3.3-4. Unions de bigues de composite
 - 3.3-5. Unions soldades
 - 3.3-6. Unions a pressió, cargolades o reblades
 - 3.3-7. Unions al llarg de bigues
 - 3.3-8. Unions amb passador

- 4- Les estructures.
 - 4.1- Tipologies d'estructures
 - 4.2- Classificació d'elements estructurals

- 4.3- Ordre jeràrquica de les estructures
- 4.4- Tipologies d'edificis fets amb composites
- 4.5- Estructures de composites reforçats
 - 4.5-1. Estructures lineals
 - 4.5-1.1. Bigues a flexió
 - 4.5-1.2. Cobertures a flexió
 - 4.5-1.3. Estructures amb sol·licitacions a tracció
 - 4.5-1.4. Bigues a tracció
 - 4.5-1.5. Arcs i marcs
 - 4.5-1.6. Estructures lineals: conclusions
 - 4.5-2. Estructures planes
 - 4.5-3. Construccions de biguetes
 - 4.5-4. Cel·les, cabines i caixes
 - 4.5-5. Cobertures corbades
 - 4.5-6. Cobertures doblement corbades
 - 4.5-7. Estructures de tipus ombrel·la
 - 4.5-8. Formes lliures
 - 4.5-9. Estructures de plecs
 - 4.5-10. Estructures de plecs corbades
 - 4.5-11. Estructures de poliedres
 - 4.5-12. Marcs triarticulats i voltes
 - 4.5-13. Cúpules geodèsiques de bigues i cúpules de membrana
 - 4.5-14. Ordenació de les estructures per a cobertes
 - 4.5-15. Conclusions

5- Els càlculs

- 5.1- Procés de càlcul
 - 5.1-1. Micromecànica
 - 5.1-2. Macromecànica
 - 5.1-3. Anàlisi d'errors
 - 5.1-4. Dimensionament
- 5.2- Característiques desfavorables
 - 5.2-1. Baix mòdul elàstic
 - 5.2-2. Manca de fluïdesa i poca deformació a ruptura
 - 5.2-3. Canvis al llarg del temps
- 5.3- Conceptes per als càlculs
- 5.4- Casos particulars
 - 5.4-1. Expo 64
 - 5.4-2. Rondo
 - 5.4-3. Fg2000
- 5.5- Càlcul de seccions transversals a través d'assajos
- 5.6- Assajos precisos a partir de les deformacions límit
- 5.7- Sol·licituds de càrrega i factors de seguretat
- 5.8- Cas particular de Domke
- 5.9- Comportament estructural degut a l'anisotropia
- 5.10- Conclusions

6- Bibliografia

1- Introducció

Per materials compostos amb característiques estructurals, entenem fibres de material d'alta resistència com de vidre o carboni barrejades de diferents formes dins d'una matriu polimèrica.

Bastant aviat els composites es van començar a utilitzar per a components d'avions o de barques, les característiques d'aquests materials eren: lleugeresa, bona motllejabilitat i bona resistència mitja.

El primer capítol de la història de la construcció d'estructures amb materials reforçats per fibres es va escriure als Estats Units. La primera aplicació de composites en aquest camp la va fer Richard Buckminster Fuller utilitzant-los com a tancaments per a sostres, el primer exemple el tenim en la fàbrica Ford, feta l'any 1954, una cúpula de bigues d'alumini amb plataformes triangulars de polièster reforçat amb fibra de vidre, les longituds d'aresta dels triangles són de 4,5m. Fuller volia combinar la longitud màxima d'aresta amb l'efecte del material translúcid.



En la construcció hi ha hagut multitud d'experiments a partir dels anys 50, assatjos i edificis realitzats, tots amb l'objectiu de poder edificar, total o parcialment amb materials compostos.

Aquests plantejaments han estat una mica deixats de banda fins avui per bastants professionals. La crisi del petroli en els anys setanta o els moviments en contra dels ecologistes entre altres, van influir quelcom en els constructors i clients, perquè no fossin ben acceptats.

No obstant, aquests materials estan cada cop més desenvolupats i actualment són utilitzats en la indústria de l'automòbil, aèria i aeroespacial, i per suposat en la indústria de la construcció.

Aquests materials d'alta tecnologia s'han desenvolupat realment en un ampli ventall de camps. En el mercat es disposa des de quadres de fibres de vidre per a bicicletes fins a esferes per a rellotges de polsera, n'hi ha un ampli ventall d'aplicacions.

En el camp de la construcció però hi ha hagut una renaixença en l'utilització dels composites, concretament en dos camps:

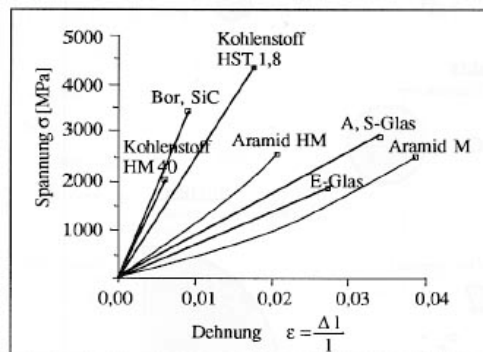
Algunes construccions estan fetes a partir de bigues de composite. Les principals àrees d'utilització son zones de pas de vianants i petits ponts o passarel·les. Amb el mateix procés constructiu es fan sistemes de cobertura de ponts, l'estructura principal dels quals esta feta d'acer, i hi son muntats elements fets de composite com a estructura suplementària.



La lleugeresa del material juntament amb el seu alt grau de preacabat fan que s'escurci la durada de l'obra.

La rigidesa del material és considerablement més alta, en les estructures de composite i hi ha menors desplegaments d'esforços, a part d'això presenten millor protecció contra la corrosió i en general menys problemes de manteniment.

Un pont per a vianants fet de perfils de composite no tindrà mai un cost total superior al del mateix pont fet d'acer, sempre es clar per la mateixa vida útil.



Corbes tensió/ deformació per a diferents composites

1.1- Conceptes i definicions:

Entenem com a composites per a aplicacions estructurals, la unió de resines amb fibres rígides. Les fibres donen rigidesa i resistència al conjunt i les resines fan de material d'unió. Materials sense fibres de reforç també s'utilitzen en la construcció, però molt poc amb objectius estructurals.

D'aquesta manera l'edifici pot suportar a la vegada forces de compressió, de forma similar al formigó armat, però més enllà d'això la matriu protegeix a les fibres d'agressions de l'entorn, sobretot d'atacs químics, i és la que al final dona la forma, color i acabat superficial al edifici.

La matriu està constituïda normalment de resines polimèriques, que tenen l'origen en derivats del petroli, però també s'estan fent estudis per aconseguir resines amb bases de matèries primes renovables.

Per aplicacions pràctiques en edificis, els duròmers tenen un interès especial, particularment polièsters insaturats i resines fenol i epoxi, degut a la seva durabilitat i estabilitat enfront de la temperatura i sobretot per la seva facilitat per a ser moldejats.

Només quan els dos components es barregen i mouen, es produeix al cap d'un determinat temps el composite sòlid, dur. La viscositat i temps de preparació es poden modificar, i moltes vegades el pas a un estat de temperatura més alt no es imprescindible. La matriu pot incloure a més altres materials addicionals, com per exemple estabilitzadors UV, material de reompliment per a donar volum, pigments, medis inhibidors de flama...

1.2- Tipus de resines:

Les dividim en tres grups, tots ells són susceptibles d'unirse amb fibres per a aconseguir un objectiu determinat:

1.2-1 Termoplàstiques: Tenen forma de fils, són estructures macromoleculares lineals que s'aconsegueixen mitjançant refredament. El resultat final aconseguit és reversible, mitjançant escalfament els termoplàstics es poden tornar a transformar en estat plàstic. Com a conseqüència de la seva manca de connexions espacials es poden motllejar de forma bastant accentuada i sota pressió i temperatura i es poden soldar.

Com a termoplàstics utilitzats en construcció trobem el PMMA, resina de PVC i PVC tou, que són utilitzats normalment com a elements de façana o per a construcció de marcs de finestra. Com a elements propiament estructurals tenen les aplicacions molt limitades.

Els termoplàstics són subministrats com a granulat i fluidifiquen a través de l'aplicació de calor, en aquest estat líquid d'agregats són impregnades les fibres.

1.2-2 Duroplàstiques: Consten de dos components fluids que es barregen, resina i enduridor. Presenten una estructura de connexions espacials

tridimensionals macromolecular, es formen mitjançant un procés d'enduriment irreversible que consisteix en aplicar pressió i temperatura, encara que alguns duroplàstics s'endureixen aplicant només temperatura. Al contrari dels elastòmers, son estructuralment resistents.

Entre els duroplàstics trobem la resina de Polièster insaturada i la resina Epoxi, les dues en combinació amb fibres són utilitzades per a la construcció d'estructures, gràcies a la seva relació qualitat-preu són les més utilitzades, al costat d'elles les resines fenòliques reforçades, resines de melamina, de silicona, d'hidròxid de carboni etc. no tenen gairebé aplicacions en aquest mercat.

1.2-3 Elastòmeres: son cadenes molt entrelligades de polímers que presenten un comportament viscoelàstic. Les avantatges que aporten en construcció son més aviat aplicades a unions i tancaments, no s'utilitzen com a reforç estructural.

1.3- Tipus de fibres:

Com a fibres de reforç trobem fibres de vidre, d'aramida o de carboni, les fibres es treballen en forma de teixits. Es diferencien entre Rovings (material de corda) i Matten (fases apilades lligades o no unes amb les altres o també poden ser teixits units entre ells). Inicialment les fibres d'aramida i de Carboni no s'utilitzaven gairebé gens en la construcció, el seu desenvolupament va començar bastant mes tard i fins avui no s'ha aturat.

1.3-1 Fibres de carboni

Unides amb matriu constitueixen un material d'alt rendiment que s'utilitza per a sollicitacions fora del normal, per a fer estructures com per exemple de ponts. Segons el percentatge que porta de fibres, aquest material pot aconseguir una rigidesa doble a la de l'acer, mantenint iguals els mòduls elàstics, el preu es però 4 vegades mes car que el de l'acer. Avui en dia podem trobar al mercat làmines de composite fetes de fibra de carboni amb un 70% de fibra dins d'una matriu de resina epoxi. Amb motiu de la seva alta resistència a tracció i al medi actualment ja s'utilitzen regularment per a reformes d'edificis, en sollicitacions a tracció.

1.3-2 Fibres de vidre (Glas-Fiber Reinforced Plastics)

Els composites reforçats amb fibra de vidre utilitzen sobretot les possibilitats formals del material. Amb ells es poden seguir les noves tendències de l'arquitectura moderna amb formes orgàniques i rodones i colors més intensos. La fibra de vidre és un material de gran eficiència per la seva lleugeresa (densitat= 1,8t/m³) i al mateix temps rigidesa. Això fa disminuir molt el pes global

de l'edifici. Característica en la qual els composites superen a tots els materials de construcció coneguts.

La fibra de vidre, reforçada amb políester, amb resina de poliestirè insaturada o amb resina epoxi s'utilitza per a elements constructius portants (que suporten càrrega) en general les qualitats de tots són similars, la resina epoxi però es deixa treballar millor, després de l'enduriment és més clar i translúcid, es colora més uniformement i es contrau menys durant el procés. La resina epoxi a més de tenir un preu més alt, també té la desavantatge de que després de l'enduriment desprèn fums tòxics durant el procés d'enduriment, per això només és produïble sota unes mesures de seguretat molt particulars.

Les qualitats dels composites de fibra de vidre gracies, als seus possibles components individuals, a les proporcions de fibra/matriu i qualitats i orientació de les fases, la fan molt avantatjosa d'utilitzar, brinden un llarg nombre de qualitats positives en comparació amb els materials convencionals. La determinació de les qualitats mecàniques en dependència dels components base és un dels problemes més grans que els constructors han de superar a l'hora de calcular estructures d'aquest material.

1.4- Característiques principals:

1.4-1 Menys pes

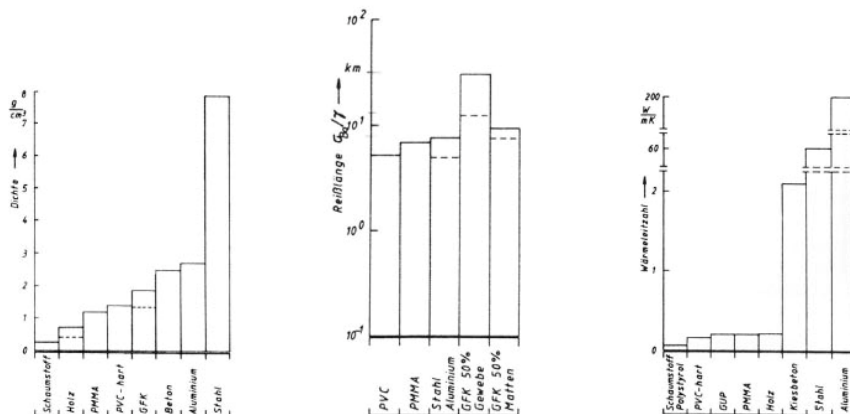
El políester reforçat amb un 30% de fibra de vidre té un pes específic d'aproximadament 15 kN/m^3 , o sigui és a prop d'un 40% més lleuger que el ciment o el vidre, per concentracions més altes de vidre el pes específic augmenta entre els 20 i els 25 kN/m^3 .

Alt rendiment de les estructures: Per rendiment entenem la rigidesa de l'estructura en funció del pes específic. Els composites fets de fibra de vidre tenen un rendiment extraordinari, pot inclús sobrepassar els valors de l'acer.

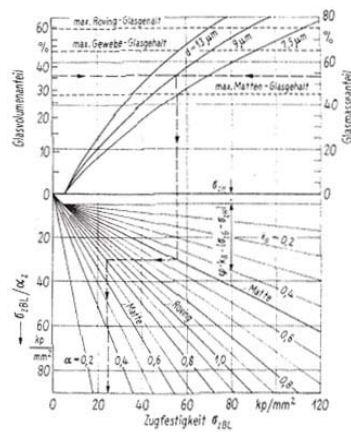
Alta resistència a tracció: La resistència a tracció és directament proporcional al % de fibres de vidre, normalment oscil·la entre el 25 i el 30%.

El % de fibres depèn de la tecnologia de producció, actualment els fabricants tenen una gran experiència en la mecanització de processos per a produir fibres, per tant la resistència a tracció augmenta dia a dia. Parts del edifici es fan en tallers, manualment o amb maquinària.

Dels diagrames següents, el del mig dona informació sobre les rigideses en comparació amb altres materials. Per % en vidre més alts la resistència a tracció del composite pot arribar a estar entre 1,5 i 2 cops la de l'acer.



Densitat, rigidesa i conducció de calor per a diferents composites



Resistencia a tracció en funció de la fracció volúmica de fibra de vidre

1.4-2 Translucidesa

Com a material translúcid els composites de fibra de carboni són aptes per a la substitució del vidre, contràriament al vidre, són menys fràgils, més resistents a impactes i presenten millors valors com a aïllants tèrmics. Per això es van utilitzar des del principi per a poliesportius i piscines cobertes, així com també per a hivernacles. No s'aconsegueixen translucències mes grans del 85%, per això no podem tenir un material totalment transparent.

1.4-3 Aïllant tèrmic (sensibilitat enfront de la temperatura)

Els composites fets de fibra de vidre presenten una capacitat de conducció del calor similar a la de la fusta, al contrari del ciment o el formigó, aquest materials no presenten vies de pas de corrents freds, condició molt important quan s'utilitza per a elements constructius a les façanes.

S'utilitza també en plataformes per al sostre en construccions de tramats de bigues, d'aquesta manera s'hi poden intreconnectar biguetes petites, amb lo qual queda una estructura suport, una subestructura i l'aïllant tèrmic anclat a ella.

En la construcció d'habitatges, les estructures de composite presenten una construcció de bigues similar a la que esdevindria amb el formigó, mentre que els elements utilitzats com a recobriment i cobertures són normalment peces sortides de motlle, això suposa un canvi radical en la concepció dels edificis, el fet de poder produir peces enormement corbades de fibra de vidre, cúpules senceres, estructures simètriques corbades per les dues bandes o cobertures amb formes plegades reproduint les típiques construccions industrials representa unes possibilitats infinites, l'arquitecte es pot deixar portar per les construccions formals sense pensar en si el material serà o no capaç d'agafar aquella forma.

Molts dels edificis on son utilitzades aquestes estructures son de grans magnituds i la funció que han d'acomplir és únicament protegir de la pluja, vent o neu, pertant les exigències en quant a aïllant tèrmic no suposen en aquests casos cap problema.

Al costat d'aquestes ventatjoses propietats tèrmiques trobem la desvantatja del canvi de propietats mecàniques a causa del augment de temperatura.

1.4-4 Gruix

Elements estructurals de composite poden valdre a efectes pràctics com a elements impermeables, si porten una capa de pintura addicional (Gelcoat). A més també és impermeable al gas, per tant fan funció de barrera davant de fums.

1.4-5 Resistència al medi

Es també una gran avantatge enfront d'altres materials de construcció. Tenen alta resistència als medis tant àcids com bàsics. Els composites fets amb fibra de vidre no es poden torrar ni son susceptibles de corrosió, per altra banda la desavantatge en aquest camp es la mala reacció enfront a la llum del sol, sota la radiació UV i també sota l'acció de la temperatura, es redueix considerablement la resistència dels materials i la rigidesa de l'estructura es pot veure afectada a curt plaç.

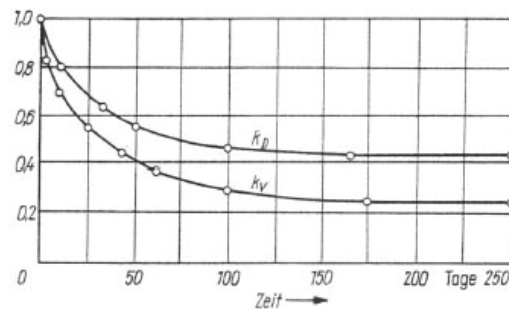
1.4-6 Baix mòdul elàstic

El seu mòdul elàstic és més petit que el dels materials de construcció clàssics. Amb un 40% en pes de fibra de vidre s'aconsegueix un mòdul elàstic de 8.000 N/mm², aproximadament el 80% del mòdul elàstic de la fusta conífera en la direcció de les fibres, o un 25% de l'acer.

En relació amb aquest fet, composites del tipus poliester reforçat amb fibra de vidre s'han estudiat només per a ser utilitzats en estructures amb gruixos de 3 a 5 mm i només en unes sol·licitacions determinades, degut al seu alt preu i mala resposta estructural, en aquestes estructures un mòdul elàstic més baix no juga un paper gaire important. Aquestes estructures poden ser simples o dobles, corbades, articulades o unions espaials de bigues, les possibilitats són infinites però sempre reforçant la construcció amb subestructures de biguetes.

1.4-7 Canvi de propietats

El problema més gran dels composites és el canvi de propietats amb el temps, a causa de la càrrega i la temperatura el material s'afebleix, sobre la construcció hi actuen càrregues durant espais de temps curts i també durant llargs plaços, aquestes segones són només un 30% de les càrregues a curt plaç.



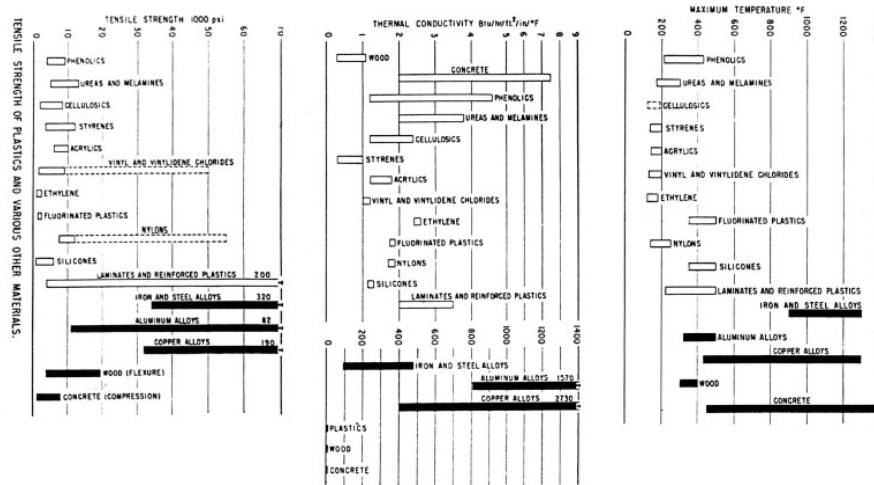
Afebliment d'un prototip al llarg del temps a causa de l'acció de la temperatura

1.4-8 Resistència al foc

El comportament contra el foc depèn en principi del tipus de resina que fa de martiu d'unió de les fibres, el Poliester insaturat és difícilment incendiàble (Material classificat com a B1 segons la DIN 4102). Amb l'addició d'altres materials la resistència al foc pot augmentar, de manera que les resines esdevenen totalment ignífuges. Per això poliesters insaturats i resines epoxy, amb o sense reforç de fibra de vidre no són en cap cas desfavorables a la resistència al foc, pel contrari les parts d'edificis fetes amb fibres de vidre no aconsegueixen normalment una alta resistència en aquest camp, no suficient per a entrar dins de les resistències al foc classificades en les taules de la normativa. Edificis de varies plantes tenen unes exigències de F90, fins avui encara no ha estat possible aconseguir-les amb composites, en casos particulars s'ha aconseguit provar una resistència de F30 en construccions d'habitatges. Parts dels edificis estructurals fetes de composite es poden utilitzar només per a edificis d'una planta.

El comportament exacte contra el foc de les resines de poliester reforçat amb fibra de vidre té relació amb el temps que aguanten sota l'efecte de les flames, i també del comportament de les substàncies tòxiques que se'n desprenen, això

no ha estat fins avui profundament investigat i documentat, encara resta com a pendent per als futurs productors i investigadors.



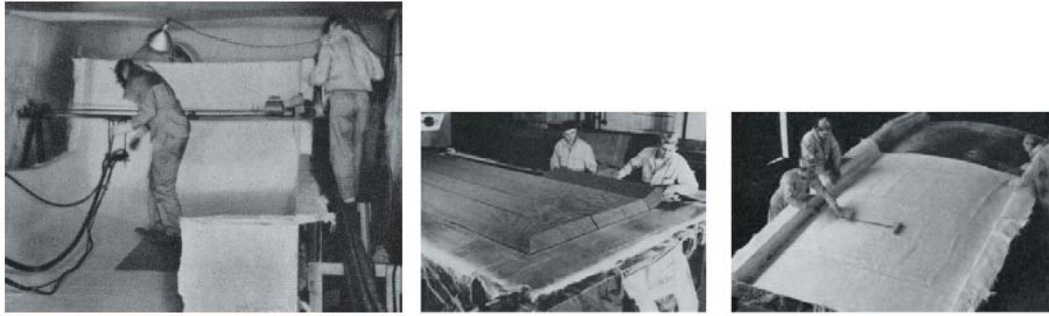
La taula del mig mostra la conductivitat tèrmica de diversos composites

1.4-9 Aïllant del so

La tècnica d'aïllant acústic suposa essencialment 2 problemes: el primer es que la major part de superfícies d'edificis fets amb composites son classificades com a no aïllants, no tenen la capacitat d'absorbir el so. Per aconseguir una acustica correcta s'han de fer modificacions addicionals, aplicar-hi algun material absorbent del so, normalment el problema es resol aplicant a la paret o sostre material de revestiment tèxtil. La superfície del composite és porosa i pertant sense capa de "Gelcoat" no es poden considerar aïllants acústics.

Parts d'edificis de composite que siguin al mateix temps aïllants acústics, densos i resistents al medi encara no existexen. Trobem una millora substancial del aïllant acústic en les construccions estructurals de bigues. Segons l'autor Laeis els materials espumosos en construccions de sandwich poden aconseguir un aïllament tan gran com les cameres de buit. Un comportament encara mes aïllant el trobem en construccions de plaques de sostre i capes de llana mineral, pero aquestes es veuen mancats de les altres propietats necessàries en l'edifici.

El segon problema el trobem en la protecció de la radiació del ambient. Edificis de composites, igual que en totes les construccions lleugeres mostren poc volum d'aïllant acústic. En construccions formades per bigues i parets d'una sola capa s'aconsegueixen valors d'aproximadament 30 dB, per a millorar aquest valor es fan dobles construccions de bigues, com per exemple en la Monsanto House, en casos com aquests són imprescindibles solucions d'aquest tipus perquè una casa així sigui habitable.



Fabricació de les construccions dobles i provisionament d'aïllant a la Monsanto House

L'aparició d'abombaments en edificis de composite a causa dels aïllants del aire i del so no s'ha investigat encara amb profunditat, només se'n poden fer aproximacions, es pot quantificar quant aïllant tèrmic i acústic es necessita per un cas concret. Segons el tipus de composite i la forma del edifici, l'estudi de cada cas es particular, les proves in situ són l'única forma de treure'n resultats correctes.

Werkstoff	Glas- masse- anteil [%]	Dichte ρ [kg/dm ³]	l/ρ [mm · m ²] [kg]	σ/ρ [km · kp/kg]	E/ρ [km · kp/kg]	$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$	Richtpreis [M/kg]	Preis/kg $\frac{\text{Preis}}{\sigma/\rho}$ [M/1000 kpm]
PVC	—	1,38	0,72	3,6	182	11,5	4,5	4,00	1,12
PVC, glas- faserverstärkt	30	1,60	0,62	8,6	530	16,9	5,9	8,00	0,85
GUP, faser- harzgespritzt	25	1,40	0,71	5,0	500	18,9	6,3	9,00	1,80
GUP, matten- verstärkt	30	1,47	0,69	7,2	580	19,8	6,4	10,50	1,45
GUP, gewebe- verstärkt, $k_{fl} = 0,5$	50	1,67	0,6	10,8	1020	24,7	7,1	35,00	3,25
GUP, gewebe- verstärkt, $k_{fl} = 0,9$	60	1,78	0,56	29,2	1685	30,8	8,1	38,00	1,30
GUP, roving- verstärkt, $k_{fl} = 1,0$	70	1,93	0,52	41,5	2070	32,8	8,2	10,00	0,24
Harte Faser- platten	—	1,00	1,00	2,5	400	20,0	7,4	0,80	0,32
Asbestzement	—	1,9	0,53	0,6	1000	22,9	6,5	0,50	0,84
Stahl St38	—	7,8	0,13	4,9	2690	18,6	3,5	2,00	0,41
AlMg3F26	—	2,66	0,38	9,8	2630	31,4	7,2	6,00	0,61
Kiefernholz	—	0,56	1,8	14,3	1785	56,5	17,9	2,00	0,14
Hartschaum	—	0,02	50,0	0,5	20	31,5	37,0	5,00	10,00
Papierwabe	—	0,019	53,0	1,6	385	142,0	102,0	5,00	3,10
Beton	—	2,2	0,45	0,7				0,05	0,07

Taula comparativa de característiques de diferents materials, tant d'açers com espumes i composites

A la taula anterior hi trobem una comparativa de diferents tipus de composites amb altres materials, són relacions de pes i qualitats de diferents materials de construcció. El valor E/ρ es un factor de referència per a la curvatura, degut a la càrrega pròpia per a la mateixa secció de curvatura. Aquí els materials metàl·lics tot i la seva densitat són molt més efectius que els composites. Segons això les estructures de composite en sol·licitacions a flexió s'han de construir de tal manera que la secció final quedi perfectament equilibrada.

El valor arrel de E/ρ permet una valoració del material en relació a la longitud de l'element, aquí el composite és igual d'apte que l'acer. Per construccions amb sol·licitacions a tracció els composites són particularment apropiats. El valor de

longitud resistent (σ/ρ) del poliester és actualment un 25% del de la fibra de vidre, o sigui que es troba per sobre del valor de l'acer. No obstant al comparar preus i posar en contrast propietats de rigidesa en funció del preu per kg de material, els constructors prefereixen no utilitzar-lo, degut al que costa la unitat de força resistent a tracció per km. El valor en la taula anterior mostra com aquesta relació no ha millorat en els últims temps.

Les avantatges que suposen les qualitats positives dels composites, fan que se'ls consideri molt bons com a material per a estructures portants. Abans de ser utilitzats en construcció van ser emprats per a fabricació d'avions i vaixells.

Les tècniques desenvolupades i els coneixements adquirits en la construcció d'avions amb composites, es van poder aplicar un temps mes tard en l'edificació, concretament en estructures per a edificis de grans dimensions.

Un cop acabada la segona guerra mundial, els fabricants d'avions passaren els seus coneixements a la construcció, tant de càlculs com de processos industrials. De la construcció de vaixells se n'extreu també directament la tecnologia de fabricació i l'estructura en si mateixa.

Mes endavant amb el mateix objectiu, constructors, arquitectes i enginyers uneixen forces i coneixements per a desenvolupar composites de fibra de vidre, amb l'interès comú de construir edificis d'alta envergadura.

El problema de la protecció contra incendis es crucial a resoldre, en ell s'hi ha d'invertir molt de temps i diners en investigació, la qualitat negativa del baix mòdul elàstic ha de ser contrarestat amb plantejaments de disseny apropiats, i el material utilitzat ha de ser correctament escollit per a l'aplicació que li correspon.

Arribarà un dia en que la major part d'edificis de grans dimensions seran coberts amb membranes de composite, ja que els costos seran baixos, la producció efectiva i els problemes d'aïllament i protecció seran solucionats.



Diferents exemples de fabricació de vivendes i cobertures

2- Cronologia històrica dels composites en la construcció

- Al 1900, desenvolupament de l'estàtica de les construccions d'acer.
Fi de la 2^a Guerra Mundial: Unió de coneixements amb enginyeria aeroespacial
Al 1950, desenvolupament de l'estàtica del formigó armat
Actualment, tècniques d'elements finits.
- 1907 Patent per a la producció de resines fenòliques de Leo Hendrik Baekland (Bakelita)
Reforç de fusta (amb fibres d'amiant, retalls tèxtils i llana) i de teixits d'amiant.
- 1910 Comença la producció de Bakelita pel químic Belga L.H. Baekeland.
Es funda l'associació de Bakelita a Berlin
Comencen les primeres produccions per mitjans propis de Composites.
- 1928 S'obté per primer cop PMMA per Röhm i Haas a Darmstadt (Alemanya)
Fabricació de vidre de seguretat amb estructura sandwich de Poliàcrilat polimeritzat, per O.Röhm.
- 1930 Fabricació del Poliestirol, utilització per a joguines, material d'embalatge i per a espuma aïllant.
- 1933 Fabricació de l'Acrylglas i ràpida aplicació com a fracció de vidre en avions militars.
Carleton Ellis (USA) obté la primera patent per produir resina de polièster insaturat.
- 1935 Comença la gran producció tècnica de fibra de vidre per Owens-Corning Fiberglas Corporation (USA)
- 1937 Producció de Polièster insaturat per Ellis Forster (USA)
Patent de Bayer pel procés de la poliaddició per a fer el poliuretà.
- 1938 Producció de la resina de polièster per Ellis Forster
Patent per a la producció de resines Epoxi de P.Castan
- 1940 Producció de Poliuretà (PUR) per IG-Farben, (Leverkusen)
- 1940 E.G. Rochow (USA) inventa un procediment industrial per a la producció de silicona sintètica.
- 1942 Desenvolupament tècnic del polièster reforçat amb fibra de vidre (US Rubber Company)
- 1943 Primeres parts fetes amb estructures sandwich per a avions de fibra de vidre.
Laminats de polièster insaturat com a capes de sostre i fusta de balsa com a material resistent/estructural.
- 1945 Producció d'estructures tipus panel d'abella per L.S. Meyer
Tècnica per a la producció de carcasses de composite per G.Lubin i W. Greenberg
- 1947 Producció industrial de resines epoxi
- 1950 Principi de la producció de polièstirè insaturat a Alemanya
- 1951 Primera patent de Pultrusió

- Tècnica del estrangulament per a la producció de perfils
- Utilització de poliols de polièster per a la producció d'espumes, es fan reaccionar poliols amb catalitzadors creuats.
- 1952 Preparació dels fonaments per a la tècnica de producció d'espumes de Poliuretà, per Bayer, a Leverkusen fins a 1954.
- 1953 S'inventa la tècnica Spray Cocooning
 - Utilització del vinil làtex de secat ràpid espraïable, inicialment per John Zerning i un grup d'estudiants sota la direcció de Richard Baringer al Illinois Institute of Technology.
 - Es supera la barrera dels forats en composites mes grans de 0,8 m
 - Producció de cobertes del tipus "Hipersuperfícies"
- 1953 Hermann Schnell obté la patent per al Policarbonat (PC)
- 1956 Producció tècnica del Policarbonat
- 1959 Comença la producció de fibra de carboni per Union Carbide
- 1971 Comença la producció de fibres d'aramida per DuPont

3- Tècniques de producció

Hi ha una gran quantitat de mitjans de producció de composites per a aplicacions en construcció, la majoria de processos tenen l'objectiu d'aconseguir un contingut més alt en fibres, per això s'hauria de parlar més de fibres de material reforçades per una matriu que no pas de materials polimèrics reforçats. Les fibres úniques es consideren com a filaments, les formes que hi ha disponibles al mercat tenen dissenys simples, cordes amb fases paral·leles, els anomenats Rovings, fibres llargues desordenades o teixits. Fins i tot podem trobar capes de teixits tridimensionals, per a produir edificis amb estructures tipus sandwich o similars.

3.1- Dissenys i experiències prèvies i paral·leles amb altres materials

Construir estructures amb composites no vol dir obligatoriament el desenvolupament de noves estructures ni tampoc de nous mètodes de càlcul, es a dir que en molts casos sistemes ja coneguts, com per exemple estructures de plecs es modifiquen per tal d'adaptar el nou material als requeriments desitjats, en altres casos però les antecessores estructures de ciment ja no tenen gaire en comú amb les noves.

S'han fet plataformes laminars de fibra + matriu amb la mateixa tècnica que la del formigó armat: el material que aguanta a compressió és la resina i el material que aguanta a tracció son les fibres.

La construcció d'estructures de composite arriba de forma teòrica i pràctica en tallers de fabricació, però mentre amb el formigó armat era possible de fer

construccions planes al mateix temps que estructures corbes de tipus continu i d'aquesta manera aconseguir un efecte visual de membrana, amb composites es van començar a fer estructures planes a parts individuals, com peces sortides de motlle que encaixades unes amb altres constituïen una superfície. Per altra banda amb la construcció de formigó no es possible portar els components de l'edifici a l'obra i allà ensamblar-los, s'ha de construir alla mateix, amb composites pel contrari es necessita prèviament un taller de fabricació i un cop a l'obra només realitzar les unions.

Aquests fets plantejen alguns problemes constructius i d'aquí en neixen les seves conseqüents teories de desenvolupament o possibles solucions.

1- Nova tècnica d'unions

2- Nova teoria d'estructures planes muntades per parts

El nou material encara es regeix amb les teories del formigó o de la construcció amb fusta. S'ha de desenvolupar una teoria nova pròpia que defineixi be els processos a seguir en la producció.

3- En el camp pràctic, tenint en compte les propietats d'aquests materials s'han de desenvolupar tècniques aplicables únicament a ells per a treure'n el màxim rendiment.

Els punts 1 i 2 ja s'han dut a terme fent proves prèvies i assajos amb prototips, així doncs les característiques dels materials ja estan tabulades.

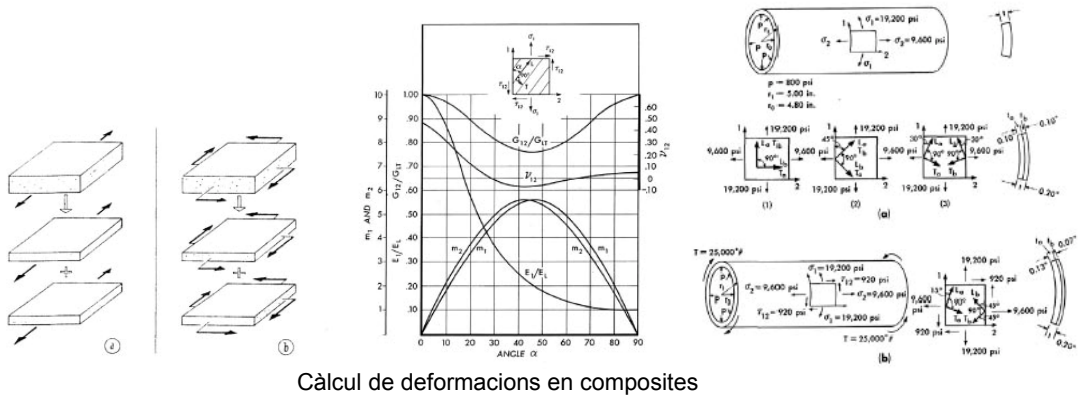
Al començament només es feia recerca d'algunes poques propietats. Els pioners en aquestes tècniques treien els valors en gran part de proves fetes amb materials construïts per ells mateixos. Després de la segona guerra mundial, amb l'agrupació de coneixements extrets de la construcció d'avions, es va aconseguir un gran avanç tecnològic. La major part de la informació recollida en aquesta època la trobem descrita en la literatura per Sonneborn i Beyer. Aquestes teories van ser desenvolupades perquè la construcció dels laminats en detall no és comparable amb cap altre material. A Alemanya els constructors d'avions Puck i Reinhardt van ser els encarregats del desenvolupament de la teoria de "mall/red" i de la teoria de laminats.

La teoria de "red" te que veure amb la generalització de que la xarxa de fibres absorbeix totes les sol·licitacions de càrregues externes, la resina doncs s'encarrega de d'assumir i repartir la part de la càrrega a compressió, aquest important repartiment de càrregues fa que la resina actuï en tot el conjunt del material.

Per la teoria clàssica dels laminats, fibra i matriu participen d'igual manera en el repartiment de càrregues. Puck i Reinhardt calculen els composites disposant un nombre suficientment gran de fibres de reforç per a la repartició de càrregues (també es pot fer amb cordes trenades de roving). No obstant aquest mètode de relació de seccions de vidre te una desavantatge i és que el resultat no es pot comparar amb el de cap altre material, només en tenim els paràmetres següents: rigidesa, mòdul elàstic i tensió.

El que els enginyers sabien de les tècniques de construcció aeroespacial, resta ara com a subdisciplines de càlculs d'estàtica aplicades a la construcció.

Els enginyers aeroespacials continuen desenvolupant processos de càlcul en avions que segueixen interessant al mon de la construcció, com per exemple la teoria d'elements finits, molt interessant i ben acceptada per als enginyers de construcció.



Càlcul de deformacions en composites

De tal manera que un cop es superen les fronteres del camp propi, comença un posterior desenvolupament de les diferents disciplines juntes. Així doncs, en la història dels últims anys s'ha vist una fusió de coneixements teòrics sobre estructures lleugeres entre construcció d'edificis i construcció aeroespacial.

Amb el mètode dels elements finits es va fer possible resoldre completament problemes de camps i calcular qualsevol tipus d'estructura superficial plana i també de components separats de composite. No obstant fins al 1980 cap estàtic va poder fer-ne us per al càlcul d'estructures amb composites, perquè la tècnica de càlcul es va desenvolupar inicialment en uns camps molt específics i no tots els ordenadors personals ho podien calcular.

Per al desenvolupament de la tècnica d'unions s'han seguit diferents camins, molts cops s'ha arribat a unions incalculables, l'objectiu de molts enginyers és encara resoldre aquestes qüestions i així assumir la separabilitat "en peces" d'un edifici. Això va ser una utopia, un desig mai complert que s'ha intentat solucionar des del començament de l'època industrial. Així, la major part de connexions i unions han estat inspirades en la construcció amb acer, encara que ja eren conegudes les tècniques d'encolar, les condicions per a encolar components a l'obra i les tècniques conegudes inicialment no eren suficientment ben desenvolupades com per a ser dutes a terme amb efectivitat.

La unió de fibres i matriu pot ser de proporcions molt diverses en funció essencialment de la tècnica de producció. Totes les tècniques de producció de materials reforçats per fibres estan descrites en aplicacions per a construcció de vaixells, aquests materials es formen mitjançant processos d'enduriment per pressió i temperatura, només a excepció de la resina de polièster insaturat per a

la unió amb la fibra de vidre, que també pot endurir-se a temperatura ambient i sense pressió.

És indispensable per a la producció en serie de parts d'edificis de composites donar a l'edifici la forma desitjada. En la majoria de casos les aplicacions són per a cobertes.

Els motlles o contenidors de les peces poden ser de fusta, guix, acer o també algun altre tipus determinat de composite, depenent del nombre de peces que han de formar-lo. Els motlles de guix es solen fer d'una fins a tres peces, els de fusta es poden arribar a fer de 50, els de composites i acer poden estar formats per un nombre de parts quasi il·limitat.

La utilització d'aquests motlles mostra la proximitat dels composites amb el ciment, que també és format en un motlle en un procés d'enduriment, la transformació en aquesta forma preconfigurada així com la seva grandària pot divergir molt en uns casos dels altres.

Els composites per estructures, per motius econòmics només poden produir-se en gruixos de 3 a 5 mm, les superfícies de les cobertes son però mes exactes, les toleràncies són més petites que en les construccions amb ciment. Per això és més econòmic fer més nombre de peces, d'aquesta manera l'estructura engalzada feta de composite constarà de molts sub-components petits que es podran muntar a la mateixa obra, mentre que amb formigó sempre s'ha d'encofrar tota l'estructura al moment de la construcció.

Les tècniques de producció de fibres de vidre es divideixen en manuals, possibles sense la intervenció de maquinària específica i en processos mecànics, en els quals és indispensable maquinària i pensar en els corresponents costos addicionals que això comporta. Enmig dels dos també hi trobem processos que es fan manualment però amb alguna ajuda de maquinària en alguns punts de la cadena, ja sigui entremig o a l'acabat. Una desavantatge és que aquests processos només possibiliten una petita fracció de volum de les fases, així doncs en processos semimecànics, la resina és la part més abundant en el composite i també la més cara.

En aquests materials la càrrega esta molt ben repartida, però un volum més gran de fibres és una garantia de rigideses més altes i contraccions menors, un volum més gran de fibres facilita fer capes mes primes, però només s'aconsegueixen amb processos totalment mecànics.

Hi ha diferents procediments per a augmentar el contingut en fibres, com per exemple un procés posterior d'aplicació de pressió o a través de pressió a les fases, que es troben entre dos contramotlles, amb la finalitat de després injectar-hi només la resina, però per això són imprescindibles les instal·lacions pertinents. Una variant es el pretreballat de teixits preimpregnats (prepregs), son processos automatitzats fets per robots.

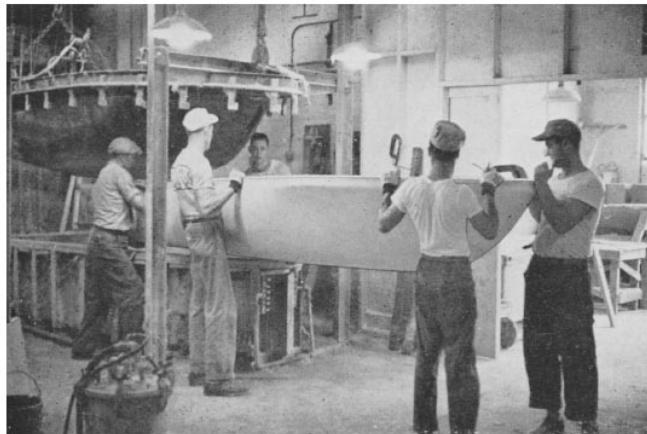
La inversió econòmica que s'ha de fer per comprar maquinària, de moment només és rentable per a fer series llargues. Per aquest fet, gairebé tot el que s'ha construït des dels inicis dels composites fins ara ha estat de forma manual o semimecànica.

3.2- Tècniques de treballat per a fer cobertures

Es desenvolupen a partir de la base de l'encolament de plaques amb plaques, per a avions i edificis lleugers. Especialment es desenvolupa per a composites reforçats amb fibra de vidre.

Mes endavant es desenvolupen processos de recobriment i de pultrusió (es fan filaments a través d'un procés de pressió), al 1945 G.Lubin i W. Greenberg patenten un sistema per a fer recobriments de fibres, tots aquests processos són aplicables posteriorment també a altres composites.

Amb aquests procediments de recobriment es van implantar les bases per a la realització de recobriments cilíndrics i aquestes formes constructives van entrar a l'enginyeria de construcció, es van començar a produir sitges i altres elements similars. El procediment va ser utilitzat per Schwabe per a tota una sèrie d'altres aplicacions, com per exemple el "filament winding" avantatjós pel seu preu més baix i unes velocitats de producció relativament més altes. Un cop formats, els cilindres es tallen en 2 o 3 parts i d'aquesta manera s'aconsegueixen cobertures que poden servir com a sostre o com a superfícies coberta.



Construcció de barques similar a la posterior construcció de cobertures

A continuació es descriuen tots els procediments productius per a composites reforçats amb fibres:

3.2-1 Procediments manuals

Amb aquest procediment es poden formar components de qualsevol forma i mida, els materials de reforç (fibra de vidre i teixit) es dipositen manualment capa sobre capa en motlles ja preparats i són impregnats amb resina, mitjançant pinzells i corrons. El laminat s'endureix sense pressió. S'obtenen els següents resultats:

- Tolerància del gruix de la paret: per un gruix de 2-3 mm = +- 0,4mm
- Radi mínim: major o igual a 5mm
- Inclinació dels costats: entre 1/12,5 i 1/25
- La laminació de l'armat o parts d'unió no presenta cap dificultat

- Percentatge en massa de fibra de vidre: Matte = 20/30 %, teixit = 40/60 %, teixit Roving = 35/45 %.
- Enduriment en fred a temperatura ambient en 30-90 min, post enduriment en 5 hores.
- Entre 3 i 3,5 kg/h + força de treball (per aconseguir el material acabat)

En processos de laminat manual, els Matten són fabricats pensant en que puguin ser guardats d'una forma optimitzada i en el moment de la seva utilització impregnats amb resines i ventilats. El material laminat es processat capa a capa. Aquesta feina manual requereix una ampla formació, a més de maquinària adient i un equip de treball. S'han de prendre les mesures adequades de protecció laboral a causa de les emissions (màscares de gas i sistema de ventilació adequat)

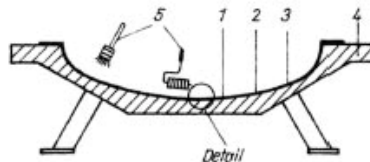
Aquest mitjà de producció és apte particularment per a parts d'edifici individuals, (modulars) tan per la forma exterior com per l'adaptació de les fibres a les exigències.

Un tractament tèrmic posterior (Trempe) millora la duresa final i disminueix les emissions de l'edifici un cop acabat,

El procediment és apte per a la reproducció d'edificis a partir d'un patró, edificis representatius.

Avantatges: costos baixos d'inversió i grans superfícies d'edifici preformades.

Desavantatges: les pèrdues relativament altes de material i la pèrdua de temps (procés lent).



3.2-2 Procediments semi-mecànics

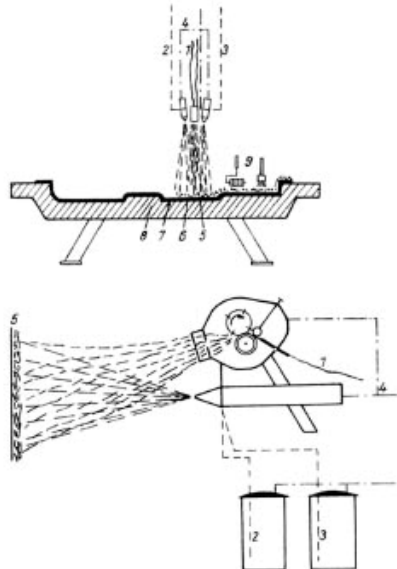
3.2-2.1 Procediments de dispersió de fases

Dispersió d'una mescla de rovings tallats i posterior acceleració dels mateixos barrejats amb la resina dins d'un motlle, també per tècnica de dispersió, finalment igual que en el procés dels laminats manualment és treballat amb pinzells i corrons. El laminat final també s'endureix sense pressió. Se n'obtenen els següents resultats:

- Tolerància del gruix de paret: per 3mm de gruix = +- 0,5mm. Pels canvis de contorn es pot arribar a comptar amb fins a 3 mm d'acumulació de material.

- Radis mínims: intern, major o igual a 10 mm; extern, major o igual a 5 mm.
- Inclinació dels costats = 1/12,5 i 1/25
- La laminació d'armats tampoc presenta en aquest cas cap complicació.
- Percentatge en massa de vidre: 20/30 % de Matte.
- Enduriment en fred a temperatura ambient en 30-90 min, post enduriment en 5 hores.
- 5 kg/h + força de treball (per aconseguir el material acabat)

El procediment és apte per a edificis patró, peces sortides de motlle i series acabades, i és ideal per a formes esfèriques i grans superfícies fortament corbades, també construccions especials o específiques. L'alt grau de mecanització és una avantatge davant dels laminats manuals, sempre que se'n facin series suficientment llargues. Com a desavantatges hi trobem les mateixes que a l'anterior grup.



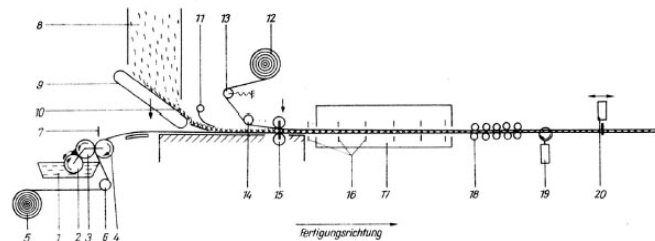
3.2-2.2 Processos mecànics d'injecció i de buit

Per injecció s'entenen mètodes de producció de formes mitjanament grosses, amb un motlle de com a mínim 2 parts que tanca deixant una cavitat interior llisa. Primer entra el material de reforç en una part del motlle i després es tanca, seguidament s'injecta la resina, ja sigui mitjançant pressió (mètode del buit) o injecció. En surten les següents característiques:

- Superfície llisa pels dos cantons
- Tolerància del gruix de paret: per 3 mm = +/- 0,5 mm
- Radi mínim major o igual a 5
- Inclinació dels costats: 1/50

- Laminat de l'armat o dels connectors, és possible
- Percentatge massa de vidre: 20/30 % Matte, 35/55 % teixit
- Enduriment en fred a temperatura ambient en 30-90 min, post enduriment en 5 hores
- Entre 6-8 kg/h + força de treball (per a aconseguir el material acabat)

El procediment és apte per a formes mitjanament grans i grans, s'hi poden fer forats entremig i intercalacions com marcs o cobertures, així com també elements de connexió complicats. Es poden arribar a produir formes enormement complicades. Es aplicable només a produccions en sèrie, ja que només es poden produir amb una premsa hidràulica o pneumàtica. Es poden fer sèries curtes (100 elements), mitges (1000), o llargues (10000).

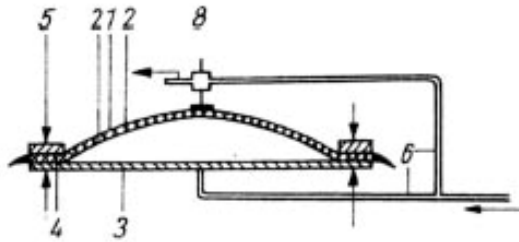


2.2-2.3 Processos de bufat

Amb aquest procediment es poden fer formes lleugeres i arquejades. Les fibres de vidre es conformen en fred i sense pressió, la resina s'impregna entre 2 làmines i aquestes són posteriorment inflades mitjançant aire a pressió, així s'endureixen. El resultat és que les dues bandes de la superfície són llises, es poden aconseguir grans superfícies amb gruixos molt baixos. Se n'obtenen els següents resultats:

- La tolerància del gruix de paret depèn de la irregularitat del Matte
- Inclinió dels costats: 1/50
- Laminat de l'armat o dels connectors, es possible
- Percentatge massa de vidre: 20/30 % Matte
- Enduriment normalment en fred, en calent s'accelera l'enduriment.
- 3 kg/h + força de treball (per a material acabat)

El procediment és específic per a una o més cobertures. La petita inversió que suposen possibilita la producció en sèrie així com també la producció de components especials en petit nombre de peces, la desavantatge és que es requereix molt espai.

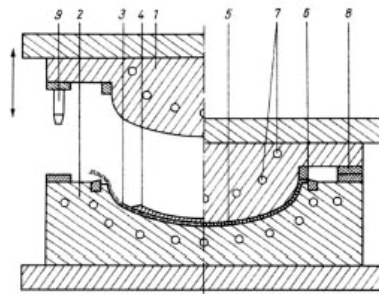


3.2-3 Procediments mecànics

3.2-3.1 Premsa en calent

Es fan components preacabats de resina i fibra de vidre, són els anomenats preregs, en un motlle d'acer preescalfat, es premsa i es dona la preforma, després es deixa refredar. Es poden fer peces amb toleràncies molt precises. Amb motiu del gran cost de la inversió només és apte per a sèries llargues, a partir de 10000. En surten els següents paràmetres:

- Tolerància del gruix de paret: entre 0,1 i 0,3 %
- Radi mínim: major o igual a 5mm
- Inclinació dels costats: entre 5° i 15°
- Percentatge massa de vidre: 20/30 % Matte
- Enduriment en calent: 40-60s/mm gruix de paret
- Entre 15-20 kg/h + força de treball (per a material acabat)



3.2-3.2 Premsa en fred (procediment de baixa pressió)

En aquest procediment el Matte o teixits es posen en un motlle de pressió i es barregen amb resina que ja porta una estona remonent-se, sota l'efecte d'una pressió baixa el conjunt és endurit dins del motlle. Es pot utilitzar per a sèries petites i mitjanes. Es fan elements de fins a 5m² de superfície. Contràriament als laminats manuals, aquests tenen les següents avantatges: alta productivitat, millor qualitat i mes altes rigideses, a través de continguts més alts de vidre. La desavantatge és la gran inversió econòmica que s'ha de dur a terme.

- Tolerància del gruix de paret: fins a un 1,5 %
- Radi mínim: major o igual a 5mm
- Inclinació dels costats: entre 1/25

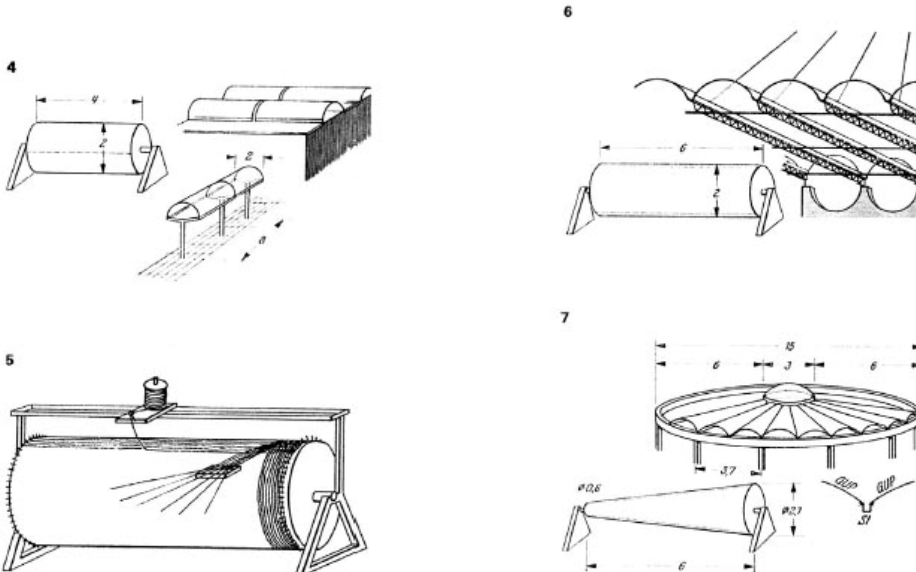
- Percentatge massa de vidre: 25/45 % Matte, teixit normal 50/60 %, teixit Roving 30-45 %
- Enduriment en fred
- 10 kg/h + força de treball (per a material acabat)

3.2-3.3 Mètode de cobertura

Es fan cossos còncaus simètrics, per simetria de rotació, en els quals s'hi tensen cordes de fibra a través de tota una àrea, un cop definida la superfície s'impregna amb resina i amb l'ajuda d'un cilindre rotatiu que aplica compressió es dona la forma final a la cobertura.

També hi ha processos on la coberta s'endureix en el motlle.

Les cobertures esfèriques i cilíndriques es fan amb recipients on s'aplica alta pressió. El producte acabat presenta formes simples prismàtiques, cilíndriques o esfèriques, i s'utilitzen normalment per a fer recipients, tubs, conductes, sitges, cisternes etc. Així com també bigues de totes les grandàries. S'hi aconseguen introduir una gran proporció de fibra de vidre. Dividint aquestes formes en dues, tres o quatre parts es poden aconseguir peces de gran llum, cobertures per tapar plantes radials, voltes amb funció de marquesina...



- Percentatge massa de vidre: 25/45 % Matte; teixit: 50/60 %; teixit Roving: 30-45 %
- Enduriment en calent
- 20kg/h + força de treball (per a material acabat)

En els processos d'enrotllament de fibres (filament winding) els Rovings són impregnats amb resina i segueixen un procés robotitzat, són dipositats dins un

motlle rotatiu on la resina endureix. El producte aconseguit és realment d'altres prestacions.

La diversitat de formes és però limitada, aquest procediment és sobretot interessant per a recipients, depèn de la cinemàtica del robot i de la dilatació del motlle.

Altres procediments de producció són derivats del treballat de polímers no reforçats, les matèries primes son lleugerament agrupades i comprimides a dins del motlle, allà s'endureixen, només es poden fer servir les que tenen una proporció relativament baixa de retalls de fibra curta.

Alguns procediments són per producció en sèries llargues, només aptes per a parts d'edificis de grandària limitada, com elements de la façana. Requereixen d'instal·lacions industrials per a ser produïts.

3.2-3.4 Poltrusió.- Procediment per a fer cordes a pressió.

Es fan perfils de parets gruixuts a través d'una premsa de corda, hi ha perfils similars en la construcció en acer que s'utilitzen com a bigues o com a elements de tancament.

Els perfils es poden fer, per exemple, amb processos de pultrusió. En ells, els Rovings són barrejats i conduïts a un motlle patró amb la secció del perfil, són impregnats amb resina i enfortits dins del motlle. Per acabar, son tallats en les longituds desitjades.

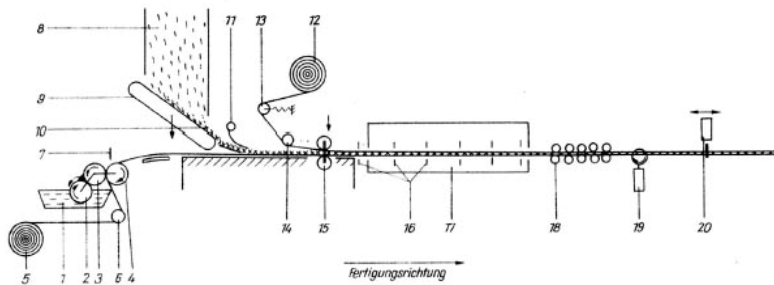
S'aconsegueix un contingut molt més alt en fibres que en el procés anterior, no obstant les fases estan predominantment orientades en una direcció, evidentment el perfil acabat serà més apropiat per a càrregues longitudinals i menys per a torsió. Les construccions que d'aquí en surten, recorden les clàssiques construccions de formigó armat. En aquest cas, degut al mòdul elàstic relativament baix del material, són necessàries majors seccions. Les habituals unions cargolades seran les justes i necessàries per a un funcionament òptim i una optimització de material.

Amb tecnologies similars es fan plaques de sostre, que posteriorment a l'obra s'eleva i s'incorporen a l'estructura, en construccions per exemple de ponts.

3.2-3.5 Procediment per a fer plataformes laminades

Amb aquest procediment es poden fer superfícies contínues de composite, ja siguin planes o ondulades. Per una dosificació i mescla automàtiques, la mescla de resina corre sobre un rotllo, una superfície dura, on a causa de l'aplicació de calor s'endureix i posteriorment és tallat. Aquest procediment altament mecanitzat es d'alta productivitat i es apte per a productes de gran massa, com plataformes llargues, per aquest motiu te costos d'inversió alts.

- Percentatge massa de vidre: Roving o Matten, 25 %
- Enduriment en calent
- 100kg/h + força de treball (per a material acabat)

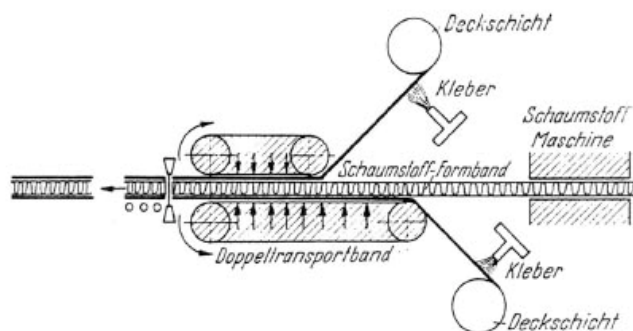


3.2-3.6 Fabricació d'estructures de bigues

Es diferencien 2 procediments:

- 1) Quan tot el tram de bigues prefabricades són unides amb la plataforma que fa de sostre a través de pressió.
- 2) Quan s'utilitza el mètode de l'espumat. Les construccions còncaues preacabades son espumades, de tal manera que la construcció presenta un doble reforç.

Pels dos procediments hi ha el mètode manual i el mecànic. Es similar al laminat de plataformes, es poden fer també de manera continuada, inclús també les plataformes de sandwich.



3.2-4 Conclusions

Amb gairebé 20 anys d'experiència en diferents mètodes de producció, l'autor Schwabe assenyalava més de 100 paràmetres influents en la producció de composites amb components estructurals.

Al costat dels costos del material hi ha els costos d'acabat, el segon factor més determinant per a fer possible l'obra. Per a l'elecció del procés productiu s'han de tenir en compte els càlculs previs i la quantificació d'unitats, com més endavant veurem en el camp dels composites encara queda molt per a precisar i sempre es treballa amb aproximacions. En el següent quadre es troben els estàndards actuals:

Verfahren	Formenbau	Stückzahlen*	Bemerkungen
Handauflege-	1 Schalung	bis 400	Lohnintensiv, nur 1 glatte Oberfläche
Handeinlege- mit Harzinjektion	2 leichte Schalungen	bis 1000	arbeitsparend, umweltfreundlich, 2 glatte Oberflächen
Faserspritzen	1 Schalung	bis 400	Schutzkabine erforderlich, nur 1 glatte Oberfläche
Kaltpressen	Presse, 2 Formen	400-3000	} nur für kleinere Teile Höchstgrenze 4 m ² 2 glatte Oberflächen
Heißpressen	Presse, 2 Formen	ab 3000	
Spritzpressen	Presse, 2 Formen		nur kleinere Teile
Kont. Imprägnierung	Anlage		Spezialverfahren für glatte und Profilplatten
Pultrusion	Ziehform		Profil, lineare Bauteile
filament winding	Anlage ggf. Holzkern		Rohre und Hohlkörper lohnsparend

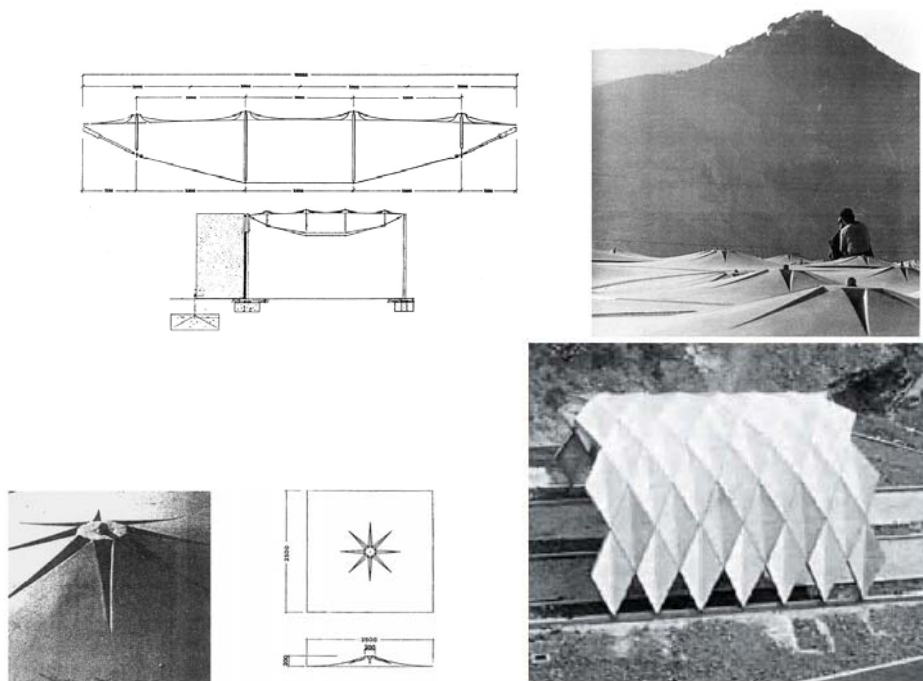
Estructures d'un nombre de components inferior a 400 són encara realitzables amb procediments manuals, estructures de fins a 1000 unitats es poden realitzar també manualment amb mètodes de pinzell i corrons, per a un nombre d'unitats mes grans aquests tipus de tècniques deixen de ser rentables.

L'experiència però en aquests casos, no esta lligada enlloc, cada cas es nou. Heinz Isler per exemple, va fer un petit taller a la mateixa obra per a facilitar el treball d'unió de les unitats formants de la coberta de la gasolinera de Thun, aquestes plataformes es van fer amb procés de polarització (dispersió de fibres) a França. Quelcom semblant va passar amb la construcció de la "Bulle Six Coque".



Gasolinera de Thun i Bulle Six Coque

També Renzo Piano utilitza aquest mètode per la fàbrica de sofre i també per les sol·licitacions a tracció a l'estructura de Compagno, a Gènova.



Compagno (Gènova) i cobertura de la fàbrica de sofre

Aquest mètode dona un rendiment constant i alta qualitat en cas de que contingui un alt volum en fibres. Piano va fer estructures d'un rendiment realment alt i pes baix ($g = 0,04 \text{ kN/m}^2$).

El mètode de la cobertura més efectiu i econòmic és el que s'utilitza per a fer sitges i contenidors, així com també per a formes de mig cilindre, procés que s'ha utilitzat des dels inicis dels composites fins a l'actualitat. Les estructures fetes amb "filament winding" o filaments creuats també són de les més econòmiques, exemples en són la doble curvatura de la coberta de la depuradora de Heinz Isler o l'estructura de Montazni- Relaisstation, la cella GFG, o la cobertura de Transstar-Villa, amb sol·licitacions a flexió.

Amb aquests procediments es poden realitzar les formes arquitectòniques estructurals que es vulguin, com es va fer a la plaça del mercat (Markthalle) de Stephane Du Chateau. Amb ells s'ha fet més efectiva la producció de grans superfícies.



Plaça del mercat de Stephane Du Chateau

3.3- Tècnica de unions

Les estructures de composite són en general estructures planes. Com hem dit, normalment estan formades per la unió de varies parts individuals. D'això se n'extreu:

- El fet de que els components de l'edifici depenen inevitablement d'un pas previ pel taller.
- Han de ser transportables.
- Un cop a l'obra, han de ser fàcils d'unir entre elles, sense cap més necessitat del taller, ja sigui amb pega o amb unions cargolades, ha de ser factible tancar el conjunt del sistema.
- D'aquesta manera l'edifici pot arribar a ser de vegades mòbil, muntable i desmuntable.

Les unions de les parts individuals de composites reforçats amb fibra de vidre tenen un paper molt important. Per raons de producció cada part té com a màxim una superfície de 5 m². Les estructures resultants són d'una gran envergadura, les llums mitges són molt llargues, per això han d'estar fetes amb varis elements. Les estructures fetes amb composites de fibra de vidre solen ser planes, el seu punt de tensió màxima carrega al mig de l'estructura, mitjançant tensió homogènia de membrana.

Segons el tipus de unió, aquestes tensions de membrana són desviades del seu pla mig, es transporten des d'aquests punts i es concentren en altres superfícies, d'aquesta manera el comportament de l'estructura en aquests punts de unió resta inalterable, d'això se'n diu aconseguir un efecte de càrrega nivellada. Aquestes possibilitats d'unió en estructures de composite estan ja ben medides i definides. El treball d'investigació de Stefan Linne fet a la Universitat Bauhaus de Weimar, anomenat FOMEKK, versa sobre aquest tema.

Entre les particularitats de les unions fetes amb composites trobem que, en comparació amb els metalls, els composites presenten una menor resistència a torsió i resistència en els punts de suport. A més, el laminat presenta tendència a la delaminació sota tensions d'arrencament, per això són recomanades unions encolades (Bonded joints) i reblades (Riveting).

Hi ha molt poca informació publicada sobre unions i també sobre coles o unions cargolades. Sonneborn i Hintersdorf parlen de unions en general, i en altres llibres es descriuen unions amb passadors que són factibles d'utilitzar només per a sol·licitacions a compressió.

Per tant, no és sorprenent que molts constructors prenguin dels manuals tècniques ja ben dominades de les unions cargolades, encara que aquests siguin poc accessibles. No es presenta tampoc gaire informació sobre tornilleria, distàncies mínimes als cantos, tensions a torsió i tensions dels cossos.

Les unions cargolades es fan fàcilment, són unions desmuntables que permeten dur a terme el concepte desitjat d'edificis desmuntables. Per aquest motiu, moltes vegades no s'utilitzen unions encolades, encara que aquestes últimes responen millor a la repartició de càrregues, ja siguin planes o superficials, donat que hi ha més superfície d'unió. Una solució intermèdia l'ofereix l'anomenat

atrapament o pinçament, que com en les unions cargolades es tracta de unions puntuals amb grans superfícies de repartiment de càrrega, els punts d'unió són punts encolats al laminat de fibra de vidre.

3.3-1 Unions tancades

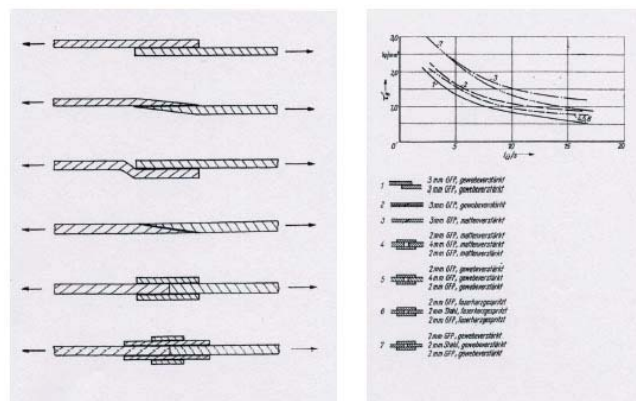
Són unions indivisibles, al principi no van ser gaire utilitzades per falta de coneixements però degut a la seva repartició de càrregues continuada s'han fet servir també com a parts d'edifici.

3.3-2 Unions encolades

S'utilitzen bastant en cobertes, no es diferencien gaire de les de plataforma. Plataformes primes i rígides són encolades unes amb altres mitjançant capes primes de material elàstic. L'observació simplificada de les sol·licitacions mecàniques indica que les parts d'unió estan sotmeses essencialment a tracció/compressió, i la cola elàstica influeix en contra de l'empenyiment.

Les formes de les unions són solapaments contràriament a les unions encolades entre metalls, l'influència del gruix de cola a la unió és bastant menor en les unions composite-composite i composite-Metall.

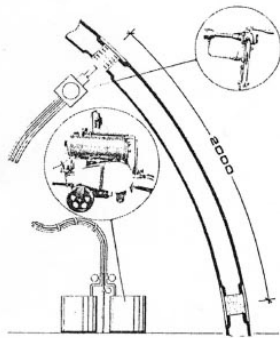
En el desenvolupament de les coles encara queda molt per avançar però és un camp on cada dia es descobreixen nous avenços.



3.3-3 Unions de composite amb composite

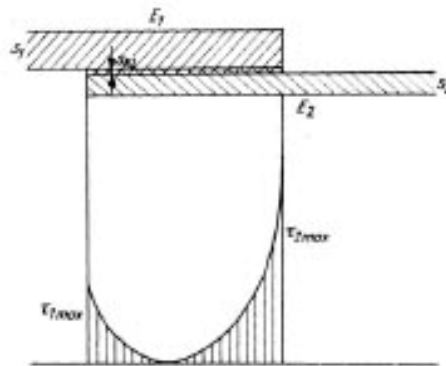
Un excel·lent exemple per aquest tipus d'unió n'és la cúpula de Renzo Piano (14 ena Triennale de Milan al 1967). Les soldadures químiques estan fetes per mitjà de resina de poliestirè i els elements modulars estan fets pel procediment de dispersió de fibres, de fibra de vidre i polièster. La soldadura es fa amb l'objectiu d'aconseguir una vulcanització del material. Una fusió de la superfície no es pot

produir, per això en punts complicats s'utilitza resina com a mitjà d'unió, aplicat amb una pistola.



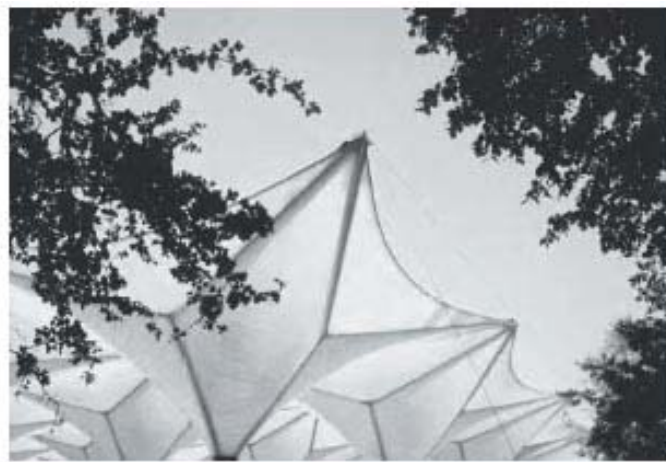
Radome

Es connecten les superfícies dels elements laminats en sandwich paral·lels i els marges dels elements són adaptats mitjançant entrants i sortints prefabricats ja en el taller i pensats amb aquest objectiu, de manera que la unió encolada es fa a posteriori, sobre els marges, un cop l'estructura ja es regeix per sí sola. En l'encolament de composites amb altres materials, a causa de la unió dels diferents mòduls elàstics, les tensions màximes són tan grans com rígides poden ser les parts de la unió.



L'esquema mostra com per les unions de composite amb metall, les tensions a la part de la unió metàl·lica són les més grans, encara que aquesta tensió també recau inevitablement en el composite. Les estructures que porten elements plans fets de composite i metall, normalment s'uneixen amb unions indesmontables, primer unes parts amb altres i després amb els tramats estructurals que els aguanten. A causa de l'unió, els dos components aguanten la mateixa força, en l'estructura hi ha una repartició equitativa de càrregues.

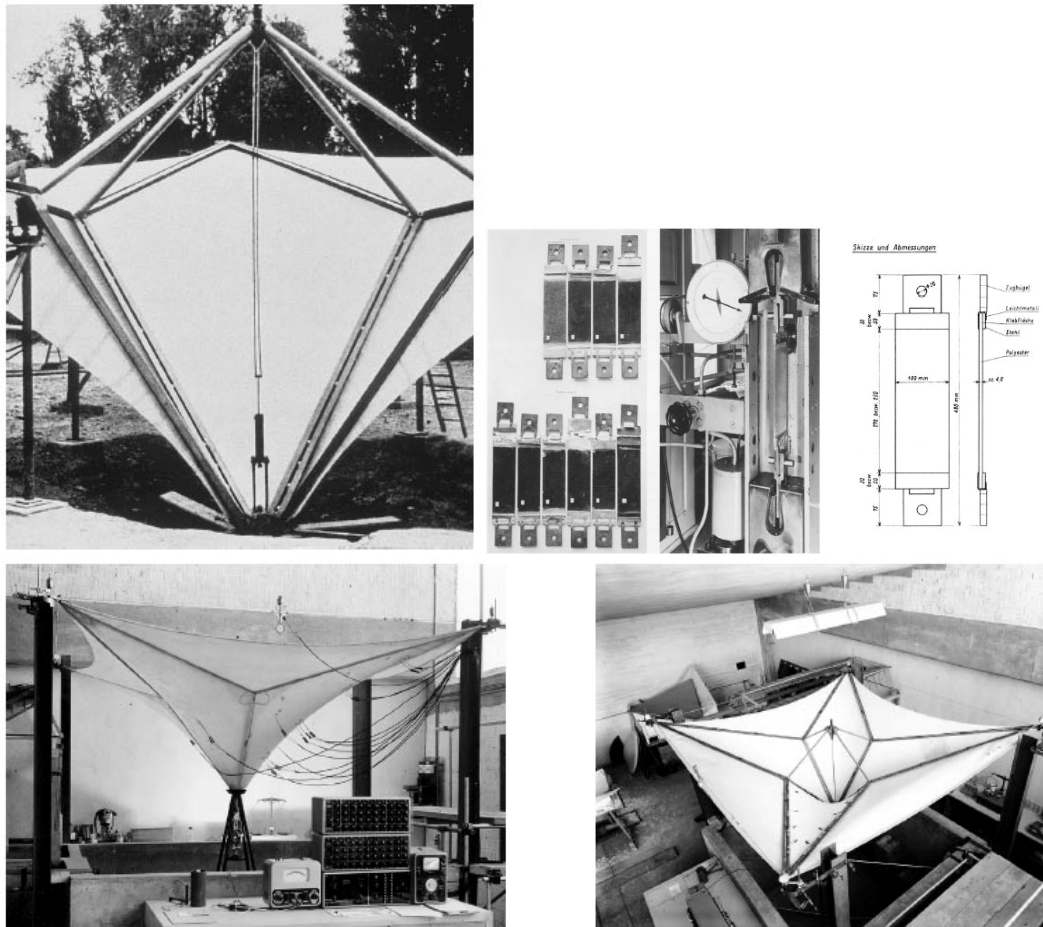
Un exemple d'aquestes construccions n'és el pavelló per a la Expo del 64 a Lausanne, construït per Heinz Hossdorf, amb ombrel·les de poliestirè (EMPA) amb els marcs de metall reforçats pels marges per aconseguir una unitat



monolítica tota interconnectada. Ell mateix diu que el comportament de l'estructura, i dels materials l'un amb l'altre es va preveure a partir de diferents assajos al laboratori.

Els laminats prefabricats units als perfils d'acer poden ser problemàtics ja que la resina pot desaparèixer a causa de la polimerització. Els marcs no poden perdre les seves toleràncies inicials o sino no podran ser montats a l'obra, i també les unions seques a través de rematxes o cargolades degut al seu comportament fràgil han de ser ben considerades. En la unió de la membrana polimeritzada amb els perfils d'acer, la factibilitat de la construcció depèn de l'acabat superficial que es dona al metall. A més s'han d'aplicar els coeficients d'estirament deguts a la calor aplicada. Amb motiu d'això es van aplicar al EMPA diferents coles i es va mirar quina funcionava millor, moltes unions trencaven per desgarrament, es va experimentar i trencar molt material fins a aconseguir resultats apropiats.

Els experiments es van fer entre temperatures de -20 i $+50^{\circ}$ i al final es van aconseguir resultats bons, com a unió finalment es va utilitzar cola d'araldit aplicant pressió sobre les superfícies.



Assajos amb galgues extensomètriques per a trobar les deformacions de membrana

3.3-4 Unions de bigues de composite

Aquestes construccions són només possibles quan les construccions són totalment impecables, amb les capes del sostre perfectament connectades, normalment les unions es fan amb pega, també a vegades per soldadura. Per construccions d'estructures de sostres amb plaques de poliester reforçat amb fibra de vidre, independentment del tipus i forma de producció de les bigues, s'utilitza poliester endurit per calor com a resina de cola. Així la cola i el sostre són químicament similars, el gruix de la cola està entre 0,1 i 0,2 mm, com a cola, a més de resines de poliester es poden utilitzar també resines de poliuretà, d'acrilat o fenòliques. Cola-resina i superfície han de unir-se particularment be. La fiabilitat de la unió es un problema ja conegut.

La firma König, al 1971, va fer "Rondo". per a portar-ho a terme va desenvolupar prèviament un Protocol. Es va documentar que en tots els fets s'observaven errors de les unions encolades. Era necessari quantificar l'augment del valor de roçament entre la capa de sostre i l'espuma, es va solucionar el problema

augmentant la rugositat de la capa del sostre, es van fer fabricant els dos cantons de PUR.

També Heiz Isler, a la seva casa de caps de setmana, utilitza una estructura de plataformes sandwich. En un treball de molta paciència es van anar posant cada un dels elements en el seu corresponent marc, adaptats manualment. Amb la mateixa tècnica però millorada, Isler va fer després la gasolinera de Thun, construcció de grans plataformes vista prèviament.

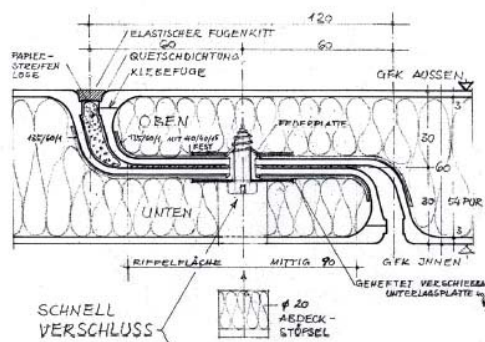
3.3-5 Unions soldades

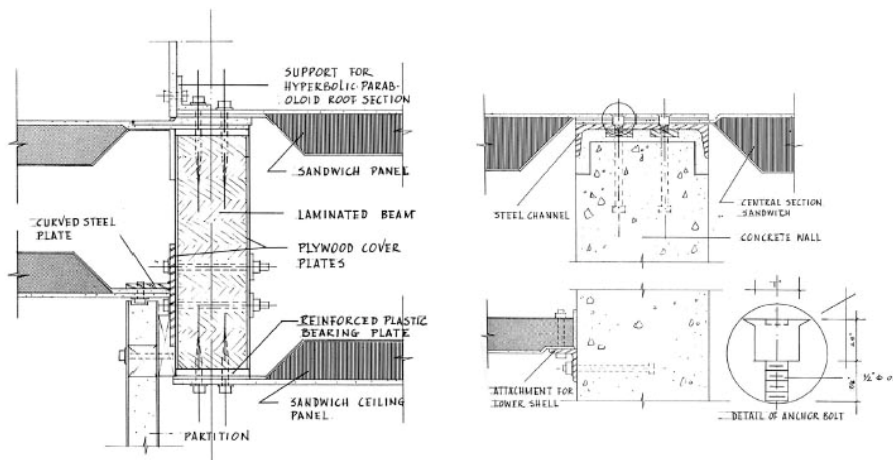
Unions inseparables, que s'utilitzen per a superfícies canviants, al contrari de les coles. Es produeix fusió del material. Pels duroplàstics, entre els quals es troben els composites fets amb fibra de vidre, no és aplicable ja que els no són solubles. És aplicable per als termoplàstics, dels quals no se'n poden fer estructures, per això en el camp que ens ocupa no són gaire importants.

3.3-6 Unions a pressió, cargolades o reblades

Son connexions de formes tancades, els cargols i reblons van ser utilitzats des dels inicis. Des de ben aviat es van donar distàncies de separació al marge de la peça per a diàmetres de 28, 38 i 47 mm, independentment del gruix del laminat. La distància al marge és per a tots els cargols (de diàmetre D) i gruixos de laminat de 2,5 a 3 cops D. En altres taules podem trobar especificacions de la longitud d'entrada perpendicular del cargol. Normalment per a diàmetres de tornilleria mes petits de 28,5 mm es necessiten com a mínim 18 mm de separació.

A la primera casa feta de composite (la Monsanto House of the Future) ja van ser aplicats aquests tipus de unions. Les cobertes de forma corba individuals amb els marges doblegats, es van cargolar unes amb altres amb cargols de 12,5 mm de diàmetre i a una distància del marge de 50 mm o sigui més gran de 3 cops D, d'aquesta manera la tensió en el forat es menor i no carrega totalment en el material. En situacions de més repartició de càrrega no s'haguessin situat els forats tan separats del marge sinó que s'hi haguessin solapat.





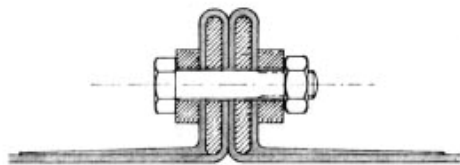
Detalls de unions cargolades i reblades

Els esquemes mostren les unions de les ales penjants i la repartició de càrrega de compressió sobre de la superfície.

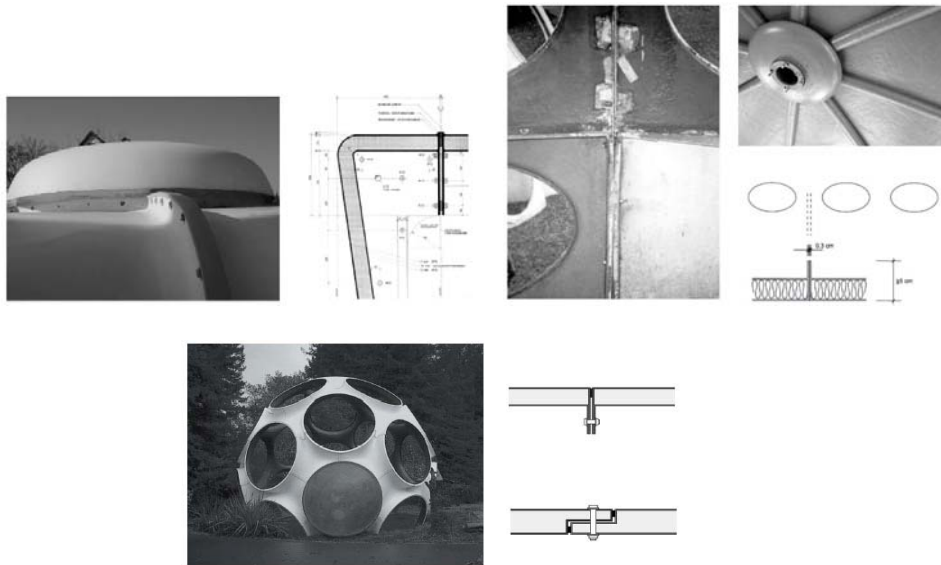
Unions cargolades solapades al marge no són gairebé mai cobertes, ni tampoc son omplertes amb algun altre material com altres unions amb el canto just al borde. El comportament del material en funció del diàmetre i posició del forat no es diferencia en aquests dos casos. La conducció de la càrrega en una direcció és un aspecte positiu d'aquestes passareles solapades, enfront dels elements formals de les superfícies llises.

Exemples de unions cargolades al marge en trobem molts, hi ha autors que les qüestionen per la seva insuficiència en quant a sol·licitacions altes.

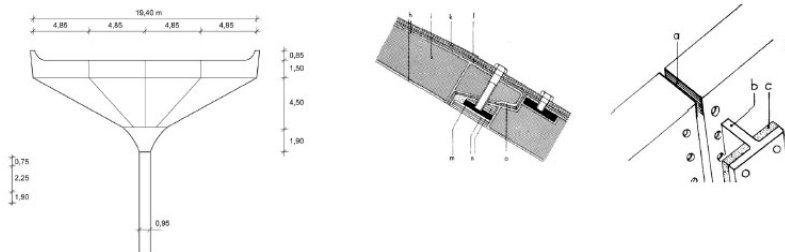
Constitueixen un recurs en les construccions antigues que encara s'utilitza, per molts també els reblons són una tornada al passat per no tenir que deixar cap distància entre cargols. En aquests sistemes les unions son d'acer amb acer cargolats i es troben situades també sobre bandes d'acer, com mostra el dibuix següent:



De la mateixa forma també s'ha potenciat l'engruiximent del marge per mitjà de fibres de Roving, en contra de l'engruiximent de la plataforma. Per a la Bulle Six Coque, per Futuro i també per bastants Fly's Eye s'ha utilitzat aquest engruiximent.



Com exemple per a unions amb solapaments cargolats tenim les estructures Monohex de Buckminster Fuller. Algunes parts de les vivendes Rondo es van fer amb unions solapades. I les pantalles protectores de l'aeroport de Dubai es van fer amb formes que recorden ombrel·les, encara que en aquest cas hi ha un element que corre al llarg de tota la construcció, una biga en forma de T que connecta tots els altres elements, d'aquesta manera la càrrega no es dirigeix en una direcció sinó que es reparteix en una gran superfície.



Detalls de l'aeroport de Dubai

3.3-7 Unions al llarg de bigues

També són anomenades tancaments de tensió. Inicialment no s'utilitzaven però pel sistema Ponza es va començar a posar en pràctica i van funcionar be. Les unions es realitzaven al llarg de tensors d'acer. Amb aquest sistema les parts de l'estructura es poden unir de forma més ràpida i lleugera, per això són adequades per a construccions de parts preacabades, que en un espai curt de temps s'han de construir en un lloc inicialment indefinit.

Com exemple tenim el Polar-Iglu, ideat a França i pensat per Groenlandia. Les cobertures son de montatge ràpid.

3.3-8 Unions amb passadors

En estructures, pràcticament mai són utilitzades. Troben alguna utilització, com a unions a compressió, en construccions de carpes, així com per a altres construccions amb cordes (tensors). També es van començar a utilitzar en la construcció d'avions.

Per a resoldre completament els problemes de unions s'han d'utilitzar programes de càlcul encara que no s'utilitzen noves tècniques de unió, són les mateixes que s'utilitzen per a construcció d'esquelets d'acer o de fusta, però al no tenir valors tabulats s'ha de recórrer a estudis d'elements finits de cada cas particular. S'ha investigat també en la construcció d'estructures híbrides, combinacions de composites amb altres materials, cada un d'ells cobrint les sol·licitacions a que millor pot respondre.

4- Les estructures

En aquest apartat es classificaran les estructures segons de els materials en que estan fets i segons les seves geometries.

4.1 Tipologies d'estructures

La sistematització d'estructures s'observa ventatjosament de moltes maneres, la diferenciació es fa entre criteris geomètrics, com son suportades les sol·licitacions exteriors per l'estructura, quines càrregues internes hi prenen part etc. Cada estructura tindrà un comportament diferent, una estructura de construcció lleugera es comportarà totalment diferent d'una biga massissa.

Una estructura és la part d'una construcció que fa la funció de suport de tot el que te a sobre, guardant la seguretat del volum que proporciona sota seu, aguanta i transporta càrrega, la connecta i la reparteix, sense deformar ni cedir.

Per qualitat de la biga, entenem la seva capacitat específica i per a comportament, entenem l'actuació que fa davant d'uns requeriments concrets.

Els elements estructurals es diferencien segons la seva geometria en elements uni, bi o tridimensionals, aquests elements defineixen al mateix temps com és tot el conjunt estructural.

Com a sistema estructural es defineix el component independent extret de l'estructura, amb paràmetres qualitius precedents, com càrregues externes que li influeixen procedents de la resta de l'estructura.

Büttner i Hampe classifiquen les estructures segons el model ideal: estructura portant i els seus elements. Els elements de l'estructura portant son definits segons la seva geometria i material.

4-2 Classificació d'elements estructurals

Estructures de bigues: Biga

Marc

Estructura

Arc

Xarxa de biguetes

Xarxa espacial

Característiques: La càrrega de les bigues recolza en una biga central o eix.

La càrrega treballa a través de força normal (tracció i compressió) i del moment flector.

Per arcs o eixos corbats la càrrega es suporta perpendicularment a l'eix central (ha d'haver-hi correspondència entre l'eix arquejat i la línia de compressió de la càrrega)

Construccions amb cordes: Corda individual

Corda radial

Xarxa de cordes/membrana estable

Característiques: Sollicitacions a tracció a partir d'una direcció principal

Estructures hiperbòliques: Paraboloides Hiperbòlic

Característiques: Bona combinació entre repartiment de càrregues a tracció i compressió

Efecte comú dels elements principals en la superfície hiperbòlica amb estabilitzadors i elements de fixació.

Estructures de superfície plana: Plaraformes o Làmines

Superfícies plegades

Plecs formant arcs

Característiques: Els elements laminars tenen sempre càrregues normals.

Com que les càrregues són perpendiculars al pla de l'estructura, la repartició de la càrrega es dona en 2 direccions conegudes, això és beneficiós pel càlcul.

Estructures de plecs: combinació de plataforma i efecte estructural laminar

Estructures d'edificis grans, gratacels: Construcció d'esquelet

Construcció d'habitatges penjants

Construcció de façanes laminars

Característiques: Efecte comú dels elements estructurals per anivellament de Càrregues verticals i horitzontals

Estructures de coberta: Cilindres

Esferes/ Cúpules

Formes mixtes

Construccions de cobertes

Característiques: Es suporten les càrregues planes a través de la normal (tracció-compressió) i força d'empenyiment.

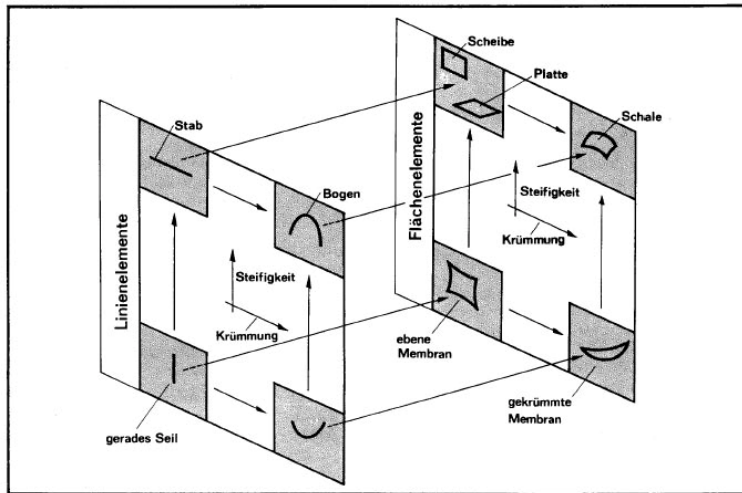
Efectes dels marges, també amb els moments i forces transversals, també a tenir en compte.

Estructures pneumàtiques: Coixins d'aire

Sales, volums grans de coixí d'aire

Característiques: Estabilització de la forma a través de pressió interna.

Sollicitació de tracció en tot el conjunt de l'estructura.



Divisió de les estructures entre lineals, planes i corbes

		Tragstrukturelemente							
		Linienelemente				Flächenelemente			
		Biegeweich		Biegesteif		Biegeweich		Biegesteif	
Tragstrukturen	1-Dimensionale Tragstrukturen								
	2-Dimensionale Tragstrukturen								
	3-Dimensionale Tragstrukturen								
		gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt	eben	gekrümmt	eben	gekrümmt

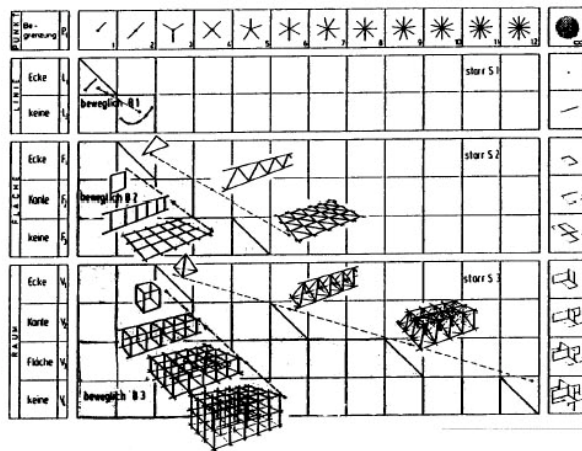
Quins elements estructurals formen quines estructures

Heino Engel extreu del coneixement de mecanismes, que les forces es produeixen i condueixen a través d'una simple divisió de l'estructura. En les anomenades famílies d'estructures, els sistemes estructurals tenen mecanismes d'efectes similars, que s'anomenen direccionaments de la càrrega. El principi de flux de càrregues en el conjunt de l'estructura es completament igual.

Les estructures híbrides són una barreja entre diferents sistemes estructurals i necessiten una definició per separat. Aquests diferents sistemes es troben dins d'un conjunt estructural definit. Actualment s'estan desenvolupant estratègies per a quantificar valors en aquestes estructures i es possible aproximar el seu rendiment a partir d'uns esforços inicials aplicats. Com a exemples d'estructures híbrides trobem les de Z.S. Makowzki.

Gabriel i Wagner clarifiquen l'ordre i el principi de diferenciació, partint del sistema de mobilitat de l'estructura, la diagonal separa les estructures mòbils de les immòbils, per exemple un cable pot ser estabilitzat per 2 elements immòbils, un sistema mòbil tindrà diferents comportaments de repartició de càrregues que un immòbil.

Observem la reacció de l'estructura a partir de les càrregues externes, no per càrregues internes ni pel sistema d'esforços sinó per el canvi de càrregues en l'element i deformacions elàstiques que se'n deriven.



Estructures puntuals, lineals, planes i tridimensionals

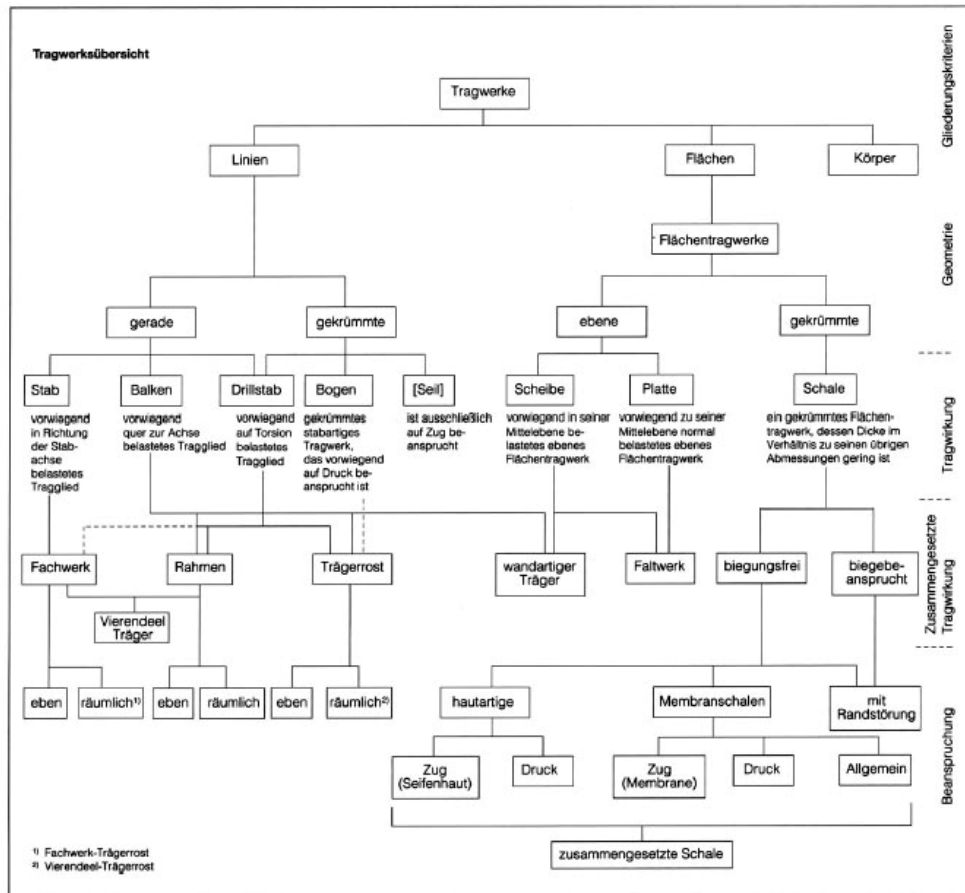
4.3- Ordre jeràrquica de les estructures

Les consideracions es prenen en el següent ordre:

- Geometria: Lineal/superficial o plana/corbada
- Efecte de l'estructura: Sol·licitacions (flexió/força normal)
- Efecte del conjunt: Efecte estructural general

Separació en primer lloc de les estructures lineals i superficials, i dins d'aquestes segones diferenciació entre planes i corbades. Es fa una divisió encara més precisa amb la llista dels efectes estructurals del conjunt, per exemple es separen els efectes estructurals d'una biga amb quatre suports i una estructura plegada.

El criteri de divisió segons sol·licitacions es diferencia sobretot en les cobertures per les seves reparticions de forces (amb o sense sol·licitació a flexió) segons la taula següent:



4.4- Tipologies d'edificis fets de composite

Contràriament a aquest ordre, pel que afecta a l'anivellament de forces internes, el que han fet la majoria d'autors ha estat buscar l'ordre de l'estructura de composite en els cossos individuals en els quals la geometria ha quedat establerta. Així trobem tipologies d'edificis com cabines o carpes pels quals no s'ha produït cap altre material. No és cap nova estructura sinó una nova forma construïda, una combinació de plaques de sostre i làmines de paret.

S'han fet per exemple, caixes de 2x2x2m, amb plaques laminades cuidant els detalls constructius de unió d'unes amb altres, angles, marges, etc. En aquestes te sentit una divisió en plataformes i làmines. Les peculiaritats les trobem en les formacions contínues i rodones, allà les cantonades son fabricades en cada cas de forma diferent, ben al contrari de plataformes i làmines.

També es combinen estructures planes amb espais llisos formant piràmides de composite que són unides unes amb altres mitjançant bigues. Segons Wagner i Gabriel aquestes estructures han de tenir un mecanisme propi d'anivellament de càrregues, ja que estan formades per diferents tipus de components i solen ser asimètriques.

S'ha de saber quina estructura és apte per ser feta amb composites. El treball d'investigació més desenvolupament (I+D) de cases de composite i espais cel·la va donar com a resultat en els inicis de la utilització dels composites, més de 200 cases construïdes. La investigació trenca el somni de la construcció convencional, a partir de que els composites es comencen a veure com a materials fantàstics. Es va estendre el pensament de que posant el material dins d'una màquina i donant-li una velocitat de treball obtenim directament un component, inclús potser fins i tot amb la forma final vàlida, color, rigidesa correcta i acabat superficial. Això influeix directament en l'augment de la producció pensant en l'edifici com a una unió de diferents parts sortides de motlle, o dit d'una altra forma de diferents espais generats a partir d'un procés mecànic d'injecció.

En la recerca s'han qüestionat també els problemes de rendibilitat, la pregunta que es fan els constructors és: el sostre de fibra de vidre amb polièster és més rentable que un sostre de formigó o fusta? Però no es pregunten si el composite en general és més rentable que els materials del seu voltant. Els costos d'una estructura de composite, com per exemple una coberta, depenen de la forma del cos, així es poden fer formes semiesfèriques o semielíptiques i encara que es pot preveure la fabricació d'una sèrie, és difícil que avui en dia siguin rentables, degut a la seva immobilitat i la seva difícil modularitat. Contràriament a aquestes, les estructures corbades, són altament rentables i a més estructuralment són molt estables perquè actuen com una membrana, seccions transversals petites són suficients per anivellar les forces i el consum de material es mínim. La rendibilitat es quantifica segons si en aquell moment hi ha algun material per a fer aquella funció igual de bé i a menor preu. Actualment les formes de producció avancen molt i més en el camp dels composites. La rendibilitat s'ha d'estudiar en cada cas.

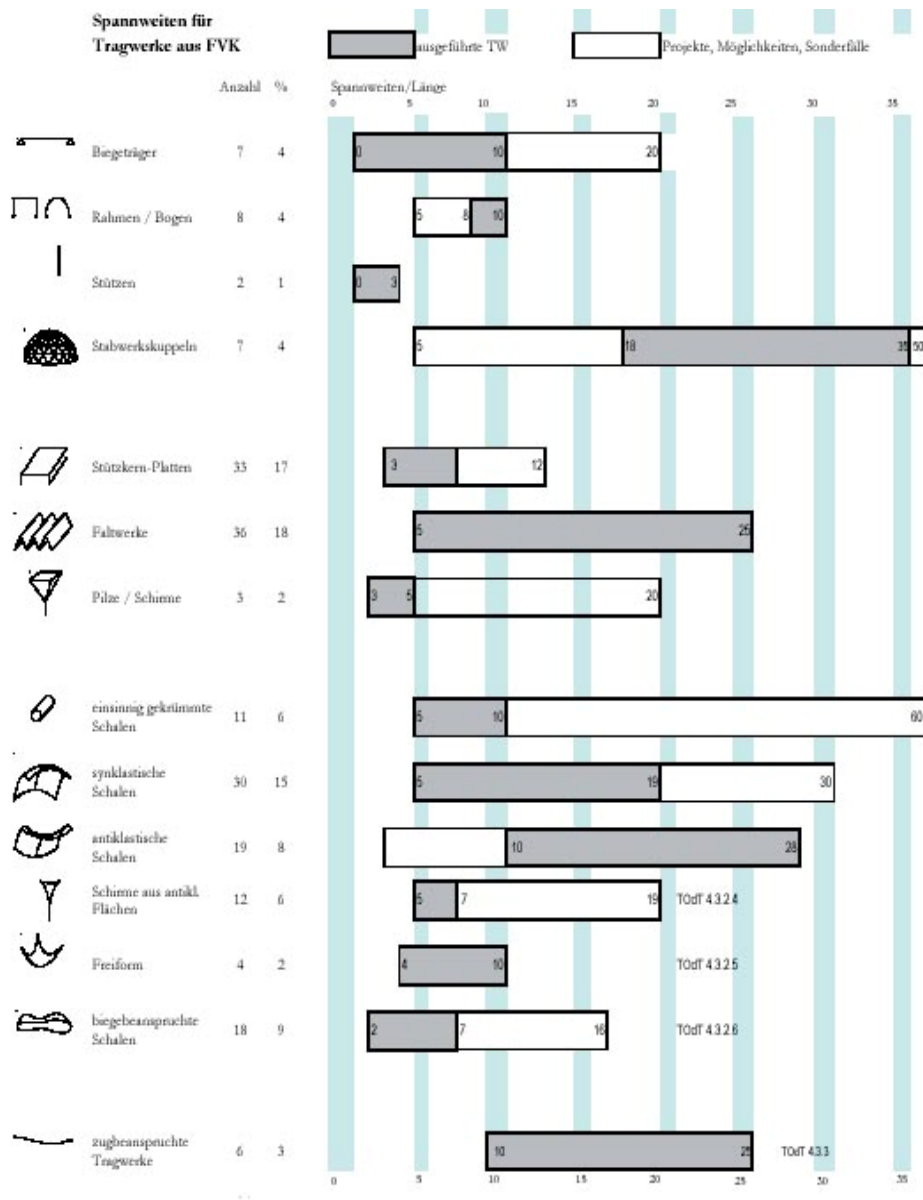
Les estructures espacials i piramidals suportades per biguetes es troben dins del grup de les estructures de plecs, ja que el seu anivellament de càrregues intern és molt semblant a elles. Cúpules geodèsiques, estructures fetes de cel·les i també cabines, són considerades categories especials amb motiu del seu bon anivellament de càrregues.

Com a valoració de les estructures estudiades es dona una visió general de les possibles tensions. Segons la combinació estructura/material hi haurà unes tensions o altres però moltes vegades és difícil de quantificar-ho en composites reforçats. Engel, en els seus experiments pràctics va trobar diferents resultats que es corresponien amb els coneixements teòrics previs.

El gruix marcadament superior en la zona de màxima tensió s'aplica per les valoracions fetes a partir d'estructures anteriors. Les construccions que s'han intentat només una vegada o en casos especials, o que encara resten com a possibles idees per al futur, no es poden considerar fiables, però són susceptibles d'estudi. Si aquest estudi es considera representatiu es guarda la documentació per a futurs projectes.

Fins al moment, les estructures de bigues encara no s'han provat com per a donar-les per efectives, se n'han fet només 6. En canvi d'estructures doblement corbades ja se n'han fet 33, i es poden considerar de funcionament òptim.

Tinguin o no tinguin aplicació, moltes de les estructures de composite es classifiquen com a no aptes. Es poden trobar uns 250 tipus d'estructures classificades en la taula "l'ordre de les estructures" al costat de la descripció de l'estructura hi ha més detalls com el nom, fabricant, enginyer/arquitecte, lloc on s'ha edificat, i també hi ha una casella on s'intenta explicar gràficament com pot arribar a tensionar-se l'estructura. Valors concrets de càrrega o tracció són escassos a la taula, però es poden trobar a altres llocs, l'objectiu d'aquesta és tenir un valor aproximatiu o una idea bàsica de com funciona l'estructura sota càrrega.



Sol·licitacions dels diferents tipus d'estructures:

Construccions d'una sola capa	Sotmeses a:
Biguetes i plataformes	tracció, compressió, empenyiment, flexió i càrregues combinades
Cobertures circulars cilíndriques	compressions interiors, exteriors i axials, empenyiment, flexió i càrregues combinades
Cobertures simètricament doblades	rigidesa i estabilitat
Cobertures no simètricament doblades	rigidesa i estabilitat
Làmines o plataformes	tensions llargues i d'empenyiment, bufaments, estabilitat i flexió
Cobertures circulars cilíndriques	pressions internes i externes
Cobertures esfèriques	rigidesa i estabilitat
Hipercobertures	rigidesa i estabilitat

4.5- Estructures de composites reforçats

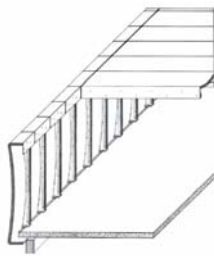
Les primeres estructures construïdes van ser les cúpules geodèsiques descobertes per Richard Buckminster Fuller. Poc després es van fer ja estructures de cobertura, al mateix temps que Buckminster Fuller feia el Geodome, a l'any 1956. Més endavant Yves Magnant i Ionel Schein fan "Arts des Menagers" amb forma de closca de cargol, a on tant utilitzen plataformes com bigues a tracció. Aquests arquitectes van fer al 1956 juntament amb els arquitectes Coulon, la cabina Coulon, una sèrie de cabines de només 2x2 m per unitat completament de composite. També van ser fabricades cobertures amb sol·licitacions a flexió, amb resultats molt bons. Monsanto House of the Future és un exemple d'aquest tipus de construcció. Però les construccions més significatives en composites són les estructures de plecs, que es van començar a fer servir tard, cap al any 1962. A mitjans dels anys 60, Z.S.Makowski i els seus col·laboradors, entre ells Renzo Piano es dediquen a la recerca i desenvolupament de tipologies d'estructures. Les cobertures corbades i cilíndriques troben gran aplicació en construccions enginyerils. Hi ha pocs exemples per a construccions amb sol·licitacions a tracció, encara que composites reforçats amb fibres són els més apropiats per a realitzar aquest tipus d'estructures.

4.5-1 Estructures lineals

4.5-1.1 Bigues a flexió

No són gaire utilitzades degut al baix mòdul elàstic dels composites, per això no es tenen considerades en sol·licitacions a flexió.

Per les cases vivenda fg2000 de Wolfgang Feuerbach les plataformes sandwich són d'1,25 cm d'ample, però en un principi no van ser pensades per aquesta aplicació estructural. En la producció de les plaques es va observar un comportament dolent enfront de les forces d'empenyiment en els laminats, per lo qual semblava no realitzable, per això va ser important l'aplicació d'una bona tècnica de unions, es van reforçar els marges de les passarel·les fins a una altura de 40 cm, d'aquesta manera no es rigiditzaven més les plaques sandwich, sinó que feien d'estructures primàries que a través de la plataforma principal quedaven suportades.



Detall plataforma terra



Construcció de les vivendes fg2000

4.5-1.2 Cobertures a flexió

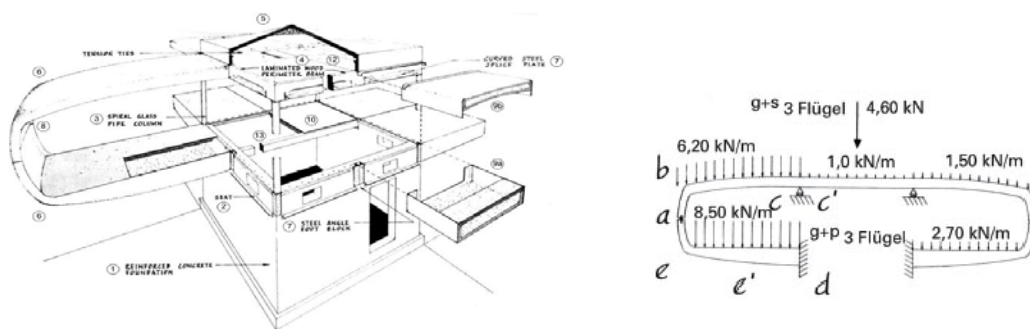
La Casa Monsanto és un dels exemples més genèrics de sol·licitacions a flexió, també Bulle Six Coque, Rondo o Ventura CF45, els materials de les quals estan fets, deixen la possibilitat de ser fabricades en qualsevol forma. Tots aquests casos són estructures de cases independents de la seva secció terra, en comparació amb les cases fetes amb estructures tipus membrana, aquestes connecten un disseny lliure, sense barreres amb un gran volum útil.

Els processos productius són molt àgils i mostren un alt grau de preacabat i unions senzilles, a més de mobilitat i transportabilitat.

Mostren un bon repartiment de càrregues, igual que les estructures plataforma experimenten deformació en el seu pla mig a través de càrregues perpendiculars al pla.

El gruix de les capes depèn de cada estructura en particular, no hi ha gruixos de material estàndard sinó que es produeix el material exactament tal i com es vol per a una aplicació determinada. Al final la seva estructura esquemàtica serà una construcció de biguetes.

Amb cobertures que aguanten a flexió s'aconsegueixen longituds de 15 m, aproximadament igual que en estructures plataforma, mentre que amb estructures membrana se n'aconsegueixen de 20 a 25 m.



Esquema constructiu i repartició d'esforços a la casa Monsanto

4.5-1.3 Estructures amb sol·licitacions a tracció

Els composites són ideals per aquests tipus d'estructures. Amb bones experimentacions prèvies es pot arribar a minimitzar molt el gruix de material.

En funció de com actuï l'estructura o de com estiguin units uns components amb altres hi poden aparèixer bufaments. Es poden aconseguir també grans longituds lliures, entre 10 i 25 m, els gruixos es donen entre 2,5 i 5 mm. Pocs constructors han fet servir composites en sol·licitacions a tracció, només Heinz Hosdorf, Renzo Piano i més tard Günther Ackermann, utilitzen aquest principi, naturalment han de reforçar les superfícies sotmeses a tracció amb un reforç als cantons. Les unions al terra les han de solucionar enginyers, l'arquitecte fa un predisseny l'enginyeria ha d'encarregar-se d'estudiar-la ja que els càlculs no són fàcils.

La construcció a Gènova de Renzo Piano, d'estructura d'acer amb plataformes de polièster reforçat amb fibra de vidre, te les plataformes pretensades, de tal manera que resisteixen a tracció, elements de composite tensionen per sota i d'aquesta manera s'aconsegueix una longitud lliure de 10 m. La construcció s'aguanta per sí mateixa, no te fonaments, ja que aquests elements de composite que te a sota es troben a banda i banda i estan units uns amb altres amb cables, d'aquests elements també en parteixen els pilars horitzontals.



Les construccions paraigües pretensades tapen superfícies de 18 x 18 m per unitat, es poden prolongar els mòduls indefinidament, ja que s'aguanten per sí sols, l'únic problema pot ser en segons quins casos, el petit gruix de la capa.

4.5-1.4 Bigues a tracció

Inicialment no es buscava respondre a sol·licitacions a tracció molt altes ni fer components d'edificis molt estables, amb els composites era difícil d'aconseguir. Actualment s'utilitzen només quan les sol·licitacions del medi ho requereixen perquè no hi ha cap altre alternativa o quan per motius de deformacions a l'interior de l'estructura no es pot utilitzar cap altre material. On sí que s'utilitzen és en finestres i marcs de porta dins d'una estructura corba, les longituds de biga són petites en comparació a la secció transversal, d'aquesta manera es tanca un sistema estable. En els següents dos exemples s'utilitzen perfils buits de secció transversal de càrrega:



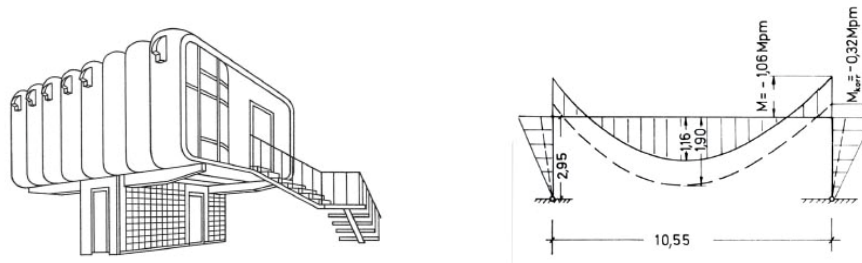
Detalls de les construccions Rondo

4.5-1.5 Arcs i marcs

Ambdós tenen un comportament similar a flexió, també s'ha treballat poc amb aquesta estructura, es va utilitzar en les fg2000, a cada 2 unitats de paret i 1 unitat de sostre hi ha un marc clavat a ancoratges del terra i també a les cantonades superiors.

Màxima longitud de tracció = 10 m i màxima altura del sistema = 3,5 m. Els mòduls individuals són fets amb estructura sandwich amb formes de caixa

cargolades, hi ha una gran rigidesa entre les plaques paret i la placa terra de l'estructura principal, això l'ha fet aplicable a altres construccions, com per exemple en cobertures de grans superfícies com piscines o pistes d'esport.



Dibuix i diagrama de moments de fg2000

4.5-1.6 Estructures lineals: conclusions

No són desapropiades per a la utilització amb composites. Les anomenades bigues de marge reforcen plataformes primes. El marge funciona com a biga, com que està doblegat, el material és més rígid en tota la seva longitud.

A la T.U. de Berlin es fan investigacions per a bigues de composite, i s'han publicat recomanacions importants com les següents:

- El mòdul elàstic dels composites es petit, per tant les barres sotmeses a compressió arribaran aviat al doblegament o inclús al trencament.
- Comportaments a flexió no es suporten i ràpidament s'inclinen.
- La construcció és factible quan s'arriba a la càrrega crítica, i el material està al límit de la ruptura sense trencar, això vol dir que per sol·licitacions a compressió els perfils buits entren en acció.

Ackermann estableix un criteri per a calcular estructures de bigues amb comportament viscoelàstic. Encara que no siguin gaire utilitzades les estructures de bigues es solen fer servir en la construcció de prototips i maquetes d'estudi, amb l'objectiu de jutjar sistemàticament el comportament de l'estructura sota càrrega. No són gaire bones estructuralment però serveixen per a extreure'n els càlculs.



Fabricació de prototips

4.5-2 Estructures planes

Gràcies a la consistència fluida, susceptible de ser produïda dins d'un motlle, els composites poden produir-se com a formes corbes. A més, la majoria responen bé als requeriments arquitectònics que presenta l'habitatge, com per exemple: protecció del clima, radiació solar, humitats etc (protecció de l'edifici).

Funcions d'aïllant tèrmic i del so, tancament espacial i reflexió de la llum, són també realitzables sense problemes en aquests tipus de construccions.

El tipus de funció/protecció escollida ve definida per l'estructura i la seva construcció, aïllants del calor i del so s'aconsegueixen a partir de construccions en sandwich, fent una estructura de laminat de la forma desitjada, el tancament espacial s'aconsegueix ja de per se amb aquest tipus d'estructura. La superfície de composite es recobreix d'una capa protectora anomenada Gelcoat, gràcies a ella es dona a la paret, densitat i contingut d'aigua. En quant a transparència es pot aconseguir un pas de fins a un 80% de la llum però sempre tindrem material translúcid, mai totalment transparent.

S'ha arribat a sol·licitacions tèrmiques més grans de les normals en hivernacles. Al contrari de les construccions de perfils d'acer i vidre, les de composite tenen avantatges en quant a manteniment, per la millor resistència a la corrosió i a problemes de trencament, també el petit pas de calor que permeten en comparació amb el vidre fan que el material tingui un efecte positiu en quant a balanç energètic. El pas de la llum diürna que travessa el material (70-80 %) s'aconsegueix fabricant capes molt primes, entre 1,2 a 1,5 mm de gruix.

Si s'observen problemes d'estabilitat degut a la geometria de l'estructura s'ha de controlar el procés de formació de la peça. Es poden fer dobles curvatures, estructures plegades, o també formes el·líptiques, amb bigues de cobertura arquejada (biga i cobertura al mateix temps). Els hivernacles de la DDR per exemple, es podien fer de gruixos molt primos i només amb el seu propi pes podien suportar la càrrega del vent i la diferència de temperatura i a l'hivern eren escalfats i suportaven la càrrega de neu que tenien a sobre.



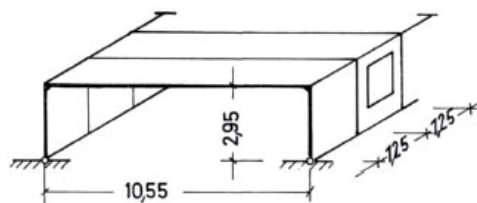
Cobertures corbes en una estació d'autobusos

Les estructures planes de composite es fan:

- 1- En parts iguals, preacabades i muntades a l'obra; poden ser estructures mòbils, al contrari de les de ciment.
- 2- Estructures planes de cobertures llises, piràmides preacabades reforçades amb biguetes d'acer com a estructura; algunes estructures es poden fer de material lleuger (alumini). Les va desenvolupar també Makoski (Les Matèries Plàstiques), el resultat és un tipus d'estructura additiva

Tots ells són elements estructurals plans que a través d'una càrrega perpendicular al pla experimenten una deformació al mig, per a contrarestar la flexió se n'augmenta el gruix, no són apropiades per a estructures corbes i s'utilitzen normalment com a estructura plana per a sostres.

Les plataformes de composite són reforçades normalment per estructures de biguetes, els seus paràmetres avantatjosos són el gruix i la rigidesa. En trobem exemples construïts de polièster reforçat amb fibres i estructures de tipus bresca d'abella.



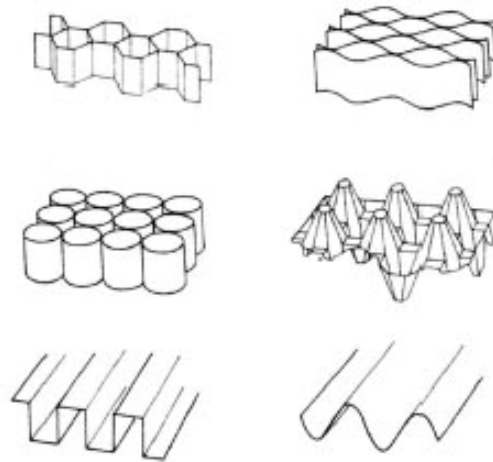
Flexió màxima al mig

4.5-3 Construccions de biguetes

Es coneixen des del 1940, ja llavors es van començar a produir estructures tipus bresca d'abella per L.S. Meyer. Es poden fer també de fusta o d'espuma de poliuretà. Estructuralment funcionen com plataformes amb nervadures.

Inicialment eren estructures utilitzades en les indústries de l'automòbil i l'aviació, ara s'utilitzen per a construccions lleugeres com sostres d'acer prim, làmines d'alumini, passarel·les, reixes o panells, són fetes normalment d'estructura de bigueta o de bresca d'abella (formes de cartró impregnat de resina) també s'han utilitzat espumes com a element estructural en plataformes.

Les plaques de sostre i tramats de biguetes es poden aconseguir doncs de diverses formes. Les primeres són produïdes per a qualsevol aplicació de fibra de vidre, o en algun cas de polièster reforçat amb fibra de vidre. Com a tramats s'utilitzen estructures de cel·la, amb forma de plafons o d'ona, no hi ha gaires més formes utilitzades.



Heinz Isler va fer una forma peculiar d'estructures cel·la, que consisteixen en plataformes amb nervadures. Amb elles s'aconsegueixen llums molt llargues, però les plaques s'han de laminar a la mateixa obra, ja que el transport de l'estructura preacabada és impossible. Un cop col·locades s'hi adapta la reixa de reforç.

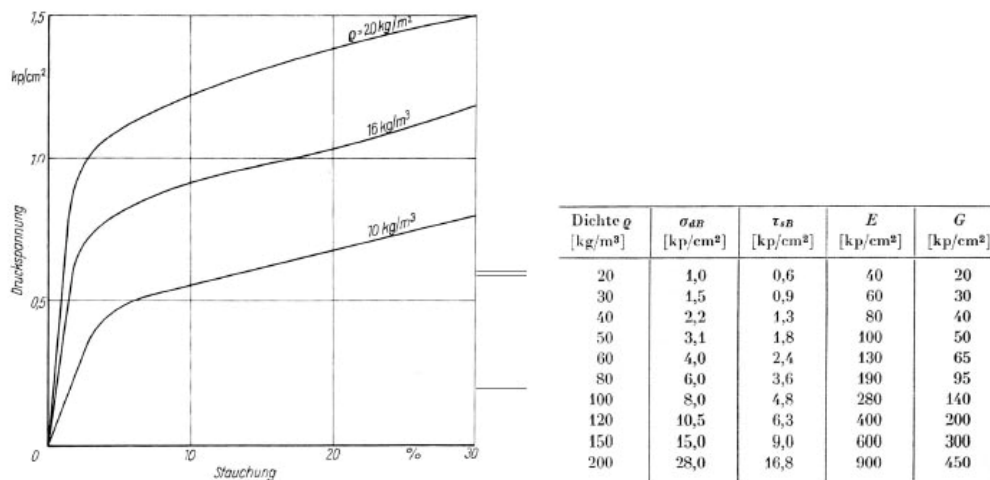
A la gasolinera de Thun es fan servir cubs en comptes de reixa, d'aquesta manera s'aguanta millor la càrrega perquè hi ha més superfície de contacte.

Normalment, aquestes estructures cel·la són impregnades amb resines manualment i tenen un preu relativament baix. En comparació amb espumes sintètiques dures, es mostra que la seva rigidesa a tracció i empenyiment és entre 3 i 6 cops més alt, i el mòdul elàstic de 10 a 20 cops.

Els valors d'aïllant tèrmic d'estructures plafó són també bastant més alts que les construccions amb espumes, això fa que tot i les seves bones característiques enfront la deformació no se'n tregui gaire partit en aplicacions de construcció. Pel contrari, les espumes plàstiques sí que tenen una gran aplicació, en plataformes amb reforç de biguetes. S'hi troben més de 20 formes d'aplicació.

Entre les espumes dures més conegudes hi trobem l'espuma de Poliuretà (PUR) o una altre no tan favorable tèrmicament, l'espuma de Polistírol. Les espumes tenen una gran superfície d'expansió i un cop assecades es beneficien les propietats mecàniques del conjunt. Augmentant la densitat d'espuma augmentem rigidesa a tracció i a l'empenyiment, o sigui que augmentem els seus respectius mòduls elàstic i d'empenyiment.

La corba tensió/deformació mostra que per sobre la frontera de proporcionalitat les cel·les es deformen irreversiblement, la unió entre biguetes i plataforma es trenca per forces d'empenyiment. Veiem doncs que l'estabilitat d'aquestes estructures és qüestionable. (Font: Plastics in Building Structures)



Resistència a tracció i característiques de diferents patrons de biguetes

Les llargades lliures d'espai cobert amb plaques poden arribar a ser de 7 m i el seu gruix pot variar molt, ja que és totalment independent de la llargada. Pel contrari a les plaques d'acer, la flexió i els paràmetres h i d es poden conèixer, h és menor o igual a $li/35$ i $d=h+3\text{cm}$. Els gruixos d'aquestes construccions són a causa de mes factors no linealment determinats.

El gruix d'aquestes estructures ve donat pel gruix de la cel·la, per això les capes de sostre de composite reforçat són molt primes en comparació al gruix total.

El gruix de la cel·la ve determinat per l'aïllant tèrmic i acústic, per això els plafons, degut a la seva més alta rigidesa i mòdul elàstic, tenen gruixos de plataforma més petits que les espumes. No hi ha una metodologia de predimensionament definida, però per a definir el gruix es segueixen els següents criteris:

- 1- Longituds de biga curta, fins a 3m i rigideses mitges d'espumes i composites reforçats per fibra de vidre: gruix de $d = l/50$, com s'ha dit abans el gruix pot augmentar o disminuir progressivament depenent de les sol·licitacions estàtiques.
- 2- Amb plataformes fetes de plafó, els gruixos són inferiors als de les espumes, gruix de plataforma: $d = l/125$, però es pot arribar fins a $1/260$.
- 3- Les plataformes amb nervadures són formalment comparables a les d'espuma, i tenen un pes de $g = 0,3$ fins a $0,45 \text{ kN/m}^2$.

Les plataformes de composite no es diferencien en quant a l'anivellament de càrregues de les plataformes d'altres materials.

Com a problemes hi trobem els abombaments i bufaments a les capes primes i a les unions de plataforma amb plataforma.

4.5-4 Cel·les, cabines i caixes

Dins d'aquesta categoria hi han intervingut tots els tipus d'experiments fets amb composite, les caixes estan formades d'un terra, sostre i parets, que fan funció de làmina o plataforma. Gràcies a elles s'han aconseguit dissenys molt variats, les proporcions i la precisió que s'arriba a cantonades i corbes donen sentit a la seva utilització en edificis petits, per la seva mobilitat, resistència al clima, possibilitat de nous dissenys i formabilitat, lamentablement però no tenen resistència estructural.

La recerca per fer cases de composite o cel·les espacials fa que s'hagin elaborat uns nous tipus de formes però en conjunt tenim el mateix problema, degut a les dificultats de les unions i les forces normals ens quedem en les típiques formes de composite. Per sort s'està millorant tant en disseny com en processos industrials, no obstant les construccions quadrades amb angles de 90° i amb la menor part de cantonades i unions són les més segures i econòmiques (per exemple fg2000).

La longitud suportable a tracció està sempre entre els 2 i 2'5 m, són distàncies llargues que permeten en la majoria de casos ser realitzades sense càlculs estàtics previs.

Aquestes formes es caracteritzen més que per la seva càrrega, per les seves característiques de fabricació i per la forma i unions.

4.5-5 Cobertures corbades

Es van començar a aplicar tard i en edificis grans no s'han utilitzat mai, cada cop agafen més protagonisme com a edificacions industrials, bidons, contenidors, cilindres...

Les xemeneies són construccions peculiars dins del tipus de cobertes desenrotllables, es fabriquen a partir de segments d'anell, la seva tracció augmenta degut al augment de gruix de paret. En les imatges següents es mostren les unions de seccions cilíndriques individuals.



De les aplicacions industrials se'n varen treure aplicacions quotidianes, es feien els mateixos productes però per a utilitzacions diferents, encara que no van ser gaire ben acceptades en el mercat.



Comparació de bidons industrials amb edificis fets seguint la mateixa tècnica

Normalment les longituds a tracció cobertes amb cobertures cilíndriques solen ser de 10 m, les cobertes son estabilitzades a través de làmines als cantos. El direccionament de la tensió va en direcció de l'eix de corbatura, superfícies d'1 m de gruix donen llums de 3 i 4 metres lliures de pilars.

Fetes d'una peça serveixen només per a petites longituds a tracció, s'aconsegueixen fins a 5 m de longitud, per sobre d'aquest punt es divideixen tots els segments en parts iguals.

Amb estructures dividides es poden arribar a longituds a tracció d'entre 2 fins a 20 o 25 m, hi havia el projecte d'una catedral de 30 m de llum però no es va arribar a realitzar.

Per construccions d'una capa trobem exemples molt lleugers, de $g = 0,05 \text{ kN/m}^2$. L'estabilitat augmenta en superfícies amb corbatures secundaries.

4.5-6 Cobertes doblement corbades

Cobertures d'aquest estil en veiem en Antoni Gaudí a la Sagrada Família (encara que no de composite) i també de Fèlix Candela a Mèxic.

La rigidesa és més gran que les anteriors, per tant funcionen normalment com a cobertes d'una sola capa de composite. Amb gruixos de 1,6 i 3,2 mm s'aconsegueixen longituds de 7 fins a 15 m i amb reforç de biguetes interiors es pot arribar fins als 20 m de diàmetre.

Són les cobertes que tenen la rigidesa més gran contra els bufaments i abombaments.

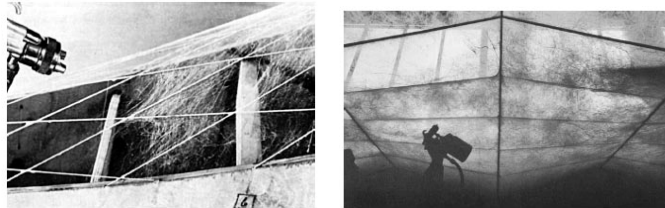
També es poden construir paraboloides hiperbòlics, les estructures estan formades per superfícies planes i la cobertura es pot formar per cordes tensades, el procés industrial més utilitzat és el de polverització (Cocooning).

Son molt lleugeres, també tenen pesos de $g = 0,05 \text{ kN/m}^2$.

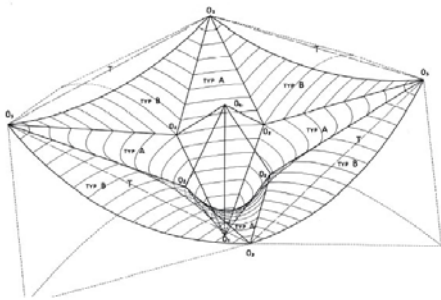
I també hi ha estructures completament no separables, sobretot a Anglaterra i Estats Units, són construccions molt llargues com per exemple cobertures de piscines o palaus d'esports.

Tot el grup d'estructures corbades, doblement corbades i hiperbòliques són també anomenades hipercobertures, aquestes van tenir molts predecessors.

Inicialment es pretensava una xarxa de cordes i posteriorment era coberta amb una massa endurable (procediment d'«spinn») generalment una capa de vinil-làtex de secat ràpid, un cop seca la membrana de làtex era endurida un altre cop amb una capa gruix mínim. Per aquest procediment es poden fer formes difícils i grans, els gruixos es poden arribar a fer de fins a 75 cm, encara que els gruixos normals són de 50cm, que es fan sense problemes. Així s'han fet construccions grans però també objectes com cadires i lampares.

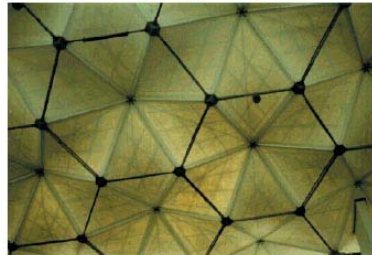


Exemple de tramats de cables recobert per pulverització



Hipercobertures

Els exemples construïts reflecteixen un cop més les grans capacitats d'aquestes estructures. La tribuna de l'estadi Laval, amb elements policromats, feta per Yves Chaperot té una longitud lliure de 28m i carrega en la direcció contrària 10,5m. Mostra la rigidesa i lleugeresa dels elements de fibra de vidre en una estructura, i de com s'aconsegueix dreçar un edifici a partir del típic principi de l'addició, la construcció d'una estructura a partir de petits elements idèntics. Du Chateau pren més tard aquest principi de Yves Chaperot i prepara hipercobertures de forma industrial, també policromades, dissenya al mateix temps noves estructures en que les unions en els angles estan fetes d'acer. Aquestes construccions són el contrari de les cobertures esfèriques, les quals a partir de la divisió d'elements se n'extreu la forma per a cobrir superfícies. Du Chateau i Makowski no feien encara estructures híbrides, les van començar a desenvolupar 20 anys més tard, en aquells moments encara feien estructures espaials llises.



Tribuna de l'estadi Laval

4.5-7 Estructures de tipus ombrel·la

Constitueixen un altre principi d'addició econòmic, que juntament amb les cobertes normals són de les més utilitzades, es caracteritzen per tenir una obertura a sobre. Un exemple d'aquests sostres el trobem a l'Expo de Lausanne del 64, en el Pavelló de Osaka.



Parlem d'estructures tipus bolet, en canvi quan les superfícies que formen els embuts o cràters estan sotmeses a compressió, aquí podem trobar-hi també superfícies planes, aquestes últimes són però menys resistents. Parets de superfícies planes són poc utilitzades, un exemple n'es l'aeroport de Dubai, on s'aconsegueixen 18 m lliures de pilars, amb superfícies d'aquest tipus però corbades es va fer la Monsanto House of the Future, la primera feta amb fibra de vidre. L'exposició americana a Moscou es va fer mitjançant l'addició d'estructures tipus ombrel·la de 1'5 mm de gruix.



Expo americana a Moscou



Aeroport de Dubai

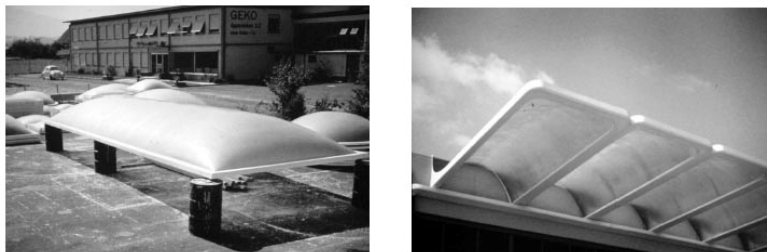
Les dimensions externes són en aquest cas de 10 x 10 m, si l'element és pretensat les grandàries poden doblar-se.

4.5-8 Formes lliures

N'hi ha tres tipus:

- 1 - Les formes de muntanya, a partir de motlles de terra.
- 2 - Les membranes que s'aguanten sota pressió.
- 3 - Les que es fan a partir d'un teixit penjant que s'endureix, igual que una corda que penja i defineix una corba, la flexió a través del material determina la forma.

Aquests tipus de formes són susceptibles de construir-se amb composites, però encara estan en una fase molt experimental, tot i que ja són realitzables i lliures de defectes i d'esquerdes.



Formes de tipus membrana fetes a partir de motlles

4.5-9 Estructures de plecs

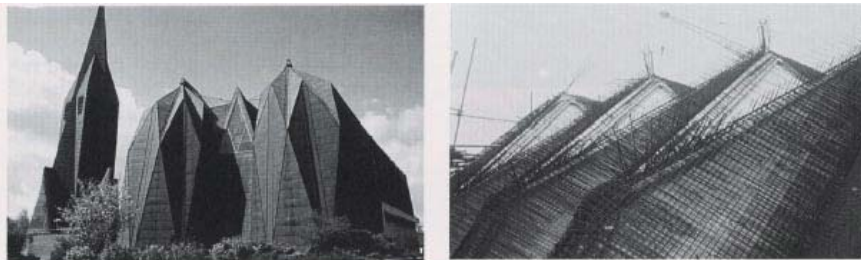
Amb aquestes estructures s'aconsegueix un augment de rigidesa en comparació amb estructures planes, això fa possible la connexió de grans longituds, són molt aptes per a estructures externes de composite.

Contràriament a les plataformes i vidres, només suportades per construccions de biguetes, les longituds a tracció lliures estan entre 5 i 25 m, encara que alguna vegada s'ha arribat a fer de fins a 45 m. El pes d'aquestes estructures es molt baix en comparació amb la resta. Per a estructures de plecs planes o també corbades s'aconsegueixen pesos entre $g = 0,05$ i $0,07 \text{ kN/m}^2$ per a longituds a tracció de fins a 25 m, en comparació amb les plataformes que només feien fins

a 2 o 3m. La longitud encara es pot augmentar amb la construcció de marcs portants. La relació entre condicions a tracció i altura de la construcció és lineal. A partir de l'addició de capes s'aconsegueixen diferents gruixos d'innúmerables formes, els productors han intentat d'ordenar aquest grup segons les seves característiques:

- Prismàtiques: Plans prismàtics, que van paral·lels uns amb altres, que canvien d'inclinació, o que són de seccions triangulars.
- Piramidals: Poliedres i estructures espacials

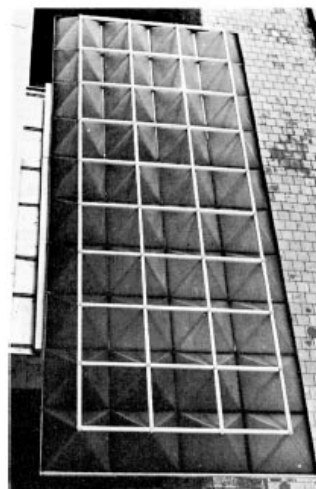
Les estructures de plecs de composite troben els seus avantpassats en les de ciment. Amb la combinació de les dues tècniques es poden aconseguir també longituds molt grans de tracció. Eduardo Torroja i Fèlix Candela són referents espanyols en aquest camp, però les seves experiències són posteriors als treballs de Makowski i Huybers.



Estructures de plecs i tramats en 2 direccions

A través de la unió de les cantonades superiors de les piràmides s'estableixen estructures espacials de reixats, els quals poden anar en 2 o 3 direccions. El càlcul d'aquestes estructures s'ha de realitzar amb computadors.

Es fan estructures de plecs formant piràmides no reforçades de fins a 9 m, la superfície mínima de la piràmide és de 0,6 x 0,6 m. Amb piràmides de composite les longituds de tracció es poden fer fins a 20 m.



Estructura espacial de reixat

4.5-10 Estructures de plecs corbades

En comparació amb les planes, transporten la càrrega a través de forces paral·leles al pla del mig, les cobertures arriben a ser així molt primes i poden estar fetes només d'una capa. Amb composites es pot fer gairebé qualsevol forma imaginable. Els seus precedents es troben també en les construccions de ciment.

Van ser els mateixos arquitectes de formes corbes de formigó, Fèlix Candela, Frank Lloyd Wright i Le Corbusier que es van començar a interessar pels composites com a nou material per a les seves estructures. No obstant, Fèlix Candela com que podia construir amb formigó per un preu de 12 euros/m², no es va dedicar gaire a la investigació d'aquells nous materials, s'hi havia d'invertir massa, i no se sabia quant se'n treurien resultats. Molts altres arquitectes i constructors no s'hi han interessat perquè han trobat les noves formes massa exagerades o molt diferents de tot lo construït fins ara, a part de que no s'han fiat gaire de la seva resistència.

Heinz Isler va ser el primer en experimentar amb composites, encara que les seves formes amb aquests materials eren geomètricament simètriques, similars a les fetes amb formigó. Va començar quan encara no hi havia res escrit sobre el comportament d'aquests materials. Amb ell va començar a haver-hi literatura, que va continuar desenvolupant-se després de la segona guerra mundial.

En quant al comportament a tracció i estabilitat podem dir que les càrregues es reparteixen per igual entre cadascuna de les formes individuals, de forma similar al formigó, així com també les forces de compressió al mig de la coberta. Les forces de tracció i flexió juntament amb el petit mòdul elàstic dels composites fan que les estructures no siguin gaire estables però sí rígides, prioritari en comparació amb les cobertures de formigó. Aquest càlcul de curvatura ens dona el seu límit, o almenys un valor orientatiu:

$$p_{\text{krit}} = \alpha \frac{E \cdot d^2}{R_1 \times R_2}$$

mit

α Beulfaktor

E E-Modul

d Schalendicke

R_1 und R_2 Hauptkrümmungsradien in dem gefährdeten Punkt



El factor de cobertura depèn de la forma de coberta i de les seves sol·licitacions als marges. Amb les formes corbes tenim moltes possibilitats d'augmentar la seva estabilitat, augmentant-ne el gruix o el radi de curvatura s'augmenta també la càrrega crítica. Aquest principi s'ha utilitzat molt per a les estructures simètriques doblement corbades. En tenim exemples en Heinz Isler, en la cambra climàtica i la depuradora, o també en les cobertures de cúpula amb forma d'estrella de Stephan du Chateau.



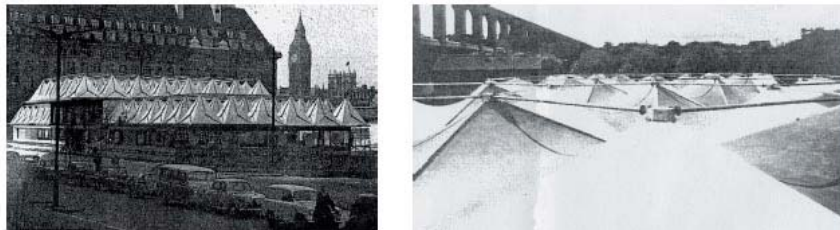
Cobertures de cúpula corbades

Els càlculs es feien inicialment igual que per al formigó, però les primeres diferències en quant a gravitació entre el formigó i els composites ja es comencen a veure en la fabricació.

Les primeres superfícies de composite es feien d'una peça, feien com a màxim 7 m de diàmetre. La idea de dividir la construcció en parts va esdevenir fortuïtament en una construcció, degut al transit del carrer. La cúpula no era accessible ja que feia 5 m, per tant es va dividir i posteriorment es va transportar fins allà.

S'ha de trobar un compromís entre grandària de la forma, transportabilitat i preu. Des de que es van començar a dividir les estructures no s'ha deixat de treure partit de la seva transportabilitat, per exemple s'ha fet amb el Polar Iglu o les cases de vacances Rondo o Futuro.

A partir de la separabilitat és quan la construcció de composite s'escindeix de la de formigó, apart naturalment de per la seva lleugeresa. Però les aplicacions de composite i de formigó no es fan competència unes amb altres, les de composite s'uneixen interiorment entre elles amb mecanismes o clipatges, es formen esquelets interns propis de la construcció en fusta o en acer, totalment divergents de les de formigó, en canvi l'alumini com a metall lleuger si que fa la competència als composites per a segons quines estructures mòbils o segons quins edificis.



Transport d'estructures modulars i posterior montatge



Cúpules dividides en segments

La fusta, que s'havia utilitzat des de tants anys enrere ha tingut gràcies als composites una aplicació molt gran en cúpules, degut a l'efecte cobertura i a que possibilita un repartiment de càrregues de tipus membrana en totes direccions.

Les unions de cada una de les parts de la membrana es fan sempre als esquelets de fusta o acer, ja que les cobertures de composite, per mecànica de forces no poden formar cap esquelet, a part de que les unions en sí mateixes mai queden completament ben resoltes.

La unió que més s'ha utilitzat és cargolant o reblant els marges de les cobertes, però d'aquí n'esdevenen dues desavantatges: a conseqüència de les unions el material no es més lineal sinó que forma punts de tensió i pot començar a trencar a partir d'ells, i segon les forces normals a la coberta, les tensions ja no es direccionen tan directament al mig i l'efecte membrana queda parcialment anul·lat. Buckminster Fuller uneix els components del Fly's Eye amb cargols metàl·lics situats puntualment en els marges, però de petits diàmetres, així les forces en la cobertura són petites i connectades només en una petita secció transversal.



Vivendes esfèriques montades a la mateixa obra

En comparació amb estructures de plecs i cúpules de biguetes, les cobertures doblement corbades poden formar longituds a tracció mes grans, les cobertures corbes tenen com a límit els 20 m, les inversament corbades 28 m, i les cobertures desenrotillables tenen la frontera als 10 m.

Les estructures pretensades arriben a una altura de 60 m, els gruixos de les parets de cobertures cilíndriques augmenten en el moment del pretensat.

Les construccions sandwich poden arribar a cobrir longituds de fins a 60 m, independentment del seu gruix, factor econòmicament molt positiu amb motiu del I+D dut a terme per a construccions d'aquest tipus. Les estructures fetes de dues capes poden arribar a 90 m sense problemes de flexió.

4.5-11 Estructures de poliedres

Formen un petit grup similars a les estructures de caixes i aguanten més força que les membranes.

Comportament geomètric: inclinació de les cares i flexió.



4.5-12 Marcs triarticulats i voltes

Són estructures estàticament determinades, planes, plegades i ideals de fer amb composite. La fàbrica de sofre de Renzo Piano a Pomezia, a prop de Roma, vista abans, és exageradament lleugera $g = 0,04 \text{ kN/m}^2$. Així tota la superfície podia ser coberta amb rombes d'iguals dimensions. Té una forma molt innovadora i és molt econòmica en comparació amb els materials utilitzats fins al moment.

Renzo Piano sempre va tenir molt present la investigació ja que el seu germà tenia l'empresa Resine Prodotti Derivati, a Milà.

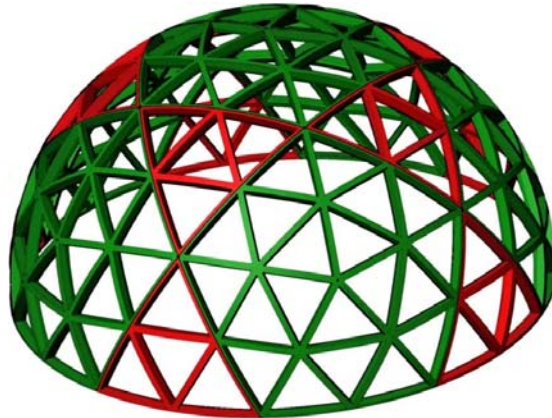
4.5-13 Cúpules geodèsiques de bigues i cúpules de membrana

Per a les cúpules suportades per biguetes, també anomenades xarxes de bigues, que segueixen el principi geodèsic (cúpules geodèsiques) de Buckminster Fuller, és necessari fer una consideració per separat.

Una cúpula geodèsica és una part d'una esfera geodèsica, un poliedre generat a partir d'un icosaèdre o un dodecaèdre. Les cares de la cúpula poden ser triangles o hexàgons, de tal manera que els vèrtexs coincideixen tots amb la superfície d'una esfera o un el·lipsoide.

Per a l'esfera geodèsica es compleix el teorema de poliedres d'Euler:

$$X \text{ cares} + Y \text{ vèrtexs} - Z \text{ arestes} = 2$$



Cúpula geodèsica de marcs triangulars

En aquest àmbit és on són més utilitzats els composites com a material estructural, al costat de les aplicacions per a sitges. Les cobertures resistents al clima, com cúpules per a estacions radar/Geo-Dome tenen diàmetres variables, podent arribar a ser enormes, així per exemple les cúpules de Fylingdales a NY tenen un diàmetre de 42 m. La patent per a fer aquest tipus de cúpules la va fer el mateix Buckminster Fuller al 1965 i fins al moment se n'han fet unes 200.000. Les cúpules de barres, o biguetes són les més apropiades per aquesta aplicació, doncs les estacions radar no poden ser fetes amb materials metàl·lics, a més el seu baix pes i la possibilitat de divisió de l'estructura sense dificultats a la mateixa obra fan dels composites els materials més apropiats per a la seva construcció (les estacions radar es construeixen normalment a les muntanyes). La forma externa rodona permet instal·lar-hi l'antena. El composite permet la seva modificació en qualsevol punt o unió per a muntar-hi l'ancoratge. Per a la perfocació de les cúpules de Fylingdales van ser necessaris experiments prèvis de repartició de càrregues a través de la superfície/xarxa de la cúpula.



Per grans diàmetres, els triangles grans han d'estar més dividits, degut a que les tensions es reparteixen entre llargues distàncies, això fa que hi hagi diferències entre les llargades de barres.

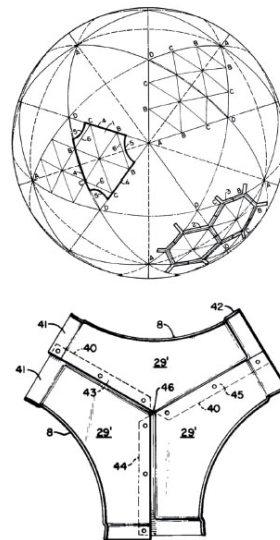
A vegades s'han d'utilitzar formes configurades a pressió i temperatura i això encareix bastant els costos, però també n'augmenta la qualitat, els costos poden disminuir però quan les barres són més nombroses amortitzen més ràpidament el cost del motlle.

A www.radome.net fabricants americans, presenten construccions tipus, marcs estructurals que delimiten espais "Dielectric Space Form". Allà hi són presentades diferents variants:

La 1^a variant és una capa de membrana prima (1mm) a sobre d'una estructura cúpula de bares de composite, generalment de fibra de vidre.

La 2^a és una capa de laminat simple de 2,3 mm.

La 3^a i 4^a són construccions sandwich de 2 o 3 capes (específic per a Radomes).



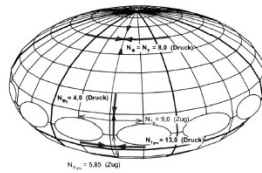
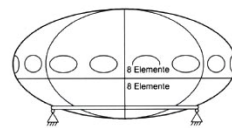
Construcció i divisió d'una esfera geodèsica

El dimensionament del gruix aïllant de sandwich ve donat per la càrrega i la radiació a la que la membrana està exposada. A més, els elements de

composite transmeten la càrrega al fonament a través de la pròpia xarxa. Les unitats de triangles o hexàgons poden ser planes o corbades.

El principi de repartició de càrregues de les cúpules geodèsiques deixa obertes moltes possibilitats estructurals de l'estructura. L'estructura portant s'obté a partir de projecció i repartiment i s'omple per triangles que no tenen com a funció principal el reforç, encara que al final estructura i triangles carreguen tots dos junts, ja que són plataformes reforçades pels marges (i a vegades amés corbades). Així s'arriba a fer realitat el concepte de que tota la membrana sigui estructural, això representa pels composites una avantatge enorme enfront dels altres materials de construcció, al mateix temps que són tancament espacial i element estructural.

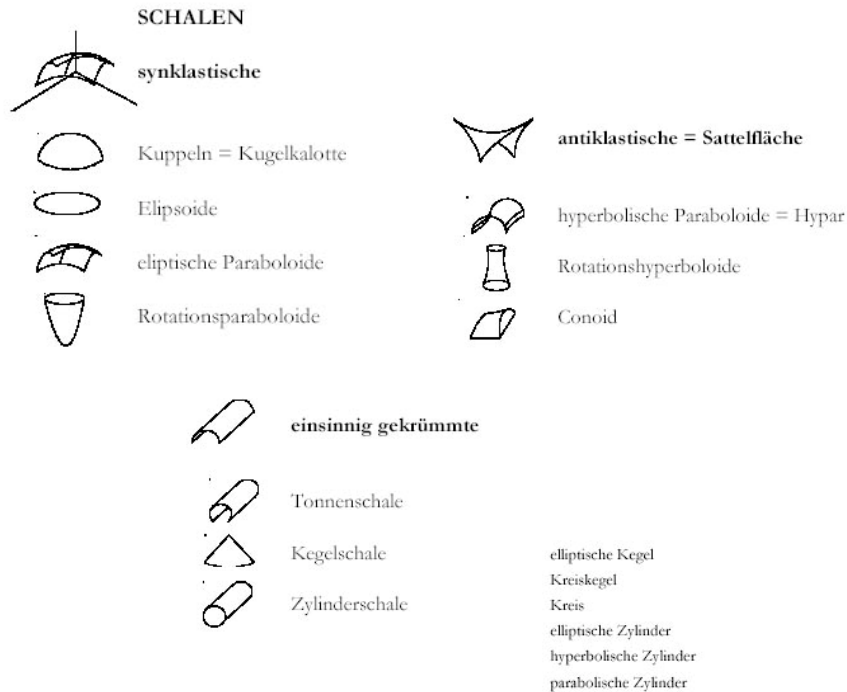
Una altra possibilitat d'estructures geodèsiques son les "Flyes Eye". Aquí la membrana és oberta encara que només a través dels ulls. Es fan a partir de pentàgons i hexàgons corbats, amb peces prefabricades, amb grans obertures. Els que s'han construït fins ara s'han fet laminats manualment. El muntatge es fa de manera que uns elements s'uneixen amb els altres solapant-se, i gràcies a això es fa d'una forma molt àgil i ràpida. Aquestes estructures es van patentar sota el nom de Monohex.



Construccions Flye's Eye

L'èxit d'aquestes estructures te a veure amb les investigacions de superfícies de cúpula de Buckminster Fuller, però les aplicacions d'aquestes investigacions estan relativament desaprovechades. Les Radome de composite son lleugeres, mòbils i amb un alt grau de preacabat, la capa protectora contra la radiació es pot pintar a sobre sense problemes. Es van desenvolupar molt durant la guerra freda com a instal·lacions de radar i ara són considerades d'alta tecnologia.

4.5-14 Ordenació de les estructures per a cobertes



Aquest es un esquema de la taula de les estructures, mostra un tipus de cada una de les estructures que s'han fabricat fins ara. En la taula original hi trobem 250 exemples, dels quals 93 son cobertes i 74 son de tipus membrana.

En total son:

9 cobertes desenrotllables.

33 cobertures corbades.

16 inversament corbades.

12 estructures tipus ombrel·la (també de tipus cobertura corbada) de les quals 2 tenen sol·licitacions a tracció.

4 formes lliures.

19 cobertures a flexió, suporten la càrrega a flexió i no per la força de la membrana.

4.5-15 Conclusió

Aquestes estructures són de les més significatives, en comparació amb les similars de formigó no produeixen gairebé tracció degut a la seva longitud, la seva tècnica de producció i la possibilitat de fer estructures modulars de petits elements les fa aplicables també a altres tipus d'estructures, al contrari de les estructures espaials de metalls lleugers tenen l'avantatge de ser translúcids i

resistents al medi. Com hem dit abans, es pot arribar fins a llums de 25 m, i en segons quines fins a 30 m.

Els gruixos de paret mínims són de 3 mm, nivells inferiors a les estructures de cobertes, però sempre depèn de l'aplicació. També s'aconsegueixen estructures corbes amb les mateixes longituds lliures, altura i secció de perfils, amb un comportament similar, grandàries similars i mateixos direccionaments de les tensions principals, a la vegada que també tenen semblant comportament d'estabilitat.

A partir de l'aplicació dels composites no es van desenvolupar noves estructures, els processos s'han mantingut, només s'han readaptat al nou material, que es troba igualment dins d'un motlle per a ser endurit i té un comportament similar al del formigó.

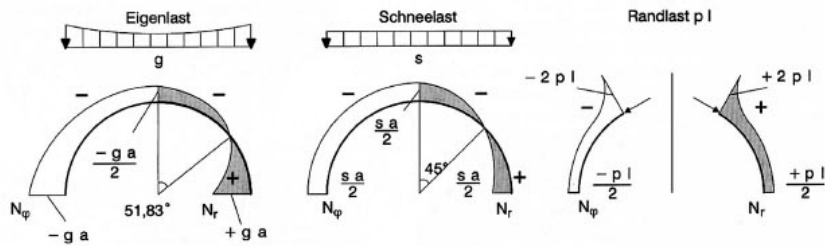
La major part de tipus d'estructures utilitzades ja eren conegudes amb formigó, però el tipus i la forma d'instal·lació en una estructura se'n diferencia molt.

La construcció amb composites es caracteritza per la divisió de l'estructura en parts modulars individuals, el motiu principal és el cost de producció que té el motlle, en cas de que totes les peces siguin exactament iguals s'abarateixen molt els costos. El mateix passa amb el transport, parts petites signifiquen menys desplaçaments. La desavantatge és però que com més petites són les peces més unions s'han de fer, i el comportament de l'estructura se'n pot veure perjudicat.

Per això s'ha de trobar un límit de dimensions de peces, en el que s'equilibrin costos de motlle i de transport. Es poden produir peces de 3 i 5 m i després transportar-les amb camions normals. Si la tirada és suficientment llarga i s'han de fer relativament poques unions, la construcció surt a compte.

En tots els projectes d'aquest tipus s'utilitzen components preacabats. Només les proves amb prototips es fan al lloc de la construcció, de vegades d'una sola peça, i en el cas de que funcioni es segueix endavant i es pensa la millor forma de dividir-les i transportar-les.





Esquema de sol.licitacions de càrregues de persones, neu i càrregues als marges

5- Els càlculs

5.1- Procés de càlcul

La deducció de les igualtats per al càlcul de composites és realment complexa, en la literatura es poden trobar descripcions detallades. Els mètodes de càlcul utilitzats són softwares, com per exemple ESAComp, o també són implementats programes generals FEM (elements finits), com ANSYS. Intentaré donar només una idea general per a la comprensió dels fonaments. El càlcul es divideix en tres parts.

- 1- Micromecànica per a l'obtenció dels valors de cada una de les capes.
- 2- Macromecànica per a l'obtenció del comportament de tot el laminat en conjunt.
- 3- Anàlisi d'errors com a base per a futurs càlculs.

5.1-1 Micromecànica

Els valors obtinguts en els assajos fan considerar els composites inicialment com a capes independents cada una d'elles homogènia. Degut a que les característiques mecàniques són fortament diferenciades, hi ha casos en que tenim valors de fibres dominant i casos en que tenim valors de matriu dominant. Els primers es poden calcular amb una bona aproximació amb la regla de les mescles.

El mòdul elàstic en la direcció de les fibres:

$$E_{11} = E_{f11}\varphi + E_m(1 - \varphi)$$

Amb φ com a fracció volúmica de fases en les capes individuals, l'index f per el valor de les fibres i m per el de la matriu.

Anàlogament per els valors perpendiculars/transversals:

$$\mu_{12} = \mu_{f12}\varphi + \mu_m(1 - \varphi)$$

Pel mòdul elàstic en la direcció transversal i pel mòdul d'empenyiment s'utilitza la regla de les mescles:

$$E_{22} = \frac{E_{f22}G_m}{E_m\phi + E_{f22}(1 - \phi)}$$

$$G_{12} = \frac{G_{f12}G_m}{G_m\phi + G_{f12}(1 - \phi)}$$

Amb la presentació d'aquest model es comprova que les formes tenen un bon comportament elàstic en la direcció de les fibres, i respectivament en la direcció perpendicular el comportament elàstic segueix una elasticitat ordenada a través de les capes.

Mitjançant el canvi de ϕ per l'arrel de ϕ en les equacions anteriors aconseguim finalment les fórmules per els paràmetres dominants de la matriu E22 i G12. Aquests càlculs són suficients per a determinar les deformacions en la matriu, són valors fàcils d'aconseguir i relativament precisos.

$$E_{22} = \frac{E_{f22}G_m}{E_m\sqrt{\phi} + E_{f22}(1 - \sqrt{\phi})}$$

$$G_{12} = \frac{G_{f12}G_m}{G_m\sqrt{\phi} + G_{f12}(1 - \sqrt{\phi})}$$

Hi ha altres fórmules de càlcul possibles, formes per altres valors i també per fases desordenades o paral·leles, sortint dels casos inicials es molt difícil però quantificar valors, per exemple en reforços industrials no es fàcil determinar les deformacions en cada un dels models del catàleg. Una aproximació inexacta però fàcil es la substitució de reforços comercials per 2 capes anàlogues de UD. Existeix una fórmula de les mescles corregida en la qual la part de fases s'introdueixen en la direcció de la futura càrrega. El factor k s'introdueix per la part de fases perpendiculars a la direcció de la càrrega. Per conjunts de fases desordenades i comercials s'utilitza k= 0,5 amb 2 direccions de fases amb el mateix valor.

Per conjunts o reforços curts val l'expressió:

$$E_{11} = E_{f11}\phi\kappa + E_m(1 - \phi\kappa)$$

Per reforços comercials:

$$E_{11} = E_{f11}\phi\kappa + E_m(1 - \phi\kappa) + E_m \frac{1 - \kappa}{(1 - \mu_m^2)(1 - \sqrt{\phi})}$$

5.1-2 Macromecànica.

Dels valors de les capes individuals se'n treuen les propietats dels laminats, per això s'ha fet servir la teoria classica dels laminats (CLT). Es suposa un pla (o aproximant una superfície lleugerament corbada) una estructura plana segons la teoria de superfícies de Kirchoff. Les cobertures son petites en comparació a les proporcions de l'edifici, no hi ha tensions en la direcció del gruix, els plans seccionats resten plans davant la deformació. A més, es suposen el comportament lineal elàstic i la perfecta unió entre les capes individuals.

En els laminats, per la grandària de la secció i les tensions en el pla, donat el gruix t valen les relacions conegudes:

$$n_{xx} = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_{xx} dz$$

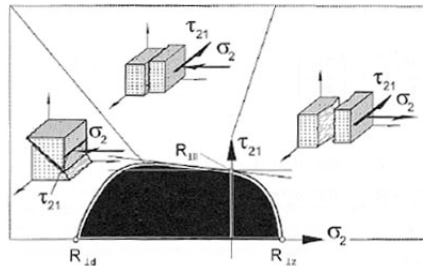
I anàlogament per n_{yy} i n_{xy} , on $\sigma_{xy} = \tau$

$$m_{xx} = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_{xx} z dz$$

Anàlogament, per m_{yy} i m_{xy} :

Les tensions d'una capa individual k es calculen a partir de les deformacions i curvatures, cada cop prenent el pla mig del conjunt del laminat.

En el dibuix següent es mostra la interacció de σ_2 i τ i les seves corresponents formes de trencament:



Aquí, Q_k és la matriu de rigidesa de les capes individuals k , que considerem juntes en un conjunt comú. Per al laminat complet es transforma el sistema de coordenades.

Z_k és el gruix de les capes individuals en el laminat, aquestes relacions estan ja definides i són integrades. Així les característiques dins les capes primes individuals es poden considerar com a constants, d'aquesta manera per acabar esdevé una equació fàcil:

$$\mathbf{A} = \sum_k \mathbf{Q}_k t_k$$

$$\mathbf{B} = \sum_k \mathbf{Q}_k t_k z_k$$

$$\mathbf{D} = \sum_k \mathbf{Q}_k t_k (z_k^2 + t_k^2/12)$$

S'aconsegueixen els gruixos de secció a través de les deformacions amb:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix}$$

Aquestes són fórmules simplificades, després d'aquests primers anàlisis s'utilitzen programes de càlcul que dels valors de les capes individuals obtenen la matriu de rigidesa del laminat. Programes addicionals observen per exemple les exigències tèrmiques. Amb això es pot calcular tot l'edifici o part d'ell. Per acabar es tornen a transformar les exigències en relació a les capes individuals per a provar la seguretat contra errors.

5.1-3 Anàlisi d'errors

El càlcul de la condició d'errors es un tema més complicat, hi ha diferents teories estudiades i també trobem criteris empírics segons la utilització. El doblegament i trencament dels diferents tipus de matrius entremig de les fases diferencien els tipus d'errors.

El dibuix de l'apartat anterior mostra el trencament de la matriu per a diferents nivells d'exigència, aquesta superfície d'interacció augmenta en la direcció σ_1 cap a una superfície d'error tridimensional.

Aquests models citats indiquen que si bé alguns problemes de detall per aquests materials es completen, molts altres encara no estan ben aclarits, tot i que per un predimensionament són suficients els càlculs anteriorment citats.

5.1-4 Dimensionament

A continuació es presenten ajudes de medició que condueixen àgilment a un primer predimensionament. De tant en tant es presenta problemàtica l'obtenció de paràmetres del material.

Vistes a les avantatges de la matèria prima de composite i de les seves propietats de conformat, és molt desitjat però sovint difícil, tenir preparats materials de construcció de la mateixa forma que es fa amb els procedents de la construcció en acer.

Per al disseny d'una estructura feta amb composites cal buscar un previ contacte amb el fabricant, o es calculen els valors necessaris dels materials afegits a partir d'assajos i proves.

Per a facilitar les coses a l'usuari seria bo facilitar en cada cas un mètode, una experiència pràctica similar feta prèviament, que sigui apta com a metodologia a seguir, que permeti evitar els casos particulars, però encara no existeixen gaires procediments d'aquest tipus.

Les proves de seguretat encara es troben en fase de desenvolupament. En els últims temps s'ha aconseguit fer algunes construccions amb perfils extruïts de composites a partir del manual d'instruccions del fabricant Fiberline. S'inclouen indicacions de propietats de materials experimentalment obtingudes, des de paràmetres dels perfils, fins a connexions i unions típiques prefabricades.

Actualment l'associació de control d'edificació està pendent de construir parts senceres d'edificis incloent-hi a més exemples de càlcul, així es presentarà almenys un esbós de normativa a seguir.

Com a valor característic per a quantificar de resistència del material s'agafa el 5 % del valor de ruptura. Les qualitats del material són obtingudes i es calcula el valor característic de $R_{k0,05}$ amb:

$$R_{k0,05} = \mu_R - k_s \sigma_R$$

μ_R i σ_R són aquí la mitja i la desviació típica del valor de la resistència i k_s depèn del numero d'intents portats a terme. El valor característic experimenta diferents factors de reducció:

A més s'hi aplica un factor de seguretat conegut d'altres normes, que en aquest cas depèn de diferents paràmetres:

Uns són condicions de mesura:

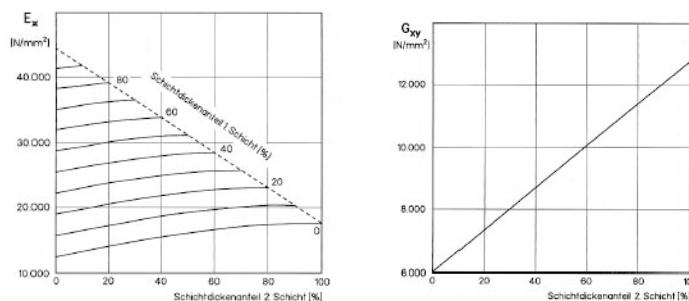
Per exemple per a càrregues externes.

Informació sobre rigidesa.

Consideració de l'estabilitat com a local o com a global.

L'altre fa referència al material:

Forma de producció (mecànica o manual).



Informació sobre rigidesa i deformació del material en percentatges

Adicionalment s'hi introdueix un factor de modificació, com a producte dels 3 factors que hi influeixen, els quals inclouen les condicions d'entrada:

Amb A_1 per a la durada de l'efecte (que un altre cop depèn de la forma de producció)

Amb A_2 per la influència del medi (clima i efectes químics)

I amb A_3 per la temperatura de l'ambient

$$A_{mod} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

Amb això es calcula el valor medit de la resistència del material amb:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M \cdot A_{mod}}$$

Aquest format es fa servir en casos de paràmetres com el mòdul elàstic, la rigidesa o la deformació a ruptura. En les recomanacions, aquests valors numèrics són determinats pels factors correctors, el mateix passa amb el coeficient de seguretat.

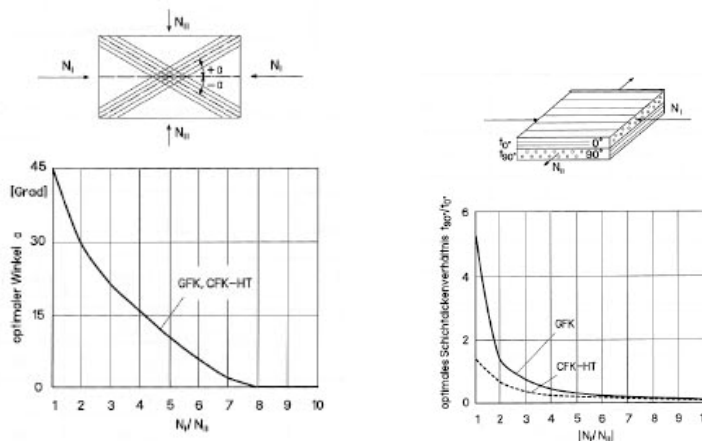
Amb la finalitat d'arribar ràpidament a un predimensionament amb valors reals, Michaeli et Al. han desenvolupat diferents normatives, aquests mitjans d'ajuda serveixen per a la consulta en cas que es requereixi, però aquí no s'explicaran perquè ocuparien massa espai.

Els paràmetres fonamentals són obtinguts mitjançant la recerca de laminats ja calculats, amb valors mitjos de qualitats de materials.

Diagrames similars als de la fotografia de la pàgina anterior s'utilitzen per els coeficients de dilatació en funció de la temperatura i pels reforços de fibres d'aramida i de carboni. Alguns carpet plots s'obtenen també a través del fabricant.

Pel desenvolupament pràctic del disseny d'una estructura de composite es recomana procedir de la següent manera:

- 1- Càlcul d'una estructura amb llei de materials homogènia i aproximació de les propietats del material. Determinació de les càrregues principals normals.
- 2- Disseny d'un primer laminat amb mitjans d'ajuda, pel càlcul de càrregues principals.
- 3- Càlculs secundaris amb el disseny del laminat sota l'aplicació de CLT.
- 4- Revisar la seguretat de l'estructura i embotellaments en ella per tots els casos de càrregues. En el cas d'un nou disseny de laminat s'han de fer nous càlculs.



Les dues fotos anteriors mostren les dues càrregues normals principals a compressió, en aquests casos les dues capes són igual de fortes, les forces normals principals tenen diferents signes.

A la foto de la dreta es mostra un laminat $0^\circ/90^\circ$ amb diferents gruixos de capa òptims. Aquesta construcció obtinguda així no és constructivament acceptable, perquè no es ortotròpica, a més per a afavorir la disminució de tensions d'empenyiment interlaminars es recomana preveure-ho amb elements més prim. La construcció òptima de capes es pot obtindre pel càlcul de càrregues principals.

Les proves de materials i assajos de parts d'edificis van ser inicialment l'únic mitjà per a provar la seguretat de l'edifici. Amb les regles del sòlid lliure es poden conèixer les sol·licitacions en cada un dels punts suport de l'estructura, partint d'unes càrregues inicials aplicades, però les reaccions poden ser molt diferents en funció del material. Mentre que amb fusta, formigó i acer ja està tot conegut, per a composites està tot per a descobrir.

Les sobrecàrregues per neu i persones, diferències de temperatura i deformacions causades per ells, esforços màxims a ruptura, etc., es poden calcular també per a composites, i se'n pot treure el cas més desfavorable, però encara no es poden donar valors de gran precisió.

Aquestes característiques noves encara per a descobrir, es presenten complicades, però es pot determinar si s'aguanten o no unes sol·licitacions en un camp concret.

La vida útil també es difícil de quantificar encara, depèn molt de les sol·licitacions, la radiació UV i la temperatura, tots ells son factors que influeixen en escurçar la vida d'aquests components, ja que redueixen la seva rigidesa (entre un 10 i un 12,5 %) i n'augmenten la deformabilitat.

Els intents de tenir valors aproximatius de la resistència d'aquests materials ha estat una labor de molts enginyers durant molts anys, s'han anat trobant valors per mitjà de processos iteratius molt units a les experiències pràctiques.

5.2- Característiques desfavorables

5.2-1 Baix mòdul elàstic

Correspon aproximadament a la meitat d'una fusta de nivell mig, per això en qualsevol forma constructiva hi trobem el problema de fons de l'estabilitat, que prové de les sol·licitacions a tracció. En algunes construccions es poden contrarestar mitjançant el seu procés de format, com per exemple cobertures, estructures de plecs o laminats sandwich.

5.2-2 Manca de fluïdesa i poca deformació a ruptura

Composites i concretament composites reforçats amb fibres de vidre, tenen en comparació amb l'acer un diagrama tensió/deformació molt poc elàstic. La gran part de deformació plàstica, que estem acostumats a veure en l'acer, en els composites falta per complet. Les càrregues puntuals de curt termini no flueixen, per això en la construcció hi ha problemes, especialment en les unions.

5.2-3 Canvis al llarg del temps

El problema més gran dels composites és el seu canvi de propietats amb el pas del temps. La durada de les càrregues i l'efecte de la temperatura resten resistència i mòdul elàstic al material. La seva resistència és clau per a una estructura de composite efectiva. Per a l'aplicació en construcció els components han de provar una durada de 20 anys.

Statische Berechnung zum Kunststoffhaus fg2000

1. Vorbemerkungen
1.1. Allgemeines
 Für das eingeschossige Wohnhaus ist gegeben: rechnerische Baugliederung der tragende Werkstoffe.
 Die Bauelemente bestehen aus folgenden Elementen von 125 mm Breite, wobei die Platte als Sandwich ausgeführt ist, während die Stiege aus GFF durch Holzbohlen ausgeführt werden. Die Durchdringung spannt sich für über 10 m und lagert sich auf den Mauerwerk ab, mit denen sie verschraubt sind.

1.2. Werkstoffe
 a) Stahlbetonwerkstoff als Material, dessen Eigenschaften angegeben sind.
 $E = 20000 \text{ kp/cm}^2$
 $\sigma_{\text{Bruch}} \geq 250 \text{ kp/cm}^2$
 $\gamma_{\text{Bruch}} \geq 6$ angegeben
 b) Sandwich aus Schaumstoff mit Drivestration aus GFF
 $\gamma_{\text{Bruch}} \geq 2,5$ angegeben
 c) Holzbohlen nach DIN 1052
 d) Schrauben 4D Feingalvanisierter Stahl A4-70
 e) Klebung
 $\gamma_{\text{Bruch}} \geq 40 \text{ kp/cm}^2$
 $\gamma_{\text{Bruch}} = 8$ angegeben

1.3. Berechnungsgrundlagen
 a) DIN 1055, 1056, 1052
 b) verbriefte Richtlinien für Glasfaserverstärkte Kunststoffe
 c) Stahlschlüsselwerte & Werten

2. Bauelemente ohne Berücksichtigung der Bauteile
2.1. Belastung
 Elementbreite $b = 125 \text{ cm}$
 tragende Konstruktion 30 kp/m^2
 8 mm Holzspanplatte $8 \cdot 125 = 1000 \text{ kp/m}^2$
 Typische Belang 12 kp/m^2
 Klebmasse 4 kp/m^2
 $P = 75 \cdot 125 = 9375 \text{ kp/m}^2$
 $P = 94 \text{ kp/m}^2$
 $P = 100 \text{ kp/m}^2$
 $pro \text{ m}^2: q = 100/125$

2.2. Schnittkräfte
 $Q = 150 \cdot 10\% = 750 \text{ kp}$
 ohne Berücksichtigung der Randabsp.:
 $M_0 = 150 \cdot 10\% = 1800 \text{ kp}\cdot\text{m}$
 $M_p = 50 \cdot 10\% = 700 \text{ kp}\cdot\text{m}$

2.3. Niederlandsmomente

a+b	F	e	F·e	F·e ²
125	125	—	—	~ 0
40	80	10	1200	18000
20	—	—	1200	10700
				$\Sigma = 28700 \text{ cm}^4$

PKB Planungs- und Konstruktionsbüro für Hoch- und Tiefbau, Beratender Ingenieur Ulli Dipl.-Ing. C. Dietrich, 65163 Mainz-Mornbach Hauptstraße 160, Telefon 0615146188

Kunststoffhaus fg 2000
 Wolfgang Feierbach
 Kunststofftechnik
 6472 Altenstadt/Hess.

DR.-ING. CARSTEN LAGLIE PROJEKT 107 SEITE 2
 FOR

Vorbemerkung
a. Allgemeines
 Die statischen Berechnung liegen die zur Zeit gültigen Vorschriften und Bestimmungen sowie die Festwertangaben des Herstellers zugrunde.
 Gegenstand der Berechnung ist ein Bauelement aus GFF (Glasfaserverstärkter Kunststoff) aus Zweijohntechnik. Die Breite eines Rahmens beträgt 125 mm, die Gesamthöhe gemessen von der unteren Rahmeneinlagerung beträgt 342 mm.

Glasfaserverstärkter unges. Polyester

APPROB. DR.-ING. C. DIETRICH

Càlculs justificatius de la resistència a flexió de fg2000

5.3- Conceptes per als càlculs

- Segons les càrregues.
- Segons els límits.
- Segons les deformacions.

Es comparen les càrregues a les que està sotmesa una estructura amb un sistema de càrregues ja provat. Les característiques particulars del material es treuen a partir de càlculs fets apart, ja que les característiques dels materials clàssics ja faciliten una part molt gran de la informació. Es treu a través d'una suma de factors correctors:

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{Bruch}}{V \times A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4}$$

La influència de l'envelliment provoca incerteses de càlcul, per tant es prenen mesures de recobriment amb "gelcoat". Un factor corrector d'1,2 és suficient. La influència de la durada de la càrrega s'aproxima mitjançant assajos destructius. Aquests són normalment curts, la corba de ruptura logarítmica permet veure la rigidesa restant, els factors correctors son d'1,6 fins a 2. El factor corrector temperatura s'aproxima per 1,2. D'aquesta manera estan totalment determinats per coeficients, les tensions, deformacions i estabilitat. Coeficients de seguretat se n'han utilitzat doncs per tots els camps: estructura, utilització i estabilitat.

Acte seguit es considera el comportament en parts individuals, mai hi ha hagut un concepte teòric sol, sempre ha estat acompanyat de proves i assajos de cada un dels components.

Es fan unes suposicions i després es proven amb assajos. Després, a l'hora de la construcció es fa una anàlisi enginyeril i estructural de tota l'estructura, un cop però ja està ben definit el projecte.

$$\text{vorh } \sigma < \text{zul } \sigma \quad \text{bzw.} \quad \text{vorh } f < \text{zul } f$$

Les sol·licitacions es treuen de la teoria de laminats. Els materials es proven en assajos a curt termini i s'escullen només algunes combinacions de fibra-matriu, després s'ha d'aproximar la tensió i el comportament a ruptura sota un temps de càrrega. Amb un algoritme es troba quin canvi de forma tindrà el material al cap de 5 anys.

A la casa Monsanto es va provar que el laminat aguantava per sobre dels 11000 segons, o sigui 2,5 anys, es va assajar amb càrregues del 40 al 80 % de la rigidesa a curt termini.

Fórmula de càlcul per als canvis de forma en funció del temps:

$$e = e_0 (1 + t^n)$$

e

e_0

t

$$n = 0,0245$$

D'això se'n treu que per norma es pot carregar en un 25 % de la força màxima.

Per a la construcció de la casa Monsanto es van programar una sèrie de protocols, un assaig de càrrega puntual de 5 tones amb una temperatura de 80-100° C, d'aquí se'n treuen valors de resistència a curt temps. Per les pèrdues de rigidesa a la cobertura externa es conta amb un factor corrector d'1,2 a 1,3.

Per la reacció a llarg temps el que es fa encara és observar l'edifici en funcionament durant 9 o 10 anys i veure on falla.

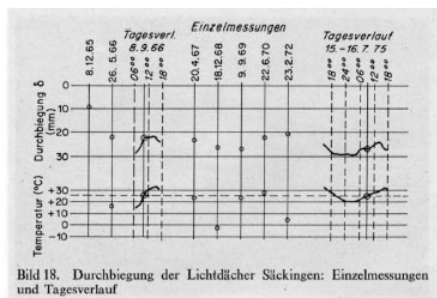


Bild 18. Durchbiegung der Lichtdächer Säckingen: Einzelmessungen und Tagesverlauf

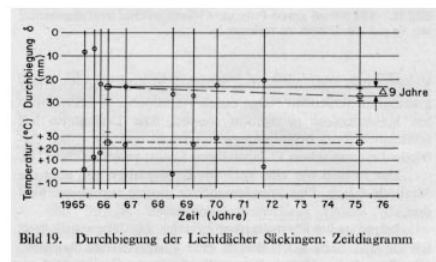


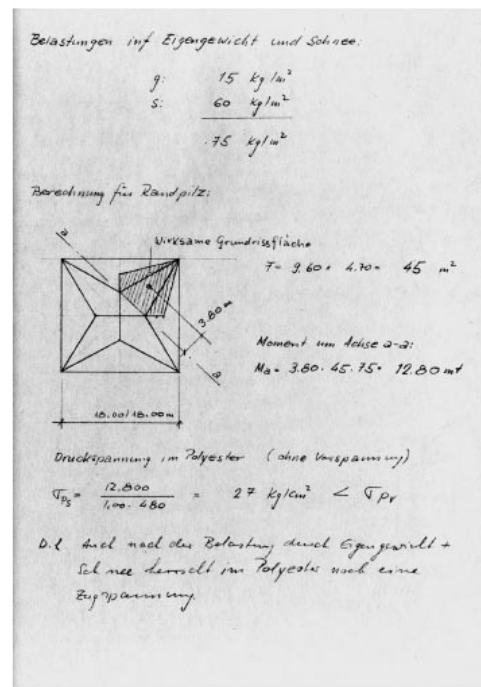
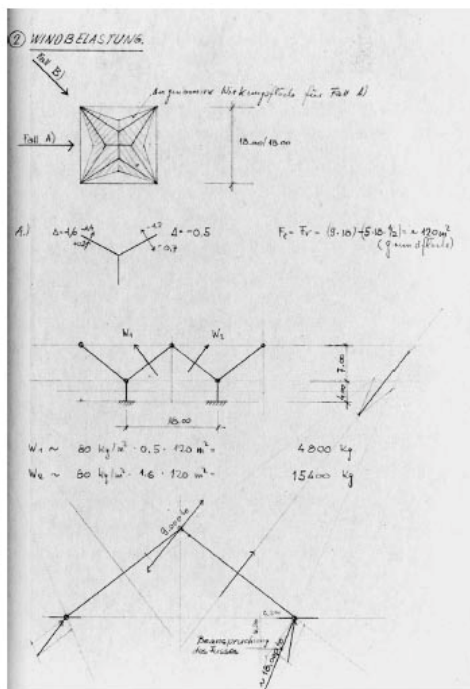
Bild 19. Durchbiegung der Lichtdächer Säckingen: Zeitdiagramm

Gràfiques resultants dels assajos a curt termini a la casa Monsanto

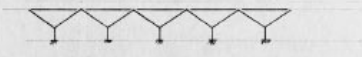
Les construccions fetes amb poliester tenen dues característiques no desitjades: Les tensions de la membrana són irregulars i la força no queda ben repartida. La utilització d'aquest material es qüestiona enfront de l'acer, en aquestes aplicacions, pel seu més alt grau de deformació amb el calor, així com també sota sol·licitacions a tracció, ja que per la seva deformació elàstica inicial el material es continua deformant sense límit. Aquestes qualitats desfavorables es quantifiquen per mitjà d'assajos previs. Es treuen valors de forces a curt temps i després es troba la pèrdua de resistència a tracció a causa de la dilatació per calor. La ruptura segueix una corba logarítmica, a partir d'aquesta corba s'interpol·la la pèrdua de resistència a ruptura, per un temps ja establert de 3 anys. Com a mesura de seguretat s'han utilitzat a vegades cilindres pneumàtics prement components de l'estructura, en el moment en que és necessari fan força de compressió en el sentit desitjat.

5.4 Casos particulars

5.3-1 Expo 64



Temperaturinfluss:



A) Abkühlung

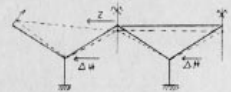
Zugband: Aus Symmetrie-Gründen sind in den Torsionsstreifen die gleiche Länge anzunehmen.

Vergrößerung der Spannung inf. $\Delta T = -30^\circ$

$$\Delta \sigma = \Delta E \cdot \epsilon = 30 \cdot 0,012 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 756 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{Zug}} = 756 + 420 = 1176 \text{ kg/cm}^2$$

Randplatz



Z: $2,01 \text{ cm}^2 \cdot 756 \text{ kg} = 1520 \text{ kg}$

Diese Zugkraft verteilt sich als Horizontalverschiebung in die Stiefköpfe der beiden Randträger.

$$\Delta H = \frac{1}{2} \cdot 1520 = 760 \text{ kg}$$

Angenommener Horizontalverschiebung im Stiefkopf

$$H = 6,500 \text{ to.}$$

$$\Delta H = 11,6 \% \cdot H$$

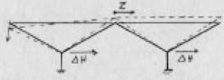
B) Erwärmung:

Zugband: Vergrößerung der Spannung inf. $\Delta T = +30^\circ \text{C}$

$$\Delta \sigma = 30 \cdot 0,012 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 756 \text{ kg/cm}^2$$

z.B. das Zugband wird spannungsfrei

Randplatz: Spannung im Zugband bleibt



Z = $2,01 \cdot 420 = 845 \text{ kg}$
(Kraft im Zugband inf. Vorspannung)

$$\Delta H = \frac{1}{2} \cdot 845 = 422 \text{ kg}$$

$$\Delta H = 6,5 \% \cdot H$$

Càlcul de sol·licitacions límit per a la Expo 64

Es suposa que la càrrega reposa justament a sobre de la cobertura i del marc, suporta les forces del vent, del pretensat i de l'acció de la temperatura. D'aquesta manera el marc exerceix una força màxima de tracció sobre el poliester pretensat. Segons els assajos fets, el producte, amb un factor corrector de 6,0 és:

$$\sigma_{\text{max}} / 10 \text{ h} < 0,5 \sigma_{\text{R}}$$

Amb un factor de 4,7 també es pot donar l'estructura com a pretensada amb seguretat.

5.3-2 Rondo

Es una cobertura amb doble curvatura, igual pels dos cantons. Prèviament a la seva construcció es van fer investigacions estàtiques i maquetes, es va trobar un sistema de substitució amb el qual es podien determinar exactament les forces de membrana de la cobertura.

És un bon exemple de com a partir de bigues i arcs triangulars es pot aconseguir una cobertura externa circular. En realitat no és cap cobertura sinó una plataforma circular que està sotmesa a flexió. Per una càrrega prova d'1 a 5 cops el valor de la càrrega de neu es veuen ja deformacions plàstiques i fins i tot ruptures. Si només aquesta força aplicada durant un espai de temps curt ja

provoca aquests resultats, es millor no fer assajos de càrregues a llarg termini. Això posa en evidència el poc coneixement que es tenia del comportament dels composites en el moment en que Rondo es va construir.

3. Berechnung

2.1. Dachplatte (Schalenteil A)

Kreisplatte mit $D=1,60\text{ m}$

gerechnet nach R. Baus: Berechnungsregeln für Platten und Wandscheiben Teil 415

$$M_r = \frac{q \cdot r^2}{16} (3 + \mu) (1 - \rho^4)$$

$$M_\phi = \frac{q \cdot r^2}{16} [3 + \mu - (1 + 2\mu)\rho^4]$$

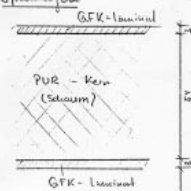
für $\rho = \frac{r}{r} = 0,95$, $q = 515 \text{ kg/cm}^2$, $\rho = \frac{r}{r} = 0$, $\mu = 0,10$

$$M_r = \frac{515 \cdot 0,80^2}{16} \cdot 3,2 = 67 \text{ kg m}$$

$$M_\phi = \frac{515 \cdot 0,80^2}{16} = 67 \text{ kg m}$$

$A = \frac{1 \cdot 0,80}{2} \cdot 515 = 206 \text{ kg/cm}$

Spannung für



$$J = \frac{100 \cdot 6^3}{12} + \frac{10 \cdot 51^3}{12} = 1800 + 1350$$

$$J = 4950 \text{ cm}^4$$

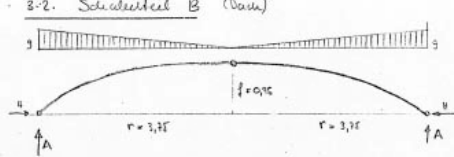
$$W_x = W_y = \frac{4950}{4} = 1237,5 \text{ cm}^3$$

$$G_x = G_y = \frac{6700}{162} = 41 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{206}{100 \cdot 2} = 0,206 \text{ kg/cm}^2$$

Momente in der Mitte der Schalendicke

3-2. Schalenteil B (Dau)



$$A = \frac{q \cdot r^2}{2} = 0,515 \cdot \frac{3,35^2}{2} = 0,97 \text{ kg/m}$$

Moment im Schalenteil

$$M_{\text{sch}} = \frac{q \cdot r^2}{2} \cdot r = \frac{q \cdot r^3}{2} = \frac{q \cdot r^2}{6}$$

$$H = \frac{M_{\text{sch}}}{f} = \frac{q \cdot r^2}{6 \cdot f}$$

$$H = \frac{0,515 \cdot 3,35^2}{6 \cdot 0,95} = 1,27 \text{ kg/m}$$

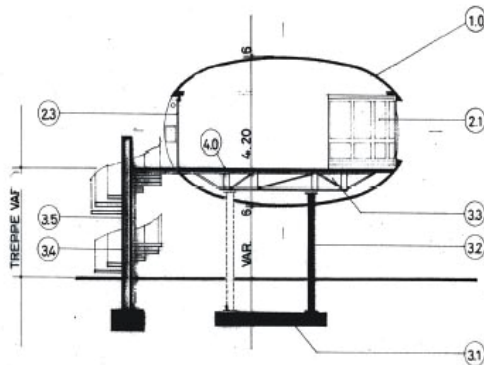
Druckkraft in der Schalte

$$\rightarrow D = \sqrt{A^2 + H^2} = \sqrt{0,97^2 + 1,61^2} = \sqrt{2,57} = 1,60 \text{ kg/m}$$

Annahme: Druck wird durch GFK-Laminat übernommen

$$G_B = \frac{1600}{100 \cdot 0,8} = 27 \text{ kg/cm}^2$$

Càlculs de moments de les plataformes



Esquema estructural i aspecte de Rondo

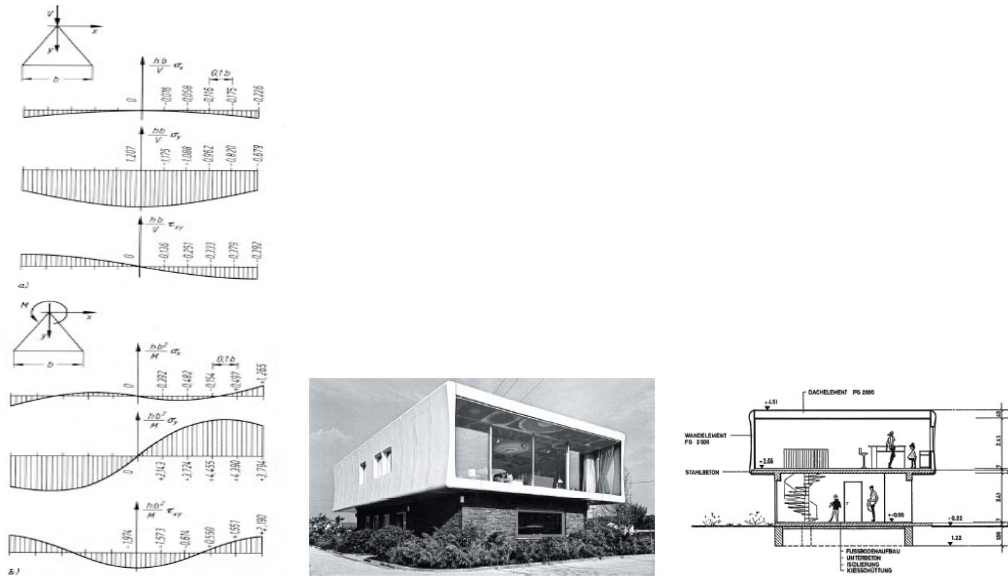
5.3-3 Fg2000

En aquesta construcció es van fer tots els càlculs seguint les normes clàssiques de rigidesa dels materials. Es van trobar les càrregues de l'estructura i calcular sol·licitacions: moments i forces normals, i es treuen les forces de reacció en els suports. A partir de la confrontació entre sol·licitacions i resistències se'n treuen tensions, que han de ser sempre més petites a les permeses.

El comportament a llarg termini es va aproximar inicialment, i després a partir de varis experiments es va anar concretant fins aconseguir valors pràcticament exactes.

A partir d'aquest procés iteratiu i aquests processos es van trobar regles que encara avui són vigents.

Feierbach, amb aquest sistema va preveure abastir un gran mercat, es començava a veure factible de produir en sèries.



Diagrames de moments i aspecte de fg2000

En les estructures de plecs també es va dur a terme prèviament un procés d'experimentació amb l'estructura i després es van elaborar les fórmules teòriques, amb una enorme coincidència entre experimentació i càlculs.

Pels càlculs de les estructures de plecs de superfície llisa (Stressed Skin Space Grid) s'utilitzen també processos d'aproximació, s'estudien les divisions de tensions en hexàgons i en piràmides quadrades, a partir d'aquí es poden determinar les lleugeres curvatures a les parets de les piràmides.

Les estructures planes de plecs són ideals per a l'aplicació en composites pel seu alt grau de preacabat industrial. Tenim parts idèntiques que s'uneixen entre elles donant una gran rigidesa i permetent cobrir grans superfícies. Aquestes estructures experimenten una gran deformació quan s'hi aplica la càrrega, per això s'han de proveir de gruixos importants.

Es calculen segons l'anomenada teoria II, teoria d'igualtats no lineals. La teoria I calcula de forma lineal la divisió de tensions en estructures de plecs de forma precisa, les dues teories també serveixen per a estructures d'altres materials, com per exemple l'alumini.

Així doncs, els càlculs també es basen en experiments, maquetes a petita escala, models a gran escala com fg2000, models de comparació com Rondo o prototipus. Però moltes vegades els valors experimentals difereixen molt dels calculats i s'ha de dur a terme un procés llarg d'iteracions i aproximacions.

5.5- Càlcul de seccions transversals a través de proves i aproximacions

Les aproximacions es treuen de les observacions de construccions anteriors i són extrapolades al cas que es desitja resoldre. Els càlculs precisos en composites són difícils, doncs les mesclades fibra-matriu presenten tantes combinacions possibles que cap autor en pot treure una mesura estàndard a partir de la qual produir-ho tot.

Així doncs només queda la possibilitat d'orientar-se amb altres construccions, per exemple cobertures sotmeses a flexió que tapen una superfície de 8 m de diàmetre s'han fet normalment amb cobertures portants de 2,5 mm de gruix de fibra de vidre, folrat amb espuma PUR de 40 cm. A no ser que apareixi una tècnica totalment revolucionària és molt probable que en el futur es segueixi fent així, implementant en cada nova construcció petites millores.

Un cop fetes totes les aproximacions possibles es troben els factors correctors, a través d'assajos a ruptura, que proven la rigidesa dels components a curt termini. Normalment els assajos a ruptura duren per sobre de 1000 hores, l'efecte de les pèrdues de rigidesa es compara en una gràfica amb el temps (1000 h). Assajos a ruptura de durades llargues i amb canvis de càrrega reals no es duen a terme ja que seria com assajar l'edifici en si mateix.

Es treuen una sèrie de paràmetres tensió deformació i a partir d'aquí valors a curt temps de mòdul elàstic i rigidesa a tracció, per altra banda també d'aquí es treuen factors correctors que afecten a la durada de la càrrega sota influència de l'augment de la temperatura i sota influència del medi.

Trobem referències de termoplàstics reforçats amb fibra de vidre en les taules, tots amb una alta proporció de vidre (almenys 50 %). Les taules mostren els mòduls elàstics ($E_{c/0,1}$) i les rigideses a tracció ($\sigma_z/20$ %) a curt temps. Amb això es poden ja aproximar suficientment les deformacions límit del contingut en vidre per la fórmula:

$$\gamma_{10^3h} = \frac{E_{c/10^3h}}{E_{c/0,1h}} = 0,5$$

Es pot treure el comportament a ruptura a llarg termini per 10^3 hores a partir del valor a curt termini (0,1 hores) per la fórmula:

$$E_{c/10^3h} \cong 0,7 E_0 \quad \text{und somit}$$

$$\beta = \frac{E_{c/10^3h}}{E_0} = 0,7$$

Dit d'una altra forma, es pot considerar la resistència a curt termini com una reducció a la meitat de la resistència a llarg termini. Pel mòdul elàstic hi ha altres relacions:

$$\delta_{20/40} = 0,85$$

$$\delta_{60/20} = 0,85^2 = 0,70.$$

El comportament canviant dels composites enfront del temps es troba per:

$$\sigma_{t/\theta} = \gamma \times \delta \times \sigma_B \quad \text{und} \quad E_{t/\theta} = \beta \times \delta \times \sigma_B.$$

Utilitzant aquests valors es poden també calcular altres materials, en els càlculs de rigidesa, la tensió a la que s'arriba (σ_b), amb una seguretat de S sota el cas més desfavorable el factor del material K és constant:

$$\sigma_B < K/S$$

Els factors de seguretat es sumen de la següent manera:

$$S = S_{\min} \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

S_{\min} és un factor de seguretat no específic dels composites sinó general, representa les càrregues constants per a duròmers, així com per a fibres de vidre o per productes fets per dispersió. S_1 és factor corrector per a càrregues a llarg termini, S_2 temperatura i S_3 resistència a l'acumulació d'aigua. Canvis en la radiació UV encara estan per investigar.

	Belastungsart																										
	ruhender Zug						ruhender Druck				wechselnd* (Zug + Druck)				stoßartig												
	Nennwert	Mindestsicherheiten		Sicherheitszuschläge		Nennwert	Verformen		Instabilität		Nennwert	Mindestsicherheiten		Sicherheitszuschläge		Nennwert	Mindestsicherheiten		Zuschläge								
		kaltgehärtet	kaltgehärtet und getempert	hochgehärtet	Alterung		Temperaturüberhöhung	ständige Wasserlagerung	Mindestsicherheiten	Zuschläge (Temperatur)		Mindestsicherheiten	Zuschläge (Temperatur)	kaltgehärtet	kaltgehärtet und getempert		hochgehärtet	Alterung	Temperaturüberhöhung	ständige Wasserlagerung*	kaltgehärtet	kaltgehärtet und getempert	hochgehärtet	Alterung	Temperaturüberhöhung	ständige Wasserlagerung	
GFK-Mattenlaminat handverleht	0,5-0,8	1,6	1,4	—	> 1,5	> 1,3	> 1,5	0,5-0,8	1,3	1,2	0,7 F ₄	4	> 1,3	0,35-0,8	1,6	1,4	—	> 1,5	> 1,2	> 1,5	0,8	—	6	—	> 1,5	—	—
GFK-Mattenlaminat, gepreßt	0,5-0,8	—	1,4	1,2	> 1,5	> 1,3	> 1,5	0,5-0,8	1,2	1,1	0,7 F ₄	3	> 1,3	0,35-0,8	—	1,4	1,3	> 1,5	> 1,2	> 1,5	0,8	—	6	—	> 1,5	—	—
GFK aus vrimpapergewickelten Matten gepreßt	0,5-0,8	—	—	1,4	> 1,5	> 1,3	> 1,5	0,5-0,8	1,2	1,1	0,7 F ₄	3	> 1,3	0,35-0,8	—	—	1,5	> 1,5	> 1,2	> 1,5	0,8	—	6	—	> 1,5	—	—
Preformmassen mit Kurzfasern u. anderen Füllstoffen	0,5-0,8	—	—	1,6	> 1,5	> 1,3	> 1,5	0,5-0,8	1,2	1,1	0,7 F ₄	3	> 1,3	0,35-0,8	—	—	1,8	> 1,5	> 1,2	> 1,5	0,8	—	6	—	> 1,5	—	—

* Bei hohen Frequenzen (> 10 Hz) muß wegen möglicher Erwärmung genauer gerechnet werden.

La Taula anterior mostra una relació de factors de seguretat en funció del tipus de càrrega.

En el cas particular d'una estructura sotmesa a flexió, feta de fibra de vidre laminada manualment, endurit en fred, sense tremp i deixat reposar al aire lliure se'n treu una tensió de:

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{10^3h}}{S_{min} \times S_1 \times S_2 \times S_3} = \frac{0,5 \times \sigma_B}{1,6 \times 1,5 \times 1,2 \times 1,0} = 0,17 \times \sigma_B$$

La rigidesa a llarg termini només és un 17 % de la rigidesa a curt termini, es calcula amb un factor de seguretat general de 1,6. Es manté la rigidesa a llarg termini, veiem que després de 12 anys encara presenta un 27 % de la rigidesa a curt termini, o dit d'una altra forma, el factor de seguretat de llarg termini enfront de la càrrega a curt termini és de 3,22.

5.6- Assajos precisos a partir de les deformacions límit

L'objectiu d'aquests assajos és trobar inestabilitats a compressió, no solen ser assajos destructius, finalitzen instants abans de la ruptura del material. Els valors numèrics de les corbes de ruptura obtingudes donen com a fiable el tipus de resina i el contingut en vidre i mostren els perills d'inestabilitats a compressió:

$$\epsilon_{i\max} \leq \frac{\epsilon_{prop}}{S_F} \approx \frac{0,6\%}{1,1 \text{ bis } 1,4}$$

$$\epsilon_{i\max} \leq \frac{\epsilon_B}{S_B} \approx \frac{1,2 \text{ bis } 1,4\%}{2 \text{ bis } 3}$$

$$\epsilon_{i\max} \leq \frac{\epsilon_{krit}}{S_{krit}} \approx \frac{\pi^2}{\lambda^2 (3 \text{ bis } 4)}$$

En principi només te interès el valor de deformació a ruptura límit, es important el valor de deformació pel qual es forma la primera esquerda, amb l'augment del temps es troben els valors límits asimptòtics.

Per acumulació d'aigua i temperatura s'utilitza el coeficient k, d'aquesta manera la fórmula resultant és:

$$\epsilon_{\delta i} (20^\circ\text{C}) \times k < \epsilon_{zul} \leq \epsilon_{prop}$$

Petits gruixos de paret permesos, de fins a 4 mm el valor de seguretat general de la fibra de vidre a compressió es fixa en 10,8 i a partir d'aquí ja depèn de cada material en concret.

Aquest factor de material es compon de diferents factors individuals trets de diferents proves de materials i anàlisis de rigidesa.

Amb ells una determinació exacta de la tensió és possible, això val particularment pel factor de comportament enfront del temps, que es situa en 2,0.

En el futur s'han de fer assajos de rigidesa enfront del temps i mòdul de ruptura, per aconseguir una durada de càrrega de mínim 10^3 hores.

El factor reductor de material $W= 4,0$ es treu dels següents factors individuals:

$W_1= 2,0$ pel comportament enfront del temps a 10^5 h.

$W_2= 1,4$ per l'envelliment a causa de la influència de l'entorn i dels revestiments.

$W_3= 1,2$ per l'anisotropia a causa de l'enfortiment del material.

$W_4= 1,2$ per falta d'homogeneïtats que venen en els processos d'acabat.

En general es donen factors de seguretat molt alts $S= 2,7$ per al comportament a compressió, per això a partir de la rigidesa a llarg temps, la de curt temps es del 25 %.

Aquests càlculs, on entren en joc diferents factors de seguretat, es duen a terme quan s'ha de calcular alguna cosa més complicada que simples cobertures cilíndriques amb pressió provinent de l'interior, ja que en aquest últim cas es tracta només de làmines doblades.

A través de la relació E/ζ (flexió enfront de càrrega pròpia) es fa possible la comparació amb altres materials. Així es veu que en comparació amb l'acer, només s'aconsegueixen construccions més econòmiques quan el baix mòdul elàstic és contrarrestat amb una geometria suficientment forta.

5.7 Sol·licituds de càrrega i factors de seguretat

Pel càlcul del valor límit s'uneixen les forces de la secció en els seus casos més desfavorables. La càrrega normal p es multiplica pel valor límit n_i . El valor $\sum S_i$ és la suma de les forces de les seccions N, Q i M.

$$\sum S_i \geq \frac{n_i}{k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times k_6} = \frac{1,4}{0,90 \times 0,95 \times 1,0 \times 0,8 \times 0,50} = 4,5 \times B$$

Factors reductors:

$$zul\sigma = \frac{\beta_z}{S \times A_1 \times A_3} = \frac{\alpha_0 \times \beta_z}{S \times (1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

daraus folgt

$$A_1 \times A_3 = \frac{(1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}{\alpha_0} = \frac{(1 + 2 \times 0,31 \times 0,7 \times 1,0)}{1,0} = 1,434$$

bzw.

$$zul\sigma = 1,434 \times \beta_z$$

Els nous factors k1 i k2:

k1 es el nombre de capes de matten i és independent de la forma de producció, el factor k2 diferencia els conceptes de rigidesa i estabilitat. Per a l'estabilitat juguen un paper molt important les toleràncies de masses i deformació.

Els factors k3, k4, k5 i k6:

k3 es el factor de temperatura, k4 acumulació d'aigua i k6 durada de la càrrega amb el valor $W = 1,5/0,5 = 0,33$.

Alguns autors fan anar aquest paràmetre entre 0,22 per tracció i 0,5 per flexió. k5 es el factor reductor pel medi, especialment per efectes de llum UV, normalment $k5 = 0,8$.

Lastart	Grenzlastfaktor n_t	Bemerkungen
Eigenlasten Schneelast	1,4	Wirkt sich eine Verringerung der Eigenlasten ungünstig aus, so ist $n_t = 0,9$ Eigenlast + Schneelast = Dauerlast
Windlast	1,2	für Wohn- und Gesellschafts-, Landwirtschafts- und Industriebauten
Windlast	1,3	für turmartige Bauwerke mit Höhe zu kleinster Breite ≥ 5
Verkehrslasten*)	1,2...1,4	$n_t < 1,4$ nur für Verkehrslasten, deren Maximalwert kurzfristig wirkt
Sonderlasten	1,1	

Valors límit per a càrregues de neu, vent i persones

Els factors k_n , k_8 i k_9 són per a càrregues dinàmiques, perquè els composites reaccionen diferent davant d'impactes que altres materials, com per exemple l'acer.

Pel cas d'una sol·licitació a flexió d'una estructura de fibra de vidre laminada manualment, no trempat i deixada reposar a l'aire lliure, amb un 30 % de percentatge de fibres, 3 capes de matte i a 20° C, es treu com a valor de resistència límit la següent:

$$E_0 = 600 \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad \text{Tab. 1} \quad \text{Kurzzeit-E-Modul}$$

$$\beta_z = 8 \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad \text{Tab. 2} \quad \text{Kurzzeitfestigkeit (Zug)}$$

$$\varphi = 0,7 \quad \text{Tab. 2} \quad \text{Kriechzahl für 23}^\circ$$

E_0 i β són el mòdul elàstic a curt termini i la rigidesa a curt termini respectivament

Einflußart	Verstärkungswerkstoff	Abminderungsfaktor k_m		Bemerkungen	
		m			
Gleichmäßigkeit	1 Lage Matte 2 Lagen Matte 3 Lagen Matte Gewebe	1	0,75	zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Flächenmasse der Verstärkung	
			0,85		
			0,90		
			0,95		
Anpassung		2	Festigkeit	Stabilität	Anpassung an besondere Bedingungen: statisches System, Toleranzen der Profile, Fehlerhebel, Vorbeulen
			0,95	0,8...1,0	
Temperatur		3	0 °C	1,15	
			20 °C	1,00	
			40 °C	0,85	
			60 °C	0,70	
			80 °C	0,50	
Wasserlagerung		4	0,50		gilt für ständig im Wasser lagernde Bauteile
Alterung		5	0,80		Abbau der Festigkeit durch atmosphärische Einflüsse, Schutzmaßnahmen (Gelcoat, Anstriche) sind erforderlich, Abminderung entfällt für Stabilitätsnachweis
Dauerbelastung	Matte Rovinggewebe Gewebe	6	Biegung	Zug	zur Festigung einer Belastungshöhe, bei der praktisch keine Materialschädigung durch Kriechen eintritt
			0,50	0,45	
			0,43	0,31	
			0,26	0,22	
Schwellbelastung		7	0,50		bei $n_t = 1,4$ und zusammen mit $k_1 \dots k_4$ anwendbar; gilt nur bei glatter Oberfläche und Gestaltung ohne Kerbwirkung
Wechselbelastung		8	0,25		
Häufige Stoßbelastung		9	0,30		

Taula de factors correctors, com de regularitat, temperatura, acumulació d'aigua, o durada de la càrrega

Alguns autors encara fixen la rigidesa a llarg termini amb $1/45 = 0,22$, o sigui un 22 % de la rigidesa a curt termini. Així el factor de seguretat queda amb 1,4, la rigidesa a llarg termini després de 12 anys resta encara amb un 31 %, enfront al 27 % d'altres autors, això vol dir que l'estructura estaria un 10-15 % millor reforçada.

5.8 Cas particular de Domke

Domke mostra un gran avanç respecte a tot lo construït anteriorment per 3 innovacions essencials:

Aplica tots els coeficients de seguretat per les coses que fins al moment no es coneixien amb precisió i desenvolupa un mètode exacte per a treure les rigideses que resten sota la durada i acció de la temperatura.

En qualsevol projecte es marca l'objectiu de que les tensions estiguin per sota de les permeses, i els canvis en funció del temps han de ser previstos i acotats. En aquest cas no es disminueixen les tensions mínimes permeses sinó que s'augmenten les sol·licitacions a l'altra banda de la igualtat.

Per Domke es va fer un nou model reològic, amb el qual es pot definir amb bastant precisió el comportament a ruptura. Els composites tenen un comportament viscoelàstic, les elongacions $E1$ i pressions $\eta1$ són proporcionals i representen el comportament de cossos rígids amb canvis de forma elàstics, l'elasticitat $E0$ fa referència al comportament de les fluïdeses viscoelàstiques.

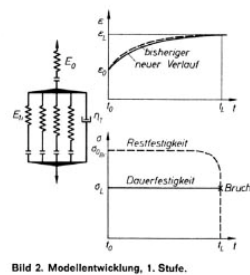
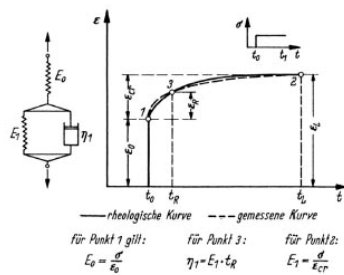
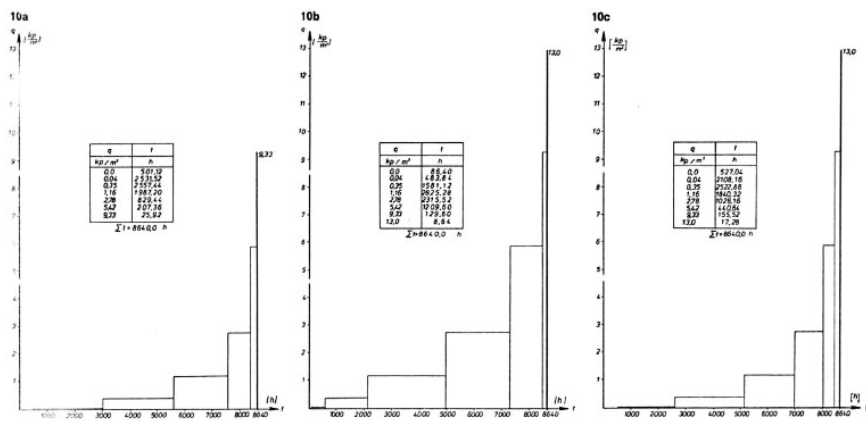


Bild 2. Modellentwicklung, 1. Stufe.



Model reològic per a Domke

Com a exemple de sol.licitacions a tracció en estructures fetes de laminat de fibra de vidre, endurit en fred i no trempat, deixat reposar a l'aire lliure, 30 % de fibres, 3 capes de material a temperatura de 20° C, situació Aachen, 202 m sobre el nivell del mar.

$$A_2 = 1,0 \quad A_4 = 1,0$$

Factors correctors per envelliment i sol.licitacions de fabricació i factor de seguretat general:

Höchstlasten (q aus DIN 1055 (Eigengewicht, Wind, Schnee)

Kriechlasten q_{cr} aus Tab. 6

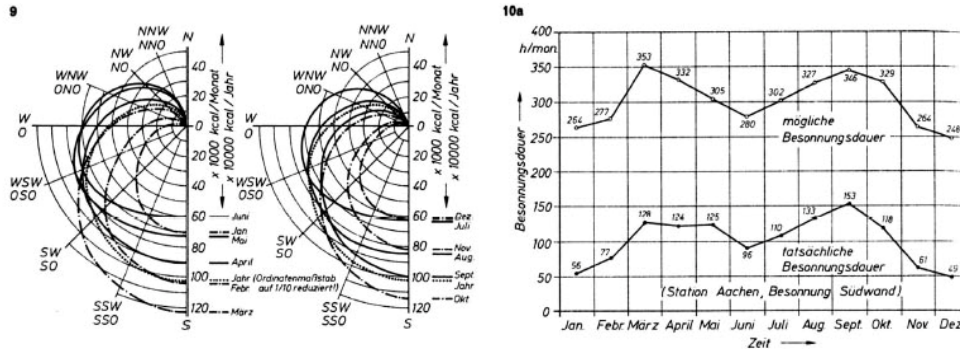
Schnee, Aachen, SLZ II = Höchstlast / Kriechlast = $[q / q_{cr}]$

Sol.licitacions de càrrega:

$$zul\sigma = \frac{\alpha_0 \times \beta_z(23^\circ)}{S \times (1 + 2 \times \frac{q_{cr}}{q} \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

Comparació amb el procediment anterior:

$$zul\sigma = \frac{\sigma_{Bruch}}{S \times A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4}$$



Influència de la llum solar al llarg de tot l'any en la Roberta externa de la construcció

$$zul\sigma = \frac{\beta_z}{S \times A_1 \times A_3} = \frac{\alpha_0 \times \beta_z}{S \times (1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

daraus folgt

$$A_1 \times A_3 = \frac{(1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}{\alpha_0} = \frac{(1 + 2 \times 0,31 \times 0,7 \times 1,0)}{1,0} = 1,434$$

bzw.

$$zul\sigma = 1,434 \times \beta_z$$

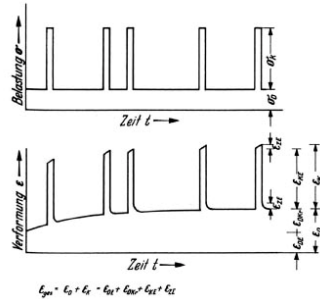
Per a Domke, la rigidesa a llarg termini és $1/2,0 \times 1,434 = 0,34$, o sigui un 34 % de la rigidesa a curt termini, amb el factor de seguretat 2,0 les rigideses a llarg temps resten encara després de 12 anys en un 69 % en lloc dels 27 o 31 % obtinguts amb altres mètodes de càlcul per a altres construccions.

Pel comportament viscoelàstic s'ha de considerar la dependència de la deformació enfront del temps, la grandària de la secció i les tensions que hi intervenen.

Com a funcions de càrrega no es considera només una sola càrrega duradora, sinó també una càrrega que augmenta progressivament, a més també les sobrecàrregues de vent i neu. Es pot calcular per exemple la càrrega de neu d'un mes, o de vent durant 10 hores i a partir d'aquí interpolar.

Al canviar de materials convencionals a composites hi ha un canvi en els efectes de les càrregues i això comporta un desconeixement del funcionament del material.

S'han de tornar a predefinir els càlculs per a les càrregues de neu i vent, ja que són totalment dependents de les qualitats del material.



Esforz deformació en funció del temps

Càlcul de la rigidesa:

$$\text{zul}\sigma = \frac{\beta_z}{S \times A_1 \times A_3} = \frac{\alpha_0 \times \beta_z}{S \times (1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

daraus folgt

$$A_1 \times A_3 = \frac{(1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}{\alpha_0} = \frac{(1 + 2 \times 0,31 \times 0,7 \times 1,0)}{1,0} = 1,434$$

bzw.

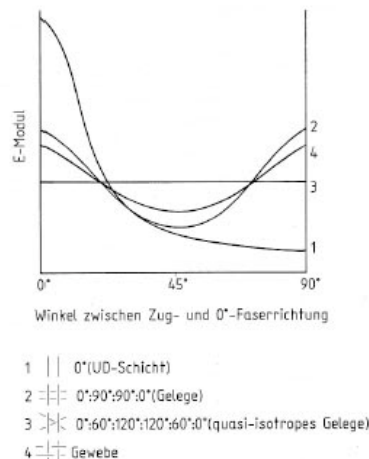
$$\text{zul}\sigma = 1,434 \times \beta_z$$

$$R = \frac{R_0}{k_t \times k_\vartheta \times k_u}$$

Deformació:

$$\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} = \left[\frac{\sigma_I}{E_0} (1 + \varphi_I \times c_\vartheta \times c_u) \right] + \left[\frac{\sigma_{II}}{E_0} \times c_\vartheta \times c_u \right]$$

5.9- Comportament estructural degut a l'anisotropia



Mòdul elàstic en funció de l'angle entre tracció i direcció de les fibres

Els càlculs sobre aquests components són complicats, els composites no són homogenis a causa de la seva preparació i per això també anisotròpics.

Hi ha tabulats una sèrie de mòduls elàstics obtinguts de diferents proves, la proporció de fibres en la direcció de la càrrega és un factor determinant.

La corba 1 de la gràfica anterior presenta el resultat d'una prova amb només una direcció de fibres. La dependència de la direcció del comportament estructural aquí és evident.

Les corbes 2 i 3 són fibres en diferents direccions sobreposades. Un ordenament ortogonal no és suficient per a compensar la dependència de la direcció de les fibres de la corba 2.

L'ordenament de les capes de la corba 3 és pràcticament la d'un laminat quasi isotròpic.

La prova 4 correspon a la 2 fins al moment just en que les fibres són entrelligades.

Hi ha diferents formes de teixir les fibres, i amb diferents proporcions, segons la direcció i les diferents formes de barrejar-lo en el treballat. En l'allargament de les fibres de l'assaig a tracció, es veu com queden molt corbades en relació amb el teixit i queden disposades a través de la matriu. Les fases en la direcció transversal ajuden a la discrepància entre les corbes 2 i 4.

La no homogeneïtat influeix també en la rigidesa del laminat, la tensió que és capaç de suportar no és més gran que la dels components més durs, però tampoc més petita que la dels més dèbils. Si per exemple, exercim una càrrega en un laminat tipus UD en sentit transversal, a través de la direcció de les fases l'allargament a ruptura degut a la concentració d'allargaments pot però inclús ser menor al de cada un dels components per separat.

Un altre fenomen degut a l'anisotropia són les tensions interlaminars, les tensions entre cada una de les capes en la direcció del gruix del laminat. Cap a una banda es solapen en estretes curvatures i de l'altre es formen espais buits, s'hi fan forats i poden causar la debilitació del material per delaminació, el

material es fa malbé perquè es divideixen les capes del laminat. Constructivament s'han d'evitar aquests problemes, donant la suficient grandària del radi de curvatura, o desviant el deslaminament cap als marges del material. No hi ha encara cap plantejament satisfactòriament aplicable pel càlcul dels marges del material, com tampoc per la desviació que te quan es plega, o pel radi màxim de curvatura...

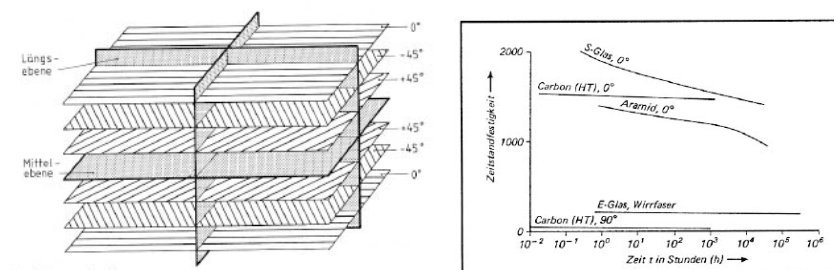
L'anisotropia suposa una complicació més a l'hora de la construcció i també del càlcul, però també és una característica avantatjosa del material. L'adaptació de les fases en quant a quantitat, material i direcció, en l'acompliment de les exigències posa de manifest el particular potencial de la construcció lleugera dels materials reforçats per fibres.

Resulta molt costós, però permet construir parts de l'edifici amb càrregues canviants, i també amb direccions de càrrega no convencionals. Les anisotropies dels laminats són difícilment dominables.

Es construeixen laminats ortotròpics, amb dues direccions principals definides, ortogonals entre elles, les capes dipositades defineixen plans de simetries com es veu a la fotografia següent, el ratllat indica la direcció de les fibres.

En els materials compostos també es veu la marca del comportament a tracció al llarg del temps, doncs les fibres hi poden ser visibles, l'augment de les dilatacions és una empremta que marca la historia del material.

El comportament en dependència del temps també és influenciat per el tipus i durada de la càrrega, temperatura i influències del medi com humitats, processos químics, corrosió etc. La segona fotografia mostra la rigidesa de diferents composites en funció del temps.



5.9- Conclusions

Els composites són materials de construcció d'alt rendiment, molt competitius. No hem de pensar que són nous materials per a substituir-ne d'altres.

L'objectiu de qualsevol projecte ha d'arribar molt lluny, s'han d'aprofitar les qualitats específiques de cada material. Per això són interessants els composites, que es poden desenvolupar en camps d'aplicació molt particulars: parts d'edificis molt lleugeres amb un grau de precabat molt alt, també productes en sèrie i temps de muntatge molt curts a l'obra.

Per altra banda gràcies als composites es poden fer determinades formes arquitectòniques complicades, que només són possibles d'aconseguir amb aquests materials.

La imatge negativa que tenien abans els composites ha canviat. S'han promès molts nous dissenys i implementacions per a composites, amb base a la producció de matèries primes, amb vistes a l'envelliment dels recursos i una posterior eliminació de l'edifici quan acaba el seu període d'utilització, en comptes de seva demolició.

Alguns fabricants ja ho han mig fet en forma de llibre o manual, sempre i quant no existeixi un Know How per a una implementació particular.

Encara que no estiguin aclarits tots els detalls en la mecànica complexa dels composites, són aplicats amb èxit en altres camps. Ens manca encara molta experiència en el camp de la construcció, s'han de fer encara moltes més proves i acumular i classificar tota la informació possible sobre aquests nous materials.

Es comencen a utilitzar composites primerament perquè els industrials busquen nous mercats, les possibilitats són il·limitades, es poden arribar a fer estructures pràcticament transparents.

Els pioners van ser Buckminster Fuller i Heinz Isler, després van venir Heinz Hosdorf, Renzo Piano i Z.S. Makowski, tots van lluitar per l'objectiu d'establir uns mitjans que fessin possible econòmicament la realització d'estructures amb composite.

Quan comencen a aparèixer noves tipologies de vida, amb cases de grans plantes, és quan es comencen a produir cobertures d'aquests tipus, però per a poder fer edificis no convencionals han d'unir esforços el constructor, l'inversor, l'arquitecte i enginyer.

Estructures lineals es desenvolupen a partir de les seves similars construccions d'acer i fusta, i estructures planes venen de les seves similars de formigó.

A partir d'aquí en surten 2 possibilitats:

La construcció de l'estructura i la seva posterior divisió en parts, opció perjudicial per a l'estructura perquè crea més debilitats en les unions.

O la fabricació de peces modulars en el taller per a la seva posterior unió a l'obra.

Amb el model reològic s'intenten aproximar les corbes de ruptura del material per a esforços de durada llarga, amb el consegüent estalvi dels assajos a temps real.

Amb motiu de la crisi del petroli de 1973 es paren de construir estructures de composite. Forma i funció en els acabaments de series llargues per a construir edificis eren només utilitzades per una part petita de la població i en la major part dels casos no eren rentables.

Les infinites possibilitats de la mescla de fibres i matriu es van classificar en material car, i gairebé cap inversor (a part per exemple de Amtor Schwabe) va integrar composites en el mercat, per això els constructors han continuat construint sempre amb acer i formigó.

Amtor Schwabe publica un escrit on explica aquesta problemàtica en la construcció i planteja un seguit de solucions, entre elles:

El mercat de la construcció ha de buscar sistemàticament qualitats, mesures, càlculs, i ha d'aconseguir fer grans tirades de peces.

L'experiència constructiva amb fibra de vidre s'ha de fer comprensible per a un ampli cercle de gent, tant per a enginyers i arquitectes com també per a no especialistes.

El càlcul de construccions de composite s'ha d'aprofundir i arribar a coneixements fixes.

Pel que fa al productor del material i del treballador (modelista, mecànic, laminador...) se'ls ha d'oferir materials estàndards, les qualitats del qual, siguin generalment conegudes i de rendiment alt.

S'ha d'acabar amb la diversitat de noms i de productes, i de diferents qualitats i d'incompatibilitats entre ells.

Amb els nous mitjans de producció (I+D) s'ha de donar la possibilitat de produir components cada cop més grans.

6- Bibliografia:

Ackermann, Günther: Viskoelastische Stabwerke-Beitrag zur Berechnung der linearen Theorie der Viskoelastizität (1972).
Schriftenreihe der Bauforschung, Reihe Technik und Organisation der Bauakademie der DDR.

Ackermann, Günther: Dünnwandige einschichtige Konstruktionen aus Plastwerkstoffen- Empfehlungen zur Berechnung (1982).
Bauforschung und Baupraxis, Bauinformation der DDR, Berlin.

Bau-Überwachungsverein. Empfehlung Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen, Hamburg (2002).

Born, J.: Schalen, Faltwerke, Rippenkuppeln und Hängedächer. Düsseldorf: Werner Verlag, (1964).

Domke, H.: Kunststoffbau. Wiesbaden und Berlin. Bauverlag (1981).

Fiberline Composites. Design und Konstruktionshandbuch, Kolding, Dinamarca (1995).

FOMEKK: Futuro Nr 13, Berlin 2004 (Material d'arxiu).

Hossdorf, Heinz.: Das Erlebnis Ingenieur zu sein. Basel: Birkhäuser Verlag (2003).

Isler, Heinz.: Tragende Bauteile aus Kunststoff: Anwendungsbeispiele. Schweizer Bauzeitung (1977).

Isler, Heinz.: Spiel ohne Grenzen. Sonderdruck aus Beitrage zur Geschichte des Bauingenieurwesens 12. T.U. München, Lehrstuhl für Baukonstruktion (2002).

Kunststoffbaus fg 2000.: Schriftenreihe "Bau- und Wohnforschung" Bad Godesberg (1973).

Monsanto Chemical Company.: Monsanto Magazin, (març1968).

Monsanto home of the future.: State Film Productions, Inc.: Werberfilm USA (1957).

Moser, K.: Bemessung von Tragwerken aus Faser-Kunststoff-Verbund, Mehlhorn, Der Ingenieurbau Bemessung Berlin. Verlag Erns & Sohn (1998).

Polóni, S.: Tragkonstruktionen aus Kunststoffen, Kunststoffe im Bau (1969).

Rondo.: Selbsttragende Schale und innenliegende Tragkonstruktion. Dr Walther & Mori für die CSB Constructa System (1971).

Schwabe, Amtor.: Fertighäuser aus und mit Kunststoffen. Wohnform (1969).

Timoshenko, S.: Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill (1961).

Venturo.: Kunststoffbaus. Bauen + Wohnen (1973).

Williams, R.J.: Dubais Tor zur Welt. Plasticconstruction (1971).

Zimmer, K.: Plastbau, Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium, Dresden: Zentralstelle für das Hochschulfernstudium (1992).

Pàgines web:

<http://www.apme.org>

http://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Buckminster_Fuller

<http://www.bfi.org/gallery/FlysEyeDome>

<http://www.designboom.com/eng/archi/maneval.html>

<http://www.dubaiairport.com/DIAInternet/Airport+Guide/Departing>

<http://www.feierbach.com>

<http://www.plasticliving.com/hotff.html>

<http://www.radome.net>

<http://www.radomes.com>

<http://www.slowaygallery.com/Pages/twelve.html>