AIAS 2015 - 479

OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE DI UN TELAIO MOTOCICLISTICO MEDIANTE ALGORITMO PATTERN SEARCH

L. Scappaticci[a], N. Bartolini[b], E. Guglielmino[c], G. Risitano[d]

[a] *Università degli Studi Guglielmo Marconi - Facoltà di Scienze e Tecnologie Applicate, Via Plinio, 44, Roma - e-mail: l.scappaticci@unimarconi.it*
[b] *Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. Duranti, 67, Perugia - e-mail: nicola.bartolini1@studenti.unipg.it*
[c] *Università degli Studi di Messina - Ingegneria Elettronica, Chimica e Ingegneria Industriale, Contrada Di Dio (S. Agata) 98166 - Messina, e-mail: eguglie@unime.it*
[d] *Università degli Studi di Messina - Ingegneria Elettronica, Chimica e Ingegneria Industriale, Contrada Di Dio (S. Agata) 98166 - Messina, e-mail: giacomo.risitano@unime.it*

Sommario

La modifica dei regolamenti tecnici delle competizioni motociclistiche di livello mondiale, ha introdotto la nuova categoria Moto 2; si tratta di veicoli prototipi che utilizzano pneumatici monomarca e motori derivati dalla produzione di serie, anch'essi forniti da un unico costruttore. Gli sforzi dei costruttori, in tal senso, si concentrano per lo più sulla progettazione della ciclistica e sull'aerodinamica del veicolo.

Il telaio è l'elemento di collegamento fra l'avantreno e il forcellone della moto, nonché sostegno per il propulsore. Stabilità e la maneggevolezza del motoveicolo sono prerogative strettamente dipendenti dalle caratteristiche geometriche di questo componente; non solo, sul telaio agiscono importanti sollecitazioni sia in fase di percorrenza delle curve che di frenata e accelerazione.

Le prestazioni di questo componente possono essere valutate in primo luogo in termini di peso e rigidezza: un telaio prestazionale nel mondo delle competizioni, è dunque una struttura dal minor peso possibile, nel rispetto di parametri di caratteristici di "efficacia" come la rigidezza flessionale e torsionale.

Scopo di questo lavoro è massimizzare le prestazioni di un telaio motociclistico di categoria Moto 2, mediante l'implementazione di un algoritmo di ottimizzazione basato su logica *pattern search*, che prevede la progettazione di una funzione obiettivo in grado di ottimizzarne il peso controllandone le rigidezze.

La base di partenza è un telaio dimensionato dal costruttore Bimota sulla base del proprio *know-how*; l'analisi delle caratteristiche di sollecitazione del modello di riferimento è stata condotta sia attraverso prove sperimentali che numeriche.

Abstract

The change of technical regulations of the motorcycle racing world class, introduced the new Moto 2 category; the vehicles are prototypes that use single-brand tires and engines derived from series production, also supplied by a single manufacturer. The efforts of the teams focus mostly on the design of the chassis and the aerodynamics of the vehicle.

The chassis supports the engine and is, at the same time the connecting element between the front end and the rear end of the motorcycle. Stability and handling of the vehicle prerogatives are strictly dependent on the geometrical properties of this component; not only, it is a structural element subjected to severe and changing loads during competitions.

The performance of a racing motorcycle frame can be primarily evaluated in terms of weight and stiffness: an high performing chassis, is therefore a structure showing a very low weight, but respecting some parameters of "effectiveness" dictated by the values of the flexural and torsional stiffnesses.
The aim of this work is to maximize the performance of a tubular frame designed for a motorcycle racing of Moto 2 category. The matter of fact is the implementation of an optimization algorithm that acts on the dimensions of the single pipes of the frame and that involves the design of an objective function so as to minimize the weight of the frame by controlling its stiffnesses.
The starting point is a frame dimensioned by the manufacturer Bimota on the basis of its know-how; the analysis of the stress characteristics of the reference model was conducted through both experimental and numerical tests.

Parole chiave: Ottimizzazione Strutturale, Pattern Search, Motociclo.

1. INTRODUZIONE

L'ottimizzazione strutturale è ormai un'attività che non può prescindere dall'applicazione di un algoritmo automatico di ricerca dell'ottimo; la necessità di costruire strutture che siano al contempo prestazionali e leggere, permette, infatti, di implementare procedure di ricerca della soluzione migliore modellando funzioni obiettivo anche complesse, ma che permettono di ridurre di diversi ordini di grandezza il numero di casi da analizzare. Non a caso molti software di analisi agli elementi finiti sono in fase di implementazione di pacchetti di ottimizzazione strutturale.
In ambito motociclistico la tematica è molto sentita, soprattutto quando si parla di telai in traliccio di acciaio, essendo questa una struttura piuttosto versatile; se poi il componente è pensato per equipaggiare un veicolo da competizione, allora la minimizzazione del peso diventa un discriminante, anche a scapito di una vita inferiore del componente.
Formalmente un problema di ottimizzazione strutturale, può essere così definito:

$$V(X) \rightarrow min, X = \{x_{1,} x_{2,} \dots , x_n\}^T \qquad (1)$$

con $a_i \leq x_i \leq b_i$, i= 1, …, n e con $g_j(X) \leq 0$, j= 1, …, m, dove $V(X)$ rappresenta la funzione obiettivo, X è il vettore delle variabili di progetto, a_i, b_i le limitazioni geometriche per le variabili di progetto, $g_j(X)$ rappresenta la limitazione funzionale, n è la quantità delle variabili di progetto ed m la quantità di vincoli funzionali [1].
Il processo di ottimizzazione diventa più complesso quando non si conoscono le derivate della funzione $V(X)$. La letteratura riguardante l'ottimizzazione senza derivate ha visto una crescita esponenziale sin dal momento in cui ne sono apparse le prime applicazioni ad opera di Spendley et al. [2] e Nelder et al. [3]. La vastissima diffusione di questi metodi è chiaramente dovuta alla versatilità di impiego; si va da applicazioni in campo biomedicale [4], fino all'ottimizzazione del prezzo del pedaggio autostradale in funzione del tipo di veicolo [5].
Una volta definita la funzione obiettivo è necessario definire il metodo di ricerca del minimo che definisce i parametri e le caratteristiche dell'oggetto ottimizzato. Gli algoritmi sviluppati in tal senso si dividono in "diretti" oppure "basati su modello"; questi ultimi usano una forma surrogata di $V(X)$ per gestire la "direzione" di ricerca dell'ottimo, mentre i primi computano direttamente $V(X)$. Esistono, inoltre, algoritmi di ricerca "locali" oppure "globali", che si differenziano in base alla possibilità di definire arbitrariamente il dominio di ricerca (algoritmi globali), e ancora algoritmi "stocastici" o "deterministici", a seconda che offrano la possibilità di effettuare step di ricerca random oppure no.
In [6] Airoldi et al., propongono un'ottimizzazione strutturale di un forcellone motociclistico in materiale composito, massimizzando la rigidezza e minimizzando il peso e servendosi di algoritmi genetici (globali, basati su modello). In [7], R. Cazacu et al. studiano un problema di ottimizzazione strutturale per mezzo di algoritmi genetici applicato alle travature reticolari; l'ottimizzazione strutturale di una travatura reticolare è oggetto di studio di L. Lamberti et al. in [8]; in questo caso il problema è affrontato con il metodo delle successive linearizzazioni (SLP). Il metodo SLP è classificabile come "globale" e consiste nel formulare e risolvere una serie di sotto-problemi

linearizzati del problema non-lineare generale; è considerata una tecnica semplice e generale, ma che presenta delle componenti euristiche che possono influenzarne la risposta numerica.
Il metodo *Pattern Search* appartiene alla categoria degli algoritmi di ricerca locale diretta, molto diffusi in quanto semplici, ma anche flessibili ed affidabili. Il metodo implementa algoritmi ben collaudati [9,10]: all'inizio di ogni nuova iterazione si effettua un sondaggio locale della funzione obiettivo attraverso un *pattern* di punti che definiscono una matrice di possibilità. La scelta della direzione successiva dipende dai valori che la funzione obiettivo assume all'interno della matrice generata allo step precedente.
Kourehli et al. in [11] hanno focalizzato l'attenzione sulla localizzazione di danni strutturali sfruttando dati modali incompleti derivanti da misure sperimentali. Il problema proposto è di interesse dal momento che il numero di sensori applicabili su una struttura è senz'altro ridotto se paragonato ai numero dei gradi di libertà della stessa modellata in numerico. Sulla base dei dati modali incompleti gli autori hanno utilizzato un algoritmo *Pattern Search* per individuare danni strutturali.
In [12], J.E. Rodríguez et al. affrontano un problema di ottimizzazione strutturale applicato su un telaio motociclistico servendosi di una funzione multi-obiettivo ottimizzata in due stadi; nella prima fase si sono minimizzati il peso e la tensione massima sulla struttura nella fase di frenata, nella seconda gli autori focalizzano l'attenzione sulla problematica della rigidezza torsionale. In [13], J.E. Rodríguez et al. propongono un'ottimizzazione strutturale dello stesso telaio motociclistico applicando algoritmi evolutivi. Si tratta di metodi stocastici globali nei quali è possibile implementare anche il controllo con reti neurali. Gli autori, in quest'ultimo lavoro, attraverso il confronto fra i risultati ottenuti in entrambe le attività, dimostrano come sia possibile, a scapito del costo computazionale, ottenere soluzioni più raffinate.
Scopo del presente lavoro è l'ottimizzazione strutturale di un telaio per motociclo da competizione (Figura 1) impiegato nel campionato mondiale di velocità (Classe Moto 2) tramite metodologia *Pattern Search*. In particolare il prototipo oggetto di analisi, un traliccio in cromo-molibdeno, è stato in prima istanza costruito dalla casa motociclistica Bimota in base alla propria esperienza e successivamente testato dai piloti, i quali ne hanno valutato, positivamente, le caratteristiche di guidabilità in pista. In seguito, il telaio è stato ottimizzato con l'ausilio di una funzione multi-obiettivo al fine di ottenere una riduzione del peso, mantenendo comunque le medesime caratteristiche di rigidezza torsionale e flessionale precedenti. Per far ciò, è stato necessario:

- Misurare le grandezze obiettivo della funzione di ottimizzazione attraverso prove sperimentali [14];
- Elaborare un modello agli elementi finiti poi successivamente validato;
- Realizzare un nuovo modello parametrico semplificato agli elementi finiti costituito da elementi tubolari (*PIPE*). Quest'ultimo modello parametrico ha permesso di implementare una funzione obiettivo dipendente dalle sole geometrie e posizioni dei singoli tubi e traversine del telaio.

Tutte le analisi FE sono state realizzate in ambiente Ansys®, mentre il processo di ottimizzazione è stato gestito con *optimtool* di Matlab® generando, per ogni iterazione, un stringa di comando per Ansys® contenente le nuove configurazioni spaziali e geometriche delle traversine in funzione della direzione di ricerca definita dal *Pattern Search*.

Figura 1: Un particolare della struttura oggetto di analisi.

2. MATERIALI E METODI

Il telaio oggetto di studio è, inizialmente, un traliccio in cromo-molibdeno costituito da 30 elementi tubolari che presentano uno spessore di 1.5 oppure 2 mm, a seconda della loro posizione; i tubi sono saldati a penetrazione completa e, nella zona anteriore, convergono al supporto per l'avantreno. Nella parte posteriore la struttura a traliccio è progettata per essere collegata al supporto per il retrotreno, mentre inferiormente il telaio è disegnato per essere collegato al motore, che funge da elemento portante della struttura (Figura 1).

2.1. Fase uno

La prima fase del lavoro ha previsto la caratterizzazione meccanica del componente così come è stato pensato dalla casa produttrice Bimota. Scopo della campagna di prove sperimentali era rilevare le rigidezze flessionale e torsionale del telaio.
In figura 2 sono schematizzati i test effettuati per rilevare le grandezze di interesse.

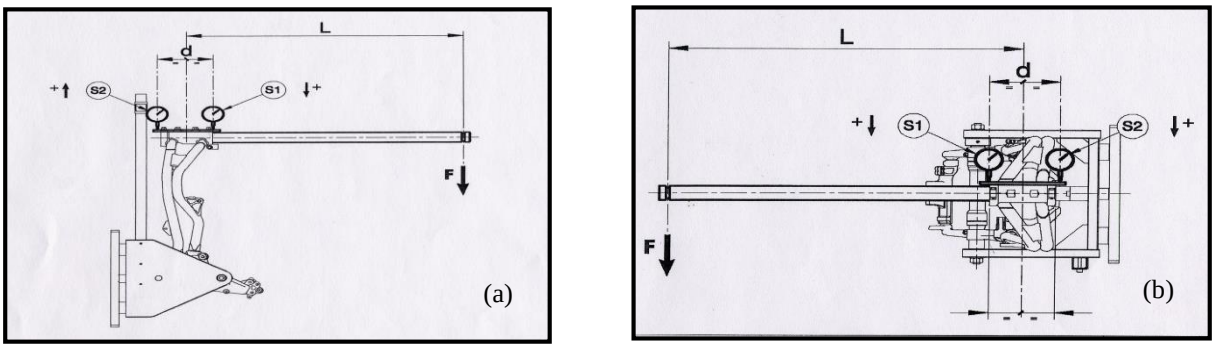

Figura 2: Setup per test di rigidezza flessionale (a) e torsionale (b).

In entrambe le condizioni, il telaio è vincolato ad un banco prova rigido attraverso gli attacchi motore. I carichi sono applicati con pesi calibrati che insistono sull'estremo libero di una trave montata nella sede del canotto di sterzo. Nel caso (a) si genera una sollecitazione di flessione e nel caso (b) di torsione. Gli indicatori s_1 ed s_2 mostrano il posizionamento e il verso positivo della misura dei comparatori centesimali utilizzati per valutare gli spostamenti indotti dai carichi nelle sezioni estremali del canotto di sterzo.
Dalla misura degli spostamenti, si sono valutate la rigidezza flessionale K_f e quella torsionale K_t tramite le relazioni:

$$K_f = \frac{F\,L}{arctg\left(\frac{s_1+s_2}{d}\right)} \qquad K_t = \frac{F\,L}{arctg\left(\frac{s_1-s_2}{d}\right)} \qquad (2)$$

dove s_1 ed s_2 rappresentano gli spostamenti rilevati dai comparatori, L la distanza di applicazione della forza F dal punto di distanza media tra i comparatori e d distanza tra i comparatori. In tabella 1 sono riportati i dati relativi alle condizioni geometriche e di carico dei test.

Tabella 1: Condizioni di setup sperimentale.

Test	**F** [kg]	**L** [mm]	**d** [mm]
Rigidezza flessionale	50	557	185
Rigidezza torsionale	20	1595	187

Il set up sperimentale sopra descritto (telaio, metodologia di carico, castello di prova, etc.) è stato simulato in Ansys®. Lo scopo era quello di ottenere un modello FE del telaio originale validato dai dati sperimentali. Gli elementi utilizzati sono del tipo *SHELL 181* della libreria di Ansys®. Per tutte le componenti del telaio, cannotto di sterzo, travi telaio e longheroni superiori, sono stati considerati

differenti spessore. Tutti i componenti che presentano lo stesso spessore sono stati modellati come unica superficie. L'interfaccia tra componenti diversi, come per esempio tra cannotto di sterzo e travi telaio, è stata modellata come contatto lineare di tipo incastro (MPC). Il modello complessivo del telaio ottenuto è costituito da 37430 elementi e 37760 nodi (Figura 3). Il carico è stato simulato come forza remota agente sul cannotto di sterzo; si sono infine considerati quattro vincoli fissi in prossimità dell'attacco al motore. In queste condizioni si sono valutati gli spostamenti direzionali corrispondenti all'asse di misura dei comparatori utilizzati per la caratterizzazione sperimentale.

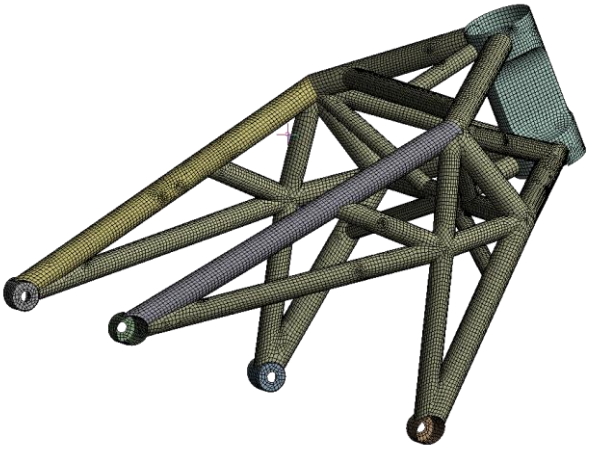

Figura 3: La discretizzazione del telaio standard.

Come per i test sperimentali, una volta ottenuti i valori degli spostamenti s_1 ed s_2, si è proceduto al calcolo delle rigidezze flessionale numerica (Kf_{num}) e torsionale numerica ($Kt_{numd}\ e\ Kt_{nums}$ relativamente al verso del carico applicato).
In tabella 2 si riportano le differenze percentuali ottenute tra le prove sperimentali ed i test numerici.

Tabella 2: Confronto tra test sperimentali e numerici

Test	Differenza tra sperimentale e numerico
Rigidezza flessionale	3.4 %
Rigidezza torsionale sinistra	10.1 %
Rigidezza torsionale destra	9.2 %

2.2. Fase due

Data la geometria del telaio in esame, costituito cioè da più travi tubolari che convergono su medesimi nodi, l'ottimizzazione è stata applicata su un modello parametrico FE costituito da elementi *PIPE* che, in base alle esigenze della funzione obiettivo, variano la loro posizione e geometria. La lunghezza, i diametri e gli spessori di queste travi tubolari costituiscono pertanto le variabili di progetto con le relative limitazioni geometriche. L'esigenza di creare questo secondo modello FE è dettata, ovviamente, dalla mole di calcolo preposta alla CPU e, quindi, la necessità di avere un modello più snello e "facilmente" adattabile all'algoritmo di ottimizzazione scelto.
Per quanto concerne il cannotto di sterzo, avendo una geometria non modificabile per esigenze di progetto, non è stato oggetto della procedura di ottimizzazione. Esso è stato modellato utilizzando l'elemento *SHELL 63* della libreria di Ansys® adatto a simulare una superficie alla quale possono essere fornite proprietà inerziali. Il modello superficiale del canotto (2088 elementi) è poi collegato alla struttura di travi tubolari (30 elementi) tramite incastro diretto al nodo, ottenendo così un modello numerico molto più versatile (Figura 4). Il modello agli elementi finiti è stato implementato in Ansys APDL® e validato attraverso il confronto (Tabella 3) con il modello precedente (Figura 3).

(a) (b)

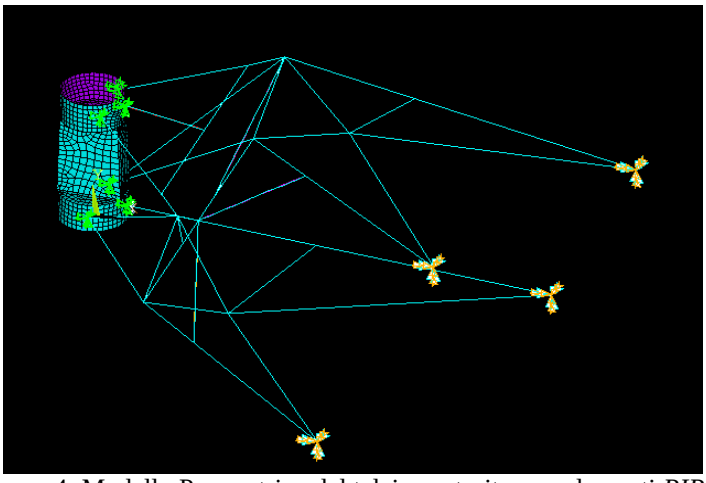

Figura 4: Modello Parametrico del telaio costruito con elementi *PIPE*.

Tabella 3: Confronto tra simulazioni su modello solido e modello semplificato *PIPE-SHELL*.

Test	**Differenza tra modello *SHELL* e modello *PIPE-SHELL***
Rigidezza flessionale	9.3 %
Rigidezza torsionale sinistra	9.5 %
Rigidezza torsionale destra	9.8 %

Da un'analisi preliminare del modello parametrico sotto le medesime condizioni di carichi e vincoli, si è dedotto che l'effetto sulla rigidezza dei rinforzi indicati in figura 5 è al massimo, dello 0,68%. Data quindi la modesta entità del contributo fornito da questi componenti, si è preferito ulteriormente semplificare il modello parametrico eliminando questi elementi.

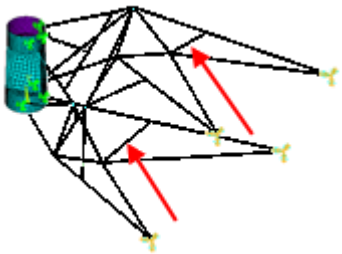

Figura 5: Particolare delle travi eliminate dopo un analisi preliminare sulle rigidezze.

L'ottimizzazione ha come scopo, in questo caso, quello di ridefinire la configurazione geometrica del telaio al fine di offrire proprietà di rigidezza flessionale e torsionale che non siano più basse del 10% rispetto al modello standard. Il valore del 10% è stato scelto dagli autori come limite superiore in base all'esperienza ed alle valutazioni con i piloti. Utilizzando come logica di ottimizzazione il già citato *Pattern Search*, si ha la necessità di definire quali siano le variabili geometriche su cui esso può agire. Considerando che il canotto di sterzo deve mantenere la geometria originale, così come devono essere fissi i punti di collegamento al motore, si individuano 9 variabili geometriche sulle quali lavorare per l'ottimizzazione (ovvero per l'abbassamento del valore della funzione obiettivo alla ricerca di un minimo). Le variabili sono di seguito elencate con riferimento alla figura 6:

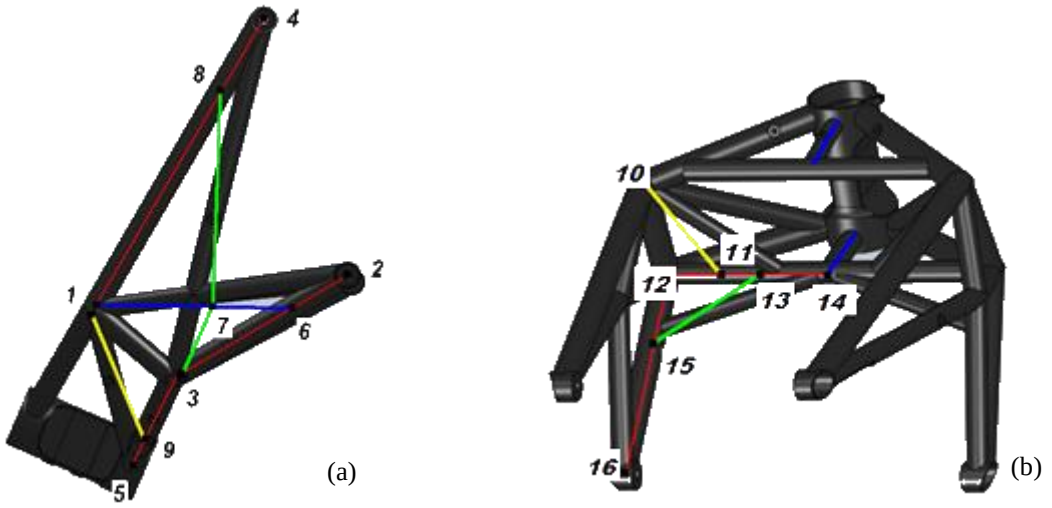

Figura 6: Indicazione delle grandezze geometriche variabili nel processo di ottimizzazione

- Punto 6: l'estremo della linea 1-6 piò variare lungo il lato 3-2;
- Punto 7: l'estremo della linea 3-7 e 7-8 può variare lungo il lato 1-6;
- Punto 8: l'estremo della linea 7-8 può variare lungo il lato 1-4;
- Punto 9: l'estremo della linea 1-9 può variare lungo il lato 5-3;
- Punto 15: l'estremo della linea 15-13 può variare lungo il lato 12-16;
- Punto 13: l'estremo della linea 15-13 può variare lungo il lato 12-14;
- Punto 11: l'estremo della linea 10-11 può variare lungo il lato 12-14;
- Le lunghezze dei tratti in blu di figura 6(b) possono assumere valori diversi tra loro;
- Il diametro e la sezione delle travi può variare, ad eccezione di quelle che vanno a comporre il profilo esterno del telaio. Onde evitare un aumento troppo elevato dei tempi computazionali, i diametri e gli spessori dei tubolari utilizzabili dall'algoritmo sono definiti in base a quelli standard disponibili sul mercato di dimensioni nell'intorno di quelle che caratterizzano i componenti originali.

Si definiscono, inoltre, le seguenti variabili:

- Δ_f: differenza tra la rigidezza flessionale del telaio originale e del telaio con geometria derivante dalla i-esima simulazione;
- Δ_{tsx}: differenza tra la rigidezza torsionale sinistra del telaio originale e del telaio con geometria derivante dalla i-esima simulazione;
- Δ_{tdx}: differenza tra la rigidezza torsionale destra del telaio originale e del telaio con geometria derivante dalla i-esima simulazione;
- W: peso del telaio con geometria derivante dalla i-esima simulazione;
- P_1, P_2, P_3, P_4: valori di peso numerico da assegnare alle singole variabili che compongono la funzione obiettivo.

In particolare la funzione obiettivo è:

$$V(X) = P_1 \cdot \Delta_f + P_2 \cdot \Delta_{tsx} + P_3 \cdot \Delta_{tdx} + P_4 \cdot W \qquad (3)$$

Considerando che le variabili che vanno a comporre la *V(X)* hanno la stessa importanza al fine dell'ottimizzazione richiesta, i valori dei pesi numerici sono definiti unitari.

3. ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Come precedentemente descritto, l'algoritmo *Pattern Search* analizza diverse configurazioni della struttura in esame, partendo da una condizione iniziale, che sia definita, per agire sulle variabili geometriche prestabilite. Una volta generate le caratteristiche delle nuove geometrie, esse vengono automaticamente ricostruite in ambiente FEM e sottoposte ad analisi numerica al fine di ottenere i valori di rigidezze e peso. Questi ultimi sono poi utilizzati per identificare il valore della funzione obiettivo di ogni singola struttura generata; quella che presenta il valore della funzione obiettivo *V(X)* minore è considerata come condizione iniziale per definire il *pattern* del successivo set si simulazioni. Lo scopo del processo di ottimizzazione è quello di giungere ad una struttura che presenti un minimo della funzione obiettivo; in questo modo si giunge ad un sistema ottimizzato, che presenti le peculiarità richieste dalla funzione obiettivo stessa rispetto alla struttura di partenza. Nel caso di questo lavoro, la struttura finale in output dal processo di ottimizzazione è riportata in figura 7(c), 7(d) confrontata alla struttura originale 7(a), 7(b). A livello geometrico si possono notare gli spostamenti dei punti 13 e 33 verso l'esterno ed un marcato arretramento del punto 8; queste modifiche comportano la riduzione di lunghezza delle corrispettive travi tubolari e come conseguenza diretta la riduzione del peso complessivo della struttura.

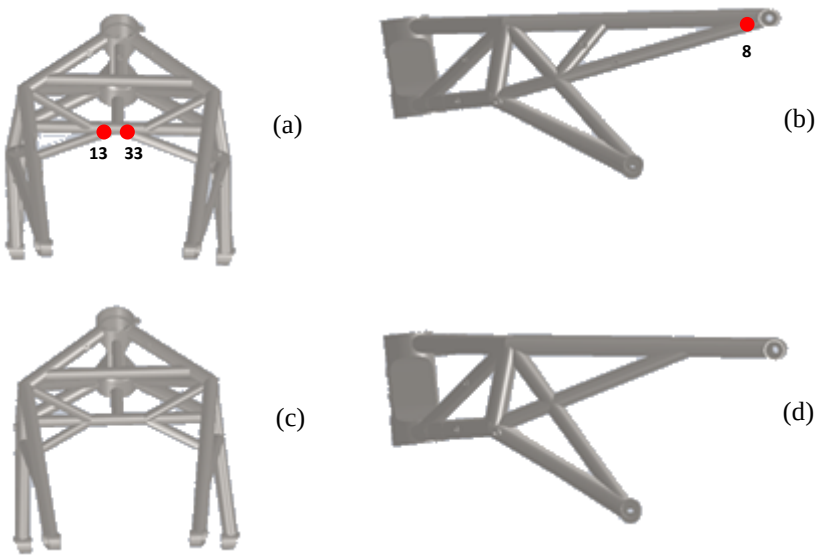

Figura 7: Confronto fra la geometria originale (a), (b) e la geometria ottimizzata (c), (d).

Si rende necessario andare ad analizzare quali siano le proprietà della struttura ottimizzata al fine di verificare la bontà del risultato ottenuto. Come primo passo, la geometria è ricostruita come modello solito in ambiente CAD al fine di valutare il peso complessivo; esso è di 5.71 kg che, comparati al peso originale di 6.77 kg, ne fornisce una diminuzione pari al 15.66%, in linea con le richieste della funzione obiettivo.
Questo risultato si dimostra estremamente importante in quanto la riduzione di massa per un motociclo da competizione fornisce un vantaggio diretto sull'aumento della prestazione.
Si deve però verificare che le rigidezze del telaio ottimizzato siano all'interno del *range* accettabile prestabilito anche dopo il calo di massa appena messo in evidenza. Per questo motivo, si costruisce il modello FEM della parte utilizzando elementi *SHELL* (paragrafo 2.1); si decide di utilizzare questa rappresentazione in quanto più vicina alla realtà delle prove sperimentali, come dimostra la Tabella 2.
Il modello è stato sottoposto alle stesse analisi numeriche effettuate sul telaio originale, per valutare la variazione delle caratteristiche di rigidezza flessionale e torsionale; esse rimangono all'interno dell'intervallo prestabilito accettabile a fronte della diminuzione di peso del telaio.
In Tabella 4, si riporta un sommario dei risultati ottenuti per le caratteristiche fondamentali del telaio motociclistico, nonché componenti della funzione obiettivo *V(X)*.

Tabella 4: Confronto delle caratteristiche principali tra i modelli FEM del telaio originale ed ottimizzato.

Test	Differenza modello ottimizzato modello originale
Rigidezza flessionale	-8.21 %
Rigidezza torsionale sinistra	-4.20 %
Rigidezza torsionale destra	-2.50 %
Peso	-15.66 %

Infine il confronto tra le tensioni equivalenti di Von Mises registrate per una delle prove di torsione mostra una differenza percentuale di circa il 7% (Figura 8).

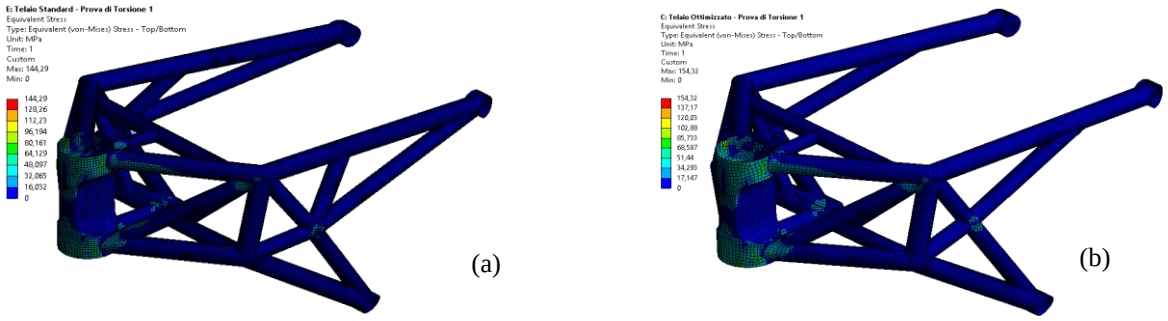

Figura 8: Confronto tensioni equivalenti tra telaio originale (a) ed ottimizzato (b) in torsione.

4. CONCLUSIONI

Il telaio è un elemento di collegamento fra l'avantreno e il forcellone della moto, nonché sostegno per il propulsore. Stabilità e maneggevolezza del motoveicolo sono prerogative strettamente dipendenti dalle caratteristiche geometriche di questo componetene. Un telaio prestazionale nel mondo delle competizioni è una struttura dal minor peso che rispetta i parametri di rigidezza flessionale e torsionale.

Il fine del presente lavoro è quello di sviluppare un metodo procedurale che conduca all'ottimizzazione di una struttura meccanica, in funzione di parametri geometrici e fisici di particolare interesse. Nella fattispecie si fa riferimento ad un telaio motociclistico da competizione in traliccio di tubi, categoria Moto 2; dato il campo di applicazione, l'attenzione si concentra sulla massimizzazione delle prestazioni. In primo luogo si è posto l'interesse nello sviluppo di un modello FEM che sia in grado di rappresentare in modo soddisfacente il comportamento reale della parte; esso viene poi validato confrontando i valori delle rigidezze caratteristiche ottenute dalle simulazioni numeriche rispetto a quelle che scaturiscono dalle misurazioni sperimentali. Al fine di diminuire il costo computazionale dell'ottimizzazione, sulla base del modello precedente è stato poi sviluppato un modello semplificato, adatto all'esecuzione in automatico di un elevato numero di simulazioni; i risultati del processo sono infine stati confrontati con il modello FEM iniziale.

La funzione obiettivo sviluppata prevede un miglioramento delle prestazioni globali della struttura e questo si traduce in un mantenimento delle caratteristiche di rigidezza all'interno di un *range* prestabilito, ma con una diminuzione del peso complessivo. Al termine del processo di ottimizzazione, si è ottenuta una geometria che presenta una riduzione di massa pari al 15.7% rispetto al modello originale.

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Danilin, "Stiffness optimization of airframe", Vol 1, Theory (2009).

[2] W.G.R.F.R. Spendley, G.R. Hext, F.R. Himsworth. "Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation", *Technometrics*, 4 (4), 441-461 (1962).

[3] J.A. Nelder, R. Mead, "A simplex method for function minimization", *The Computer Journal*, 7 (4), 308-313 (1965).

[4] M.A. Abramson, T.J. Asaki, J.E. Dennis Jr., K.R. O'Reilly, R.L. Pingel, "Quantitative object reconstruction using Abel Transform X-Ray tomography and mixed variable optimization", *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 1(3), 322-342 (2008).

[5] T. Brands, E. Berkum, D.H. Amelsfort MSc, "Optimal Toll Design in Dynamic Traffic Networks Using a Pattern Search Approximation Algorithm", *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 09, 1243 (2009).

[6] A. Airoldi, S. Bertoli, L. Lanzi, M. Sirna, G. Sala, "Design of a motorcycle composite swing-arm by means of multi-objective optimization", *Applied Composite Materials*, 19 (3-4), 599-618 (2012).

[7] R. Cazacu, L. Grama, "Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA", *Procedia Technology*, 12, 339-346 (2014).

[8] L. Lamberti, C. Pappalettere, "Un efficiente algoritmo SLP per l'ottimizzazione strutturale di forma", *Proceedings XXX Convegno Nazionale AIAS*,1179-1188 (2001).

[9] V. Torczon, "On the Convergence of Pattern Search Algorithms", *SIAM Journal on optimization*, 7(1), 1–25 (1997).

[10] H. Jeevis, "Direct search solution of numerical and statistical problems", *Journal of the ACM*, 8 (2), 212-229 (1961).

[11] SS. Kourehli,G.G. Amiri, M. Ghafory-Ashtiany, A. Bagheri, "Structural damage detection based on incomplete modal data using pattern search algorithm", *Journal of Vibration and Control* (2012).

[12] J.E. Rodríguez, A.L. Medaglia, J.P. Casas, "Approximation to the optimum design of a motorcycle frame using finite element analysis and evolutionary algorithms" *Systems and Information Engineering Design Symposium*, 277-285 (2005).

[13] J.E. Rodríguez, A.L. Medaglia, A. C. Coello, "Design of a motorcycle frame using neuroacceleration strategies in MOEAs", *Journal of Heuristics*, 15(2), 177-196 (2009).

[14] M. Bocciolone, F. Cheli, M. Pezzola, R. Viganò, "Metodologia numerica e sperimentale per l'identificazione delle caratteristiche dinamiche e strutturali di un telaio motociclistico", *Proceedings XXXIV Convegno Nazionale AIAS* (2005).