

Study and validation of a composite material hydraulic cylinder for high working pressures

Ing. PhD Sara Mantovani, Researcher, Modena and Reggio Emilia University
Ing. PhD Enrico Dolcini, R&D Manager, RI-BA Composites Srl

The weight reduction and the structural efficiency have been certainly so far among the most discussed subjects, investigated by designers and engineers in the various sectors of the market. In fact, dynamic and lighter systems allow to reduce the fuel consumption and, consequently, the energy costs associated with the use of the equipment.

In the automotive and handling machinery areas, for example, this involves the possibility of increasing the working hours or the fuel economy of a vehicle, but also to make the compliance easier with the stringent requirements on CO₂ emissions. In the extreme case of the aeronautical industry, then, the ability to reduce the mass of the bearing structure involves the possibility to increase the "payload", with obvious benefits to the purchaser of the vehicle.

In addition to these energy saving benefits, the performance should not be neglected: lighter mechanical systems allow an easier control, either in case of means of transport or components of automatic machineries, as well as higher frequencies and precision in motion.

Fig.1
Position of the tested cylinder related to the working machinery
Posizione del cilindro oggetto di studio relativamente alla macchina in opera



Studio e verifica di un cilindro oleodinamico in materiale composito per elevate pressioni di esercizio

Ing. PhD Sara Mantovani, Ricercatrice presso l'Università di Modena e Reggio Emilia
Ing. PhD Enrico Dolcini, Responsabile R&D presso RI-BA Composites Srl

L'alleggerimento e l'efficienza strutturale sono sicuramente ad oggi tra i temi più discussi ed investigati dai progettisti e dagli ingegneri nei vari settori del mercato. Sistemi dinamici più leggeri, infatti, permettono di ridurre i consumi e, conseguentemente, i costi energetici connessi all'utilizzo di una macchina. Nei settori automotive e delle macchine da movimento terra, ad esempio, questo comporta la possibilità di aumentare le ore di funzionamento o l'autonomia di un mezzo, oltre a rendere più agevole il rispetto dei requisiti cogenti sulla base delle emissioni di CO₂. Nel caso estremo dell'industria aeronautica, poi, la capacità di ridurre la massa delle strutture portanti comporta la possibilità di aumentare il "carico pagante", con evidente vantaggio per l'acquirente del mezzo. Oltre a questi benefici di carattere energetico, non va trascurato l'aspetto prestazionale: sistemi meccanici più leggeri permettono un controllo più agevole, siano essi mezzi di trasporto o organi di macchine automatiche, nonché frequenze di impiego più elevate con miglior precisione di utilizzo. Alla luce di queste considerazioni RI-BA Composites, azienda leader nella produzione di parti in materiale composito avanzato, ha analizzato la

fattibilità di cilindri oleodinamici per elevate pressioni di esercizio in fibra di carbonio e matrice termoindurente.

Lo studio si è focalizzato su un'applicazione specifica, ovvero quella di un attuttore per la movimentazione di bracci articolati di autopompe per il calcestruzzo. In particolare, il modello preso a riferimento ha le seguenti caratteristiche tecniche:

Corsa: 1250 mm

Alesaggio: 130 mm

Pressione di Esercizio: 350 bar

Pressione di Collaudo: 420 bar

Peso Totale: 120 kg

Come si evince dall'immagine (Fig. 1), tali cilindri si trovano a lavorare a notevole distanza dal centro di massa dell'autocarro, producendo un considerevole momento ribaltante. L'alleggerimento anche di pochi chilogrammi su un componente del genere, pertanto, attiva un circolo virtuoso che consente di ridurre in maniera molto considerevole la massa della zavorra necessaria alla stabilizzazione del mezzo.

Starting from these observations, RI-BA Composites, a leading manufacturer of advanced composite parts, has tested the feasibility with carbon fibre and thermosetting matrix of hydraulic cylinders for high working pressures.

The study focused on a specific application, namely that of an actuator for handling the complex arms of concrete pumps. In particular, the reference model has the following technical features:

Stroke: 1250 mm

Bore: 130 mm

Working Pressure: 350 bar

Test Pressure: 420 bar

Total weight: 120 kg

As it can be seen from (Fig. 1), these cylinders operate at a great distance from the mass centre of the truck, producing

a remarkable overturning moment. The weight reduction by even a few kilograms on this type of component, therefore, activates a virtuous circle that allows to highly reduce the mass of the ballast which is required for the stabilization of the vehicle.

The early steps of the research activity have consisted in the calculation analysis of the amount of composite material required to meet the structural requirements. More precisely, the latter are divided into:

- Resistance Requirements:

- Maximum circumference stress due to the internal pressure;
- Maximum axial stress due to the return phase of the stem;
- Resistance to instability due to the total compression during the thrust phase

Nel corso della ricerca la prima fase di lavoro ha visto l'analisi a calcolo della quantità di materiale composito necessaria a soddisfare i requisiti strutturali. In particolare, questi ultimi si dividono in:

- requisiti di Resistenza:

- *Massima tensione circonferenziale dovuta alla pressione interna;*
- *Massima tensione assiale di trazione dovuta alla fase di rientro dello stelo;*
- *Resistenza all'instabilità per effetto della compressione di insieme durante la fase di spinta*

- requisiti di Rigidezza:

- *Deformazione radiale di "pompaggio" che può compromettere il sistema di tenute tra pistone e canna del cilindro.*

Nel corso dello studio di fattibilità sono stati impiegati sia modelli analitici che a elementi finiti. I primi

hanno consentito di verificare l'andamento dello stato tensionale e deformativo nelle aree centrali del cilindro, ove l'assialsimmetria della struttura consente la soluzione in forma chiusa delle equazioni differenziali di equilibrio indefinito.

Il modello analitico implementato contempla l'ortotropia dei materiali ed ha permesso di eseguire rapidamente numerose sensibilità rispetto allo spessore di parete.

Ciò che è emerso da questa prima fase di studio, eseguita in collaborazione con l'Università di Modena e Reggio Emilia, è stata la sostanziale criticità connessa al pompaggio radiale, ovvero allo spostamento in direzione del raggio per effetto della pressione interna. Si osserva chiaramente dai diagrammi di Fig. 2, che all'aumentare dello spessore circonferenziale si ha un netto incremento della rigidezza

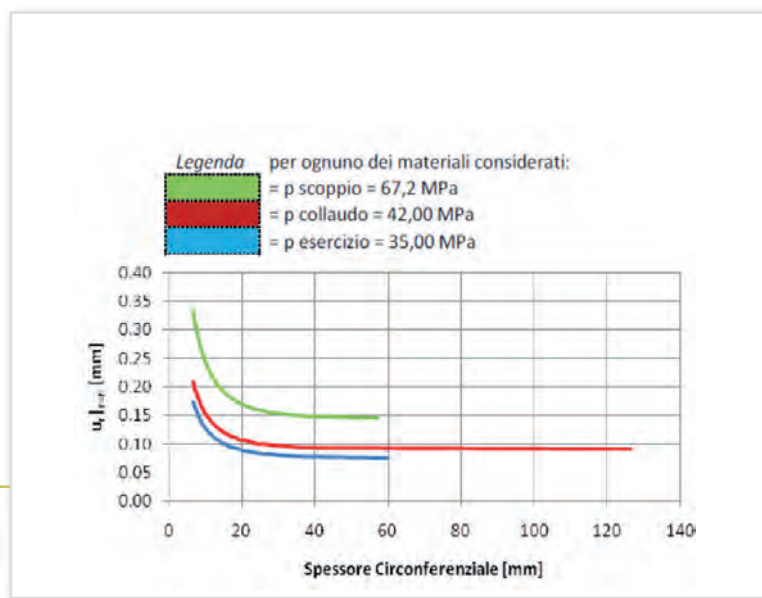


- Stiffness Requirements:

- Radial Deformation of the cylinder jacket which could endanger the sealing system between the piston and the cylinder liner.

During the feasibility study both analytical models and finite element analysis have been used. The first made it possible to analyze stress and strains in the central areas of the cylinder, where the axis-symmetric structure allows the closed form solution of the indefinite equilibrium equations.

The analytical model which has been implemented provides



fino a spessori di parete nell'intorno di 20 mm, dopo di che le curve sono pressoché asintotiche, quindi l'ulteriore incremento del materiale non risulta efficace. Nel diagramma si riporta in ordinata la dilatazione sul raggio e le tre curve riguardano i 3 livelli di carico caratteristici per il dimensionamento del cilindro: Pressione di Esercizio 350 bar; Pressione di Collaudo 420 bar; Pressione di Scoppio 670 bar. Quest'ultimo valore è quello che porta a cedimento il cilindro in acciaio preso a riferimento di questo studio.

Altro elemento che emerge dall'analisi su modelli analitici è che per ottemperare alle richieste di rigidità imposte dal corretto funzionamento delle tenute tra pistone e camicia, una fibra di carbonio ad alta resistenza e modulo di elasticità standard non è sufficiente. Una caratteristica molto importante dei materiali compositi rispetto all'acciaio, infatti, è che essi sono estremamente performanti dal punto di vista della resistenza, ma presentano dei limiti qualora siano richieste rigidità assolute molto importanti, specialmente in direzione diversa da quella in cui agisce la fibra. Quello che per l'acciaio è un problema dominato dalla resistenza (lo spessore minimo necessario ad evitare la rottura è maggiore di quello necessario a prevenire il pompaggio), nel caso del composito a fibra di carbonio diventa un problema dominato dai requisiti di rigidità. Per ovviare a questo inconveniente, si sono ripetute le analisi di sensibilità allo spessore nell'ipotesi di utilizzare una fibra decisamente più performante dal punto di vista della rigidità longitudinale. Nella Fig. 3 si mostrano i risultati comparativi tra la soluzione di riferimento in acciaio e quella realizzata con due fibre aventi rispettivamente E11 pari a 620 GPa e 760 GPa.

the material orthotropy and allowed to quickly perform several sensitivities related to the wall thickness.

What has been outlined from this first phase of the study, which was performed in collaboration with the University of Modena and Reggio Emilia, was the substantial criticality connected to the radial deformation, i.e. the displacement in the direction of the radius due to the internal pressure.

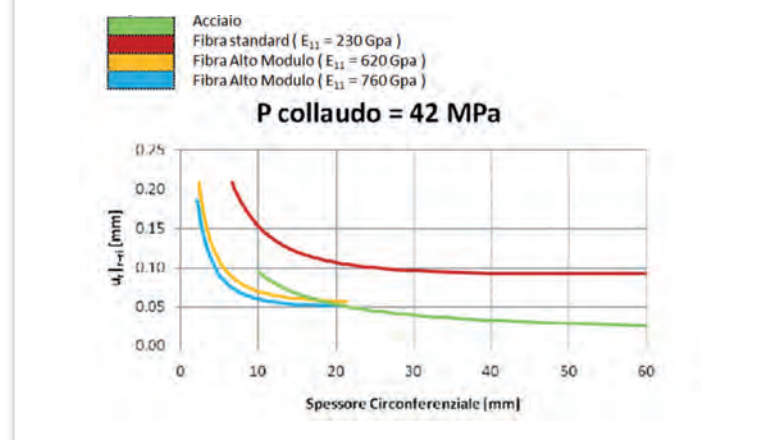
It is clearly shown from the diagrams of (Fig. 2), that as the wall thickness increases, there is a net increase in the radial stiffness up to a wall thickness of about 20 mm. After this value, the curves are almost asymptotic, so the further addition of material is not effective anymore. In the diagram radial deformation is shown and the three curves are related to three typical load levels for the cylinder dimensioning: Working Pressure 350 bar; Test Pressure 420 bar; Burst pressure 670 bar.

This latter value is the one that leads to the failure of the steel cylinder which has been taken as reference in this study.

Another information obtained from the analytical models is that in order to comply with the required rigidity imposed by the proper operation of the seals between the piston and liner, a carbon fiber featuring high strength and standard modulus of elasticity is not

Fig. 3

Behaviour of the radial displacement as a function of the thickness with various jacket materials / Andamento dello spostamento radiale in funzione dello spessore con differenti materiali della camicia



Ciò che si evince dal grafico è che solo con le fibre ad altissimo modulo si raggiunge un comportamento uguale o migliore di quello del cilindro originale in acciaio.

Successivamente a queste analisi che hanno permesso di identificare un possibile spessore, il cilindro è stato effettivamente disegnato, affrontando tutti i problemi connessi alla progettazione, ovvero gli aspetti quali la giunzione della camicia con le testate metalliche del cilindro, nonché l'esigenza di ricavare i condotti di adduzione ed uscita dell'olio. Tra gli aspetti più salienti, sicuramente vi è stata l'esigenza di evitare il contatto diretto del fluido operatore con il materiale composito all'interno della camicia. Questa necessità deriva dalla difficoltà di garantire in opera e, soprattutto, su lunghi periodi di funzionamento, l'assenza di percolazione attraverso la matrice. Ciò anche considerando lo strisciamento

enough. A very important feature of the composite materials compared with steel, is that they are extremely high performance from the point of view of resistance, but they also have limitations when absolute stiffness is required, especially in a different direction from that in which the fibers are oriented. What is a strength-driven problem for steel (the minimum thickness necessary to prevent the failure is greater than the one required to prevent radial deformation), becomes stiffness- driven for composite materials. To overcome this drawback, sensitivity analysis to the thickness has been repeated with ultra high modulus carbon fibre. In (Fig. 3) the results of the comparison are shown between the reference steel solution and the one made with two fibres having respectively E1 equal to 620 GPa and 760 GPa.

What the graph shows is that only with very high modulus fibres a behaviour equal to or better than the original steel cylinder is obtained. After these calculations which have allowed to identify a possible thickness, the cylinder was actually designed, focusing on all the problems related to the design, i.e. aspects such as the junction of the liner with metal heads of the cylinder, and the need to obtain the inlets and outlets oil ducts. Among the most important data, certainly there was the need to avoid direct contact of the working fluid with the composite material inside the liner. This need arises from the difficulty of ensuring during the work and, above all, over long periods of operation, the absence of percolation through the matrix. This also considering the

delle tenute del pistone durante il moto di attuazione, che sicuramente porterebbe ad un'usura non facilmente prevedibile. In sede di progetto, a fronte di queste incertezze e data la criticità strutturale del componente, si è optato per un "liner" metallico interno alla camicia, di spessore contenuto e tale da incrementare l'affidabilità. Lo spessore della parte metallica è stato il minimo realizzabile dal punto di vista tecnologico e si attesta in 3 mm di parete, dimensione che consente di garantire la tolleranza sia geometrica che di finitura superficiale richieste alla parte. I successivi calcoli agli elementi finiti che sono stati effettuati, hanno tenuto conto della reale geometria da progetto e sono stati orientati prevalentemente a garantire la resistenza sia dal punto di vista della rottura statica, che della stabilità al carico di punta. In particolare, attraverso un modello più accurato del cilindro si sono potuti monitorare aspetti quali la zona di transizione tra la camera in pressione e quella non pressurizzata, separate dal pistone. In quest'area si esce dalla trattazione teorica semplice, per la quale la teoria dell'elasticità fornisce una soluzione in forma chiusa, pertanto l'utilizzo di un modello FEM ha consentito di valutare l'incremento di tensioni assiali imputabile all'effetto di flessione della parete cilindrica.

Altri punti critici per i quali si è eseguita un'accurata verifica dello stato tensionale sono le zone di giunzione tra testate in acciaio del cilindro e camicia in composito. Anche in questo caso, la repentina variazione di rigidità incrementa le concentrazioni di tensione, rendendo necessari accorgimenti costruttivi specifici.

Proprio la zona di transizione tra camicia e testate è soggetta a



creep of the piston seals during the motion, which would certainly lead to a not easily predictable wear effect.

In the design stage, tackling these uncertainties and given the structural criticality of the component, designers have opted for an inner metal "liner" to the jacket, with a low thickness such as to increase reliability. The thickness of the metal part was the minimum feasible from the point of view of technology and it is found in a 3 mm wall, a dimension that allows to ensure both the geometric and surface finishing tolerances required by the component.

The following finite element calculations which have been performed, have taken into account the actual geometry of the project and they have been directed mainly to ensure the resistance both from the point of view of the static strength, and the buckling stability. In particular, through a more accurate model of the cylinder, the transition zone between the pressurized and non-pressurized chamber (separated by the piston) has been monitored. In this area the elasticity equations have not a closed form solution, therefore the use of a FEM model was necessary to evaluate the increase in the axial stress due to the bending of the cylinder wall. Other critical points for which an accurate inspection of the stress state has been carried out, are the junction zones between the steel heads of the cylinder and the composite liner. Also in this case, the sudden change in stiffness increases the stress concentrations, making it necessary specific constructive measures.

sollecitazioni considerevoli nel caso di carico di punta.

La normativa di riferimento seguita in questo studio è la ISO/TS 13725 (Fig. 4), dalla quale si evince un'anomalia di comportamento imputabile nello specifico all'utilizzo di materiali compositi e non presente nel caso del componente metallico.

Come sottolineato in figura, il valore estremamente basso del modulo di elasticità tangenziale nei compositi, in relazione a quello dei materiali metallici, porta ad una deformata in cui l'effetto del taglio è particolarmente evidente e questo induce sovrasollecitazioni nella zona delle testate. Per ovviare a questi problemi in fase di progetto si è optato per una soluzione integrata, in cui il "liner" metallico interno viene reso solidale alle flange di giunzione. Ciò comporta una transizione più dolce delle deformazioni e riduce la discontinuità nella derivata della linea elastica, evidenziata nel dettaglio (Fig. 4).

Terminata la fase di progettazione e verifica a calcolo della soluzione proposta, si è affrontata la successiva prototipazione e validazione dal punto di vista sperimentale, onde ottenere la delibera tecnica da parte del cliente finale.

Attraverso la tecnologia del Filament Winding, sono stati realizzati 2 prototipi (Fig. 5) sui quali sono stati eseguiti i seguenti test in collaborazione con CIFA Spa, azienda attiva nel settore delle costruzioni e potenziale cliente finale per il componente:

- verifica del comportamento a fatica in relazione a cicli di carico scarico;
- verifica del "damage tolerance";
- verifica del comportamento a fatica a seguito di invecchiamento accelerato;
- carico ultimo di rottura.

Per quanto concerne le prove di fatica, sono stati eseguiti cicli di carico e

Exactly the transition zone between the liner and the heads is subject to remarkable stresses in the case of buckling stability. The reference standards followed in this study is the ISO / TS 13725 and the image (Fig. 4) is reported, which shows an anomaly of behavior specifically due to the use of composite materials and which is not found in the case of the metal component.

As highlighted in the figure, the extremely low value of the tangential elasticity modulus in the composite, versus the metallic materials one, leads to a deformation in which the effect of shear is particularly evident and causing overstresses in the area of the heads. To overcome these problems an integrated design was chosen, in which the inner metal "liner" is made integral with the coupling flanges. This results in a smoother strain transition reducing the discontinuity in the slope of the deflection curve, shown in detail in (fig. 4).

After the design and calculation phase of the proposed solution, the

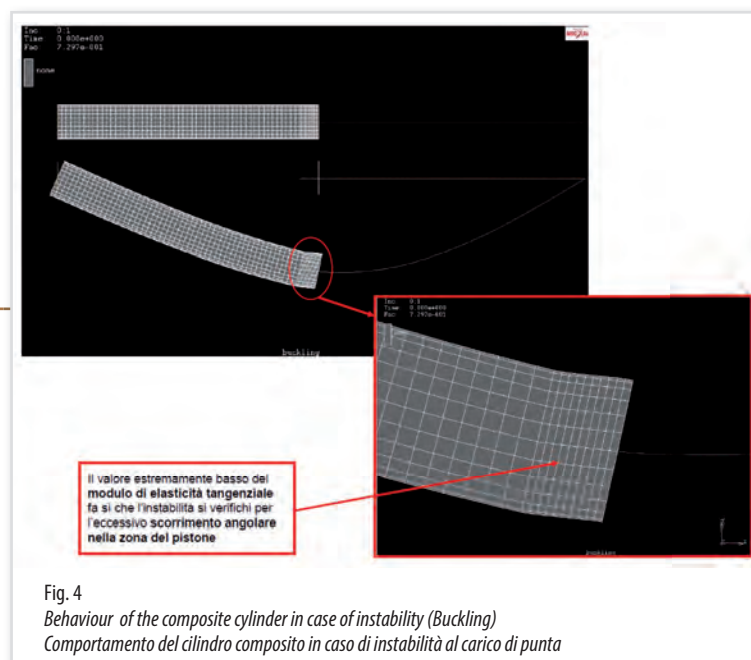


Fig. 4
Behaviour of the composite cylinder in case of instability (Buckling)
Comportamento del cilindro composito in caso di instabilità al carico di punta

scarico (cicli all'origine) con pressione crescente da 200 bar a 550 bar, per un totale di 61.380 cicli. Il carico per il quale sono state eseguite più ripetizioni è quello di 370 bar, al quale sono state eseguite 20180 ripetizioni. Nel corso della prova, che ha avuto una durata di circa 10 giorni, il componente è stato ispezionato visivamente ad ogni variazione del livello di carico, e non si sono registrate criticità. A termine della prova il cilindro era ancora perfettamente funzionante e non presentava segni di cedimento o perdite. Relativamente alla verifica di tolleranza al danno, ci si è rifatti alle norme di derivazione aeronautica ASTM D7136/10 per il calcolo dell'energia del corpo impattante al momento dell'urto. Essa è stata calcolata in funzione dello spessore complessivo del cilindro e nel caso di questo studio si è impiegato un battente cilindrico di massa complessiva di 12 kg con punta sferica di raggio 10 mm avente una velocità di 4,5 m/s al momento del contatto con la camicia. L'immagine riportata in Fig. 6 mostra l'effetto di un impatto e il relativo danneggiamento causato nelle zone esterne della camicia. Gli urti effettuati si sono concentrati nella zona centrale della camicia ed in prossimità delle flange, in modo da simulare le due tipologie

subsequent prototyping and validation from the experimental point of view was performed, so as to obtain the technical approval by the end customer.

Through the Filament Winding technology, two prototypes were made (Fig. 5) on which the following tests were performed in collaboration with CIFA SpA, a company active in the construction industry and potential user of the component:

- verification of the fatigue behavior in relation to loading/unloading cycles;
- assessment of the "damage tolerance";
- verification of the fatigue behavior as a result of the accelerated aging tests;
- burst pressure.

With regard to the fatigue tests, loading and unloading cycles were performed with increasing levels of pressure: from 200 bar to 550 bar, for a total of 61380 cycles. The design working pressure, 370 bar, has been the most tested level, with 20180 repetitions. During the test, which lasted about 10 days, the component was visually inspected at each variation of the load level, and no criticalities were observed. At the end of the test, the cylinder was still working perfectly and did not show signs of cracking or failure.

Concerning the damage tolerance requirements, the aeronautic standard ASTM D7136/10 was used for the calculation of the impact energy and the relative weight to be dropped as a function of the total thickness of the cylinder. For the present study we have used a

Fig. 5

One of the cylinders undergoing the accelerated aging test

Immagine di uno dei cilindri sottoposto ad invecchiamento accelerato



di danneggiamento maggiormente critiche per la stabilità del cilindro. In tutti i test di impatto effettuati non sono stati rilevati imbozzamenti della camicia metallica interna al cilindro, quindi la funzionalità del componente è stata considerata accettabile e la tolleranza al danno è stata accertata dai successivi test di resistenza post impatto. Infatti, il cilindro impattato è stato sottoposto a nuovi cicli di fatica al livello di carico di esercizio (350 bar). Terminati i test di fatica, infine, lo



cylindrical body with an overall mass of 12 kg and a spherical tip (10 mm radius). The speed of the dropped weight was 4.5 m/s at the very instant of impact with the jacket.

The image in (Fig. 6) shows the effect of an impact and the relative damage caused in the outer surface of the jacket. The impacts were concentrated in the central area of the liner and in the proximal area of the flanges, in order to simulate the two types of damage which are most critical for the stability of the cylinder.

In all impact tests performed, no deformation of the liner inside the cylinder was observed, so the efficiency of the component was considered rather good and the damage tolerance has been established by subsequent resistance testing after impact.

Indeed, the impacted cylinder has been subject to further cycles of fatigue to the working load level (350 bar).

Once the fatigue tests have been accomplished, finally, the same cylinder was brought to rupture showing a burst pressure of 720 bar, against the expected rate of 700 bar.

As from the tests made, it can be concluded that the study of the hydraulic cylinder, dealt with in this paper has proved the feasibility of the composite material based component, with an overall weight reduction of approximately 20% (40% only on the jacket).

The component has been newly designed taking into account the specific problems of the composite and technological constraints required for its actual production process.



Fig. 6
A detail of the cylinder surface damage caused by the impact test
Dettaglio di un danneggiamento della superficie del cilindro indotto dalla prova di impatto

stesso cilindro è stato portato a rottura facendo registrare una pressione di scoppio di 720 bar, contro un desiderato di progetto di 700 bar.

Alla luce dei test fatti, si può concludere che lo studio del cilindro oleodinamico oggetto di questo articolo ha dimostrato la fattibilità

del componente in materiale composito, con una riduzione complessiva del peso di circa il 20 % (40 % sulla sola camicia).

Il componente è stato ridisegnato tenendo conto dei problemi specifici del composito e dei vincoli tecnologici necessari alla sua effettiva produzione di serie.