

METODO DI PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI FIXTURE PER L'ASSEMBLAGGIO DI TELAI AUTOMOBILISTICI MEDIANTE ANALISI DI SENSIBILITÀ

A. O. Andrisano, M. Ansaloni, G. Berselli, E. Bonazzi, F. Gherardini, F. Leali, M. Pellicciari, F. Pini, C. Renzi, A. Vergnano

Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

E-mail: enrico.bonazzi@unimore.it

Abstract. *I sistemi di fixture influenzano enormemente i processi di assemblaggio in molti campi della meccanica, in quanto influiscono direttamente sul calcolo della catena di tolleranza. La memoria illustra un metodo di progettazione che permette di comparare e valutare differenti sistemi di fissaggio, considerando sia la posizione che il tipo di locatori. Poiché i sistemi di fixture possono essere considerati dei sistemi multi-prestazionali, il confronto viene eseguito attraverso l'impiego di opportuni indici di sensibilità. Il metodo è stato applicato ad un caso di studio in ambito automotive relativo alla saldatura in continuo di estrusi in alluminio, con l'obiettivo di garantire misure di gap con la minore variabilità possibile.*

Keywords: *sistema di fixture, analisi di sensibilità, assemblaggio telai automotive*

1. INTRODUZIONE

Nell'industria automobilistica, la qualità finale del processo di assemblaggio riveste un ruolo fondamentale, in particolar modo nella produzione di telai auto di alta gamma, dove l'elevata precisione di produzione/assemblaggio è necessaria per garantire rigidità, performance e sicurezza. La buona riuscita del processo di assemblaggio dipende fortemente dall'accuratezza e dalla robustezza del sistema di fixture (SF), essendo quest'ultimo responsabile della posizione relativa dei vari sotto-assiemi del telaio durante l'esecuzione del processo, e.g. saldatura. Ogni piccolo disallineamento tra i vari elementi può portare allo scarto dell'intero chassis.

Un SF è un dispositivo composto da locatori, morsetti e supporti la cui progettazione assume un'importanza fondamentale in campo ingegneristico. Ad esso è associato il 10-20% del costo totale del sistema di produzione [1] e spesso costituisce un importante collo di bottiglia nella realizzazione di prodotti/processi complessi.

Il processo di progettazione dei SF può essere suddiviso in quattro fasi: setup planning, fixture planning, unit design e verification [2-4]. Durante il setup planning la parte e le informazioni tecnologiche vengono analizzate al fine di determinare il numero di setup richiesti per realizzare tutte le operazioni del processo produttivo, e per definire gli opportuni datum per ogni setup. La fase di fixture planning definisce lo schema dei locatori basandosi sui requisiti di fissaggio. Tale schema identifica sia le superfici della parte che deve essere bloccata dal SF, sia la posizione corrispondente dei punti di localizzazione e di fissaggio. Il numero e la posizione di suddetti punti deve essere tale da garantire che tutti i

gradi di libertà della parte siano adeguatamente vincolati. Nella terza fase, gli elementi più adatti per la localizzazione e il fissaggio precedentemente individuati, vengono progettati e prodotti. Nell'ultima fase, infine, il SF viene testato, allo scopo di garantire il soddisfacimento di tutti i requisiti che ne hanno guidato il processo di progettazione [5-9]. Nell'attuale ambiente industriale però, viene utilizzato un metodo prevalentemente basato sull'esperienza dei progettisti, attraverso un approccio di tipo trial and error.

Numerose tecniche e strumenti Computer Aided Fixture Design (CAFD) sono state proposte negli ultimi anni per la progettazione dei SF, in particolar modo per quanto riguarda il campo delle lavorazioni meccaniche, mentre un interesse minore è stato rivolto ai problemi legati all'assemblaggio.

Tuttavia molte problematiche sono ancora oggi aperte. In particolare, sembra mancare un reale metodo di confronto dei SF che tenga conto non solo della disposizione, ma anche del tipo di locatore impiegato (dato che rappresenta un fattore evidente di influenza sulle performance finali del SF).

Nel presente articolo si propone una metodologia CAE volta a integrare questo aspetto nel processo di progettazione. Per comparare e valutare i diversi SF, è stata impiegata un'analisi di sensibilità, in grado di considerare contemporaneamente la posizione e la tipologia dei locatori. In particolare è stato affrontato il problema della determinazione del set di locatori da impiegare, al fine di garantire determinati requisiti funzionali di un assieme. La sezione 2 illustra brevemente lo stato dell'arte attuale riguardante i sistemi CAFD; la sezione 3 descrive la metodologia proposta; la sezione 4 illustra un caso di studio e i risultati dell'analisi di sensibilità; infine le conclusioni sono presentate nella sezione 5.

2. STATO DELL'ARTE

L'attuale ricerca scientifica sui CAFD si focalizza principalmente sullo sviluppo di due tematiche: come rappresentare e raccogliere le conoscenze legate alla progettazione dei SF attraverso un ambiente Computer Aided, e come implementare tale procedura ingegneristica nella realtà industriale.

Wang et al. [1] descrivono vari ambiti di ricerca che sono promettenti in ambito CAFD: *knowledge modeling*, *data mining*, apprendimento automatico (*machine learning*). Inoltre evidenziano l'importanza assoluta che la progettazione del SF riveste all'interno del percorso di sviluppo di prodotto/processo e suggeriscono di considerarla come un'attività obbligatoria per gli ingegneri. Boyle et al. [2] presentano una ricerca bibliografica comprensiva di oltre settantacinque strumenti CAFD, soffermandosi in particolare sulle proposte riguardanti la fase di progettazione dei SF e sulle tecnologie su cui questi ultimi si basano. Gli autori arrivano alla conclusione che deve essere prestata maggiore attenzione all'integrazione con cui gli approcci CAFD esplicano le quattro fasi del processo di progettazione, dal momento che, ad oggi, essi risultano essere molto segmentati. Il loro raggruppamento in un unico quadro, permetterebbe di migliorare la comprensione globale di tutti i requisiti di base dei SF, fondamentale per guidare in maniera efficace il processo di progettazione. Wang et al. [3] propongono un metodo denominato *Case-Based Reasoning*, volto allo studio e alla sistematizzazione dei risultati più importanti ottenuti nell'ambito della progettazione dei SF degli ultimi anni. Tale metodo identifica una procedura per ricavare rapidamente un SF concettuale.

Hunter et al. [4] sviluppano ulteriormente alcuni modelli per la raccolta e la modellazione delle conoscenze riguardanti la progettazione di SF, estendendoli a molti campi applicativi. In particolare presentano un *knowledge template* basato sulla distinzione tra task di analisi e di sintesi. Il *knowledge template* rappresenta uno schema con cui

definire le entità più utilizzate nella progettazione di SF per lavorazioni meccaniche. Secondo gli autori, tale approccio può essere facilmente riutilizzato in un processo automatico [5] per la progettazione di SF, per l'ispezione, il montaggio o la saldatura.

L'implementazione di una procedura ingegneristica per la progettazione dei SF utilizzabile in ambito industriale, parte dalla ricerca delle possibili soluzioni concettuali del SF. La problematica riguardante la disposizione dei componenti del SF viene affrontata da numerosi autori. In particolare, Roy et al. [6] propongono un algoritmo euristico per la selezione automatica della posizione dei locatori e dei morsetti per una data geometria della parte. Gli stessi presentano inoltre la sua integrazione in una struttura *knowledge-based*. Ngoi et al. [7] propongono alcuni principi di progettazione e suddividono i SF in tre differenti tipologie di unità, in base alla loro funzione: localizzazione, fissaggio, supporto. Qui et al. [8] presentano un metodo di progettazione dello schema del SF attraverso il calcolo dell'influenza data dagli elementi del SF e dalla parte stessa sulla precisione finale.

Yu et al. [9] descrivono un approccio per determinare velocemente e automaticamente i principali punti di bloccaggio a partire dalla geometria del pezzo. La procedura consiste nell'estrazione dei contorni del pezzo, nella loro semplificazione, nella determinazione di possibili piani di serraggio sulla parte e nella selezione dei piani ottimali.

Numerosi altri autori presentano opere circa l'ottimizzazione dei SF. Wu et al. [10] propongono un'analisi geometrica per la progettazione del SF considerando differenti posizioni dei locatori. Pelinescu et al. [11] utilizzano molteplici criteri di qualità, al fine di definire la miglior soluzione: la scelta finale dipende da un compromesso tra i vari requisiti di prestazione. Kaya [12] impiega algoritmi genetici al fine di definire il FS ottimale (considerato come insieme di locatori, morsetti e supporti), che minimizzi gli errori di deformazione elastica del componente da lavorare. Liu et al. [13] propongono un metodo di ottimizzazione del SF per la fresatura periferica di un pezzo caratterizzato da bassa rigidità.

Dall'analisi dello stato dell'arte è stato possibile distinguere due proprietà fondamentali del SF: il layout e la configurazione. Il layout rappresenta la posizione spaziale dei locatori. La configurazione, invece, è costituita dalla tipologia dei locatori utilizzati (puntalini, perni, etc.). Tali proprietà discendono dal principio di localizzazione che si intende utilizzare per posizionare il componente nello spazio e dai requisiti progettuali.

Durante la seconda fase del processo di progettazione (*fixture planning*), la configurazione del SF è solitamente assunta come dato e nessuna analisi viene fatta per investigare i suoi effetti sulle misurazioni finali.

Il problema dell'analisi dei differenti tipi di locatori è marginalmente affrontata in letteratura e non viene sufficientemente sviluppata dagli odierni strumenti CAFD. Pertanto, al fine di realizzare un processo di progettazione completo del SF, è necessario affrontare questo problema.

3. METODO

Dopo la fase di *setup planning*, sono praticabili due possibili scenari di progettazione: nel primo i requisiti geometrici e tecnologici determinano sia il layout che la configurazione, imponendo corrispondenti scelte progettuali. Quando però i requisiti non definiscono completamente la tipologia e la disposizione dei locatori, è possibile adottare differenti soluzioni. In questo caso il progettista solitamente si basa sul proprio know-how per la loro determinazione. Tale scelta avviene a partire dal fatto che è necessario vincolare i sei gradi di libertà ed evitare possibili inflessioni nel caso di componenti deformabili.

Seguendo l'approccio CAFD, invece di basarsi sull'esperienza del progettista, diventa necessario disporre di una metodologia che permetta di scegliere tra differenti configurazioni e layout. Tale scelta deve essere effettuata dopo aver individuato gli obiettivi, o i requisiti, dell'assieme finale. La formalizzazione degli obiettivi è possibile attraverso un approccio *model-based* del SF.

Per analizzare gli effetti di differenti configurazioni di SF, è necessario un modello che leghi la funzionalità dei differenti tipi di locatori e le tolleranze sugli stessi, con i requisiti funzionali dell'assieme. L'effetto finale delle tolleranze dei locatori dipende dalla tipologia degli stessi. Questo porta a configurazioni che consentono tolleranze più ampie.

Dopo tali considerazioni si propone la metodologia illustrata in Fig.1. Essa si compone di differenti fasi.

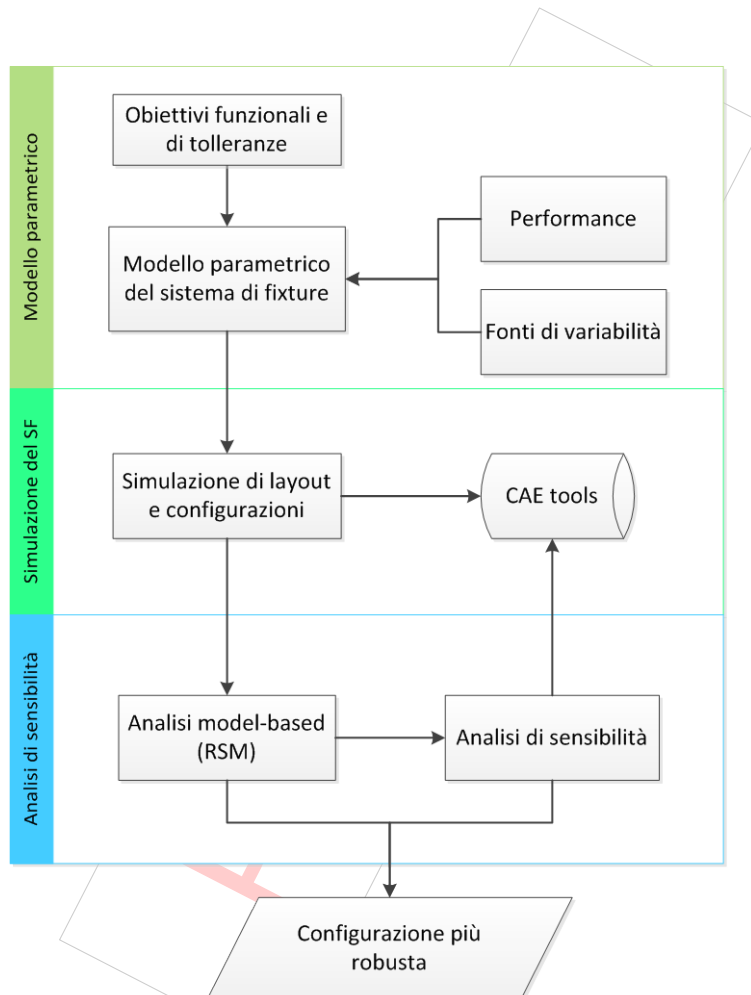


Figura 1. Diagramma di flusso relativo alla metodologia proposta

Il metodo di progettazione si basa su tre passi. Nel primo si ha la definizione del modello teorico parametrico a partire dagli obiettivi funzionali del FS (es. la posizione e l'orientamento di un dato gap tra due sottogruppi) e dal campo di tolleranza desiderata (es. obiettivo di tolleranza), in funzione del processo tecnologico o delle specifiche di qualità. Il secondo passo è la simulazione numerica delle catene di tolleranza, realizzata attraverso la variazione statistica di ogni tolleranza, per i diversi layout e configurazioni considerati. A tal proposito è stato utilizzato uno strumento "Computer Aided Tolerance" (CAT). L'ultimo passo consiste nell'eseguire l'analisi di sensibilità della configurazione del sistema per ogni dato layout, al fine di identificare il SF più adatto e robusto, e raggiungere gli obiettivi funzionali e di tolleranza.

Una criticità di questo approccio è l'individuazione di un metodo che permetta di confrontare le varie configurazioni del SF. Generalmente non è possibile comparare diverse tipologie di locatori principalmente per due motivi: sono interessati da differenti tipologie di tolleranze; hanno differenti funzioni (e.g. un foro riferisce differenti direzioni rispetto a un puntalino).

Criteri di performance di qualità

Nel presente lavoro vengono presentati una serie di indici di qualità, necessari per confrontare le diverse configurazioni del SF. Tali indici si basano sull'analisi della sensibilità del SF.

Un SF è caratterizzato dall'avere differenti obiettivi di progettazione [14]. Quindi è necessario valutare il sistema in relazione ai requisiti e alle performance complessivi. Tra i differenti contributi presenti in letteratura vari utilizzano l'analisi di sensibilità per valutare l'andamento delle prestazioni, in relazione alla variazione dei parametri che caratterizzano un sistema [15-16]. In particolare in [17] viene mostrato come estendere l'analisi di sensibilità a processi tecnologici o prodotti ingegneristici, utilizzando l'approccio *model-based* e considerando simultaneamente differenti requisiti sulle prestazioni. Seguendo questo approccio l'analisi di sensibilità viene utilizzata per misurare la robustezza di un SF.

Matematicamente il problema della sensibilità può essere formulato attraverso l'introduzione di un vettore n-dimensionale $\bar{q} = [q_1, \dots, q_n]^T$ di parametri e un vettore m-dimensionale $\bar{f} = [f_1, \dots, f_m]^T$ delle performance di sistema. Questi vettori sono legati dalla relazione $\bar{f} = \bar{f}(\bar{q})$. La variazione delle performance Δ , causata dalla deviazione dei parametri, può essere approssimata dalla relazione lineare :

$$\Delta = J \cdot dq \quad (1)$$

Nella precedente equazione J rappresenta la matrice Jacobiana del sistema, valutata per una particolare set di parametri, ed essa descrive la sensibilità del sistema. In letteratura ([15]) viene indicato il limite di validità di (1). Il dominio che contiene tutte le possibili variazioni dei parametri è lo spazio delle variazioni (Variation Space) [17]. La norma del vettore Δ permette di legare le variazioni di performance, secondo gli obiettivi di processo:

$$\|\Delta\|_2^2 = [J \cdot dq]^T \cdot [J \cdot dq] = \sum_{i=1}^m \Delta_i^2 \quad (2)$$

Nell'equazione (2) il valore del quadrato della norma è uguale alla somma dei quadrati delle singole performance di tolleranza. Posto che la matrice caratteristica di progettazione (Characteristic Design Matrix) sia $A = J^T \cdot J$, l'equazione (2) diventa:

$$\|\Delta\|_2^2 = [dq]^T \cdot A \cdot [dq] \quad (2.1)$$

Le equazioni (2) e (2.1) indicano che la matrice caratteristica di progettazione è definita semi-positiva e ha n autovettori ortonormali e n autovalori non negativi. Il numero di autovalori positivi è pari al suo rango.

Gli autovettori di A definiscono forma, dimensione e orientazione di un iper-ellissoide, all'interno di una famiglia, a seconda del valore scalare $\|\Delta\|_2$ e i punti della superficie dell'iper-ellissoide sono rappresentati dal medesimo valore $\|\Delta\|_2$.

Dal momento che la lunghezza dei semiassi è inversamente proporzionale all'autovalore, le performance risultano meno sensibili lungo la direzione dell'autovalore maggiore e più sensibili nella direzione di quello minore. Quando alcuni autovalori assumono un valore nullo, l'iper-ellissoide degenera in un cilindroide.

In [17] si introduce il *Feasible Space*, definito come la porzione dello spazio di variazione dove le performance totali del sistema sono accettabili. Quando il Feasible Space è descritto topologicamente da un cilindroide, esso diventa illimitato e non può essere eseguita l'analisi di sensibilità per una data direzione. Pertanto il cilindroide deve essere ricondotto ad un iper-ellissoide, a condizione che le direzioni degli assi principali rimangano le stesse [15].

Un criterio topologico per eseguire l'analisi di sensibilità può essere ora definito. La robustezza del sistema è massima quando la sua sensibilità è minimizzata. In tale condizione, la dimensione del Feasible Space risulta massima e la Tolerance Box ricopre la maggior parte possibile del Feasible Space, senza superare i limiti dell'ellisse. I valori assunti al di fuori dell'ellisse provocano la degradazione delle prestazioni finali e devono, pertanto, essere scartati.

Alcuni indici di sensibilità possono essere introdotti per valutare le dimensioni e l'orientazione del Feasible Space. I migliori candidati alla progettazione sono descritti dai seguenti indici, presentati in ordine di importanza [17]:

- Minimo valore per il massimo autovalore della matrice caratteristica di progettazione (λ_N);
- Massimo Feasible Space (V_F);
- Rapporto minimo tra Feasible Space e l'iper-volume della Tolerance Box n -dimensionale (β_U).

4. CASO DI STUDIO

In molti ambiti industriali, e.g. automotive ed aerospace, la minimizzazione del peso delle strutture è una necessità che deve essere affiancata da elevati livelli di efficienza produttiva e di performance del prodotto [18]. Ne è un esempio il caso di telai automobilistici, che hanno elevata influenza sulla diminuzione del peso totale del veicolo e sulle sue prestazioni. Tale riduzione può essere ottenuta attraverso la sostituzione dei componenti ottenuti tramite tecnologie di produzione massive, e.g. fusione, con componenti estrusi, che permettono di raggiungere gli obiettivi prefissati [19].

L'adozione di nuovi componenti comporta la riprogettazione del processo tecnologico utilizzato per la realizzazione del telaio attraverso: lo sviluppo di nuovi metodi produttivi, l'adozione di tecnologie innovative e l'utilizzo di un approccio integrato [20].

L'assieme assunto come caso di studio è composto da una serie di componenti estrusi che devono essere sottoposti a un successivo processo di saldatura in continuo. Tale tecnologia impone dei vincoli sulle distanze relative tra le superfici funzionali che dovranno essere unite, Fig. 2. Le parti sono caratterizzate da opportune tolleranze. Queste sono il risultato dei processi tecnologici e delle successive operazioni, necessari per l'ottenimento dei componenti. Le tolleranze geometriche e dimensionali sono presentate in [21]. Il problema consiste nell'assicurare la distanza ottimale tra le parti, necessaria per la saldatura. Per garantire ciò è essenziale progettare un appropriato SF che permetta di posizionare le parti in maniera corretta, tenendo conto delle tolleranze di progetto.

Il layout è stato assunto come imposto, per ciascuna delle configurazioni, da vincoli sulla geometria delle parti. Quindi la problematica da affrontare è la determinazione del tipo di locatori da impiegare, investigando gli effetti delle tolleranze sui gap.

Nel caso di studio proposto ci si è concentrati su due specifici obiettivi del sistema il cui comportamento influenzano il risultato finale, Fig. 3. Il metodo proposto permette la valutazione delle performance del sistema considerandole contemporaneamente. Al fine di riprodurre le variazioni geometriche è stato impiegato uno strumento Computer Aided Tolerance (CAT), in grado di simulare e analizzare la catena di tolleranze. Il software scelto è 3DCS® della Dimensional Control System Inc.

Nel caso specifico, è stata presa in considerazione la variazione di posizione di un'unica parte (parte N°2), mentre le altre sono state mantenute in posizione nominale. Per tale componente è stato possibile definire tre configurazioni del SF.

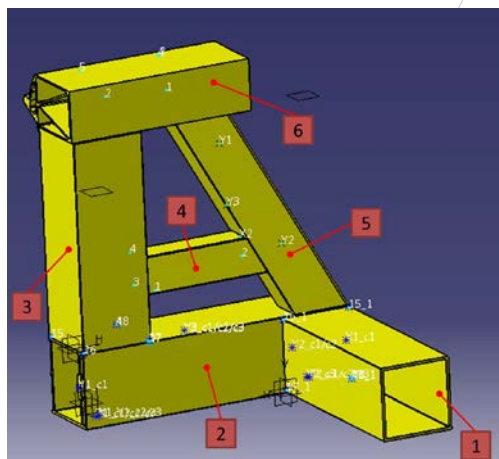


Figura 2. Sottotelaio assemblato

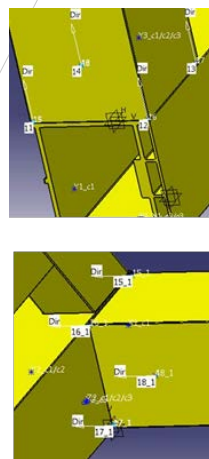


Figura 3. Definizione dei Gap1 e Gap 2

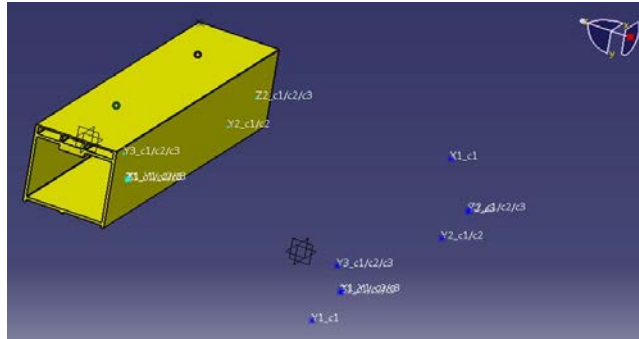


Fig. 4. Simulazione per punti del sistema di fixture

Simulazione di differenti configurazioni

La metodologia di localizzazione utilizzata, considerando il componente perfettamente rigido, è stato il metodo 3-2-1. Il primo problema affrontato è stato la determinazione della direzione principale per la localizzazione della parte. Pertanto si è assunta come direzione principale la Y, la direzione Z come secondaria e infine la direzione X come terziaria. Il software consente di simulare il sistema di fissaggio, senza la necessità del modello CAD, attraverso la rappresentazione dei locatori mediante punti, Fig.4.

Con queste ipotesi le tre possibili configurazioni sono:

- C1: 6 pad, uno per ogni grado di libertà;
- C2: 4 pad e 1 pin che sopprime due gradi di libertà (sul piano X-Y);
- C3: 3 pad, 1 pin che sopprime due gradi di libertà (sul piano X-Y) e 1 pin che vincola il rimanente grado di libertà (Y).

Ai punti che simulano i pad è stata attribuita una tolleranza di posizione lungo la relativa direzione di riferimento, al fine di simulare la variazione dimensionale dei locatori. Per i punti che rappresentano i pin è stata utilizzata una tolleranza tale da far variare la loro posizione in un intorno circolare del valore nominale sul piano X-Y. Ciò equivale a simulare la variazione della condizione di accoppiamento perno/foro.

Nell'analisi effettuata sono state impostate due misure tra la parte di riferimento e le altre: una lungo la direzione Z, l'altra lungo la direzione Y. Le due misurazioni tra le parti sono state effettuate attraverso quattro rilevamenti punto-a-punto per ognuna (Fig. 3). Questo perché le variazioni geometriche delle superfici portano a spostamenti che non sono riconducibili a semplici offset delle stesse. Pertanto la distanza minima viene calcolata tenendo conto del minore dei quattro, al fine di monitorare la presenza di interferenza tra le parti.

Attraverso una serie di simulazioni è stato possibile ottenere le superfici di risposta dei gap in funzione delle tolleranze dei locatori e della parte.

$$f_i(\bar{q}) = \alpha_i + \bar{\beta}_i^T \bar{q} + \bar{q}^T Q_i \bar{q} \quad (3)$$

I coefficienti delle diverse superfici sono presentate in Tab. 1.

Tabella 1. Coefficienti delle curve di risposta per ogni gap e configurazione.

Coeff.	<i>G1</i>			<i>G2</i>		
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
α	1.012111	1.063422	1.067034	1.016076	1.107286	1.092760
β_1	-0.003355	-0.319909	-0.447733	-0.002213	-0.284497	-0.174928
β_2	-0.096880	-0.009028	-0.316297	-0.064478	-0.287083	-0.298923
β_3	-0.002567	-0.147043	-0.006208	-0.322104	-0.105526	-0.345294
Q_{11}	0.001626	-0.649195	-0.203982	0.001168	-0.538888	-0.229279
Q_{12}	0.001996	0.005180	0.181026	0.001301	0.004202	0.202515
Q_{22}	-0.926778	-0.000979	-0.331034	-0.721200	-0.001376	-0.377633
Q_{13}	0.000141	0.183990	0.003281	-0.000087	0.140971	0.003702
Q_{23}	0.002931	0.011046	0.006038	0.002074	0.008860	0.006773
Q_{33}	0.000238	-0.189944	0.000172	-0.000190	-0.133593	-0.000341

5. RISULTATI

Dopo aver eseguito le simulazioni, attraverso lo strumento CAT è stato possibile indagare quali siano le tolleranze principali che influenzano i gap per ogni configurazione. In questo modo si è quantificata l'importanza relativa di ogni tolleranza all'interno di una determinata configurazione.

I risultati mostrano che, per la configurazione C1, la tolleranza che ha peso maggiore agisce lungo la direzione Y per entrambi i gap, inoltre la tolleranza sui pad in direzione Z ha un'elevata influenza sul gap 2. Per la configurazione C2, non sono presenti tolleranze con un effetto trascurabile per entrambi i gap, ma, in questo caso, il fattore principale è la tolleranza sui pad in direzione Y. Nella configurazione C3 la tolleranza su entrambi i pin non è il contributore principale, ma assume maggiore importanza la tolleranza sui pad in direzione Y.

Dopo aver generato le superfici di risposta, è stata eseguita l'analisi di sensibilità considerando simultaneamente entrambi gli obiettivi di progetto.

Il risultato di tale analisi permette di scegliere la configurazione che offre le prestazioni globali migliori.

Dalla tabella 2 si evince che la configurazione C3 è quella che è in possesso di una migliore combinazione degli indici rispetto ai criteri di valutazione descritti alla fine del paragrafo 3.

Tabella 2. Indici di sensibilità per ogni configurazione.

	β_u	V_f	$\hat{\lambda}_{N\ max}$
C1	0.4058	2.21E-04	1.7087
C2	0.2387	2.82E-04	1.4466
C3	0.1546	2.35E-04	1.0701

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato investigato il problema della selezione della configurazione di un sistema di fixture, ed in particolare la tipologia dei locatori. In letteratura l'approccio alla progettazione del sistema di fixture è principalmente finalizzato alla definizione e all'ottimizzazione del layout. Tale approccio non considera gli effetti derivanti dall'uso di differenti tipi di locatori. Una delle maggiori problematiche è rappresentata dalla difficoltà di comparare le differenti configurazioni, ovvero le diverse funzioni dei locatori. Dato che un sistema di fixture può essere considerato un sistema multi-prestazionale, il confronto fra diverse configurazioni è stato eseguito introducendo opportuni indici di sensibilità. Quindi sono stati definiti alcuni criteri di qualità di prestazione, al fine di valutare le performance totali di un sistema di fissaggio. Utilizzando uno strumento CAT è stato possibile utilizzare un approccio model-based per eseguire l'analisi di sensibilità.

I risultati di tale analisi permettono di valutare quali tolleranze sui locatori influenzino in misura maggiore gli obiettivi di progettazione. La metodologia proposta può essere applicata e inclusa all'interno della fase di progettazione del sistema di fissaggio.

Infine è stato analizzato, come caso di studio, un assemblaggio di un sottogruppo di telaio automotive, composto da differenti parti estruse, assemblabili mediante saldatura. Dall'analisi delle configurazioni possibili si evince che gli effetti delle tolleranze dei locatori sugli obiettivi di progetto sono fortemente dipendenti dalle configurazioni stesse. Pertanto si sottolinea l'esigenza di eseguire tale tipologia di analisi antecedentemente alla progettazione del layout dei locatori.

REFERENCES

- [1] Wang, H., Rong, Y., Li, H., Shaun, P., 2010. "Computer aided fixture design: Recent research and trends". *Computer-Aided Design*, **42**(12), December, pp.1085–1094.
- [2] Boyle, I., Rong, Y., Brown, D.C., 2011. "A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **27**(1), February, pp. 1–12.
- [3] Wang, H., Rong, Y., 2008. "Case based reasoning method for computer aided welding fixture design". *Computer-Aided Design*, **40**(12), December, pp. 1121-1132.
- [4] Hunter, R., Vizan, A., Perez, J., Rios, J., 2005. "Knowledge model as an integral way to reuse the knowledge for fixture design process". *Journal of Materials Processing Technology*, **164–165**, May, pp.1510–1518.
- [5] Hunter, R., Rios, J., Perez, J.M., Vizan, A., 2006. "A functional approach for the formalization of the fixture design process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46**(6), May, pp. 683–697.

- [6] Roy, U., Sun, P.L., 1994. "Selection of preliminary locating and clamping positions on a workpiece for an automatic fixture design system". *Computer Integrated Manufacturing Systems*, **7**(3), August, pp. 161-172.
- [7] Ngoi, B., Tay, M., Wong, C. 1997. "Development of an Automated Fixture Set-up System for Inspection". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **13**(5), May, pp. 342-349.
- [8] Qin, G.H., Zhang, W.H., Wan, M. 2006. "A mathematical approach to analysis and optimal design of a fixture locating scheme". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **29** (3-4), June, pp. 349-359.
- [9] Yu, J., Wen, T., Hu, Q., 2010. "Research on Automatic Planning of Main Clamping Points in Rapid Fixture Design System". *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, FSKD 2010.
- [10] Wu, Y., Rong, Y., Ma, W., LeClair, S. 1998. "Automated modular Fixture planning: Geometric analysis". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **14**(1), February, pp. 1-15.
- [11] Pelinescu, D., Wang, M.Y. 2002. "Multi-objective optimal fixture layout design". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **18**(5), October, pp. 365-372.
- [12] Kaya, N. 2006. "Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms". *Computers in Industry*, **57**(2), July, pp. 112-120.
- [13] Liu, S.G., Zheng, L., Zhang, Z.H., Li, Z.Z., Liu, D.C. 2007. "Optimization of the number and positions of fixture locators in the peripheral milling of a low-rigidity workpiece". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **33**(7), July, pp. 668-676.
- [14] Hoffman, E.G. 2004. *Jig and Fixture Design*. Cengage Learning, Chap. 1, pp. 1.
- [15] Zhu, J.M., Ting, K.L. 2001. "Performance Distribution Analysis and Robust Design". *ASME Journal of Mechanical Design*, **123**(1), February, pp. 11-17.
- [16] Chen, W., Allen, J., Tsui, K.L. and Mistree, F. 1996. "A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors". *ASME Journal of Mechanical Design*, **118**(4), December, pp 478-485.
- [17] Andrisano, A.O., Ansaloni, M., Leali, F., Pellicciari, M., Vergnano, A. 2011. "A novel method for sensitivity analysis and characterization in integrated engineering design". *International Conference on Innovative Methods in Product Design - Proceedings*, IMProVe 2011.
- [18] Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Walz, C., Sepold, G. 2001. "Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry". *Journal of Materials Processing Technology*, **115**(1), August, pp. 2-8.
- [19] Cavazzuti, M., Baldini, A., Bertocchi, E., Costi, D., Torricelli, E., Moruzzi, P. 2011. "High performance automotive chassis design: a topology optimization based approach". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **44**(1), July, pp 45-56.
- [20] Andrisano, A.O., Leali, F., Pellicciari, M. 2005. "Integrated Design of a Robotic Cell for Lasts Roughing". *Proceedings of International Conference on Automation, Control and Instrumentation - IADAT - International Association for the Development of Advances in Technology Bilbao (ESP)*.
- [21] European Standard 755-9 :2008. Aluminium and aluminium alloys - Extruded Rod/Parts, tube and profile - part9: Profiles, tolerances on dimensions and form.

PRE-PRINT