



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de Materials

**ACOBLAMENTS COMPÒSIT-COMPÒSIT I COMPÒSIT-
METALL**



Memòria i Annexos

Autor: Roger Escolano Benach
Director: Antonio Manuel Mateo Garcia
Convocatòria: 06/2022

Resum

En aquesta memòria es recull un estudi bibliogràfic dels mètodes emprats en acoblaments compòsit-compòsit i compòsit-metall, excloent-ne els adhesius. S'ha recapitulat els mètodes més habituals en una cartografia visual i una taula comparativa, on s'hi han avaluat criteris d'aplicació, desenvolupament, cost i impacte mediambiental. En paral·lel, s'ha fet un recull bibliogràfic al voltant de tres mètodes d'interès per no ser àmpliament coneguts en la indústria: el Comeld™, on mitjançant una texturació superficial per canó d'electrons es milloren les unions compòsit-metall; la soldadura híbrida, on amb un film termoplàstic intermediari es permet soldar compòsits termoestables amb mètodes convencionals; i el reblat electrohidràulic, que per mitjà d'una onda de xoc en medi aquós permet reblar a alta velocitat làmines fines, no factibles per reblat convencional.

Resumen

En esta memoria se recoge un estudio bibliográfico de los métodos utilizados en uniones composite-composite y composite-metal, en exclusión de los adhesivos. Se ha recopilado los métodos más habituales en una cartografía visual y una tabla comparativa, donde se ha evaluado criterios de aplicación, desarrollo, coste e impacto medioambiental. En paralelo, se ha hecho un resumen bibliográfico alrededor de tres métodos de interés por el hecho de no ser ampliamente conocidos en la industria: el Comeld™, donde mediante una texturización superficial por cañón de electrones se mejoran las uniones composite-metal; la soldadura híbrida, donde con un film termoplástico intermediario se resulta posible soldar composites termoestables con métodos convencionales; y el clinchado electrohidráulico, el cual mediante una onda de choque en medio acuoso permite clinchar a alta velocidad láminas finas, no factibles por clinchado convencional.

Abstract

In this work consists of a bibliographical review of the different methods and techniques used in composite-composite and composite-metal joints, excluding adhesives. The most prominent techniques have been gathered in a visual cartography and a comparative table, where criteria of application, development, cost and environmental impact have been evaluated. At the same time, a bibliographical review of three techniques of interest due to their novelty has compiled: Comeld™, in which through surface texturing by electron beam composite-metal joints might be improved, hybrid welding, where by an intermediate thermoplastic film the welding of thermoset composites through conventional techniques is achieved, and electrohydraulic clinching, in which through a water-propagated shockwave a high-speed clinching is achieved, leading to the possibility of thinner clinched unions.



Agraïments

Voldria agrair a na Claire Biancalana i en Boyu Chen la seva indispensable tasca per fer possible aquest projecte, així com a en Julien Martin i en Nicolas Kohout per la seva direcció i consells al llarg de tot el procés.

Per altra banda, volia també agrair a en Pep, na Núria i n' Oriol pel seu suport incondicional, i a na Yousra, n' Amina i na Zaira pel seu sosteniment.

Finalment, vull agrair a n' Alexandra Elbakyan la seva incansable tasca d'alliberar l'accés al coneixement científic a tots els racons del món.

Glossari

CFRP: *Carbon fiber reinforced polymer*, polímer reforçat amb fibra de carboni

EHC: *Electrohydraulic clinching*, reblat electrohidràulic

FLW: *Friction Lap Welding*, soldadura en superposició per fricció

FSW: *Friction Stir Welding*, soldadura per fricció rotativa

GFRP: *Glass fiber reinforced polymer*, polímer reforçat amb fibra de vidre

HSMC: *High speed mechanical clinching*, reblat mecànic d'alta velocitat

IPN: *Interpenetrating polymer network*, xarxa polimèrica interpenetrada

RTM: *Resin transfer molding*, emmotllament per transmissió de resina

TP: *Thermoplastic*, termoplàstic

TPC: *Thermoplastic Composite*, compòsit termoplàstic

TS: *Thermoset*, termoestable

TSC: *thermoset composite*, compòsit termoestable

VRTM: *Vacuum Resin Transfer Molding*, emmotllament per transmissió de resina sota buit.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VI
1. PREFACI	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Context i objectius del treball	3
2.2. Abast del treball.....	4
3. ESTAT DE L'ART	5
3.1. Cartografia.....	5
3.2. Principi dels mètodes citats	6
4. COMELD™	7
4.1. Principi del mètode.....	7
4.2. Surfi-Sculpt®	7
4.3. Acoblament Comeld™	9
4.4. Paràmetres	10
4.5. Propietats mecàniques	13
4.6. Inconvenients	13
4.7. Escala de la tecnologia	14
4.8. Impacte ambiental.....	14
4.9. Conclusions.....	14
5. SOLDADURA HÍBRIDA	15
5.1. Principi del mètode.....	15
5.2. La tecnologia de soldadura híbrida	16
5.2.1. Mecanisme d'adhesió TSC-TP	16
5.2.2. Procés d'aplicació de film termoplàstic.....	18
5.2.3. Unió per soldadura.....	19
5.3. Propietats mecàniques	20

5.4.	Inconvenients.....	20
5.5.	Dominis d'aplicació.....	21
5.6.	Escala de la tecnologia.....	21
5.7.	Impacte ambiental.....	22
5.8.	Conclusió.....	22
6.	REBLAT ELECTROHIDRÀULIC	23
6.1.	Principi del reblat tradicional.....	23
6.2.	Principi del reblat a alta velocitat (electrohidràulic i derivats).....	25
6.3.	Propietats mecàniques.....	26
6.3.1.	Condicions d'assaig	26
6.3.2.	Modes de fallida	27
6.3.3.	Eficiència.....	29
6.4.	Inconvenients.....	29
6.5.	Escala de la tecnologia.....	30
6.6.	Impacte ambiental.....	30
6.7.	Conclusió.....	31
7.	CONCLUSIÓ	32
7.1.	Taula comparativa qualitativa.....	32
7.2.	Conclusions	37
	PRESSUPOST	41
	BIBLIOGRAFIA	43
	ANNEX A	53
	ANNEX B	56

1. Prefaci

Aquesta memòria consisteix en una adaptació del projecte desenvolupat en context del programa de doble titulació en consorci amb l'EEIGM (*Ecole européenne d'ingénieurs en génie des matériaux*). Es tracta d'un projecte bibliogràfic elaborat col·laborativament amb dos altres alumnes del centre, i dirigit tant per un tutor propi de l'equip docent, com per un representant d'una empresa externa al centre, sent ell qui presenta inicialment el tema i especificacions del projecte, i qui pren el rol de part interessada en la recerca resultant. La fitxa d'especificacions en qüestió queda recollida en l'annex C.

2. Introducció

2.1. Context i objectius del treball

Les tècniques d'acoblament més conegudes han estat ja explorades en profunditat, i avui en dia s'apropen als seus límits. Amb sectors en desenvolupament cada vegada més innovadors com l'aeronàutica, el rol i l'impacte de les tècniques d'acoblament pren una gran importància. De fet, pel cas de l'aeronàutica poden representar fins a un 50% dels costos de producció [1].

A la figura 1 es mostra l'àmplia utilització de reblonat en el context d'un avió [2]

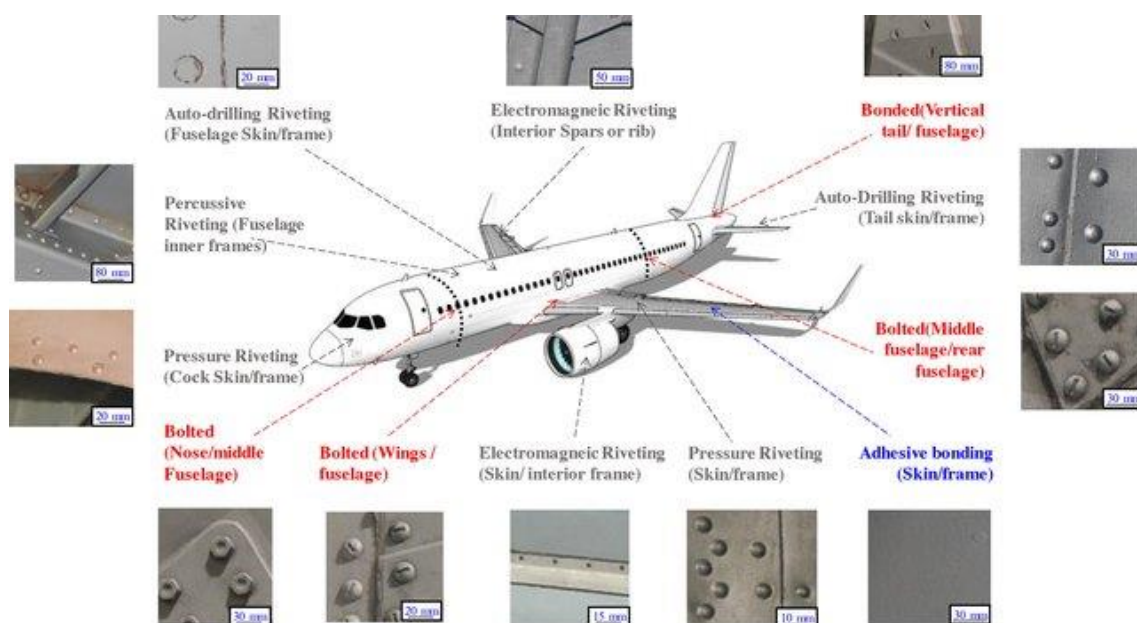


Figura 1: Exemples de reblonat en un avió

En aquests sectors, la lleugeresa de les estructures juga també un gran rol, i, per consegüent, els compòsits hi són de gran interès. Avui en dia l'acoblament de compòsits (sigui entre ells o amb metalls) està en gran manera dominat pel reblonat o els adhesius. Nogensmenys, ambdós mètodes presenten inconvenients no negligibles, com la significativa aportació de pes dels rebllons o la necessitat d'una estricta preparació de superfície prèvia a l'aplicació d'adhesius [3].

És per això que convé explorar noves tècniques d'acoblament, sigui per guanyar en productivitat o per fer front a problemàtiques associades a nous materials o noves aplicacions. En aquest context, aquesta memòria bibliogràfica pretén recollir els mètodes coneguts pels acoblaments compòsit-metall i compòsit-compòsit, excloent-ne els adhesius.

Adicionalment, es presenten de forma separada tres mètodes emergents: el Comeld™ (unió mecànica mitjançant una texturació superficial), la soldadura híbrida (aplicació de tècniques de soldadura als compòsits termoestables) i el reblat a alta velocitat (basat en un mètode de reblat electrohidràulic, permetent d'acoblar làmines fines).

Finalment, es farà una comparació qualitativa dels diferents mètodes d'acoblament citats en forma d'una taula comparativa segons criteris d'eficiència, materials adaptats, cost i impacte mediambiental, entre d'altres.

2.2. Abast del treball

Es tracta d'un treball d'abast estrictament bibliogràfic, on mitjançant principalment articles acadèmics i tècnics se'n presenten les idees més rellevants o d'interès.

Alhora, per tal de simplificar el procés de recerca (i seguint les especificacions donades), s'ha exclòs la recerca en àmbit d'adhesius.

3. Estat de l'art

Avui en dia, excloent els adhesius, les tècniques d'acoblament en ús es divideixen en dues grans famílies: els acoblaments termomecànics (fent intervenir els principis de difusió de la matèria) i els acoblaments estrictament mecànics. En ambdós casos se'n poden distingir categories segons si hi ha aportació de matèria addicional o no.

A la figura 2 s'hi presenta una cartografia enumerant alguns dels mètodes més prominents d'aquestes dues categories, emprats actualment per la majora dels acoblaments compòsit-compòsit o compòsit-metall.

3.1. Cartografia

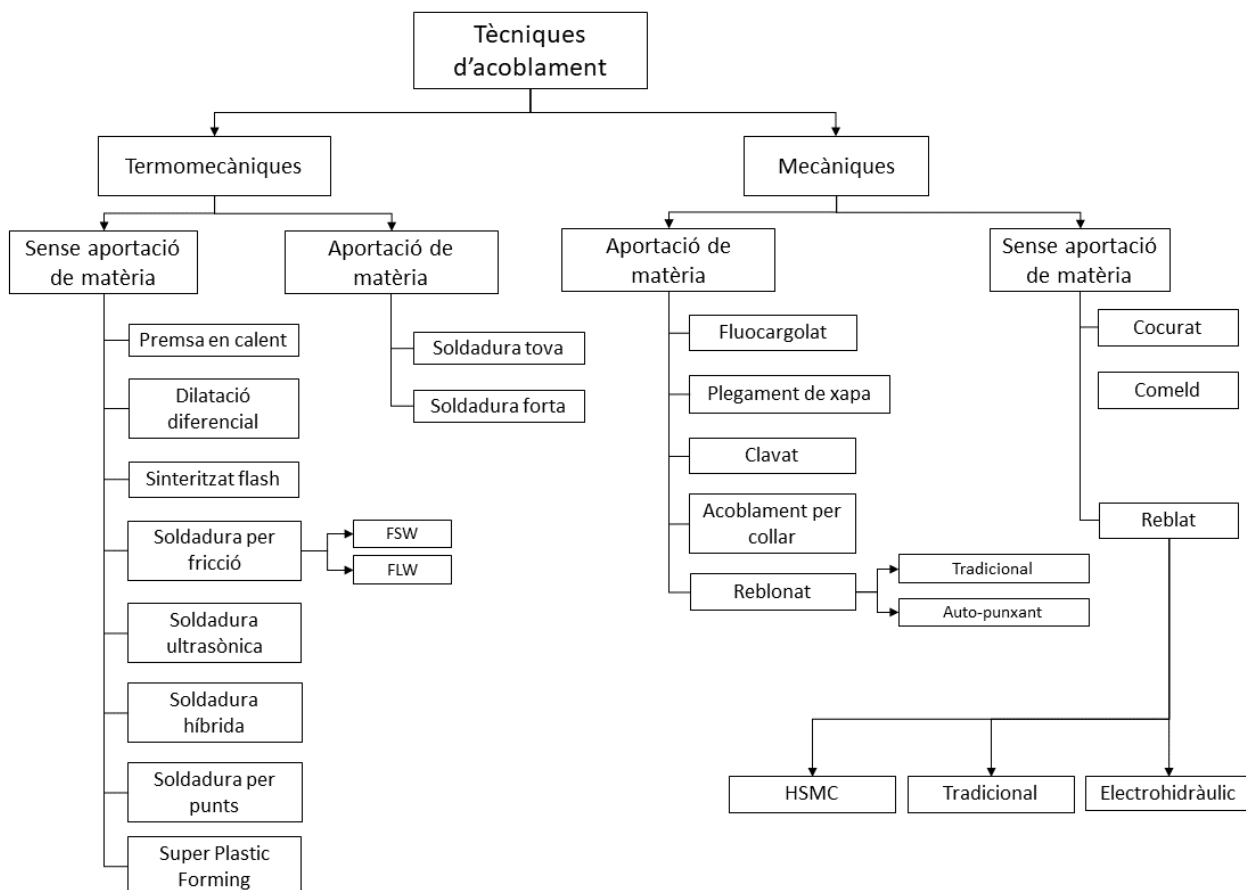


Figura 2: Cartografia de les tècniques d'acoblament

3.2. Principi dels mètodes citats

En aquest apartat s'introduirà breument els mètodes citats a la figura 2 menys coneguts, exceptuant-ne el Comeld™, la soldadura híbrida i el reblat electrohidràulic que seran desenvolupats posteriorment.

En un acoblament per dilatació diferencial, els components a acoblar són tancats en una «gàbia» fet a partir d'un material amb fort coeficient de dilatació tèrmica (sovint molibdè) i s'escalfa el conjunt. En dilatant-se, les parets imposen una pressió multiaxial a les peces, que seran acoblades termomecànicament. Aquest mètode deriva de la premsa en calent isostàtica, on s'aplica una tensió uniforme escalfant el conjunt [4].

El sinteritzat flaix (Spark Plasma Sintering) pren el mateix principi que el sinteritzat sota pressió, però es caracteritza per emprar una descàrrega elèctrica momentània qui, per efecte Joule, permet acoblar pols metàl·lica a un compost mitjançant la generació de plasma [5].

Per la soldadura per fricció (Friction Stir Welding), la calor es genera per fricció entre la peça i una eina rotativa. Anàlogament, la soldadura per fricció en superposició (Friction Lap Welding) parteix del mateix principi, però s'aplica més concretament en soldar la superposició de dues peces [6, 7].

La soldadura ultrasònica es basa en l'aportació de calor per vibració d'ultrasons. Per altra banda, la soldadura per punts genera la calor necessària per efecte joule de la resistència del material en un punt. Aquesta darrera és emprada habitualment pels acoblaments metall-metall. Tanmateix, també és aplicable als composts emprant inserts metàl·lics dins la peça [8].

El Super Plastic Forming consisteix en la injecció d'un gas calent a l'interior d'una peça formada per dues làmines. A suficient temperatura i pressió, és possible de soldar ambdues plaques donant per exemple estructures en forma de niu d'abella [4].

La soldadura tova i dura són mètodes similars, on s'acoblen dues peces mitjançant la unió fosa d'un element d'aportació. La distinció entre una i altra és la temperatura de fusió de l'element d'aportació, més baixa per la soldadura tova.

El fluocargolat és una tècnica de cargolat ràpid on les plaques a acoblar s'escalfen per fricció generada per la forta pressió i velocitat del cargolament [9].

El cocurat consisteix en un acoblament mecànic on durant el temps de curat d'un polímer se li ajunta la peça a acoblar. Després del curat complet, ambdues peces són unides de forma permanent. Es tracta d'un mètode aplicable tant a acoblaments polímer-polímer com polímer-metall.

4. Comeld™

4.1. Principi del mètode

Partint dels inconvenients presentats pels acoblaments mecànics i adhesius, es presenta com prometedora la recerca en mètodes mixts que combinin ambdues famílies tècniques, com és el cas del procés Comeld™.

El Comeld™ és un procés desenvolupat a The Welding Institute UK (TWI) [10], es tracta d'una tècnica que parteix del co-curat de materials metàl·lics i compòsits, però amb la introducció d'un relleu superficial a la part metàl·lica que mitjançant petites protuberàncies ofereix una millor adhesió.

El procés concebut per l'elaboració d'aquestes protuberàncies és el Surfi-Sculpt®.

4.2. Surfi-Sculpt®

El Surfi-Sculpt® és una tècnica de texturació superficial mitjançant un feix d'electrons desenvolupada a The Welding Institute UK des del 2004 [11].

Parteix de l'observació que en un procés de soldadura per canó d'electrons hi ha una tendència a l'acumulació de material a un dels costats. És doncs l'optimització del procés per afavorir la formació d'aquestes protuberàncies el que defineix el procés Surfi-Sculpt® [12].

El procés en si mateix consisteix en cicles repetitius d'impacte del feix electrònic (i doncs generació d'una acumulació de material) i refredament de la zona en qüestió. Una combinació de tensió superficial i pressió de vapor [13] dona lloc a l'apilament local, i en diversos cicles a la formació de les

protuberàncies. El temps de cicle és necessari per donar lloc a un estat tèrmic quasiestacionari i afavorir el desplaçament de material. La figura 3 il·lustra dos cicles de la tècnica.

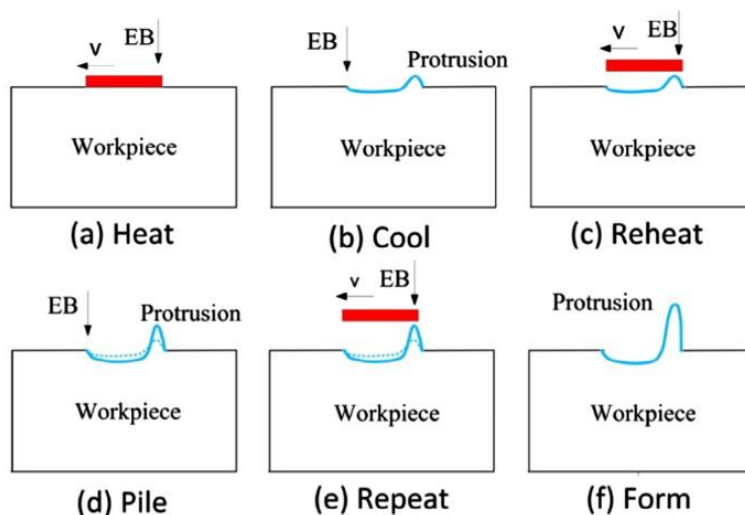


Figura 3: Cicle de Surfi-Sculpt®

Es tracta d'un procés temporalment eficient, ja que permet la formació de protuberàncies de fins a 1,5 mm en 10 s [14, 15].

Earl i Hilton [13] investigaren els paràmetres clau per millorar-ne la productivitat, assenyalant-ne la influència de la potència i velocitat del feix en la velocitat de formació de protuberàncies, i en l'efecte de la distribució d'aquestes en el manteniment d'un estat tèrmic quasiestacionari. Optimitzant aquests paràmetres, obtingueren protuberàncies de 0,93 mm en 1,083 s/protuberància.

Malgrat haver estat concebut amb un feix d'electrons, hi ha literatura indicant la viabilitat de substituir-lo per un feix làser [15, 16].

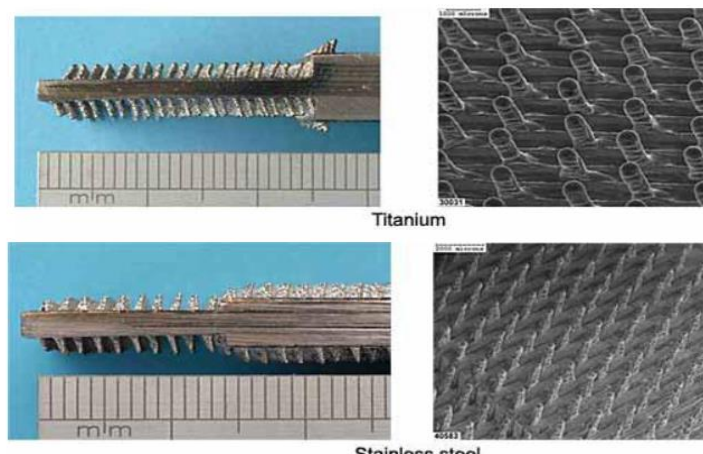


Figura 4: Dos exemples de texturació Surfi-Sculpt®, per Titani i Acer inoxidable

A la figura 4 es mostra dos exemples de tractament superficial en titani i acer inoxidable per fer acoblaments Comeld™ [17].

4.3. Acoblament Comeld™

Un cop generada la superfície desitjada en el metall té lloc l'acoblament amb el compòsit. Amb aquesta finalitat s'empren tècniques de conformació de compòsits habituals, notablement el *Vacuum Resin Transfer Molding* (V-RTM) consistent en la superposició de la preforma de reforçament (generalment fibra de vidre o carboni) sobre a la superfície texturada seguida d'una injecció de resina assistida per la pressió negativa de buit. Aquesta pressió assegura una bona infiltració de la resina al reforçament i al voltant de la peça metàl·lica. Un exemple del procés i d'acoblament final seguint aquesta tècnica es mostra a les figures 5 [18] i 6 [19].

Nogensmenys, són també factibles altres mètodes de conformació en autoclau [20, 21].

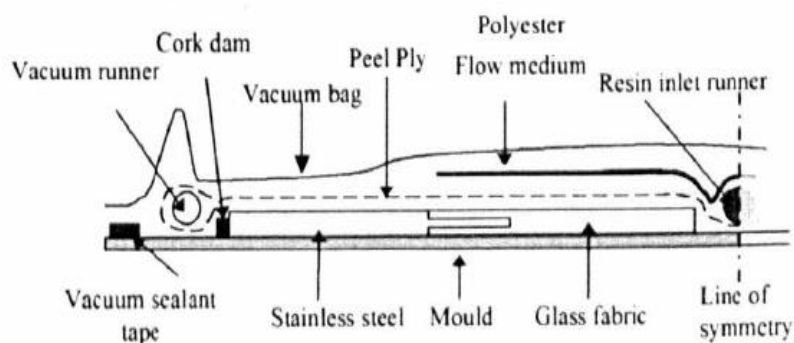


Figura 5: Procés de V-RTM

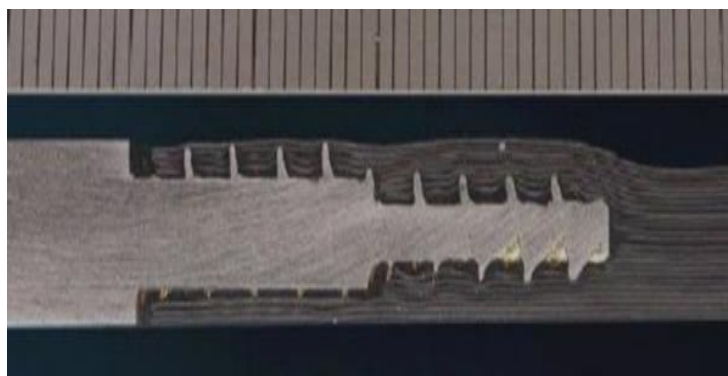


Figura 6: Exemple d'acoblament Comeld™

4.4. Paràmetres

En ser una unió relativament complexa, hi ha nombrosos paràmetres que poden influenciar la resistència de l'acoblament. Alguns d'aquests han estat estudiats per tal de conèixer-ne l'impacte i intentar parametritzar-los.

Zhang et al. compararen unions amb diferents llargades de protuberàncies per tal de poder-ne fer un model de predicció [19]. Estudiaren acoblaments de pre-preg¹ de CFRP amb un connector de Ti64V (figura 7) mostrats a la figura 8. Trobaren una millor resistència de fractura per les de protuberància curta. Així i tot, la resistència inicial a l'aparició de fractures fou similar. Els seus resultats experimentals es mostren adaptats a la taula 1.

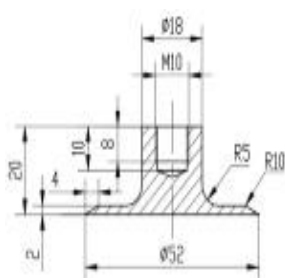


Figura 8: Connector de Ti64V

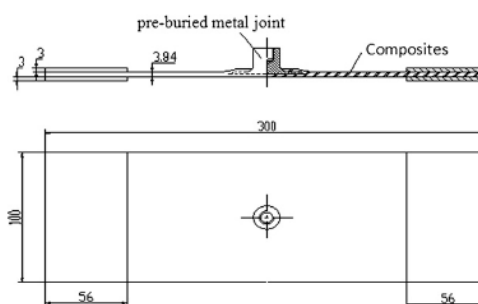


Figura 7: Vistes de la proveta emprada

Taula 1: Assaig de tracció per dues llargades de protuberància (adaptat de Zhang et al.)

Proveta	Aparició de fractura		A ruptura	
	Càrrega (kN)	Tensió (Mpa)	Càrrega (kN)	Resistència (MPa)
Protuberàncies curtes	96,7	246	231,91	589
Protuberàncies llargues	100	258	216,81	558

¹ Reforçament pre-impregnat de polímer al qual li cal sols un tractament tèrmic pel curat complet.

Alhora, Wei Tu també estudià l'impacte de la llargada de protuberància en la concentració de tensions mitjançant elements finits per acoblaments CFRP-Ti64V [17]. Com es mostra a la figura 9, la concentració de tensions es localitzà aproximadament a la mateixa alçada en tots els casos, amb distribucions força similars.

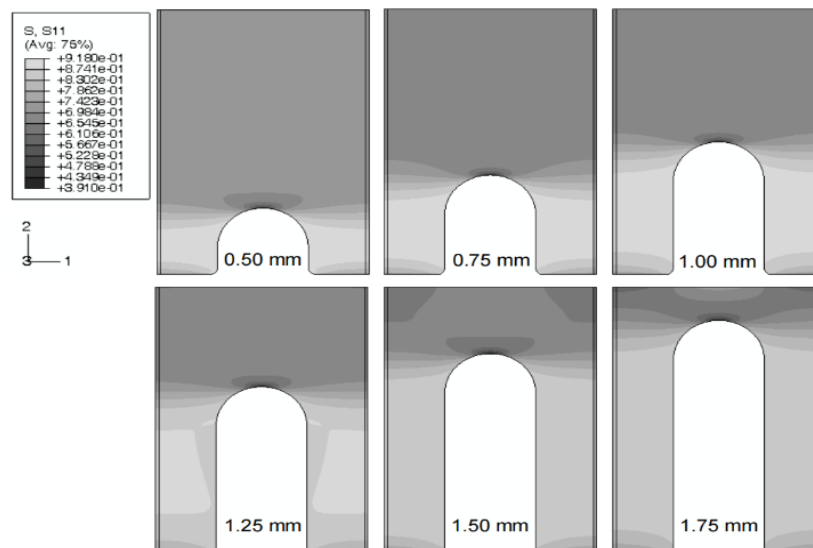


Figura 9: Resultats dels contorns de concentració de tensions axials en la regió de compòsit per diferents alçades de protuberància

Tanmateix, per tal de corroborar els resultats obtinguts per anàlisi numèrica Tu duqué a terme assajos de tracció en acoblaments CFRP/Ti64. Els assajos es van fer en 5 provetes idèntiques de 250x25x6 mm, amb una zona de 15 mm d'acoblament (vegeu figura 10).

Els resultats dels assajos de tracció es mostren a la Figura 15. S'hi observa una dispersió de tensió final abans de ruptura d'entre 28 i 42 kN, amb una mitja de 35,8 kN (figura 11) [17].

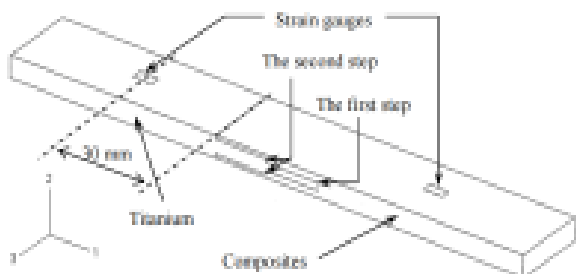


Figura 10: Esquema de la proveta amb acoblament

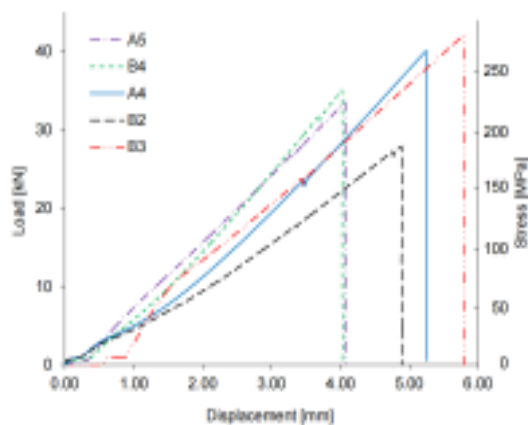


Figura 11: Assajos de tracció de cinc provetes idèntiques

Aquesta variació entre provetes idèntiques es considerà causada per llur procés de fabricació, car en el curat en autoclau aparegueren curvatures al voltant de la unió [17]. Aquestes curvatures hagueren possiblement donat lloc a una distribució heterogènia de la càrrega, qui hauria al seu torn implicat la dispersió de valors obtinguts.

Tu també n'estudià l'impacte de la distribució geomètrica de les protuberàncies en la superfície, trobant-hi un baix impacte d'aquesta [17]. Els diferents casos estudiats es veuen a la figura 12 [17].

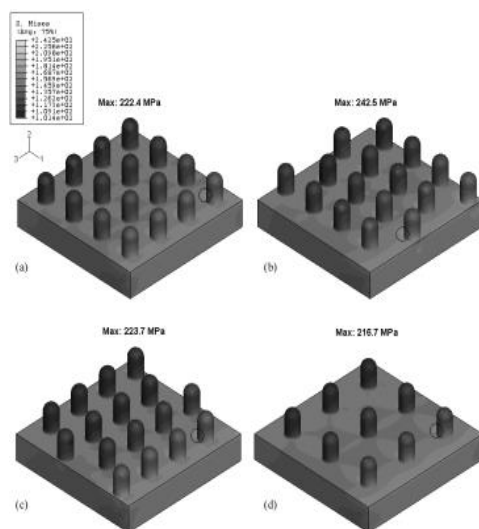


Figura 12: Tensió equivalent de Von Mises per diferents configuracions de protuberàncies

Xiong et al. investigaren també l'impacte de les orientacions d'empilament del compòsit en la resistència de l'acoblament, malgrat no treure'n resultats concloents [20].

4.5. Propietats mecàniques

Smith et al. [18] van fer assajos de tracció en acoblaments de GFRP-Ti64V i GFRP-Acer inoxidable en dues sèries, una sense tractament superficial (com es mostra a la figura 13) i l'altra amb acoblament Comeld™ (com el mostrat a la figura 6).



Figura 13: Acoblament de control

A les figures 14 i 15 s'hi mostren els resultats d'assajos de tracció per ambdós grups. S'hi constata que els acoblaments amb tractament Comeld™ presenten una càrrega de ruptura i una elongació significativament més elevades. Considerant que l'única variable és el tractament Surfi-Sculpt®, s'hi conclou que té un impacte positiu significatiu en el rendiment de la unió [10].

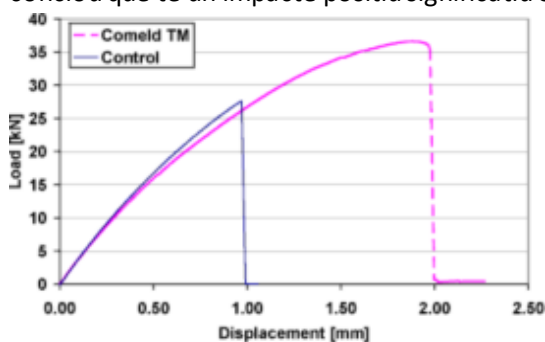


Figura 14: Assajos de tracció per acoblaments CFRP-acer inoxidable

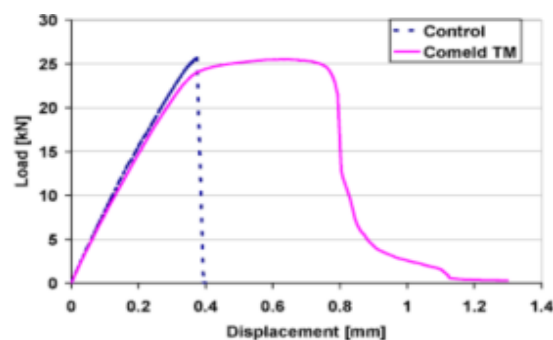


Figura 15: Assajos de tracció per acoblaments CFRP-titani

4.6. Inconvenients

Els principals inconvenients d'aquest mètode rau en l'ús d'un feix d'electrons per la texturació de la zona metàl·lica, com és la necessitat de treballar en el buit (i les limitacions dimensionals i llarg temps de procés que suposa) o la sensibilitat al magnetisme, totes dues implicant la necessitat de treballar en

un entorn tancat i controlat. Malgrat existir la possibilitat d'emprar un feix làser, aquesta variant no s'ha trobat tan eficient en termes de velocitat com amb canó d'electrons [15].

4.7. Escala de la tecnologia

Malgrat els potencials avantatges industrials que presenta pels acoblaments metall-compòsit, avui en dia es tracta d'un procés encara en vies de recerca per tal d'optimitzar-lo, sense extensa aplicació industrial. Així doncs, es troba limitat a escala de laboratori.

4.8. Impacte ambiental

Malgrat que el tipus d'acoblament en si no impliqui inherentment un gran impacte ambiental, la necessitat de tractaments superficials complexos amb canó d'electrons suposa una necessitat energètica important, i així doncs té un impacte no negligible. Alhora, en ser un acoblament permanent no permet una fàcil reutilització dels components emprats.

4.9. Conclusions

La recerca estudiada dels acoblaments emprant Comeld™ suggereixen certs avantatges en les unions multimaterial en relació amb mecanismes tradicionals com l'ús d'adhesius o rivets, malgrat implicar un important procés de preparació de superfície.

Per altra banda, es troba en un estat de recerca no massa desenvolupat, i encara manca recerca en diversos aspectes com poden ser els mecanismes d'acoblament (sobretot a escala industrial), el comportament de les protuberàncies a ruptura, o la parametrització de variables ajustables en el Surfi-Sculpt®, com la forma, distribució, radi, alçada o orientació de les protuberàncies.

5. Soldadura híbrida

5.1. Principi del mètode

Els mètodes d'encoblament termomecànics i mitjançant fusió són dels més eficients i adaptables a la indústria, arran de la seva rapidesa i bona resistència mecànica. Malauradament, no són aplicables polímers termoestables (i en conseqüència als compòsits que s'hi basen) a causa de la seva naturalesa química caracteritzada per una arquitectura reticulada.

Alhora, sovint són els compòsits amb matriu termoestable (abreviats TSC, Thermoset Composites) els més desitjats per aplicacions industrials, pel seu baix cost i bones propietats mecàniques. Les alternatives d'acoblament més emprades per aquests són els adhesius i les unions mecàniques. Malauradament, els adhesius requereixen un important tractament superficial i les unions mecàniques impliquen sovint un augment notable de pes global i problemes de laminació en perforar el compòsit.

Tenint en compte aquests factors, resulta interessant desenvolupar un mètode que permeti la unió per soldadura de polímers termoestables. En aquest apartat es descriurà el procés de soldadura híbrida, que parteix de l'aplicació d'una pel·lícula de polímer termoplàstic (abreviat TP, Thermoplastic Polymer) que serveix com a interfície intermediària sensible als mètodes d'unió tèrmica com la soldadura d'ultrasons.

Concretament, se'n poden distingir dues variants essencials:

→ Acoblament de dos TSC cada un amb prèvia aplicació d'una pel·lícula termoplàstica, creant doncs dues interfícies soldables entre elles. Un exemple d'aquest tipus d'unió es mostra a la figura 16 [22].

(Acoblament d'un TSC amb pel·lícula termoplàstica soldat a un compòsit de matriu termoplàstica (abreviat TPC, *Thermoplastic Composite*) i, per tant, soldable. A la figura 17 s'hi mostra un exemple d'aquesta unió on el substrat TSC és un compòsit amb matriu de resina epoxi i tant el film intermediari com la matriu del TPC són de PEEK [23].

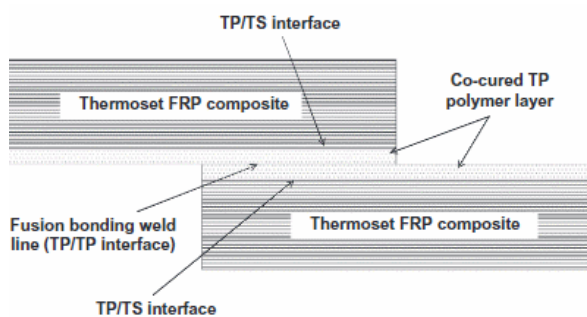


Figura 16: Esquema d'una unió de dos TSC amb TP intermediaris

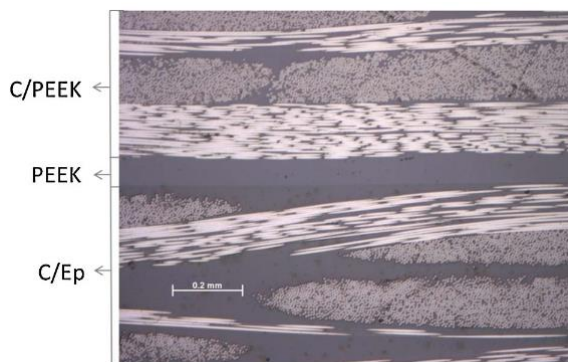


Figura 17: Exemple d'unió TSC+TP+TPC

La resistència i viabilitat de la unió són condicionades tant la bona adherència entre el TSC i la pel·lícula de TP, com per la unió termomecànica entre ambdós TP. En cas de ruptura, es poden distingir diferents tipus segons la interfície on tingui lloc. Aquests són anàlegs als trobats en acoblaments adhesius, il·lustrats a la figura 18 [22].

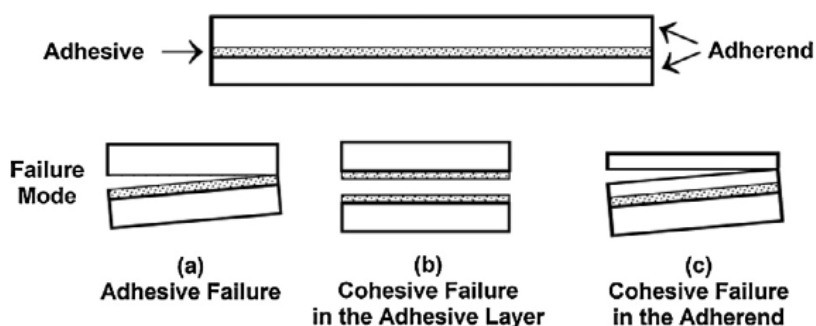


Figura 18: Esquema dels possibles modes de separació d'unions adhesives

5.2. La tecnologia de soldadura híbrida

5.2.1. Mecanisme d'adhesió TSC-TP

El mecanisme d'adhesió més explorat i emprat en literatura és una adhesió per cocurat, regida principalment per mitjans químics. Durant el curat simultani de dos compòsits en contacte, hi té lloc una difusió a la interfície que dona lloc a l'adherència donant lloc, en el cas ideal, a un semi-IPN (semi-interpenetrating polymer network, xarxa polimèrica semi-interpenetrada). Un exemple d'aquesta zona d'interdifusió es mostra a la figura 19 [24].

La problemàtica més comuna en posar en pràctica aquesta noció és la freqüent incompatibilitat química entre polímers, els quals en ser sovint immiscibles limiten en gran manera la formació d'una interfase més gran d'escassos nanòmetres [25].

Això no es tracta però d'una problemàtica nova, car els mecanismes de miscibilitat entre TP i polímers termoestables (abreviat TS, Thermoset Polymer) a estat ja àmpliament explorada en el domini de TS reforçats [26].

Diversos TP amorfs presenten una bona compatibilitat química amb TS, com el cas del PEI [27], PSU, PES [24], PS [28] i PVB [29].

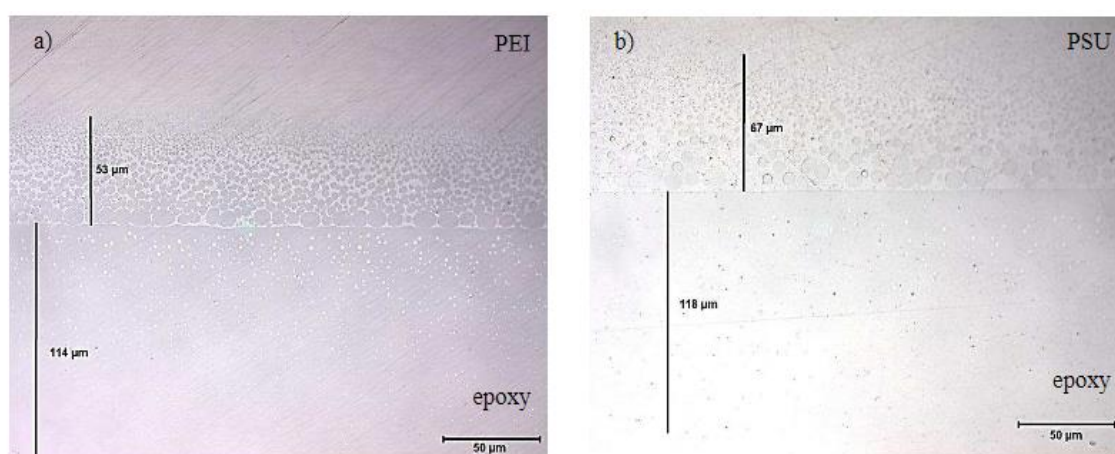


Figura 19: Mesures de distància d'interpenetració per epoxi consolidat en presència de a) PEI (53μm), i b) PSU (67μm)

Les propietats físiques ofertes per aquests TP amorfs no són pas les millors, i en conseqüència per aplicacions d'alt rendiment (e.g. aeroespacials) hi ha un interès pels polímers TP semicristal·lins els quals també presenten compatibilitat química. Tanmateix, aquesta possibilitat es troba notablement limitada per l'elevada temperatura de fusió de la majoria de TP semicristal·lins, sovint superior a la temperatura de transició vítria T_g del TS compatible. En aquesta línia, les qualitats d'adherència del PEEK amb tractaments superficials UV [23, 30] i del PVDF [31] (ambdós TP semicristal·lins) han estat explorades en literatura.

Alternativament, altres investigacions han explorat l'acoblament d'un compòsit de matriu TS compatible amb una pel·lícula TP soldats a un compòsit de matriu TP d'alt rendiment [23].

Un altre mecanisme d'evitar del tot la baixa miscibilitat entre polímers és d'emprar tècniques d'adhesió mecànica. Un exemple d'aquesta aplicació consisteix a deixar el reforçament del TS parcialment exposat i adherir-hi la pel·lícula TP a sobre per mitjans termomecànics (és a dir, escalfant a $T > T_F$ i aplicant pressió). D'aquesta manera, és la zona de reforçament compartida la que n'assegura la unió.

Així i tot, pel cas d'una adhesió CTP-TP és necessari assegurar una diferència entre temperatures de fusió suficient per no afectar el substrat [32].

5.2.2. Procés d'aplicació de film termoplàstic

Avui en dia, el principal impediment per la industrialització d'aquest mètode és el mecanisme d'aplicació de la pel·lícula termoplàstica, i és que la major part d'investigacions han estat fetes a escala de prova de concepte, i, per tant, la velocitat i eficiència no n'eren el subjecte de recerca.

La més senzilla és en autoclau, on emprant un pre-preg pel TSC s'hi superposa la pel·lícula de TP abans d'introduir el conjunt a l'autoclau per consolidar-los junts. Malauradament, aquest procés no presenta una cadència ni eficiència interessants per producció industrial a gran escala.

Alternativament, és possible aplicar el termoplàstic (en forma de pel·lícula o pols) sobre una preforma de reforçament seguit per un escalfament per permetre'n la difusió i penetració i finalitzat per la injecció de resina que conforma la matriu TS. Així doncs, resulta possible crear zones soldables localitzades mitjançant RTM (Resin Transfer Molding) o VRTM [33]. Consegüentment, resulta possible plantejar-ne l'extrapolació a altres tècniques similars com HP-RTM (High Pressure RTM) o C-RTM (Compression RTM).

Una altra línia de recerca explorable és la incorporació de TP intermediari en un procés de pultrusió, on el TP podria ser incorporat al reforçament com pel cas de l'RTM o inclòs en un procés de pultrusió avançada, on la matèria primera és de bon principi un pre-preg i caldria solament consolidar-hi el TP.

5.2.3. Unió per soldadura

Els paràmetres a considerar en la soldadura híbrida varien poc en relació amb les habituals pels TP, i, per tant, les tècniques aplicables en són ja ben conegudes, totes seguint de forma general l'esquema de la figura 20 [22].

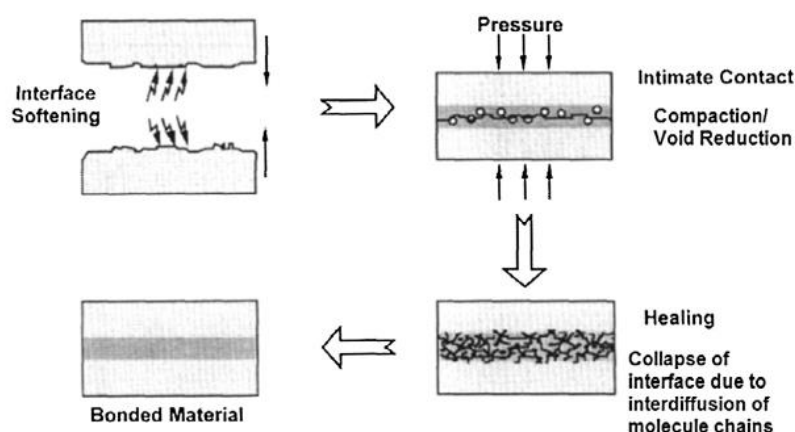


Figura 20: Esquema de les diferents etapes en una unió per fusió

Nogensmenys s'hi presenta una limitació no gens negligible, i és que tant la temperatura com el temps de soldadura han de ser ben controlats per evitar la degradació del TS. En aquest sentit, la utilització de tècniques d'alta velocitat ($t < 1$ s) com el cas de la soldadura per ultrasons foren proposades [34], així com l'emprament d'una pel·lícula termoplàstica gruixuda per aïllar-ne el substrat [23] o l'ús d'un TS amb temperatura de degradació elevada [35]. Per tal d'evitar la degradació cal controlar la combinació d'aquests paràmetres.

Així doncs, l'ús d'un TP amb temperatura de fusió baixa com el PVDF resulta de gran interès, malgrat ser molt limitant en la selecció.

L'optimització del gruix de la pel·lícula TP depèn en gran manera de la tècnica i velocitat de soldadura. Schieler et al. [35] trobaren que pel cas de la soldadura per inducció, el gruix mínim per conservar propietats mecàniques era de 250 μm . Per contra, pel cas de la soldadura per ultrasons (notablement més veloç) Villegas i Van Moorleghem [23] pogueren emprar pel·lícules de fins a 50 μm sense degradació tèrmica aparent. Tot i això, cal considerar que la soldadura per ultrasons sovint requereix l'addició d'una pel·lícula TP complementària (anomenada Energy Director, ED) entre els TP a soldar per tal de focalitzar l'energia i augmentar la velocitat d'escalfament, millorant la soldadura resultant. Pel cas de Villegas i Van Moorleghem, l'ED utilitzat era també de 50 μm . L'eficiència de la soldadura ultrasònica sense aquest intermediari també ha estat estudiada, però els resultats indiquen propietats mecàniques molt menys satisfetes [36].

5.3. Propietats mecàniques

La resistència mecànica final de l'acoblament és molt variable i depèn en gran manera de cada cas, puix que tant la tria de materials de substrat i pel·lícula TP com la tècnica de soldadura en definiran el resultat. Tanmateix, de forma general ha estat mostrat que per acoblaments compòsit/compòsit és possible obtenir resistències mecàniques en cisallament comparables a unions amb adhesiu [23].

Aquest fet ha estat també constatat per Lionetto et al. [29] qui per un acoblament de dos CFRP amb una pel·lícula intermediària de PVB trobaren resistències a cisallament d'entorn dels 25 MPa, i on la interfície crítica de ruptura fou la PVB-CFRP (així doncs exhibint un mecanisme de ruptura com el mostrat a la figura 18.a).

Pels acoblaments compòsit/metall, Ageorges et al. [37] compilaren resultats experimentals per unions de soldadura entre TPC i metall amb una pel·lícula TP intermediària adherida prèviament al metall. Els resultats són presentats a l'annex A a la taula A.1 en funció del TP intermediari emprat i a la taula A.2 segons el mètode de soldadura. S'hi pot constatar que en funció del substrat, el termoplàstic i el mètode de soldadura els resultats varien significativament.

5.4. Inconvenients

Els principals inconvenients d'aquest mètode es centren en la limitada selecció de materials per la capa intermediària, que consegüentment limiten les aplicacions de l'acoblament. També resulta una unió més complexa en comparació a una soldadura simple, car en comptes d'haver-hi una interfície a considerar n'hi ha tres (la de soldadura en si, i les dues d'adhesió al substrat). Així doncs, pot resultar més difícil de parametritzar-ne el comportament i construir-ne models teòrics.

5.5. Dominis d'aplicació

Els sectors industrials predisposats a emprar aquesta tècnica són principalment aquells on hi ha necessitat d'acoblaments compòsit/compòsit o on els acoblaments mecànics presenten notables inconvenients (com l'addició de pes). Un exemple en són els clips d'acoblament de l'armadura al buc dels Airbus A350 i Boeing 787 [38], fets de TPC i acoblats a TSC avui en dia mecànicament (il·lustrats a les figures 21 [39] i 22 [40]). La possibilitat de substituir els caragols fets servir per soldadura resulta doncs interessant. Aquest mètode també ha estat explorat per l'ús en helicòpters [35].



Figura 21: Acoblaments mecànics a l'armadura d'un Airbus A350

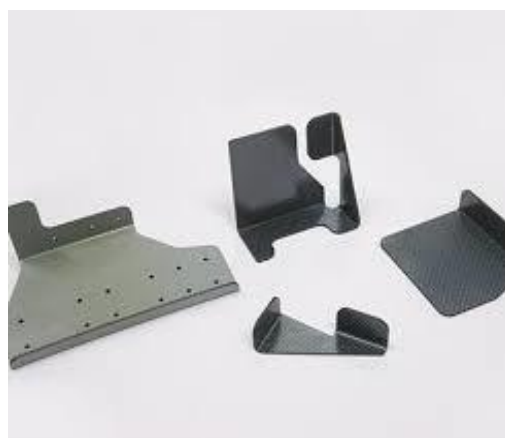


Figura 22: Clips d'acoblament fets de compòsit termoplàstic

Més enllà dels sectors aeronàutic i aeroespacial, la soldadura híbrida és també una possible alternativa als processos de co-curat tradicionals. Malgrat la necessitat d'etapes intermediàries, presenta l'avantatge de poder fabricar grans peces partint de petites seccions que poden ser fetes separatament i aleshores acoblades, en oposició al co-curat que sovint cal fer-se en dimensions finals i resulta problemàtic per peces de gran envergadura.

Altres dominis d'aplicació possibles són el sector automobilístic i eòlic. En aquest segon hi ha un interès en l'adhesió de recobriments TP a les pales per tal de reduir-hi l'efecte de la corrosió [41].

A tall general, les possibles aplicacions en literatura giren entorn els acoblaments TSC-TPC o TSC-TSC, però és un mètode també aplicable a unions TSC-metall [42].

5.6. Escala de la tecnologia

En ser una tècnica amb un gran ventall de variants, no resulta realista definir-ne una escala de desenvolupament actual precisa. Per exemple, els acoblaments compòsit-metall amb una pel·lícula intermediària han estat explorats des de fa força més temps que els compòsit-compòsit. Això no

obstant, en aquesta recerca bibliogràfica no ha estat possible de trobar-hi aplicacions actuals a escala industrial, cosa que permet inferir que es tracta d'un mètode principalment limitat a escala de laboratori.

5.7. Impacte ambiental

En ser un mètode divers, resulta difícil emmarcar-hi un impacte ambiental clar. Nogensmenys, sí que resulta interessant per ser favorable a mètodes de soldadura eficients com la soldadura híbrida que per la seva alta cadència i baix consum energètic té un impacte ambiental relativament baix. Per altra banda, la substitució d'unions permanents com el reblat per desmuntables (com la soldadura) resulta interessant en termes de reutilització, per tal de poder allargar el cicle de vida dels components acoblats.

5.8. Conclusió

En síntesi, la soldadura híbrida presenta potencial per les aplicacions on se cerca a reduir el màxim el pes en relació amb els acoblaments mecànics, o a millorar la velocitat/facilitat de producció en relació amb els adhesius. Alhora, es tracta d'un procés igualment interessant per la possibilitat d'incorporar-lo a processos industrials ja en marxa.

6. Reblat electrohidràulic

6.1. Principi del reblat tradicional

El reblat és un mètode ben conegut a la indústria per acoblar làmines basant-se en la formació d'un ancoratge mecànic entre elles com es mostra a la figura 23 [43].

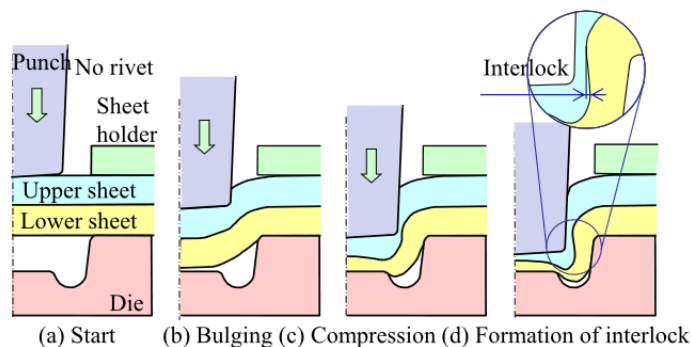


Figura 23: Acoblament de làmines per reblat

En el procés de reblat tradicional, dues plaques són embotides per un joc de punxó i matriu, deformant-les en fred i donant lloc a la unió mecànica [44]. Aquest mètode s'utilitza predominantment per làmines metàl·liques puix que generalment presenten una ductilitat apropiada.

Les diferents variants conegudes d'aquest mètode foren resumides i representades a la figura 24 per Babalo et al. [45]. Alhora existeixen mètodes que empen un escalfament localitzat per tal de facilitar l'acoblament o per adaptar el reblat a làmines de polímers termoplàstics. Sovint cal perforar prèviament una de les dues làmines per fer possible l'acoblament, tot i existeixen tècniques les quals mitjançant un punxó d'estampat seguit del reblat ho eviten.

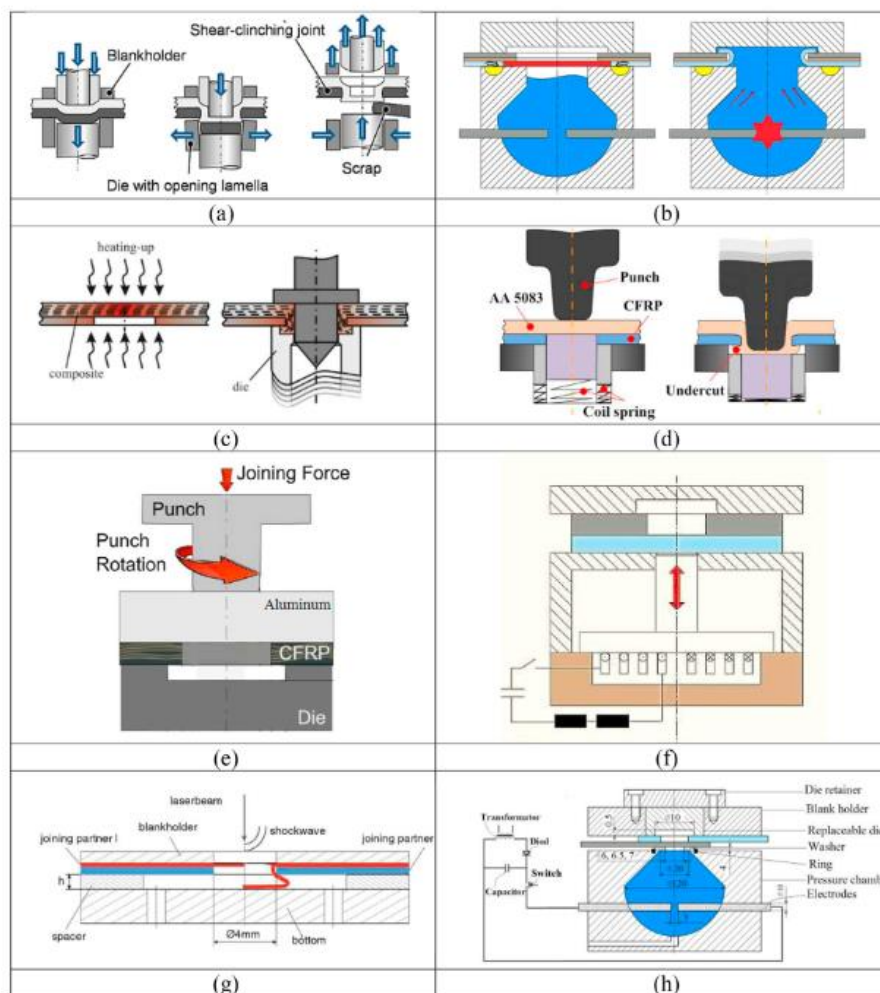


Figura 24: Processos de reblat.

A la figura 24 s'hi observen els mètodes següents: (a) Reblat amb prepunxament en una sola etapa (b) Plegament de xapa circular a alta velocitat (c) Reblat d'una làmina de termoplàstic amb un metall amb escalfament localitzat (d) Reblat amb molla amb forat previ (e) Reblat assistit per fricció, (f) Reblat electromagnètic, (g) Microreblat per xocs làser i (h) Reblat electrohidràulic.

A tall general tots els mètodes derivats del reblat tradicional presenten els avantatges comuns de ser ràpids i sense addició de matèria (i conseqüentment, sense addició de pes) [46]. Alhora, la majoria es fan en fred, també així estalviant energia.

6.2. Principi del reblat a alta velocitat (electrohidràulic i derivats)

La principal limitació del reblat tradicional és que és impossible d'aplicar-lo a làmines de gruix molt fi (generalment més prim que 0,8 mm) [45]. És per aquest cas que fou desenvolupat per Babalo et al. el reblat electrohidràulic, pel qual enregistrà una patent l'any 2020.

Els mètodes de reblat d'alta velocitat (com l'electrohidràulic) permeten millorar en eficiència, capacitat de deformació i treballar amb costos més baixos gràcies a la velocitat del procés [47].

En el reblat electrohidràulic (EHC, per electro-hydraulic clinching) una ona de xoc generada per una impulsió elèctrica es propaga en un medi aquós. És aquesta ona qui aporta l'energia mecànica necessària per a la deformació, sigui directament (amb aportació de calor o sense) o indirectament mitjançant un punxó. Aquestes tres variants es mostren esquematitzades a la figura 25 [45].

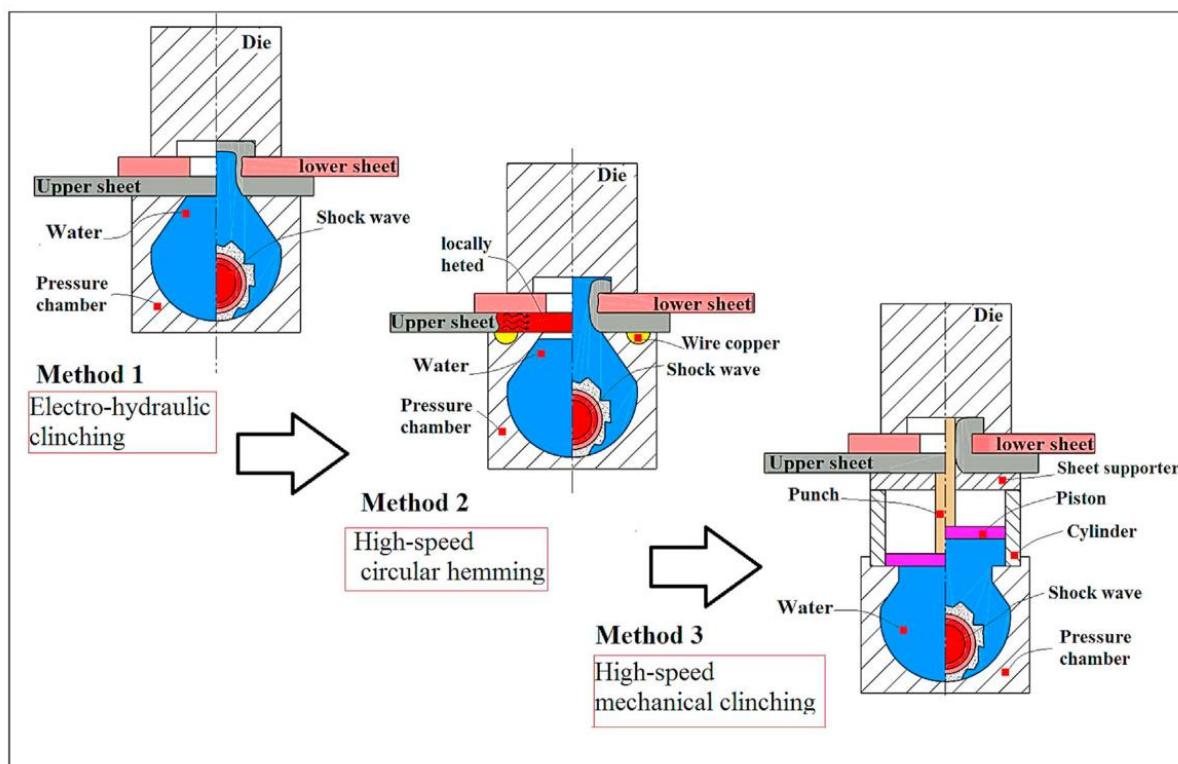


Figura 25: Diferents variants del reblat electrohidràulic

Malgrat ser un procés que dura pocs mil·lisegons cal remarcar que requereix una perforació prèvia de la làmina superior alhora que un alineament òptim d'aquesta, factors que donen complexitat i més temps de cicle al mètode [45].

La unió per plegament de xapa mitjançant un reblat d'alta velocitat (HSCE, high-speed circular hemming) es diferencia de l'EHC per l'aplicació d'energia tèrmica a la làmina més gruixuda. El reblat

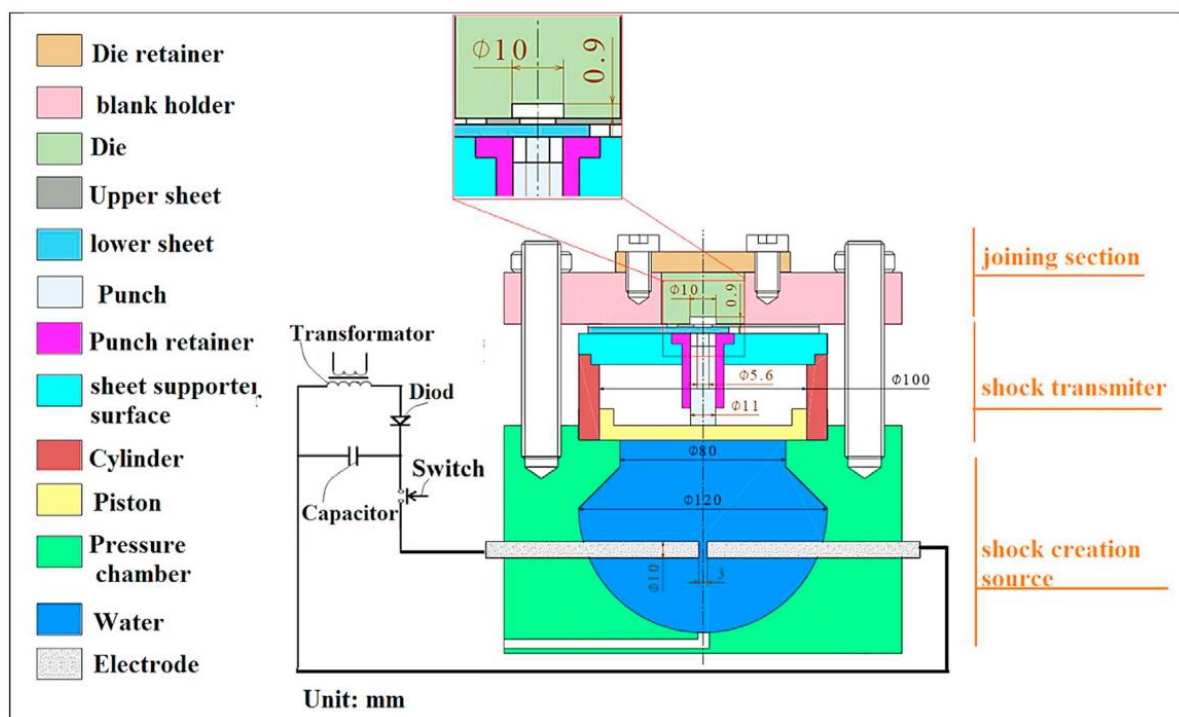


Figura 26: Reblat mecànic a alta velocitat per propagació d'ona de xoc en medi aquós

mecànic d'alta velocitat (HSMC, high-speed mechanical clinching) fa servir un punxó intermediari entre l'aigua i les làmines a acoblar. Aquest darrer mètode és el que ha estat investigat en profunditat per Babalo et al., i que es troba il·lustrat a la figura 26 [45].

6.3. Propietats mecàniques

6.3.1. Condicions d'assaig

A la figura 27 s'hi mostra una proveta obtinguda per HSMC, el comportament mecànic de la qual fou estudiat per Babalo et al. [45].

En el procés de fabricat s'emprà un punxó de 5,6 mm de diàmetre d'acer estructural ST37. La làmina del costat del punxó (inferior en la figura) s'estirà 0,9 mm. Alhora, s'hi observa una diferència de 0,08 mm entre el gruix dels colls de les dues làmines i 0,6 mm entre les dues zones d'ancoratge.

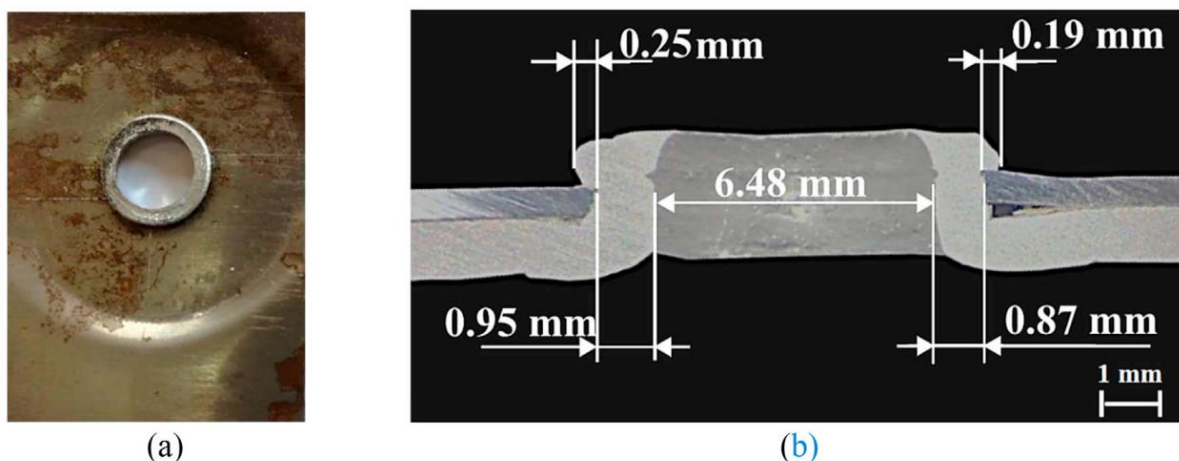


Figura 27: Acoblament d' AA1050-O/AISI1070 per HSMC (a) unió a la proveta (b) vista secció de la unió

6.3.2. Modes de fallida

Per qualsevol procés de reblat, els diferents modes de fallida sota càrrega són: desbotonat si la zona d'ancoratge és feble i la fractura del coll si aquest és massa fi [45]. Com s'il·lustra a la figura 28, també és possible una combinació d'ambdós modes [48].

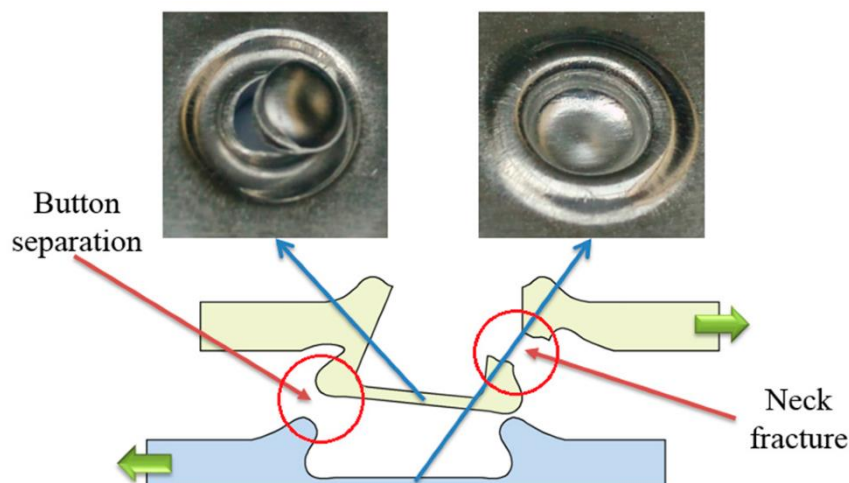


Figura 28: Modes de fallida d'un acoblament per reblat

En la recerca existent es troba que els acoblaments que tenen per mode de fallida la ruptura del coll tenen una millor resistència mecànica que aquells que presenten separació de botó. Aquest fet s'explica pel fet que pel cas de la separació de botó, la sol·licitació mecànica condueix a la deformació les làmines fins que se separen a la zona d'ancoratge. Conseqüentment, no s'hi explota la resistència màxima del material emprat.

Alhora, si durant la sol·licitació mecànica s'evita aquest mode de separació, la fallida té lloc solament per la fractura de la zona del coll donant lloc a una millor resistència [45].

La recerca de Babalo et al. en el HSMC mostrà solament la fractura del coll com a mode de fallida (figura 29), justificat pel fet que el gruix de la zona del coll és més gran que pel cas del reblat tradicional, i en conseqüència la zona d'ancoratge presenta més resistència a la separació per desbotonat [45].

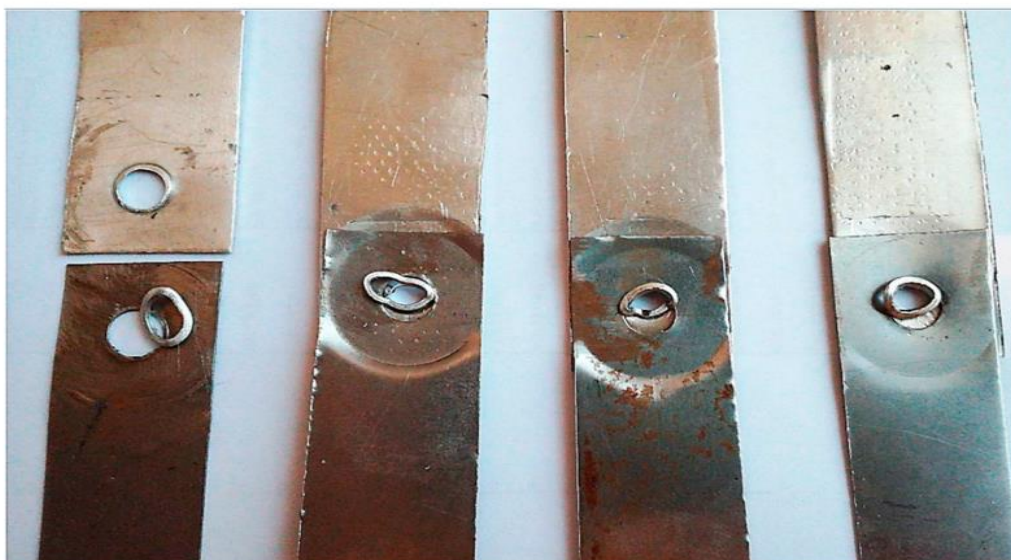


Figura 29: Ruptura del coll en assajos de tracció uniaxial

Generalment, pel reblat d'alta velocitat (com l'electrohidràulic o el magnètic), el gruix del coll roman similar al de la làmina en si oferint una millor resistència a les tensions de cisallament que pel cas del reblat tradicional, on el coll presenta aproximadament la meitat de gruix que la làmina [45].

L'explicació d'aquesta diferència rau en la velocitat del procés. En un reblat tradicional, la pressió aplicada pel punxó desplaça la matèria del coll a la zona anomenada *undercut*, per formar l'ancoratge mecànic (figura 30) [49].

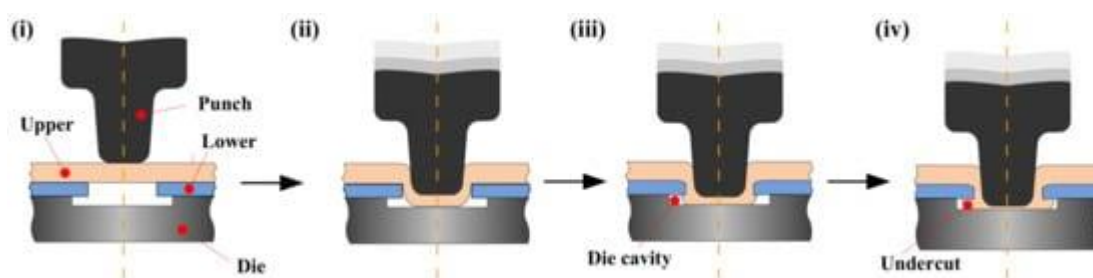


Figura 30: Esquema del reblat

Per altra banda, en el HSMC la velocitat del procés impedeix que el material es desplaci d'aquesta manera, i és únicament la matèria sota el punxó qui es desplaça a l'*undercut* i qui es propaga per formar l'ancoratge. Això resulta en un gruix d'*undercut* més fi però un coll més ample que pel reblat tradicional [45].

6.3.3. Eficiència

L'eficiència del procés pot ser calculada com el quocient de la resistència màxima possible en cisallament de l'acoblament (calculada en funció de l'àrea del forat de reblat i la resistència mecànica del material emprat) i la resistència a cisallament mesurada experimentalment.

Per l'EHC, Babalo et al. trobaren una eficiència d'unió molt elevada, al voltant del doble que per un reblat tradicional (taula B.1 a l'annex B) [46].

En una altra publicació, els mateixos autors mostraren una eficiència de 114% pel HSMC contra el 87% de l'EHC i 38% del reblat amb forat previ [45]. Els resultats compilats es troben a la taula B.2.

Així doncs, tant el HSMC com l'EHC ofereixen notables propietats mecàniques, malgrat que aquestes depenen en gran manera de les condicions de reblat (per exemple un desalineament dels components té un sever impacte negatiu en el resultat final) [46].

6.4. Inconvenients

Arran de les particularitats de la tecnologia HSMC citades prèviament, resulta necessari fer un forat previ per tal de permetre el desplaçament ràpid de matèria. Aquest procés pot ser complicat pel cas dels compòsits on el risc de delaminació és alt. Nogensmenys, aquesta problemàtica pot ser eludida de forma anàloga al sistema de la figura 24 (a), on s'empren dos punxons a ambdós costats de les làmines per a evitar el preperforament.

Un altre dels inconvenients del reblat d'alta velocitat és la fractura del punxó, donada pel petit diàmetre d'aquest en comparació a l'alta pressió aplicada al seu extrem. Pels assajos mecànics mostrats a la figura 27 aquest tenia un diàmetre de 5,6 mm i donà lloc a un acoblament de 6,48 mm de diàmetre, indicatiu de l'aixafament de l'extrem del punxó com es mostra a la figura 31 [45].



Figura 31: Deformació del punxó pel fort impacte durant el HSCM

Com els punxons no poden ser reutilitzats després de llur deformació, resulta necessari d'utilitzar-ne d'un sol ús, reemplaçables cada vegada.

La coneixença tècnica de la velocitat i profunditat de reblat són actualment en procés d'estudi, per tal de poder controlar millor la càrrega imposada al punxó i, per tant, evitar-ne la deterioració a cada ús [45]. Paral·lelament, resulta interessant la recerca en tractaments superficials per tal de millorar-ne a resistència, o la utilització d'aliatges particulars en la seva fabricació.

6.5. Escala de la tecnologia

Ja hi ha sistemes industrials que foren proposats per Babalo et al. [47] i són emprats en fabricació d'automòbils per la "caixa en blanc", l'esquelet del xassís (patent del 2020).

6.6. Impacte ambiental

Pel que fa a l'impacte ambiental del HSMC, és notable el gran consum energètic que suposa, sobretot en comparativa amb el reblat tradicional. El reblat electrohidràulic pot consumir fins a 1,1 kJ en

comparació amb 100 J del tradicional [46]. Per altra banda, en ser un acoblament permanent no permet la reutilització o el fàcil reciclatge dels components a posteriori.

6.7. Conclusió

En conclusió, es tracta d'un procés interessant pels seus bons resultats mecànics, la seva gran velocitat i la seva adaptació als nous materials i acoblaments multimaterial. Alhora, destaca per la seva aplicabilitat a làmines fines. Malgrat això, la necessitat d'alta precisió i l'elevat consum energètic en són els principals frens per la industrialització.

7. Conclusió

7.1. Taula comparativa qualitativa

Sense considerar els adhesius, existeixen doncs nombrosos mètodes alternatius d'acoblament. Alguns existeixen des de fa un llarg temps (com la soldadura o el reblonat), mentre que d'altres són molt recents i encara en desenvolupament (Comeld™) o encara altres barregen tècniques ja existents i innovació per tal d'encarar a necessitats actuals (com el reblat electrohidràulic o la soldadura híbrida).

A la taula 2 s'hi fa una comparativa d'aquests mètodes segons criteris tècnics i econòmics, oferint una anàlisi qualitativa en tant a possibilitats de desenvolupament i sectors d'aplicació per les tècniques citades.

El cost econòmic i l'impacte ecològic prenen en compte diversos criteris: l'aportació de matèria (i per tant pes addicional en l'aplicació), l'aprovisionament de matèries primeres o la necessitat energètica del procés.

Resulta notable que la major part de processos implicant la difusió dels metalls poden també aplicar-se a altres materials, amb l'aplicació prèvia d'un insert metàl·lic entre les dues superfícies a acoblar.

Taula 2: Anàlisi comparativa dels diferents mètodes

<i>Mètode</i>	<i>Materials d'aplicació</i>	<i>Tipus de mètode</i>	<i>Aportació de matèria</i>	<i>Escala actual i potencial, cadència</i>	<i>Principals sectors d'aplicació</i>	<i>Cost</i>	<i>Impacte ambiental</i>
<i>Acoblament per collar</i> [50]	Metall o plàstic	Mecànic	No	Escala industrial	Automòbil	Baix	Baix, poca energia
<i>Soldadura tova/forta</i> [4]	Metall-metall, metall-ceràmic	Tèrmic, difusió en estat líquid	Sí (metall d'aportació)	Escala industrial	Molt estès	Segons el material d'aplicació	Metalls d'aportació poden ser terres rares, consum energètic segons temperatura
<i>Reblat electrohidràulic o HSMC</i> [43, 45–48]	Metall-metall (làmines fines), e < 0.8mm Metall-compòsit	Mecànic, deformació local plàstica en fred	No	Escala de laboratori, principi d'industrialització. Procés extremadament ràpid però amb necessitat de molta preparació	Automòbil	Car	Mitjà. Molt ràpid però gran consum energètic
<i>Reblat tradicional</i> [44, 46]	Metall	Mecànic, deformació local plàstica en fred	No	Escala industrial	Automòbil, gran consumidor	Baix	Baix, poca aportació energètica
<i>Clavat</i>	Fusta, metall.	Mecànic	Sí (clau)	Escala industrial	Estructural	Baix	Baix, poca aportació energètica
<i>Cocurat</i> [51]	Compòsits, metalls	Mecànic, químic	No	Escala industrial, baixa cadència	Aeronàutica, estructural	Baix	Baix

<i>Mètode</i>	<i>Materials d'aplicació</i>	<i>Tipus de mètode</i>	<i>Aportació de matèria</i>	<i>Escala actual i potencial, cadència</i>	<i>Principals sectors d'aplicació</i>	<i>Cost</i>	<i>Impacte ambiental</i>
<i>Dilatació diferencial</i> [4]	Metalls	Termomecànic, fusió per pressió uniforme i temperatura	Indirectament: necessitat de gàbia.	Escala industrial, poc flexible però bon rendiment temps/quantitat	Microelectrònica, microfluids	ND	ND
<i>Fluocargolat</i> [9]	Principalment metalls, alguns compòsits	Termomecànic, deformació assistida per escalfament per fricció.	Sí (cargol)	Escala industrial, alta cadència	Automòbil	Baix	Baix
<i>Friction Lap Welding</i> [7]	Metalls, compòsits	Termomecànic, difusió i deformació en calent	No	Escala industrial	Aeroespacial, aeronàutica, ús general	Baix	Baix, poca necessitat energètica, cap emissió pol·luent.
<i>Friction Stir Welding</i> [6]	Metalls, compòsits	Termomecànic, difusió i deformació en calent	No	Escala industrial	Aeroespacial, aeronàutica, ús general	Baix	Baix, poca necessitat energètica, cap emissió pol·luent.
<i>Sinteritzat flash</i> [5]	Metall-ceràmic	Termomecànic	No	Escala de laboratori	Balística		Alt, gran necessitat energètica
<i>Prensa en calent</i> [4]	Metalls	Difusió per pressió externa d'un embolcall	Indirectament, necessitat d'un embolcall i gas inert a injectar	Escala industrial, baixa cadència	Microelectrònica, microfluids	ND	Mitja, ús d'àcids per decapar superfícies

<i>Mètode</i>	<i>Materials d'aplicació</i>	<i>Tipus de mètode</i>	<i>Aportació de matèria</i>	<i>Escala actual i potencial, cadència</i>	<i>Principals sectors d'aplicació</i>	<i>Cost</i>	<i>Impacte ambiental</i>
<i>Reblonat autoperforant</i> [52, 53]	Metalls, compòsits	Mecànic, deformació plàstica en fred	Sí (rebló)	Escala industrial, ràpid per no necessitar preforadar	Automòbil, aeronàutic	Baix	Baix, poca necessitat energètica
<i>Reblonat tradicional</i>	Metalls	Mecànic	Sí (un rebló)	Escala industrial	Automòbil, aeronàutica, aeroespacial	Baix	Baix
<i>Plegament de xapa</i>	Metalls	Mecànic	Sí/No, segons si hi ha element d'unió addicional	Escala industrial	Calefacció, climatització, estructural	Baix	Baix, poca necessitat energètica
<i>Soldadura híbrida</i> [22–24, 31, 35, 38, 41]	Metalls-compòsits, compòsits-compòsits	Difusió (soldadura)+químic (adhesió del film)	Sí (film intermediari)	Escala de laboratori, més o menys desenvolupat segons la variant	Aeronàutica, estructural	Variable segons els materials emprats	Variable segons els materials emprats
<i>Soldadura per punts</i> [8, 54]	Metalls	Termomecànic	No	Escala industrial, ràpid (5ms à 3s) et precís	Automòbil	Baix	Mitjà, necessitat d'aportació energètica
<i>Soldadura ultrasònica</i> [34, 36]	Metalls, compòsits	Termomecànic	No	Escala industrial, menys estès pels compòsits.	Indústria general	Baix	Baix
<i>Super Plastic Forming</i> [4]	Metalls	Termomecànic, difusió i pressió uniforme	No	Escala industrial	Aeroespacial, aeronàutica	ND	Baix.

<i>Mètode</i>	<i>Materials d'aplicació</i>	<i>Tipus de mètode</i>	<i>Aportació de matèria</i>	<i>Escala actual i potencial, cadència</i>	<i>Principals sectors d'aplicació</i>	<i>Cost</i>	<i>Impacte ambiental</i>
<i>Comeld™</i> [17, 19, 21]	Metall-compòsit	Mecànic, texturació superficial	No	Escala de laboratori	ND	Elevat	Mitjà-alt, necessitat d'aportació d'energia

7.2. Conclusions

Aquesta memòria ha permès il·lustrar la divisió de les tècniques d'acoblament compòsit-metall i compòsit-compòsit en tres grans famílies: adhesius (no inclòs en la memòria), acoblaments per difusió (dits termomecànics) els quals es basen en un gradient de temperatura i l'aplicació de pressió, i els acoblaments estrictament mecànics.

Més enllà dels mètodes ja ben coneguts i emprats, s'han proposat tres noves tècniques com a alternatives a processos d'acoblament tradicionals.

La unió Comeld™ és una tècnica d'acoblament sense aportació de matèria. Es constitueix per una combinació d'adhesió i encaix mecànic basat en la texturació superficial d'un metall per feix d'electrons per tecnologia Surfi-Sculpt®. La barreja d'aquests dos aspectes permet d'obtenir millors propietats que per adhesió simple o acoblament mecànic pur.

La soldadura híbrida és un procés d'acoblament que reposa sobre la interacció entre polímers en termes d'adsorció, adhesió i sobretot interdifusió. Parteix dels principis ja coneguts de la soldadura entre termoplàstics i metalls. Per tal de poder aplicar aquests processos a acoblaments amb termoestables, s'aplica una capa termoplàstica a la superfície, permetent-ne la soldadura.

El reblat a alta velocitat (com l'electrohidràulic) permet l'acoblament de làmines metàl·liques d'espessor molt petita, prèviament impossible. Amb aquesta finalitat es fa servir una ona de xoc propagada en medi aquós la qual transmet una forta energia en poc temps sigui a un punxó o directament a les làmines. La potència transmesa així com la velocitat del procés són ben superiors a la del reblat tradicional.

Aquests tres processos permeten respondre a problemàtiques dels acoblaments en sectors d'alt rendiment com l'aeronàutica. Així doncs, aporten un enriquiment de la gamma de possibilitats disponibles avui en dia a la indústria per tal de poder acoblar els compòsits amb altres compòsits o metalls.

Pressupost

Tractant-se d'un treball estrictament bibliogràfic, no ha estat necessari cap pressupost, com el que normalment es destinaria a treballs experimentals. Nogensmenys, si es considera el temps invertit tant per l'alumne com el tutor responsable de l'empresa (qui, al cap i a la fi, ha inclòs la supervisió del projecte en les seves tasques laborals), se'n pot fer un estimat.

Considerant una inversió de 90 hores per part de l'estudiant, amb un salari de 12€/h (aproximat d'un enginyer júnior); i una inversió de 4 hores en reunions de seguiment sumat a 3 hores de visita de les instal·lacions de l'empresa per part del tutor industrial (comptades a 50€/h), se'n pot calcular un aproximat del cost total del projecte en $C = 90h \cdot 12 \frac{\text{€}}{h} + (3 + 4)h \cdot 50 \frac{\text{€}}{h} = 1430\text{€}$.

Bibliografia

1. CURRAN, R., KUNDU, A. K., WRIGHT, J. M., CROSBY, S., PRICE, M., RAGHUNATHAN, S. and BENARD, E. Modelling of aircraft manufacturing cost at the concept stage. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Novembre 2006. Vol. 31, n° 3–4, pp. 407–420. DOI 10.1007/s00170-005-0205-8.
2. ZHAO, Hongwei, XI, Jiangjing, ZHENG, Kailun, SHI, Zhusheng, LIN, Jianguo, NIKBIN, Kamran, DUAN, Shihui and WANG, Binwen. A review on solid riveting techniques in aircraft assembling. *Manufacturing Review*. 24 Desembre 2020. Vol. 7, pp. 40. DOI 10.1051/mfreview/2020036.
3. LIONETTO, Francesca, MORILLAS, Maria Nicolas, PAPPADÀ, Silvio, BUCCOLIERO, Giuseppe, FERNANDEZ VILLEGAS, Irene and MAFFEZZOLI, Alfonso. Hybrid welding of carbon-fiber reinforced epoxy based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1 Gener 2018. Vol. 104, pp. 32–40. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.10.021.
4. BIENVENU, Yves. Assemblage par diffusion (soudage ou brasage). *Techniques de l'ingénieur Assemblage des matériaux par soudage*. 2010. DOI 10.51257/a-v1-bm7747.
5. MORIN, Cedric. *Elaboration par frittage flash de composés céramique/métal pour la protection balistique*. [en línia]. 2012. Disponible à l'adresse: <http://www.theses.fr/2012DIJOS004/document>
6. MISHRA, R. S. and MA, Z. Y. *Friction stir welding and processing*. 31 Agost 2005.
7. LIU, F. C., LIAO, J. and NAKATA, K. Joining of metal to plastic using friction lap welding. *Materials and Design*. 2014. Vol. 54, pp. 236–244. DOI 10.1016/j.matdes.2013.08.056.
8. TROSCITZ, Juliane, VORDERBRÜGGEN, Julian, KUPFER, Robert, GUDE, Maik and MESCHUT, Gerson. Joining of thermoplastic composites with metals using resistance element welding. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2 Octubre 2020. Vol. 10, n° 20, pp. 1–12. DOI 10.3390/app10207251.
9. Robotergestütztes fließlochformendes Schraubsystem RSF - WEBER Schraubautomaten GmbH. [en línia]. [Consultat el 14 Gener 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.weber-online.com/systemloesungen/schraubsystem-fuer-fliessllochformende-verschraubungen/>
10. COMELD - An innovation in composite to metal joining - TWI. [en línia]. [Consultat el 14 de gener 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-an-innovation-in-composite-to-metal-joining>

11. DANCE, Bruce Guy Irvine and KELLAR, Ewen James Crawford. Workpiece structure modification. W0/2004/028731. 8 Abril 2004. International Patent Publication.
12. An Introduction to Surfi-Sculpt Technology - TWI. [en línia]. [Consultat el 14 de gener 2022]. Disponible a l'adreça: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-introduction-to-surfi-sculpt-technology-new-opportunities-new-challenges-abril-2007>
13. EARL, Caroline, HILTON, Paul and O'NEILL, Bill. Parameter Influence on Surfi-Sculpt Processing Efficiency. In : *Physics Procedia*. Elsevier B.V., 2012. pp. 327–335. DOI 10.1016/j.phpro.2012.10.045.
14. WANG, Xichang, AHN, Joseph, BAI, Qian, LU, Wenjun and LIN, Jianguo. Effect of forming parameters on electron beam Surfi-Sculpt protrusion for Ti-6Al-4V. *Materials and Design*. 5 Juliol 2015. Vol. 76, pp. 202–206. DOI 10.1016/j.matdes.2015.03.065.
15. HILTON, Paul and NGUYEN, Lien. A new method of laser beam induced surface modification using the surfi-sculpt® process. In : *3rd Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, PICALO 2008 - Conference Proceedings*. Laser Institute of America, 2008. pp. 61–66. ISBN 9780912035895. DOI 10.2351/1.5057092.
16. BLACKBURN, Jonathan and HILTON, Paul. Producing surface features with a 200 W Yb-fibre laser and the Surfi-Sculpt® process. In: *Physics Procedia*. Elsevier B.V., 2011. pp. 529–536. DOI 10.1016/j.phpro.2011.03.065.
17. TU, Wei. *Comeld TM Joints: Optimisation of Geometric Parameters of the Protrusions*. 2011.
18. SMITH, Faye. COMELD™: An innovation in composite to metal joining. *Materials Technology*. 2005. Vol. 20, n° 2, pp. 91–96. DOI 10.1080/10667857.2005.11753117.
19. ZHANG, Hongjian, WEN, Weidong and CUI, Haitao. Study on the strength prediction model of Comeld composites joints. *Composites Part B: Engineering*. Desembre 2012. Vol. 43, n° 8, pp. 3310–3317. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.01.085.
20. XIONG, Wei, BLACKMAN, Bamber, DEAR, John P. and WANG, Xichang. The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surfi-sculpt. *Composite Structures*. 15 Desembre 2015. Vol. 134, pp. 587–592. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.08.083.
21. ZHANG, Zhou, TAN, Xiang Hu, ZHANG, Jing and SHAN, Ji Guo. Suppression of shrinkage porosity in laser-joining of CFRP and steel using a laser surface modification process “Surfi-Sculpt®.” *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1 Octubre 2018. Vol. 85, pp. 184–192. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.013.

22. DENG, Shiqiang, DJUKIC, Luke, PATON, Rowan and YE, Lin. *Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures - A review*. 2015. Elsevier Ltd.
23. VILLEGAS, Irene Fernandez and VAN MOORLEGHEM, Regis. Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1 Juny 2018. Vol. 109, pp. 75–83. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.02.022.
24. VANDI and LUIGI-JULES. *Interface diffusion and morphology of aerospace grade epoxy co-cured with thermoplastic polymers*. 2012.
25. STAMM, Manfred and SCHUBERT, Dirk Wolfram. INTERFACES BETWEEN INCOMPATIBLE POLYMERS. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1995. Vol. 25, pp. 325–56.
26. PETRIE, Edward M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. . 2nd Edition. McGraw-Hill Professional, 2007.
27. HEITZMANN, Michael T., HOU, Meng, VEIDT, Martin, VANDI, Luigi Jules and PATON, Rowan. Morphology of an interface between Polyetherimide and epoxy prepreg. In : *Advanced Materials Research*. 2012. pp. 184–188. ISBN 9783037853078. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.393-395.184.
28. MCKNIGHT, Stephen H, FINK, Bruce K, MONNARD, Veronique, BOURBAN, P-e, MANSON, Jan-Anders E, ECKEL, Douglas A and GILLESPIE, John W. *Army Research Laboratory Processing and Characterization of Welded Bonds Between Thermoset and Thermoplastic Composites*. 2001.
29. LIONETTO, Francesca, MORILLAS, Maria Nicolas, PAPPADÀ, Silvio, BUCCOLIERO, Giuseppe, FERNANDEZ VILLEGAS, Irene and MAFFEZZOLI, Alfonso. Hybrid welding of carbon-fiber reinforced epoxy based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1 Gener 2018. Vol. 104, pp. 32–40. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.10.021.
30. SHI, Huajie, SINKE, Jos and BENEDICTUS, Rinze. Surface modification of PEEK by UV irradiation for direct co-curing with carbon fibre reinforced epoxy prepreps. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1 Març 2017. Vol. 73, pp. 51–57. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2016.07.017.
31. HOU M., BEEHAG A. and YUAN Q. Welding techniques for polymer or polymer composite components. *International patent WO2003/011573*. 2003.
32. JACARUSO, Gary J, DAVIS, Geoffrey C and MCINTIRE, Allen J. *51) (52) (58) (56) METHOD OF MAKING THERMOPLASTIC ADHESIVE STRIP FOR BONDING THERMOSET COMPOSITE STRUCTURES*. 1992.

33. GOHEL, Goram, BHUDOLIA, Somen K., KANTIPUDI, Jayaram, LEONG, Kah Fai and BARSOTTI, Robert J. Ultrasonic welding of novel Carbon/Elium® with carbon/epoxy composites. *Composites Communications*. 1 Desembre 2020. Vol. 22. DOI 10.1016/j.coco.2020.100463.
34. FERNANDEZ VILLEGAS, Irene and RUBIO, Pablo Vizcaino. *On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites*. 2015.
35. SCHIELER, Oliver and BEIER, Uwe. Induction Welding of Hybrid Thermoplastic-thermoset Composite Parts. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*. 14 Desembre 2015. pp. 27–36. DOI 10.14416/j.ijast.2015.10.005.
36. TSIANGOU, Eirini, TEIXEIRA DE FREITAS, Sofia, FERNANDEZ VILLEGAS, Irene and BENEDICTUS, Rinze. Investigation on energy director-less ultrasonic welding of polyetherimide (PEI)- to epoxy-based composites. *Composites Part B: Engineering*. 15 Setembre 2019. Vol. 173. DOI 10.1016/j.compositesb.2019.107014.
37. AGEORGES, C, YE, L and HOU, M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. . 2000.
38. DETERS, A, MIARIS, A and SOHNES, G. Serial production of thermoplastic CFRP parts for the Airbus A350XB. In : *ITECH Conference*. Bremen, Octubre 2012.
39. Erika Gibson à Twitter: “Fuselage frame clips on Airbus A350 made by Aerosud SA #Ethiopian_SA.” [en línia]. 28 Juny 2016. [Consultat el 18 Març 2022]. Disponible à l’adresse: <https://twitter.com/GibsonErika/status/747774577233780736>
40. Airbus A350 Connector Clips. *Premium Aerotec*.
41. SEYYED MONFARED ZANJANI, Jamal, BARAN, Ismet and AKKERMAN, Remko. Combatting rain erosion of offshore wind turbine blades by co-bonded thermoplastic-thermoset hybrid composites. In : *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing Ltd, 23 Octubre 2020. DOI 10.1088/1757-899X/942/1/012024.
42. LIONETTO, Francesca, BALLE, Frank and MAFFEZZOLI, Alfonso. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 1 Setembre 2017. Vol. 247, pp. 289–295. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002.
43. MORI, Ken ichiro and ABE, Yohei. A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 1 Març 2018. Vol. 1, n° 1, pp. 1–11. DOI 10.1016/J.IJLMM.2018.02.002.

44. Définition du clinchage pour l'assemblage d'ensemble en tôle | Metal Interface. [en línia]. [Consultat el 14 Gener 2022]. Disponible à l'adresse: <https://www.metal-interface.com/definition-du-clinchage-pour-lassemblage-densemble-en-tole>
45. BABALO, Vahid, FAZLI, Ali and SOLTANPOUR, Mahdi. Experimental study of the mechanical performance of the new high-speed mechanical clinching. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 1 Juny 2021. Vol. 4, n° 2, pp. 218–236. DOI 10.1016/j.ijlmm.2020.11.004.
46. BABALO, Vahid, FAZLI, Ali and SOLTANPOUR, Mahdi. Electro-Hydraulic Clinching: A novel high speed joining process. *Journal of Manufacturing Processes*. 1 Octubre 2018. Vol. 35, pp. 559–569. DOI 10.1016/j.jmapro.2018.09.006.
47. BABALO, Vahid, MAHDI, Soltanpour, FAZLI, Ali and JELOKHANI NIARAKI, Rasoul. System of electro hydro clinching. US 10,625,328 B2. 21 Abril 2020. United States.
48. CHEN, Chao, ZHAO, Shengdun, HAN, Xiaolan, ZHAO, Xuzhe and ISHIDA, Tohru. Experimental Investigation on the Joining of Aluminum Alloy Sheets Using Improved Clinching Process. *Materials 2017, Vol. 10, Page 887*. 1 Agost 2017. Vol. 10, n° 8, pp. 887. DOI 10.3390/MA10080887.
49. LEE, Chan Joo, SHEN, Guo, KIM, Byung Min, LAMBIASE, Francesco and KO, Dae Cheol. Analysis of Failure-Mode Dependent Joint Strength in Hole Clinching from the Aspects of Geometrical Interlocking Parameters. *Metals 2018, Vol. 8, Page 1020*. 4 Desembre 2018. Vol. 8, n° 12, pp. 1020. DOI 10.3390/MET8121020.
50. "Collar Joining" Method Makes Plastic-Metal Hybrids | Plastics Technology. [en línia]. [Consultat el 18 Octubre 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.ptonline.com/articles/collar-joining-method-makes-plastic-metal-hybrids>
51. RUSSO, A. and ZUCCARELLO, B. Toward a design method for metal-composite co-cured joints based on the G-SIFs. *Composites Part B: Engineering*. Febrer 2013. Vol. 45, n° 1, pp. 631–643. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.08.024.
52. Création d'un assemblage solide et fiable avec le rivetage auto-poinçonneur - Atlas Copco France. [en línia]. [Consultat el 21 Octubre 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.atlascopco.com/fr-fr/itba/expert-hub/articles/self-pierce-rivet-reliable-joint>
53. Technique de rivetage auto-poinçonneur RIVSET® pour des assemblages parfaits | Böllhoff. [en línia]. [Consultat el 21 Octubre 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.boellhoff.com/fr-fr/produits-et-services/elements-d-assemblage-speciaux/rivet-auto-poinconneur-rivset.php>

54. Le soudage par résistance. Soudure par point, etc... - Rocd@cier. [en línia]. [Consultat el 21 Octubre 2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.rocdacier.com/soudage-resistance-soudure-point/>
55. SKILES, J. A. and WIGHTMAN, J. P. Heat-resistant thermoplastic/ chromic acid anodized Ti-6Al-4V single lap bond evaluation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1 Octubre 1988. Vol. 8, n° 4, pp. 201–206. DOI 10.1016/0143-7496(88)90080-2.
56. SKILES, J. A. and WIGHTMAN, J. P. The influence of ti-6al-4v chromic acid anodization conditions upon anodic oxide thickness and topography. *The Journal of Adhesion*. 1988. Vol. 26, n° 4, pp. 301–314. DOI 10.1080/00218468808071293.
57. YAKIMOV, A, NORTH, TH and SPELT, JK. Effect of wetting kinetics on poly-propylene aluminum bond strength. In : *Proceedings of the 24th International SAMPE Technical Conference*. 1992. pp. 388–392.
58. BOURBAN, PE, MCKNIGHT, SH, SHULLEY, SB, KARBHARI, VM and GILLESPIE JR., JW. Durability of steel/composite bonds for rehabilitation of structural components. In : *Proceedings of the Third Materials Engineering Conference Infrastructure*. 1994. pp. 295–302.
59. MCKNIGHT, SH, BOURBAN, PE, GILLESPIE JR., JW and KARBHARI, VM. Surface preparation of steel for adhesive bonding in rehabilitation applications. In : *Proceedings of the Third Materials Engineering Conference Infrastructure*. 1994. pp. 1148–1155.
60. XU, C, VERHOFF, J and RAMANI, K. Processing and durability comparison of a polyurethane thermoset and a hot-melt thermoplastic adhesive system bonded to galvanised steel. In : *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials*. 1999.
61. RAMANI, K and MORIARTY, B. Thermoplastic bonding to metals via injection molding for macro-composite manufacture. In : *Proceedings of the 55th Annual Technical Conference ANTEC '97*. 1997. pp. 1145–1148.
62. PROGAR, D. J. and CLAIR, T. L. St. Evaluation of a novel thermoplastic polyimide for bonding titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1 Gener 1986. Vol. 6, n° 1, pp. 25–30. DOI 10.1016/0143-7496(86)90068-0.
63. PROGAR, Donald J. *NASA Technical Memorandum 86428 ADHESIVE EVALUATION OF LARC-TPI AND A WATER-SOLUBLE VERSION OF LARC-TPI*. 1985.
64. KOHLI, DK. Development of polyimide adhesives for 3718C (7008F) structural performance for aerospace bonding applications. FM®680system. *Proceedings of the 37th International SAMPE Symposium and Exhibition*. 1992. Vol. 37, pp. 430–439.

65. MAIGHEW, RT and KOHLI, DK. Development of high temperature service polyimide based adhesives for titanium and composite bonding applications. In : *Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium and Exhibition*. 1996. pp. 1024–1034.
66. FALCONE, A, PATE, KD, CAO, TQ, HSU, GF and ROGALSKI, ME. Evaluation of a high-temperature adhesive for aerospace structural bonding. In : *Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium and Exhibition*. 1996. pp. 1035–1046.
67. DEVANANTHAN, D, SWARTS, D and KING, R. Ultrapek - a thermoplastic superadhesive. In : *Proceedings of the 39th International SAMPE Symposium*. 1994. pp. 193–195.
68. DEVANATHAN, D, KING, R, SWARTS, D, LIN, S, RAMANI, K and TAGLE, J. Thermoplastic polymeric adhesive for structural bonding applications for orthopedic devices. In : *Proceedings of the Ninth Technical Conference of the American Society for Composites*. 1994. pp. 29–35.
69. RAMANI, K, TAGLE, J, DEVANANTHAN, D, NAZRE, A and LIN, S. Thermoplastic bonding for structural applications: the role of processing. In : *Proceedings of the 10th International Conference on Composite Materials (ICCM10)*. 1995. pp. 309–316.
70. RAMANI, Karthik, TAGLE, John, DEVANATHAN, Deva, NAZRE, Ajit, SWARTS, Dale and LIN, Steve. *Thin-Film Thermoplastic-Metal Joining Process for Titanium to Poly(Etherketoneetherketoneketone)*. 1995.
71. RAMANI, Karthik and TAGLE, John. *Process-Induced Effects in Thin-Film Bonding of PEKEKK in Metal-Polymer Joints*. 1996.
72. TAGLE, J, RAMANI, K, WEIDNER, W and DEVANANTHAN, D. Poly(ether-ketoneetherketoneketone) (PEKEKK) as a thermoplastic adhesive in metal-to-metal joints for structural orthopedic applications. In : *Proceedings of the Fifth World Biomaterials Congress*. 1996. pp. 43.
73. RAMANI, K and INGRAM, C. Durability of the thermoplastic adhesive bonding to metals: Ti to PEKEKK. In : *Proceedings of the 11th Technical Conference of the American Society for Composites*. 1996. pp. 1069–1075.
74. INGRAM, C and RAMANI, K. *The effect of sodium hydroxide anodization on the durability of poly(etherketoneetherketoneketone) adhesive bonding of titanium*. 1997.
75. RAMANI, K and ZHAO, W. The development of residual stresses during thermoplastic adhesive bonding to metals. In : *Proceedings of the 55th Annual Technical Conference ANTEC'97*. 1997. pp. 1160–1164.

76. ZHAO, W and RAMANI, K. Residual stresses and thermoplastic adhesive environmental cracking. In : *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials (ICCM12)*. 1999.
77. WISE, RJ and WATSON, MN. A New approach for joining plastics and composites to metals. In : *Proceedings of the 50th Annual Technical Conference ANTEC'92*. 1992. pp. 2113–2116.
78. WISE, RJ and BATES, ADH. Ultrasonic welding of PES to aluminium alloy. In : *Proceedings of the 54th Annual Technical Conference ANTEC'96*. 1996. pp. 1203–1207.
79. TAYLOR, NS. Joining thermoplastic lined steel pipe. In : *Proceedings of the 52th Annual Technical Conference ANTEC'94*. 1994. pp. 1356–1359.
80. MCKNIGHT, SH, MCBRIDE, M and GILLESPIE JR., JW. Strength of aluminium and glass reinforced polypropylene sandwich single lap joints. In : *Proceedings of the Eighth Technical Conference of the American Society for Composites*. 1993. pp. 419–430.
81. MCKNIGHT, SH, HOMES, ST, GILLESPIE JR., JW, LAMBING, CLT and MARINELLI. Resistance heated fusion bonding of carbon fibre/PEEK composites and 7075-T6 aluminium. In : *Proceedings of the 51st Annual Technical Conference ANTEC'93*. 1993. pp. 1474–1479.
82. MARINELLI, J M and LAMBING, Cynthia L T. Advancements in welding technology for composite-to-metallic joints. *Journal of Advanced Materials*. 1994. Vol. 25, pp. 20–27.
83. BOURBAN, PE, KARAMUK, E, DON, RC and GILLESPIE JR., JW. Induction heating for rehabilitation of steel structures using composites. In : *ASCE Conference, New Material and Methods for Repair*. 1994. pp. 287–294.
84. RAMARATHNAM, G, NORTH, TH, LIBERTUCCI, M and WOODHAMS, RT. Ultrasonic bonding of high strength polypropylene. In : *Proceedings of the 48th Annual Technical Conference ANTEC'90*. 1990. pp. 1778–1782.
85. AGEORGES, C. and YE, L. Resistance welding of metal/thermoplastic composite joints. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. Novembre 2001. Vol. 14, n° 6, pp. 449–475. DOI 10.1106/PN74-QXKH-7XBE-XKF5.
86. DON, RC, MCKNIGHT, SH, WETZEL, D and GILLESPIE JR., JW. Application of thermoplastic resistance welding techniques to thermoset composites. In : *Proceedings of the 52nd Annual Technical Conference ANTEC'94*. 1994. pp. 1295–1297.
87. AGEORGES, C and YE, L. *Resistance welding of thermosetting composite/thermoplastic composite joints*. 2001.

88. LEE, Chan Joo, LEE, Jung Min, RYU, Ho Yeon, LEE, Kyung Hun, KIM, Byung Min and KO, Dae Cheol. Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials – Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Materials Processing Technology*. 1 Octubre 2014. Vol. 214, n° 10, pp. 2169–2178. DOI 10.1016/J.JMATPROTEC.2014.03.032.
89. LEE, ChanJoo, LEE, Seung Hun, LEE, Jung Min, KIM, Bong Hwan, KIM, Byung Min and KO, Dae Cheol. Design of hole-clinching process for joining CFRP and aluminum alloy sheet. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2014. Vol. 15, n° 6, pp. 1151–1157. DOI 10.1007/s12541-014-0450-6.
90. LEE, Seung Hun, LEE, Chan Joo, KIM, Bong Hwan, AHN, Min Su, KIM, Byung Min and KO, Dae Cheol. Effect of tool shape on hole clinching for CFRP with steel and aluminum alloy sheet. In : *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2014. pp. 476–483. ISBN 9783038351931. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.476.
91. LEE, ChanJoo, KIM, Byung Min, KANG, BeomSoo, SONG, Woo Jin and KO, Dae Cheol. Improvement of joinability in a hole clinching process with aluminum alloy and carbon fiber reinforced plastic using a spring die. *Composite Structures*. 1 Agost 2017. Vol. 173, pp. 58–69. DOI 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.04.010.
92. BABALO, Vahid, SOLTANPOUR, Mahdi and FAZLI, Ali. High speed circular hemming; a novel joining process for thin and low-ductile sheets. *Thin-Walled Structures*. 1 Setembre 2019. Vol. 142, pp. 98–115. DOI 10.1016/J.TWS.2019.04.059.
93. LEE, Seung Hun, LEE, Chan Joo, LEE, Kyung Hun, LEE, Jung Min, KIM, Byung Min and KO, Dae Cheol. Influence of tool shape on hole clinching for carbon fiber-reinforced plastic and SPRC440. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 2014. DOI 10.1155/2014/810864.
94. SALAMATI, M., SOLTANPOUR, M., ZAJKANI, A. and FAZLI, A. Improvement in joint strength and material joinability in clinched joints by electromagnetically assisted clinching. *Journal of Manufacturing Processes*. 1 Maig 2019. Vol. 41, pp. 252–266. DOI 10.1016/J.JMAPRO.2019.04.003.
95. LAMBIASE, Francesco and PAOLETTI, Alfonso. Friction-assisted clinching of Aluminum and CFRP sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 1 Gener 2018. Vol. 31, pp. 812–822. DOI 10.1016/j.jmapro.2018.01.014.
96. LAMBIASE, Francesco and KO, Dae Cheol. Two-steps clinching of aluminum and Carbon Fiber Reinforced Polymer sheets. *Composite Structures*. 15 Març 2017. Vol. 164, pp. 180–188. DOI 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.12.072.

Annex A

Taula A.1 : Termoplàstics intermediaris per substrats metàl·lics (adaptat d'Ageorges et al.)

Source	Substrate	Adhesive	LSS (MPa)	Remarks
Skiles et al. [55, 56]	Ti±6Al±4V	PPQ, glass filled PEI, PEI, PES, PS	25.5±32.8	Lica 44 titanate primer did not improve LSS. No ageing at 1708C but 50% LSS lost after 9 months at 2328C.
Yakimov et al. [57]	Aluminium	PP		Study of the wetting kinetics. Peel strength.
Bourban et al. [58]	Steel	PP, PEI, PAS, PPS, PES, PSU, PE, PEEK, Epoxy	15 (PSU)	Comparison between TP and TS adhesives for steel.
McKnight et al. [59]	Steel	PSU, PPS, Epoxy		Silane coupling agents.
Xu et al. [60]	Steel-GF/PP	Polyurethane TS, HDPE	8.4	Durability study.
Ramani et al. [61]	Steel	PC		In-situ joining using injection moulding. Tensile strength.
Progar et al. [62]	Ti±6Al±4V	LaRCe-TPI	36	LSS 19 MPa after 1000 h at 2048C. LSS lost after 72 h in boiling water.
Progar [63]	Ti±6Al±4V	Water soluble TPI	30.3	LSS 17.4 MPa at 2328C, LSS lost at 2788C.
Kohli et al. [64]	Ti-6Al-4V	FM*680 polyimide	17.7	LSS 9.5 MPa at 3718C.
Maighew et al. [65]	Ti±6Al±4V	LaRCe PETI-5 (FM*x5)	48.3	LSS 31 MPa after 8000 h at 1778C.
Falcone et al. [66]	Ti±6Al±4V	LaRCe PETI-5	40±50	32±37 MPa at 1778C,
	Ti±2.5Al±3V honeycomb			24.9 MPa after 5000 h at 1778C, LSS lost after 2 weeks at 708C and 98% RH
Devanathan et al. [67, 68], Ramani et al. [69, 70]	Ti±6Al±4V	Ultrapek [®] (BASF, PEKEKK)		Good chemical resistance. 120 MPa tensile strength
Ramani et al. [71]	Ti±6Al±4V	Ultrapek [®] (BASF, PEKEKK)		110±120 MPa tensile strength.
Tagle et al. [72]	CoCr Alloy			
Ramani et al. [73]	Ti±6Al±4V	Ultrapek [®] (BASF, PEKEKK)		Durability study. Optimisation of SHA
Ingram et al. [74]				

Ramani et al. [75]	Steel	PEI, PEEK	Analysis of thermal residual stresses
Zhao et al. [76]	Glass	PC	Analysis of thermal residual stresses

Taula A.2 : Tècniques d'unió per fusió amb substrats no-compòsits (adaptat d'Ageorges et al.)

Source	Substrate	Process	LSS (MPa)	Remarks
METAL SUBSTRATES				
Wise et al. [77]	L113 Aluminium/APC-2	Resistance welding	30	Heating element made from a single prepreg layer 1 PEI or PES films. Power provided through pulses.
Wise et al. [78]	HE-15 Aluminium alloy/ 30% glass powder filled PES	Ultrasonic welding	1±6.7	Tensile strength of 15±19 MPa Welding time of 0.2±1 s.
Taylor [79]	Steel	Resistance welding		Innovative thermoplastic lined pipe-work system.
McKnight et al. [80]	6061-T6	Hot press welding	8.8	LSS of 1.37 MPa obtained with epoxy.
	Aluminium-GF/PP	Resistance welding	5	LSS resistance welding , LSS hot press because Bondline thickness 3 times larger.
McKnight et al. [81]	7075-T6	Resistance welding	0±20	Stainless steel mesh used as heating element.
Marinelli et al. [82]	Aluminium-APC-2			Large scatter in LSS. Metal mesh was the weak path.
Bourban et al. [83]	Steel	Induction heating		Rehabilitation of damaged structures using TPC patches welded or fixed with TS adhesives.
Ramarathnam et al. [84]	Aluminium-PP	Ultrasonic welding	14	Tie layers were used to avoid energy directors.
		Induction welding	10.3	LSS of 7 MPa with cold curing toughened epoxy.
Ageorges et al. [85]	7075-T6 Aluminium-CF/PEI	Resistance welding	20	Optimisation of processing window based on experimental data and FEM simulations.
TS SUBSTRATES				
Don et al. [86]	PSU-CF/BMI	Resistance welding	18	TP coating co-cured to the TS laminate.

	PES-CF/epoxy		27.2	
Ageorges et al. [87]	CF/epoxy-CF/PEI	Resistance welding	20	Thermoplastic hybrid interlayer. Optimisation of processing window based on experimental data and FEM simulations.

Annex B

Taula B.1: Comparació d'eficiència d'unió de l'acoblament en relació al reblat tradicional (adaptada de Babalo et al.)

Ref.	sheet material	sheet thickness	Hole diameter	Upper sheet Ultimate strength (MPa)	F_t (N)	F_t (N)	η
EHC	AA3105	0.5	7	180	954	385	40.3 %
			7.5		1028	914	88.9 %
			8		1101	956	86.7 %
			8.5		1174	794	67.5 %
[88]	6061-T4	2	8.2	397	7732.7	3250	42%
[89]	6061	2.4	8.2	397	8680.6	3400	37%
[90]	SPRC440	1.6	8.2	580	9620.8	3500	36.4%
[91]	5083	1.4	8.2	397	5936.7	2600	43.7%

Table B.2 : Comparació dels mètodes EHC amb mètodes habituals (adaptada de Babalo et al.)

Ref	Clinching type	Upper material	Upper Sheet thickness (mm)	lower material	lower Sheet thickness (mm)	Hole diameter (mm)	Upper sheet strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	t_n mm	Shear strength (N)	efficiency
	HSMC High speed clinching	AA1050	1	AISI1070	0.5	8.5	90		0.91	1200	114%
[92]	Circular heming using	AISI1070	0.5	AISI1070	0.5	8	560		0.45	2200	67%
[46]	Electro hydraulic clinching	AA3105	0.5	AISI1070	0.5	8	180		0.42	956	87%
[93]	Hole clinching	SPRC440	1.6	CFRP	1.2	8.2	580		0.7	3500	38%
[88]	Hole clinching	Al6061-T4	2	22MnB5	1.6	8.2	538		0.51	3000	29%
[94]	Clinching assisted electromagnetic forming	AA3003-H14	1.6	CFRP	1.2	8	160		0.87	2130	73%
[95]	Friction assisted clinching	AA6061	2	CFRP	2	7	125		e	1150	58%
[91]	Hole clinching using spring die	AA5083	1.4	CFRP	1.4	8.2	318		0.82	2500	0.52%
[96]	Two step clinching	AA6024	3	CFRP	1.4	8.2	380		1.4	2500	26%



Annex C

Fitxa d'especificacions del projecte a l'EEIGM

Contexte, description et objectifs du projet :

Les évolutions des procédés industriels et des besoins conduisent à l'introduction de plus en plus large de nouveaux matériaux en compléments des matériaux habituels. A titre d'exemple, l'industrie automobile qui jusqu'à la fin du XX^e siècle réalisait les structures automobiles en aciers faiblement alliés « doux » (R_m jusqu'à 400-500MPa) intégralement soudés par résistance par point, introduit depuis les 20-30 dernières années de nouveaux aciers à très haute résistance (R_m jusqu'à 1800MPa), des alliages d'aluminium (aluminiums moulés, séries 5xxx, ...) et des matériaux composites (thermodurcissables ou thermoplastiques, à renforts synthétiques ou naturels). L'introduction de ces nouveaux matériaux nécessite le développement de nouveaux procédés d'assemblage (fluovissage, rivetage autopoinçonneur, clinchage, clouage, collage, ...).

L'IRT M2P possède aujourd'hui une bonne vision des matériaux et procédés utilisés dans le secteur automobile, ainsi que leurs limites, et il apparait nettement que les matériaux composites (seuls ou avec l'acier) constituent aujourd'hui une limite d'application pour les procédés usuels (problèmes de délaminage des fibres, tenues mécaniques associées, ...).

Afin d'initier de nouveaux projets répondant au mieux aux besoins des partenaires industriels, un état de l'art est nécessaire pour :

- Identifier les secteurs d'activités, hors automobile, utilisateurs de ces nouveaux matériaux avec des besoins d'assemblage
- Identifier des technologies (procédés, composants), hors collage, en cours de développement voir de déploiement permettant l'assemblage de ces matériaux

L'état de l'art devra permettre de donner des réponses à plusieurs questions :

- Quels sont les secteurs d'activité concernés ? (**hors automobile**)
- Quels sont les procédés identifiés, et les éventuels composants d'assemblage associés ? (**hors collage**)
- Quelles sont les performances relatives des procédés identifiés ? (temps de cycle, tenue mécanique)
- Quelles sont les gammes de matériaux concernés ? (type, nuances, épaisseurs)

L'évaluation technico-économique et environnementale de ces technologies, au moins qualitative, voire comparative, serait un plus.