

POLITECNICO DI TORINO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA MECCANICA**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**Progettazione mediante analisi FEM di un
sistema di taglio ausiliario per una macchina
waterjet**

Relatore:

PROF. ANDREA MURA

Candidato:

MAURIZIO NADDEO

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Introduzione

La progettazione classica nelle aziende che si occupano di fare ricerca e sviluppo o innovazione di nuovi prodotti si basa su una logica di “tentativi ed errori”, in cui si realizza un prototipo che viene utilizzato per le successive fasi di testing. Tale modello viene modificato fino a quando non si raggiungono i target prefissati. Questo approccio impatta notevolmente sul costo di sviluppo del prodotto poiché si determina un processo di revisione che in alcuni casi può risultare lungo e complesso.

Per questi motivi le aziende, negli ultimi anni, hanno utilizzato strumenti di analisi e simulazione già nella fase preliminare della progettazione. La valutazione di scenari multipli e differenti e le conseguenti scelte prese a monte del processo di progettazione, in un ambiente virtuale, consentono un risparmio dei costi di materie prime, del tempo di impegno delle macchine e del personale, ottenendo un miglioramento della qualità e della produttività. Nel presente lavoro si è utilizzato lo strumento dell’analisi agli elementi finiti per simulare il comportamento statico di un sistema ausiliario di taglio idroabrasivo implementato su una macchina waterjet esistente, al fine di incrementarne le prestazioni di lavoro.

Nel capitolo 1 si è fatto riferimento all’azienda CTI Foodtech s.r.l. presso cui questa tesi è stata sviluppata, descrivendo la tipologia di macchine prodotte e i mercati in cui essa opera.

Nel capitolo 2 è stata descritta l’evoluzione storica del getto d’acqua ad alta pressione e l’utilizzo nei vari ambiti industriali

Il capitolo 3 si concentra sul waterjet presente in azienda mettendo in evidenza le caratteristiche tecniche e i nuovi obiettivi di funzionamento richiesti.

Nel capitolo 4 è stato descritto come è stato realizzato il modello CAD del sistema ausiliario di taglio mediante Solidworks e successivamente sono state analizzate le azioni dovute al funzionamento in esercizio nel rilevare criticità o problematiche di vario genere utilizzando Solidworks Simulation. Particolare attenzione è stata posta alla descrizione del modello di calcolo della forza di reazione dovuta al getto d’acqua idroabrasivo facendo

riferimento alla letteratura presente. La progettazione effettuata è stata implementata e validata nell'ambiente del programma di analisi FEM che ha permesso di apportare le dovute correzioni durante la fase di sviluppo del prodotto.

In ultimo sono state effettuate le verifiche sugli apparati di movimentazione (guide a ricircolo di sfere e servomotori) per determinare eventuali variazioni significative o criticità rispetto al funzionamento originale del waterjet.

CAPITOLO 1 - L'AZIENDA CTI FOODTECH S.r.l.

CTI FoodTech è un'azienda che produce macchinari per l'industria di trasformazione alimentare, in particolare denocciolatrici di pesche e albicocche e vende linee complete per la lavorazione. CTI FoodTech è il secondo produttore di denocciolatrici per pesche per numero di unità installate nel mondo, infatti, sono oltre 600 le macchine installate e funzionanti negli stabilimenti di aziende di trasformazione industriale della frutta nei cinque continenti; attualmente detiene il secondo posto al mondo tra i produttori di macchine denocciolatrici di pesche per numero di unità installate. Con i macchinari prodotti dall'azienda vengono processati ogni anno **6 miliardi** di pesche, che rappresentano circa il 40% della produzione mondiale di pesche lavorate



In oltre 30 anni di attività, l'azienda ha depositato un considerevole numero di brevetti in numerosi Paesi del mondo, che la posizionano come una realtà all'avanguardia nel campo della lavorazione industriale della frutta.

In particolare nel settore della denocciolatura delle pesche, CTI FoodTech ha introdotto sul mercato **tecnologie rivoluzionarie**, come l'orientamento automatico continuo, il riconoscimento ottico e la manipolazione

automatica. Grazie a tali innovazioni e alle partnership con player mondiali del settore dell'elettronica e dell'automazione industriale, CTI FoodTech ha contribuito ad innalzare il livello tecnologico del mercato della produzione di macchine per la lavorazione della frutta. [1]

1.1 L'impianto produttivo

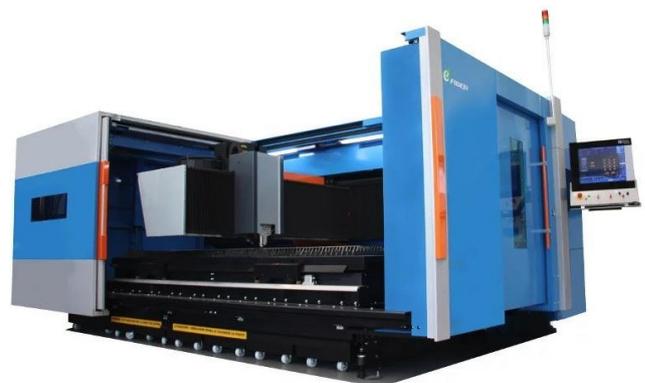


La sede principale si trova nella zona industriale di Salerno e al suo interno sono presenti gli uffici commerciali, quelli tecnici e i reparti produttivi. Infatti presso questo stabilimento vengono prodotti e assemblati i componenti che daranno vita alle denocciolatrici automatiche.

Le dotazioni al servizio dei vari reparti sono:

Taglio laser

La macchina installata ha una potenza laser fino a 4000 W e può tagliare lamiere di dimensioni 1500x3000 mm in acciaio inox fino ad uno spessore di 12 mm e ferro fino ad uno spessore di 20 mm.



Reparto carpenteria

Sono presenti stazioni di saldatura TIG, con operatori patentati.

Reparto di calandratura lamiera fino allo spessore di 2 mm, larghezza 1 m, raggio minimo 80 mm.

Assemblaggio telai e realizzazione carter

Reparto Piegatura

Si possono piegare particolari di lunghezza fino a 3 metri: garantendo il rispetto delle tolleranze e della qualità di prodotto.



Centri lavoro CNC

Sono presenti 3 centri di lavoro a controllo numerico a 3 e 5 assi in cui vengono realizzati i componenti delle macchine



Taglio a getto d'acqua

Con tale macchina vengono tagliati diversi tipi di materiale, anche quelli estremamente resistenti, riflettenti e non conduttori: dall'acciaio al titanio alla fibra di carbonio, materiali compositi, vetro.



1.2 Macchine prodotte



La **denocciolatrice di pesche mod. 320APA-E** è la diretta evoluzione del mod. 320APA, sulla quale è stato implementato un sistema elettronico gestito da un controllore a logica programmata (PLC).

La macchina allinea lungo la linea di sutura e denocciola pesche di tipo “freestone” e “clingstone” con una velocità meccanica di 352 frutti al minuto.



La **denocciolatrice di albicocche modello CTI-1000** e modello **CTI-1200**, orienta, denocciola e divide in due l'albicocca. Queste macchine lavorano fino a 1200 frutti al minuto nella versione a 6 canali e fino a 1000 frutti al minuto nella versione a 5 canali, a seconda delle condizioni del frutto.

L'utilizzo è per la produzione di albicocche dimezzate, per i cibi in scatola o surgelati. Sono realizzate in acciaio inox e hanno bisogno di poca manutenzione durante la stagione



La **denocciolatrice di avocado modello 300-AVC** alimenta e denocciola avocado piriformi a una velocità meccanica fino a 280 frutti al minuto. I frutti vengono convogliati nell'alimentatore. Un sistema di shuffle feeder posiziona e orienta i frutti in verticale, individualmente, negli alveoli delle placche portafrutto. Nella fase di taglio, due coltelli tagliano i frutti dall'alto e dal basso. Successivamente un espulsore

espelle il nocciolo separando i due mezzi frutti. Il telaio e tutti gli elementi a contatto con il prodotto sono realizzati in acciaio inox AISI 304 o in plastica food grade.



La Multi Fruit Coring è progettata per produrre mezzi frutti di elevata qualità destinati ai segmenti di fascia alta del mercato food.

La macchina è in grado di rimuovere separatamente dal frutto il nocciolo contenente il nocciolo e suoi frammenti, alla velocità di 320 frutti al minuto. Grazie al sistema di orientamento continuo, la macchina posiziona automaticamente il torsolo rispetto al frutto prima di rimuoverlo correttamente

CAPITOLO 2 – IL TAGLIO A GETTO D’ACQUA

2.1 Evoluzione storica

L’acqua è capace di infiltrarsi nel suolo in modo naturale e scavare la roccia ad una velocità che certamente non è di interesse per la tecnica. Tuttavia, la capacità dell’acqua di penetrare all’interno delle fratture e tra gli spazi intergranulari della roccia, porta molti vantaggi soprattutto nella coltivazione di depositi friabili. Infatti, già in tempi antichi, Plinio descrive nel libro “La scienza naturale” la costruzione di canali (*corrugi*), che portavano l’acqua in bacini artificiali presso le zone ricche di minerale aurifero. Quando i bacini (lungi circa 70 metri e profondi oltre 3), erano pieni, veniva aperta una piccola uscita, e il torrente che ne veniva fuori dilavava le pareti della montagna e trascinava in pianura l’oro che veniva poi recuperato. In questo modo i Romani procedevano nella coltivazione dei giacimenti auriferi in Spagna. Agricola (XVI secolo) fa notare che con il tempo tale tecnica venne portata in Germania da minatori italiani. Con la rivoluzione industriale, grazie all’introduzione della pompa idraulica manuale, i minatori gallesi e polacchi poterono modificare quest’arte. Tale pratica arrivò nel Nuovo Continente a seguito della corsa all’oro del 1849. Nel 1852 in California si ebbe lo sviluppo della tecnica del “booming”: Chalbot e Matteson costruirono un sistema pompa-tubo-ugello per dilavare la roccia tenera contenente l’oro dai lati della collina (Summers e Mazurkiewicz 1991). Il tubo era lungo circa 12 metri adattato con un ugello di ottone. Le applicazioni, tuttavia, erano limitate da restrizioni sulla disponibilità dei depositi in superficie. Le esperienze citate accesero l’interesse a livello mondiale. Nei primi anni cinquanta la Consolidation Coal Co. compì una serie di prove sul campo negli U.S.A. utilizzando un getto generato dalla pressione di 100 MPa. Si vide come la tecnologia era idonea in ambienti polverosi. A causa del grande consumo d’acqua (2500 ÷ 3000 l/min), che poneva alcune restrizioni nel caso del carbone, le progettazioni si spostarono verso tecnologie waterjet ad alta pressione e piccola portata.

Negli anni sessanta l'applicazione di questi sistemi a 150 MPa, a una grande varietà di giacimenti minerali, venne effettuata da ingegneri minerali in Germania, Russia, Polonia, Inghilterra, Cina e U.S.A. Nel 1964-1965 ingegneri polacchi e russi condussero prove industriali in miniere in sottoterraneo adoperando una lancia *waterjet* applicata alla macchina di scavo. Durante gli anni settanta furono numerose le attività in cui vennero utilizzati getti a percussione e cavitanti generati a $100 \div 150$ MPa allo scopo di taglio, estrazione, perforazione e pulitura di vari tipi di materiali. Oggi i getti d'acqua sono impiegati in diverse operazioni minerarie, sia a giorno che in sottoterraneo. In Inghilterra i giacimenti caolinici e negli U.S.A. i depositi a fosfati della Florida vengono regolarmente coltivati con *monitor* a grande gittata. Diversi sono gli esempi, soprattutto in Europa, di abbattimento del carbone con sistemi idraulici. L'interesse della ricerca applicata per il taglio con acqua ha registrato un notevole aumento negli ultimi quaranta anni, man mano che la tecnologia meccanica (e idraulica) mettevano a disposizione materiali e attrezzature che potessero lavorare a pressioni elevate. Conseguentemente la tecnologia trova impiego corrente nel campo della pulitura, per lavori di demolizione, modifica delle strutture in calcestruzzo, taglio di svariati materiali, dalla carta ai metalli.

2.2 Utilizzi del getto d'acqua

Le applicazioni di tali tecnologia sono legate alle caratteristiche dei getti, dal tipo, dalla pressione, dalla portata, dalla presenza o meno di additivi o abrasivi.

Tabella 1 - Valori di pressione e portata nei vari campi di applicazione del getto d'acqua

Pressioni di esercizio [MPa]	Portata [l/min]	Utilizzo
7	20	Lavaggio automobili
7	3800	Coltivazione carbone
14-140	8-76	Lavaggio industriale

70	38-190	Taglio e frantumazione in miniera
200-410	4-8	Taglio industriale
200-690	40-75	Rottura con cannoni ad acqua
1000	variabile	Applicazioni speciali

2.2.1 Ingegneria mineraria

I getti in pressione sono stati utilizzati inizialmente soprattutto nella coltivazione del carbone (idroescavazione). Il taglio della roccia divenne veramente attuabile quando all'alta pressione poté essere combinata l'azione meccanica di un utensile, mentre i getti d'acqua stazionari per il taglio ebbero una più lenta evoluzione. Infatti negli anni settanta si riuscì a dimostrare l'utilizzo dei getti ad alta pressione per il taglio del granito, sebbene le prime macchine non erano capaci di tagliare i blocchi nelle dimensioni richieste dalle operazioni a valle dell'estrazione. Nel 1984 venne costruito nei pressi della University of Missouri-Rolla (USA) un complesso megalitico simile a quello di Stonehenge. Un'altra applicazione del waterjet nell'ingegneria mineraria è quella del dragaggio, ovvero l'escavazione di sedimenti sott'acqua. Utilizzando un getto ad una pressione di circa 7 MPa con ugello da 20 mm, si realizzano fori profondi più di 1,5 m in circa tre minuti. La principale applicazione in questo campo comunque riguarda la rimozione di materiali incoerenti sottomarini, in modo da scoprire il minerale utile che viene poi aspirato mediante pompa a suzione.

2.2.2 Pulitura industriale

Il lavaggio in pressione comincia la sua storia nel mondo dell'industria con la pulitura a vapore agli inizi di questo secolo. Successivamente il vapore venne usato per potenziare getti di acqua calda, e con lo sviluppo delle pompe e dei macchinari si ottennero getti guidati per la pulitura industriale.

Già trent'anni fa la Shell ne faceva uso nei suoi impianti di raffinazione del petrolio. Gli impianti di pulitura sono molto semplici, pur esistendo in molte varianti, il modello base consiste in una piccola pompa, che eroga l'acqua alla lancia mediante un lungo tubo flessibile ad alta pressione. Mediante una leva di comando l'operatore fa fluire l'acqua attraverso l'ugello. La pressione del getto è variata secondo la necessità, mentre la sua portata è regolata dal diametro dell'ugello. È da notare che la bassa forza di reazione del getto d'acqua torna a vantaggio dell'operatore. Dal momento che le operazioni di pulizia riguardano la rimozione di materiale (depositato o incrostato) da ampie superfici, per velocizzare il lavoro si fa uso di getti a ventaglio. Un'altra soluzione per migliorare il lavoro di pulitura (soprattutto nella rimozione di idrocarburi), consiste nell'usare getti d'acqua caldi oltre gli 85 °C. Il calore però viene fornito all'acqua solo dopo che essa è uscita dalla pompa per evitare problemi di cavitazione (l'acqua entra nella pompa alla temperatura di circa 49 °C). Nell'industria del lavaggio delle automobili o di superfici verniciate in genere, si fa uso di getti d'acqua con additivi chimici, che hanno lo scopo di abbassare la tensione superficiale favorendo l'asportazione della sporcizia. Naturalmente il fatto che l'impatto dell'acqua sulla superficie duri una frazione di millesimo di secondo, porta al fatto che gli additivi devono essere applicati sulla superficie prima dell'arrivo del getto. Più recentemente, nelle operazioni di pulizia, viene fatto uso di getti a bolle cavitanti e getti abrasivi.

2.2.3 Ingegneria civile

In tale ramo industriale l'uso più diffuso del getto d'acqua è indirizzato alla rimozione dell'asfalto e del cemento danneggiato dalle strutture.

Con il miglioramento della tecnologia, l'ingegneria civile ha sfruttato la tecnica dei getti d'acqua a suo vantaggio anche per altre applicazioni: attualmente si inietta in pressione un mix di cemento in fori eseguiti in precedenza per migliorare la tenuta della struttura. Tale tecnica è tuttora utilizzata nello scavo delle gallerie secondo il metodo NATM, dove delle strette colonne di cemento vengono poste quasi orizzontalmente in linea con

la direzione del tunnel, in modo da creare un tetto di protezione prima dell'avanzamento dello scavo.

2.2.4 Usi militari

È noto che i rifiuti radioattivi vengono spesso messi a dimora in miniere sotterranee di sale; tuttavia, a causa di una serie di ragioni, questi rifiuti devono essere spostati. Spesso però i contenitori risultano contaminati e, pertanto, l'operazione di rimozione deve essere eseguita necessariamente con l'ausilio di robot. Grazie alla sua bassa forza di reazione il getto d'acqua ha la capacità di effettuare il taglio del metallo per realizzare una finestra attraverso la quale i rifiuti possono essere rimossi (Summers 1994.).

La tecnica del taglio a freddo dei metalli senza generazione di scintille è stata estesa per realizzare la "dismissione" di arsenali militari (grandi proiettili e missili con testata tradizionale o nucleare) utilizzando getti abrasivi per tagliare l'ogiva e asportando la sostanza pericolosa con lavaggio ancora eseguito con getto d'acqua. Il concetto della guida robotizzata è applicato anche al caso dello smantellamento di centrali nucleari obsolete per la rimozione selettiva delle sostanze radioattive che vengono raccolte in contenitori e smaltite. Un'ultima importante applicazione riguarda le operazioni di risanamento dei campi minati nelle quali il getto viene impiegato per la localizzazione delle mine e il loro brillamento a distanza in condizioni di sicurezza.

2.2.5 Usi nel campo della medicina

La possibilità di controllare la potenza del getto usando pressioni limitate e diametri molto piccoli (fino a 0,05 mm) consente l'uso del *waterjet* per applicazioni mediche e chirurgiche, soprattutto quando è richiesta un'azione selettiva su organi di diverse caratteristiche di resistenza. Sono ben note le applicazioni, in campo dentistico e per la frantumazione dei calcoli, ma esistono altri esempi che dimostrano l'interesse della tecnica per scopi curativi. Un esempio è la pratica dell'iniezione intramuscolare con siringhe a microgetto senza ago, tecnica che permette produttività eccezionali. Altro

utilizzo è dato dalle operazioni al fegato per l'asportazione di tumori, che ora vengono correntemente eseguite con bisturi *waterjet*, con il vantaggio di incidere a freddo i tessuti senza danneggiarli, lasciando inalterata la rete dei vasi (Ciccu e Massacci 1993).

2.3 Il sistema waterjet

Negli ultimi anni il sistema di taglio con getto d'acqua, con o senza l'aggiunta di abrasivo, sta riscuotendo sempre maggiore successo. L'azione di taglio è dovuta all'energia specifica posseduta da un getto d'acqua coerente eventualmente addizionato da particelle di materiale abrasivo. Nella tecnologia con sola acqua (*Waterjet, WJ*) è il fluido ad alta velocità a realizzare il taglio, mentre nella tecnologia con getto idroabrasivo (*Abrasive Waterjet, AWJ*), il getto d'acqua ha unicamente lo scopo di trasferire la propria quantità di moto alle particelle di abrasivo, la cui azione erosiva provoca l'asportazione di materiale. Il fluido viene portato ad alte pressioni (mediamente circa 400 MPa, ma si possono raggiungere anche i 900 MPa) tramite un sistema di pompaggio (intensificatore) ed inviato poi alla testa di taglio, ove si ha la conversione dell'energia di pressione in energia cinetica. È possibile prevedere l'installazione di un accumulatore per smorzare le fluttuazioni del segnale di pressione in uscita dall'intensificatore. La conversione energetica è ottenuta per mezzo di un orifizio in zaffiro sintetico del diametro pari a 0,2-0,5 mm (ugello primario), in uscita dal quale l'acqua possiede, in funzione del livello di pressione, velocità fino a 900 m/s circa; l'energia specifica del getto risulta elevata dato che il diametro dell'orifizio è dell'ordine di decimi di millimetro. Nel caso AWJ l'abrasivo viene aggiunto al fluido in una camera di miscelazione posta a valle dell'orifizio, aumentando notevolmente le sue capacità di taglio. In uscita dalla camera, il getto non presenta la coerenza necessaria ai fini di un taglio efficace: un getto non focalizzato comporta infatti una diminuzione della capacità di taglio, in quanto l'energia totale viene distribuita su di un'area maggiore e, quindi, con un'energia specifica inferiore. Al fine di ovviare a tale inconveniente, a valle della camera di miscelazione viene montato un focalizzatore in carburo di tungsteno che riduce la divergenza del getto. Le caratteristiche che rendono

la tecnologia AWJ utilizzabile su svariati materiali come materiali metallici, plastici, vetrosi, ceramici e lapidei, sono:

- è un taglio “freddo”, che non altera termicamente il materiale;
- è un taglio “pulito”, tale cioè da non lasciare sfridi o bave evidenti;
- è un taglio “svincolato” dove cioè oggetto tagliente e manufatto da tagliare non sono a contatto.

In particolare, nel campo dei lapidei la tecnologia waterjet ha assunto un'importanza notevole dato che le tecnologie tradizionali, soffrono di fortissime limitazioni dovute sia alla fragilità e alla durezza di tali materiali, sia alla impossibilità di effettuare tagli curvilinei o di forme geometriche particolari. La tecnologia WJ/AWJ è oramai da svariati anni (anni '70-'80) entrata a far parte del mondo dell'industria e della ricerca, tanto da non poter più essere considerata una tecnologia alternativa. L'utilizzo di questa tecnologia copre svariati settori industriali, da quello aeronautico a quello automobilistico a quello delle semplici lavorazioni meccaniche; in particolare sta facendo il suo ingresso, nella fase sperimentale, come tecnica per la deformazione plastica (idroforming) o incrementando quella già nota della rimozione di strati superficiali (decoating).

Il sistema è composto da:

- impianto di trattamento dell'acqua:
- pompa ed intensificatore di pressione
- sistema di taglio
- vasca di raccolta
- sistema di movimentazione e controllo

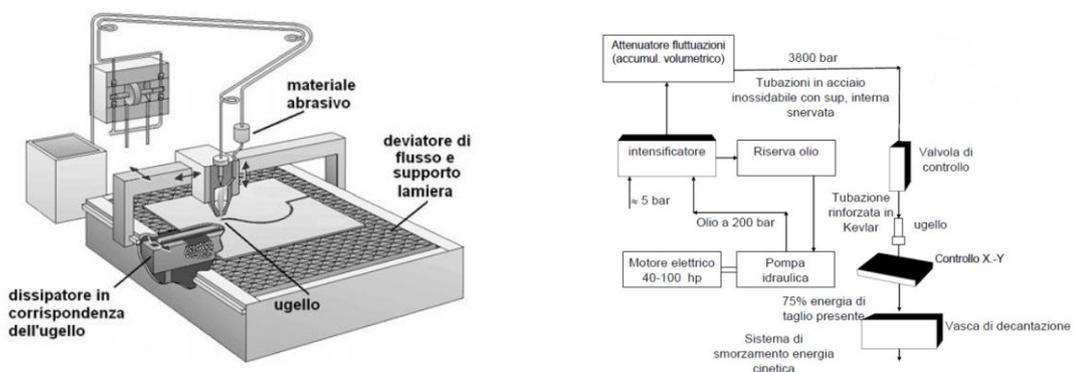


Figura 1 - Schema elementare di un sistema waterjet [11]

2.3.1 Impianto di trattamento dell'acqua

L'acqua per il funzionamento del waterjet è prelevata dalla rete idrica e deve quindi essere depurata per eliminare tutti quegli elementi, come i sali di magnesio e calcio, che possono ridurre la portata dell'acqua nelle tubature, usurare l'ugello e il focalizzatore o causare la corrosione delle parti metalliche.

2.3.2 Pompa e sistema idraulico

Il sistema di pompaggio ha il compito di comprimere l'acqua proveniente dal serbatoio principale fino alla pressione di esercizio. È costituito dal motore, da una pompa e da un elemento detto *intensificatore* che consente di innalzare la pressione dell'acqua di circa 10-40 volte ed ottenere in uscita una velocità del getto superiore di 2.5-3 volte quella del suono.

2.3.3 Intensificatore

È il nucleo principale di un sistema waterjet ed è costituito da tre circuiti fondamentali [3]:

- *Il circuito a bassa pressione dell'olio.* Una pompa a cilindrata variabile, dotata di compensatore di pressione, aspira olio da un serbatoio e portato alla pressione di funzionamento. Una parte viene inviato all'intensificatore di pressione che genera la forza sul pistone della camera dell'olio necessaria a creare, grazie al rapporto di intensificazione, l'altissima pressione nel circuito d'acqua. La restante parte agisce su di una valvola di regolazione capace di far variare la portata d'olio di ritorno alla pompa. Questo dispositivo consente quindi di regolare la pressione dell'olio in mandata.
- *Il circuito ad alta pressione dell'acqua* invece convoglia l'acqua all'intensificatore, ove si genera l'altissima pressione sfruttando il rapporto di intensificazione dei cilindri. L'acqua in pressione pronta per la lavorazione viene inviata alla testa di taglio. Fanno parte del circuito anche componenti importanti per il corretto funzionamento

del sistema quali l'accumulatore e lo scarico dell'acqua ad alta pressione.

- Il *circuito di raffreddamento dell'acqua* ha il compito di raffreddare l'olio che, in alcune parti del sistema e in alcune situazioni, si surriscalda notevolmente. Ciò accade soprattutto quando la pompa è in funzione ma lo spillo che regola l'uscita del getto dalla testa di taglio è in posizione di chiusura. In tale configurazione l'olio non riesce a trasformare l'energia di pressione in velocità cinetica del fluido in quanto il pistone dell'intensificatore staziona in una posizione di equilibrio generata dal bilanciamento delle forze di pressione dell'acqua e dell'olio. Di conseguenza, tutto l'olio che viene aspirato ritorna al serbatoio, attraverso il ramo di feedback, con una temperatura superiore a quella media. Nel condotto verso l'intensificatore, l'olio invece staziona in pressione senza trovare via di uscita, aumentando così la sua temperatura. Per evitare di scaricare al serbatoio l'olio di ricircolo ad una temperatura elevata sono previsti due scambiatori di calore.

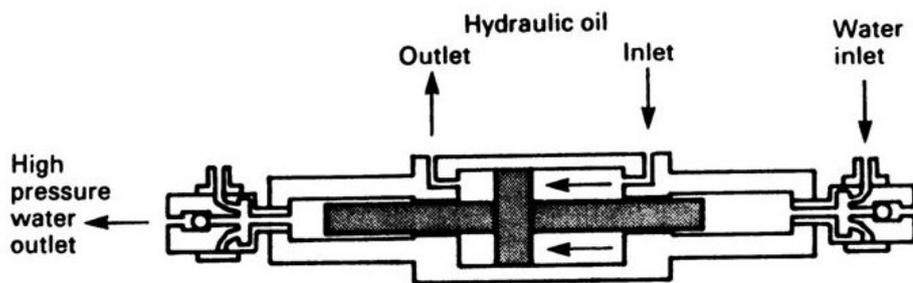


Figura 2 - schema di un intensificatore idraulico

L'intensificatore è costituito quindi da due circuiti uno con olio e il secondo contenente l'acqua che deve essere mandata in pressione. Per realizzare ciò si deve operare sulla pressione dell'olio che viene regolata da una pompa oleodinamica.

Analizzando l'equilibrio delle forze agenti sul pistone dell'intensificatore si ha:

$$P_{acqua} \cdot S_{acqua} = P_{olio} \cdot S_{olio}$$
$$P_{acqua} = \frac{S_{olio}}{S_{acqua}} \cdot P_{olio}$$

dove:

P è la pressione del fluido considerato

A è la sezione di passaggio del fluido

Il rapporto $\frac{S_{olio}}{S_{acqua}}$ è detto *fattore di intensificatore*. Il rapporto tra le sezioni di passaggio di acqua e olio è costante quindi agendo sulla pressione dell'olio si può regolare la pressione dell'acqua. A questo punto il fluido di lavoro viene inviato ad un serbatoio di accumulo che serve per regolarizzare ed uniformare la portata del fluido, poiché nella fase di compressione si generano fluttuazioni di pressione causate dall'interruzione del pompaggio nei punti di inversione del moto dei pistoni, dalle deformazioni delle tubature e dalla comprimibilità del fluido. Per evitare tale problematica alcuni waterjet utilizzano due intensificatori di pressione collegati in parallelo, ma che non operano in fase.

2.3.4 Sistema di taglio

Dal serbatoio mediante opportune tubature in grado di sopportare elevate pressioni, l'acqua viene inviata alla testa *di taglio*. Questa è costituita ad un ugello di opportuno calibro e da un condotto chiamato focalizzatore. Il getto che fuoriesce è nella maggioranza dei casi idroabrasivo ad una velocità supersonica, che viene diretto contro la superficie del pezzo da lavorare. Si determina così l'asportazione del materiale tramite un meccanismo di erosione.



Figura 3 - schematizzazione di una testa di taglio idroabrasiva e del meccanismo di asportazione del materiale

2.3.5 Vasca di raccolta

La sua funzione è quella di:

- dissipare l'energia residua posseduta dal getto (75% dell'energia iniziale)
- impedire riflessioni del getto verso gli organi della macchina
- ridurre la rumorosità
- accumulare i residui di materiale del pezzo lavorato e l'abrasivo per consentire il ricircolo e l'eliminazione

2.3.6 Sistema di controllo

I sistemi a getto d'acqua sono dotati di un sistema di *controllo numerico* che gestisce in maniera automatica le funzioni operative. La testa di taglio è guidata da un elaboratore elettronico che comanda la posizione dell'ugello sul bersaglio mediante un sistema di coordinate X -Y-Z. Inoltre, è possibile un interfacciamento della macchina con un sistema CAD-CAM che consente una maggiore automazione delle lavorazioni.

2.4 Vantaggi e svantaggi

Ci sono molti vantaggi della tecnologia waterjet (awj) rispetto alle tecniche di lavorazione tradizionali [4] :

- è un taglio a freddo (raramente si raggiungono i 100°C) e quindi il bordo non presenta deformazioni termiche o meccaniche
- si possono tagliare diversi tipi di materiale con spessori diversi
- richiede minimi sistemi di fissaggio del pezzo
- non occorrono utensili ausiliari
- le lavorazioni sono operazioni meccaniche di compressione ed erosione che non presentano marcate tensioni e la rugosità è bassa
- minimo spreco di materiale

Tra gli svantaggi:

- la vita media degli ugelli è estremamente ridotta
- il processo di taglio è rumoroso (85-95 dB) poiché la velocità dell'acqua all'uscita dall'ugello è supersonica
- i costi di investimento per l'acquisto dell'impianto sono elevati
- nonostante si abbia una perdita bassa di materiale durante il taglio, si producono dei rifiuti secondari formati da acqua, sostanza abrasiva e materiale derivante dal taglio. Occorre quindi prevedere un sistema di deposito e smaltimento di questi fanghi come rifiuto di lavorazione

Tabella 2 - Materiali e loro spessore massimo per taglio con waterjet

Materiale da tagliare	Spessore massimo [mm]
Gomma	130
Metallo multistrato	10
Materiale espanso	200
Polimeri	50
Cuoio	60
Legno	15
Acciaio inossidabile	100
Leghe di alluminio	120
Titanio	100
Marmo	140
Vetro	100
Rame - Bronzo	100

Tabella 3 - Prestazioni di taglio con getto idroabrasivo (Summers e Mazurkiewicz 1991)

Materiale	Spessore [mm]	Velocità di taglio [cm/s]	Diametro ugello [mm]	Pressione [MPa]
Acciaio inox	20,1	0,085	0,457-1,58	205
Titanio	31,8	0,762	0,457-1,58	205
Alluminio	25,4	0,085	0,457-1,58	205
Vetro per specchio	4,83	1,27	0,457-1,58	205
Pannelli in ceramica	0,71	0,085	0,457-1,58	205

CAPITOLO 3 - PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI TAGLIO AUSILIARIO

3.1 Descrizione della macchina esistente

La macchina waterjet presente in azienda è costituita da un robusto *basamento* saldato e trattato, il quale regge un *ponte mobile a sbalzo (trave)* che può essere equipaggiato con testa di taglio a 5 assi interpolati montata su un *carro* che può scorrere longitudinalmente e trasversalmente alla trave a sbalzo. Questa soluzione permette oltre al taglio di diversi spessori in posizionamento automatico anche il taglio di particolari curvi. La movimentazione è resa possibile da un sistema a pignone e cremagliera e guide rettificate con pattini a ricircolo di sfere. Tutte le parti meccaniche sono protette da carter in acciaio inox con labirinti multipli e soffietti impermeabili all'acqua e all'abrasivo.



Figura 4 - macchina waterjet presente in azienda

- **Vasca portapezzi**

La vasca è completamente staccata dal basamento della macchina: questa soluzione facilita le eventuali operazioni di manutenzione. È costruita in lamiera di acciaio inox AISI304 di spessore 3 mm con rinforzi e sui bordi gli appoggi della griglia. Il livello dell'acqua può essere variato tramite uno scolmatore regolabile posto all'interno della vasca. L'acqua nella vasca aiuta a ridurre la rumorosità del getto, mantenendo il livello sempre tra i 75 e 80 dB(A). La griglia di appoggio standard è composta da lamine a S con interasse 75 mm e spessore 2.5 mm. Il carico sostenibile della tavola è di 1000 kg/m² fino a un massimo di 4000 kg. Per supportare carichi maggiori sono fornibili sostegni speciali.

- **Sistema C.N.C. a 5 assi;**

I movimenti degli assi sono ottenuti con servomotori Brushless, privi di manutenzione, alimentati da servoazionamenti digitali per una migliore linearità di movimentazione alle basse velocità. I servomotori azionano i sistemi pignone e cremagliera. Le movimentazioni eseguite sono:

- Asse X - Traslazione eseguita dal ponte a sbalzo sulla lunghezza del basamento;
- Asse Y - Traslazione eseguita dal carro sulla lunghezza del ponte a sbalzo;
- Asse Z - Traslazione verticale eseguita dal carro;
- Asse B - Rotazione della testa birotativa intorno all'asse Z;
- Asse A - Rotazione della testa birotativa intorno all'asse X;

- **Testa di taglio**

La testa di taglio è di tipo KMT Autoline e rappresenta il sistema più evoluto attualmente disponibile sul mercato. Il focalizzatore è del tipo LONG LIFE. Le caratteristiche importanti sono il basso lavoro di manutenzione, il getto di taglio indirizzato con precisione, il prefiltro che protegge l'ugello. [5]



Specifiche tecniche	
Altezza complessiva	448 mm
Diametro ugello primario	0.17 mm
Diametro focalizzatore	0.54 mm
Peso	3 kg

- **Sistema di dosaggio abrasivo a clessidra**

È costituito da un serbatoio trasparente posto vicino alla testa di taglio. Un orifizio calibrato consente di dosare correttamente l'abrasivo. La testa di taglio verrà quindi alimentata da un serbatoio della capacità di 480 kg che permette un'autonomia di lavoro in automatico di 16 ore con consumo di 500 grammi al minuto. Il caricamento del materiale avviene senza interrompere il ciclo di taglio.



Figura 5 - clessidra per il dosaggio dell'abrasivo

- **Pompa e intensificatore**

La pompa installata è modello STREAMLINE SL-VI STD da 37 kW (50 CV) ed è progettata per la produzione flessibile nelle applicazioni ad acqua pura e con abrasivo. L'unità è dedicata ai tipi di lavori di taglio che richiedono pressioni di taglio fino a 3.800-4000 bar. Lo stantuffo tuffante dell'intensificatore è realizzato in materiale ceramico. Rispetto a uno metallico, presenta la superficie più dura e più levigata in maniera da resistere meglio all'usura, elimina le intaccature e aumenta la durata operativa della tenuta.



Specifiche tecniche	
Potenza nominale motore	37 kW / 50 CV
Intervallo di pressione	500 – 4000 bar
Portata max a pressione costante	4,3 l/min

Figura 6 - pompa installata con caratteristiche tecniche

- **Addolcitore acqua di taglio**

La sua funzione è quella di eliminare il calcare presente nell'acqua di taglio. Il ciclo di trattamento dell'acqua può essere volumetrico o temporizzato, a seconda della tipologia di acqua da trattare. È comunque sempre necessaria un'analisi chimica dell'acqua che verrà utilizzata.

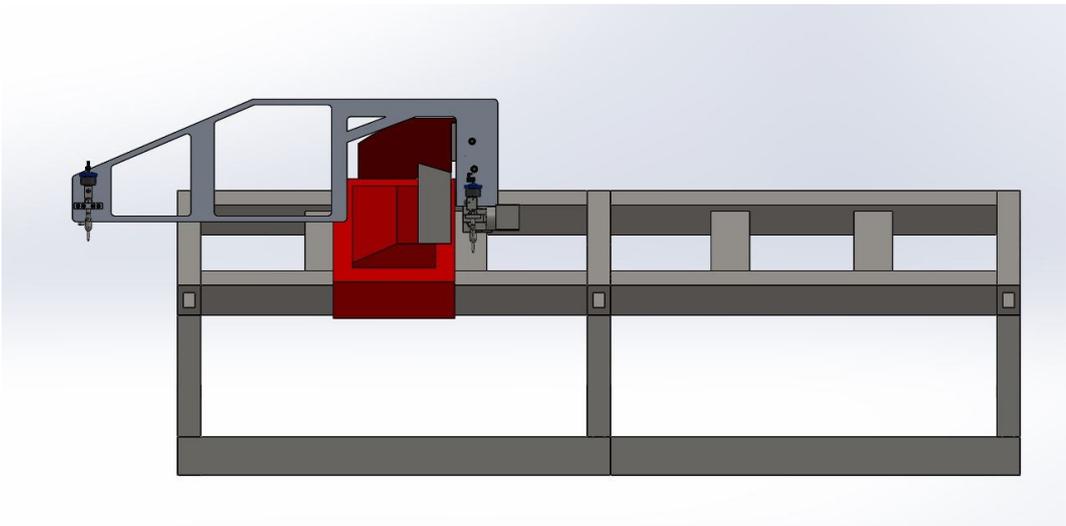
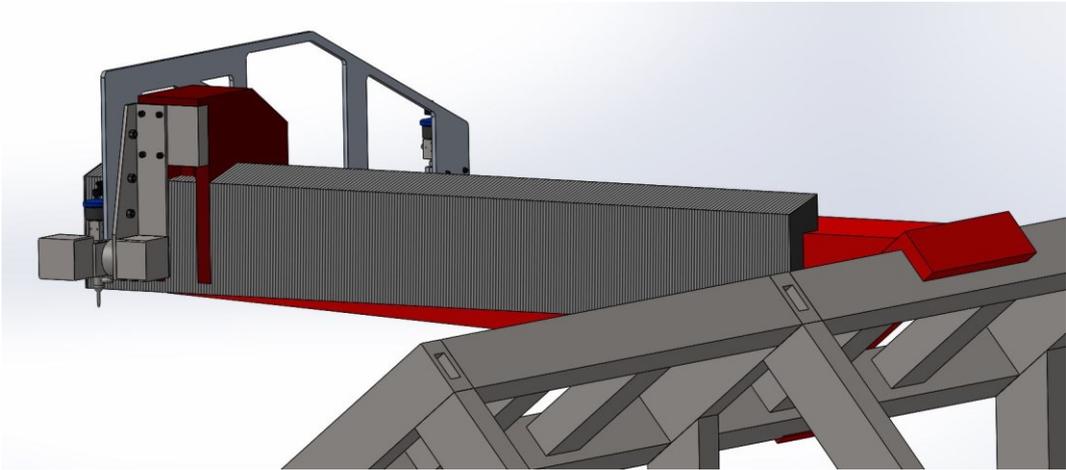
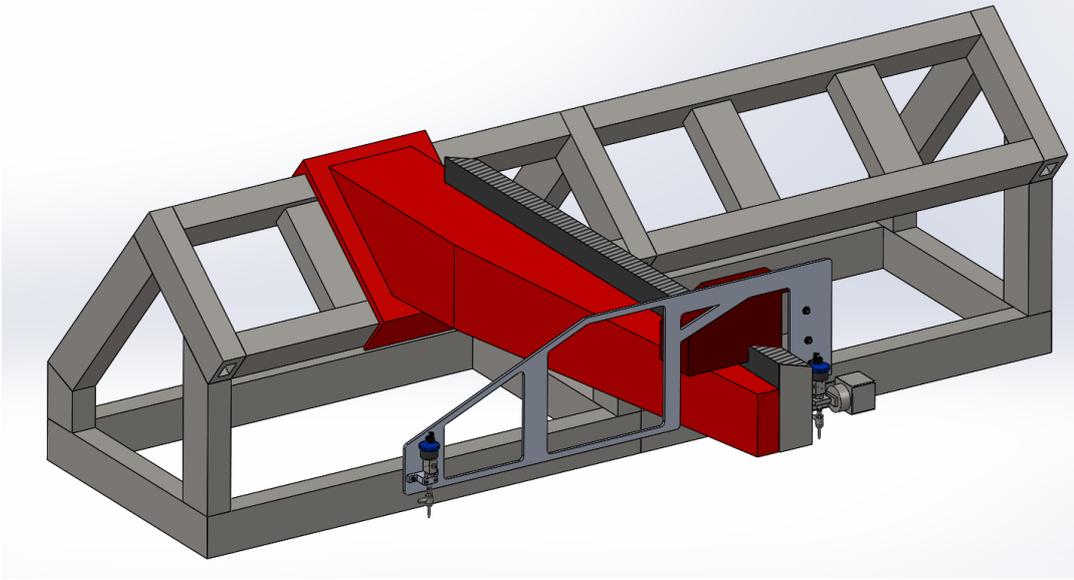
Tabella 4 - Caratteristiche tecniche del waterjet presente in azienda

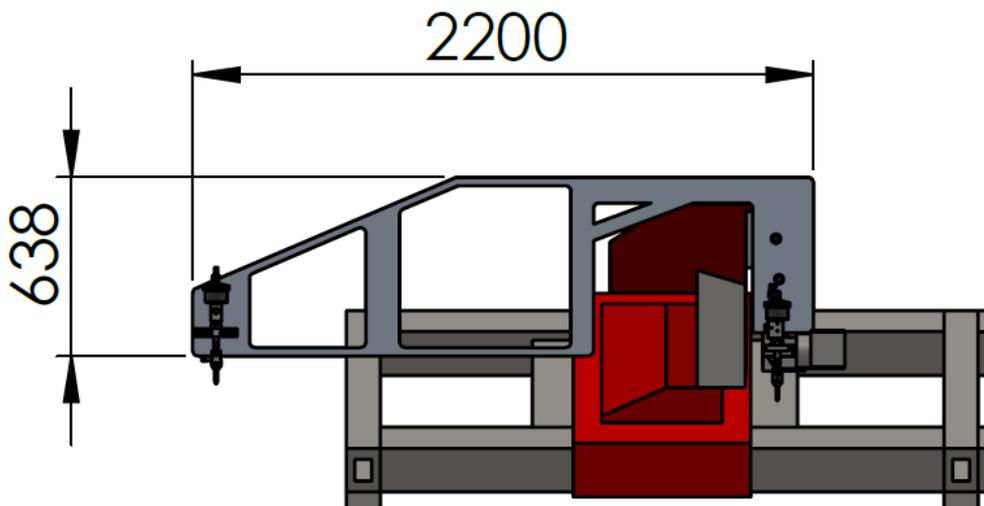
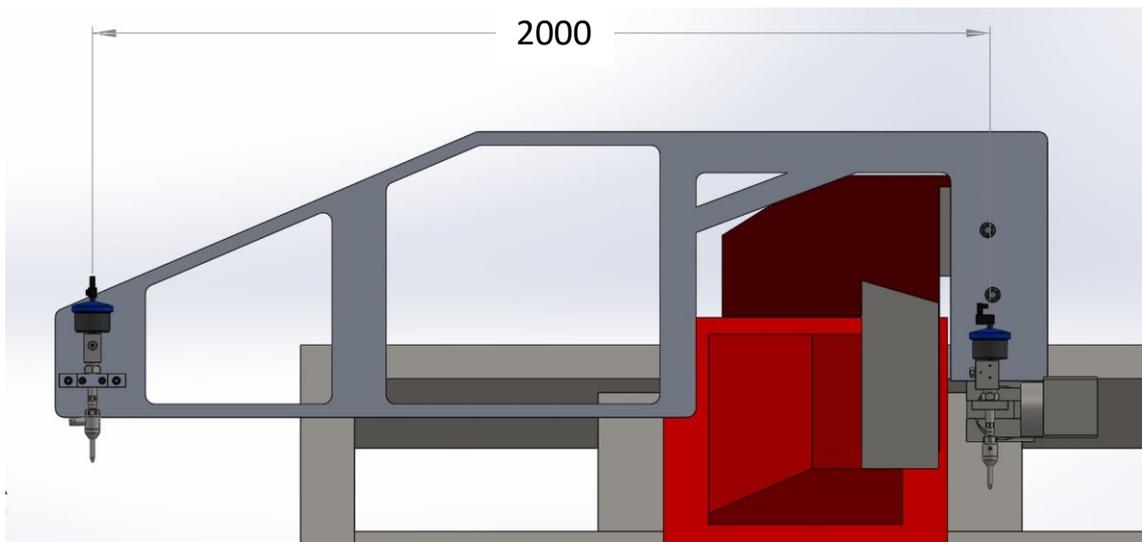
Struttura	Cartesiana a ponte sospeso		
Misure	Larghezza	4.100 mm	
	Profondità	4.450 mm	
	Altezza	2.375 mm	
Peso	Centro di lavoro	7.340 kg	
Assi - Velocità	Asse X	3.000 mm	20 m/min
	Asse Y	2.000 mm	20 m/min

	Asse Z	350 mm	20 m/min
Movimentazione	Motori	Servomotori brushless	
	Movimento	Pignone e cremagliere	
	Guide	Pattini a ricircolo di sfere	
Testa di taglio	5 assi di tipo KMT Autoline		
Vasca	3500 x 2200 x 640 mm		
Alimentazione	Elettrica	3 x 400V, 50Hz	
	Pneumatica	4 bar	
Potenza		45 kVA	

3.2 Nuovi obiettivi di funzionamento del waterjet

La macchina waterjet esistente consente la lavorazione e il taglio di componenti il cui ingombro massimo è di 3000 mm x 2000 mm x 350 mm. Il nuovo obiettivo di funzionamento è quello di estendere la dimensione massima lavorabile lungo l'asse del basamento (asse di lavoro X) fino a 5000 m lasciando invariate le altre quote. Per questa ragione si è pensato di introdurre un nuovo sistema di taglio che potesse lavorare in maniera complementare a quello esistente e sistemato su una nuova struttura di supporto montata a sbalzo sul carro mobile. Le movimentazioni originali lungo gli assi Y (traslazione del carro longitudinalmente alla trave) e lungo l'asse Z (escursione verticale della testa di taglio) rimangono invariate potendo così sfruttare il sistema di controllo della macchina. Le due teste di taglio (i cui ugelli sono allineati lungo l'asse X) si trovano così ad una distanza relativa di 2 metri. Si può, in questo modo, continuare ad utilizzare il sistema di controllo della macchina con l'unica variante dell'asse di lavoro X. Conseguentemente è stata anche modificata la vasca di raccolta e la griglia di supporto ai pezzi da lavorare, portando le dimensioni a 5500 x 2200 x 640 mm.





Dimensioni supporto testa di taglio

Lunghezza	2200 mm
Altezza	638 mm
Spessore	15 mm
Distanza relativa ugelli	2000 mm
Peso complessivo	21 kg

CAPITOLO 4 - ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI (FEM)

4.1 Fasi dell'analisi FEM

Lo studio di un problema strutturale viene risolto da un generico codice agli elementi finiti attraverso 3 fasi:

- *Pre-processing* : viene costruito il modello definendo la geometria che verrà riprodotta all'interno del software, le proprietà del materiale che andranno a simulare le caratteristiche fisico-meccaniche reali e la meshatura a partire dalla quale il programma risolve un certo numero di equazioni.
- *Solving* : è la fase vera e propria di risoluzione numerica del modello.
- *Post-processing*: vengono visualizzati i risultati elaborati a valle della risoluzione numerica.

4.1.1 *Pre-processing*

4.1.1.1 Preparazione del modello

In questa fase è stato riprodotto al cad un modello del waterjet esistente mediante una serie di misurazioni effettuate sulla macchina presente in azienda, in quanto non si aveva a disposizione il file da poter implementare direttamente nei software a disposizione. Per la modellazione è stato utilizzato Solidworks. A partire dal cad del waterjet e considerando gli ingombri a disposizione, è stato modellato il nuovo sistema di taglio ausiliario, costituito da una struttura da realizzare mediante taglio laser utilizzando le attrezzature presenti in azienda, la cui funzione è di supporto e guida per la nuova testa idroabrasiva su di esso montata. Come si può vedere dalla figura 7, la soluzione adottata consiste in un profilato sottile di 15 mm di spessore che viene ancorato per mezzo di 3 bulloni M16 all'angolare in acciaio presente sul carro mobile. Nel profilo è presente una sagoma a forma di "U capovolta" per evitare qualsiasi interferenza con la trave durante l'escursione della testa di taglio primaria lungo l'asse Z. Inoltre

sono stati ricavati degli “scarichi” per diminuire il peso complessivo. In questo modo il movimento della nuova testa di taglio può essere controllato dal pannello di comando originario in quanto le coordinate di lavoro lungo l’asse Y e l’asse Z rimangono invariate, mentre la coordinata X è traslata di 2 m rispetto al sistema di riferimento originario.

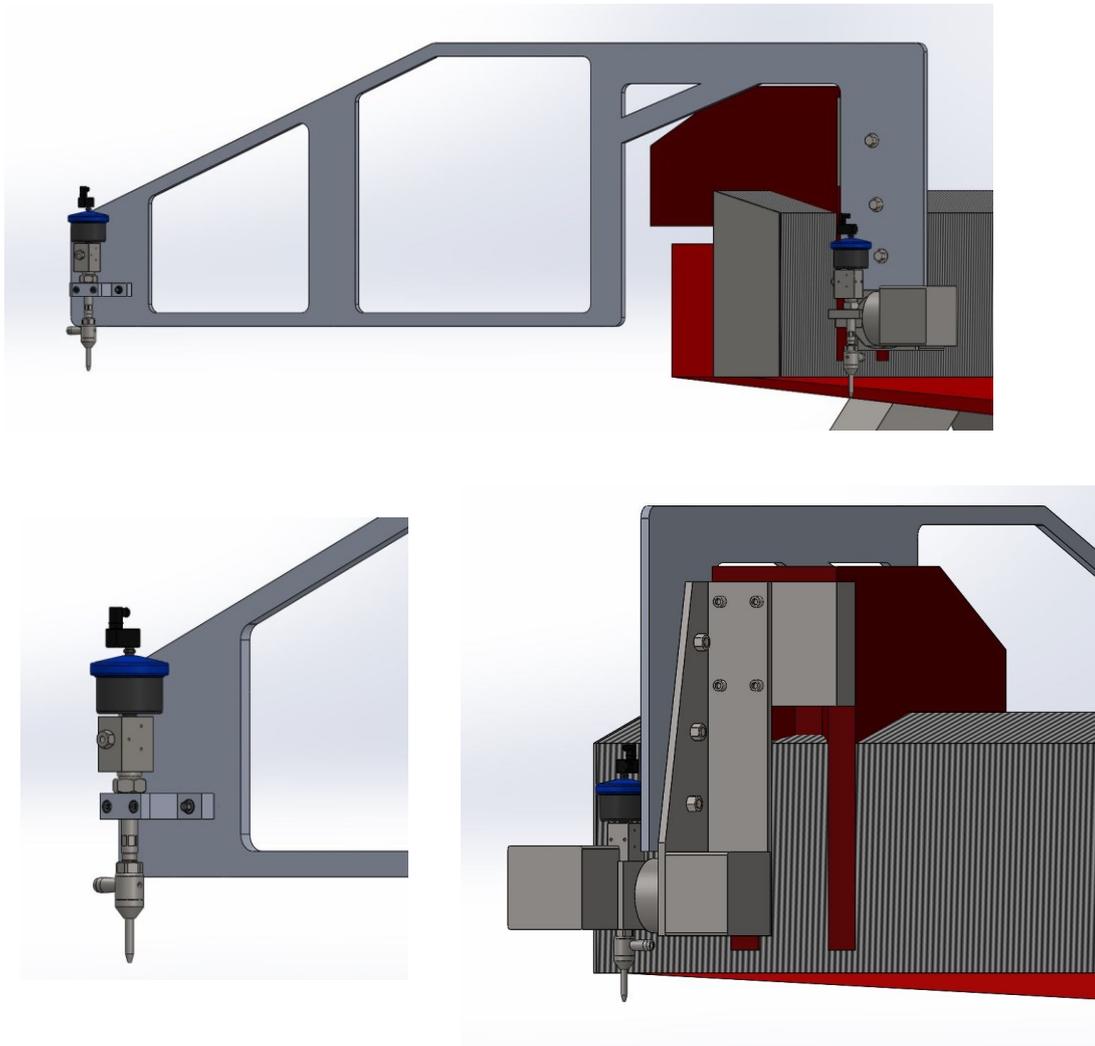


Figura 7 - supporto per il nuovo sistema di taglio con un particolare dell’ancoraggio al carro mobile

Definito il modello al cad, questo è stato trasferito nell’ambiente di lavoro di Solidworks Simulation per la vera e propria analisi utilizzando il metodo agli elementi finiti (FEM)

4.1.1.2 Scelta del materiale

Al fine di limitare il più possibile il peso della nuova struttura introdotta, è stato scelto un alluminio 6063 che presenta

- buona resistenza meccanica
- buona resistenza alla corrosione
- buona lavorabilità alle macchine utensili

Tabella 5 - Caratteristiche alluminio 6063

Modulo elastico	69000	MPa
Coefficiente di Poisson	0,33	
Modulo di taglio	25800	MPa
Densità di massa	2700	kg/m ³
Resistenza alla trazione	240	MPa
Snervamento	215	MPa
Coefficiente di espansione termica	2,34 e ⁻⁰⁵	/K
Conducibilità termica	209	W/(m·K)

4.1.1.3 Vincoli e zone di contatto

Per quanto riguarda i vincoli è stato introdotto un vincolo esterno di fisso sulle facce a contatto con il pavimento dei profili inferiori del basamento in quanto quest'ultimo viene fissato al pavimento su di una pedana in legno.

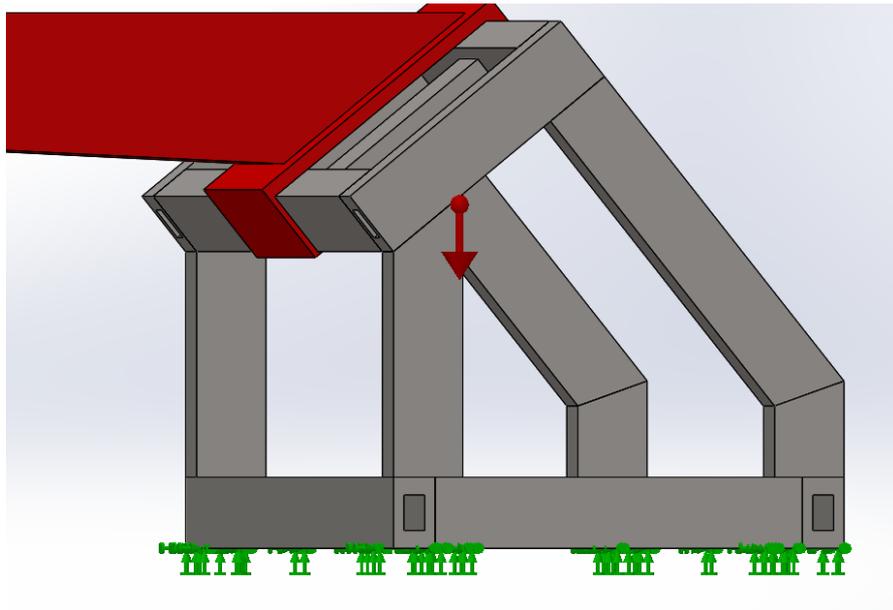


Figura 8 - vincolo di fisso sulla parte inferiore del basamento

In Simulation è possibile specificare le condizioni di interazione tra le entità geometriche a livello globale, a livello di componente o a livello locale. Nell'interazione di *unito* (*bonded contact*) il programma collega le entità *Gruppo 1* e *Gruppo 2* (*sorgente e destinazione*) definite nel Property Manager come se fossero saldate. Per le entità geometriche con mesh indipendente, l'unione viene applicata con equazioni dei vincoli. È inoltre possibile unire i componenti applicando nodi mesh comuni ai loro contorni. In questo caso, i componenti che hanno nodi mesh comuni ai loro contorni effettuano la mesh come un unico corpo. L'interazione di *contatto* (*no penetration*) impedisce l'interferenza tra le entità, ma consente la formazione di giochi.

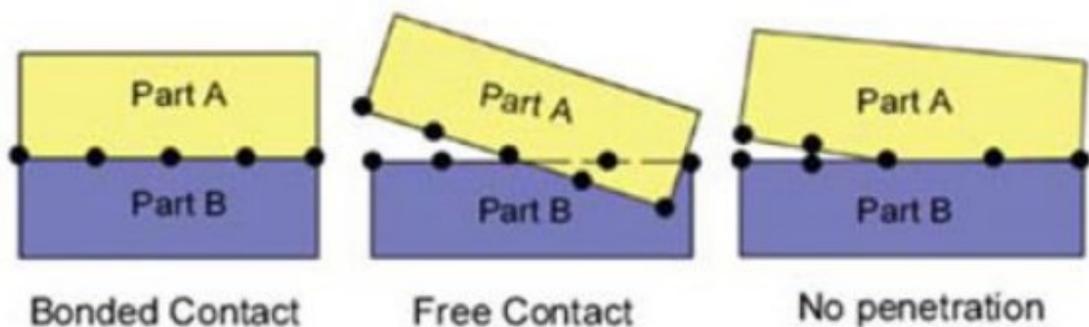
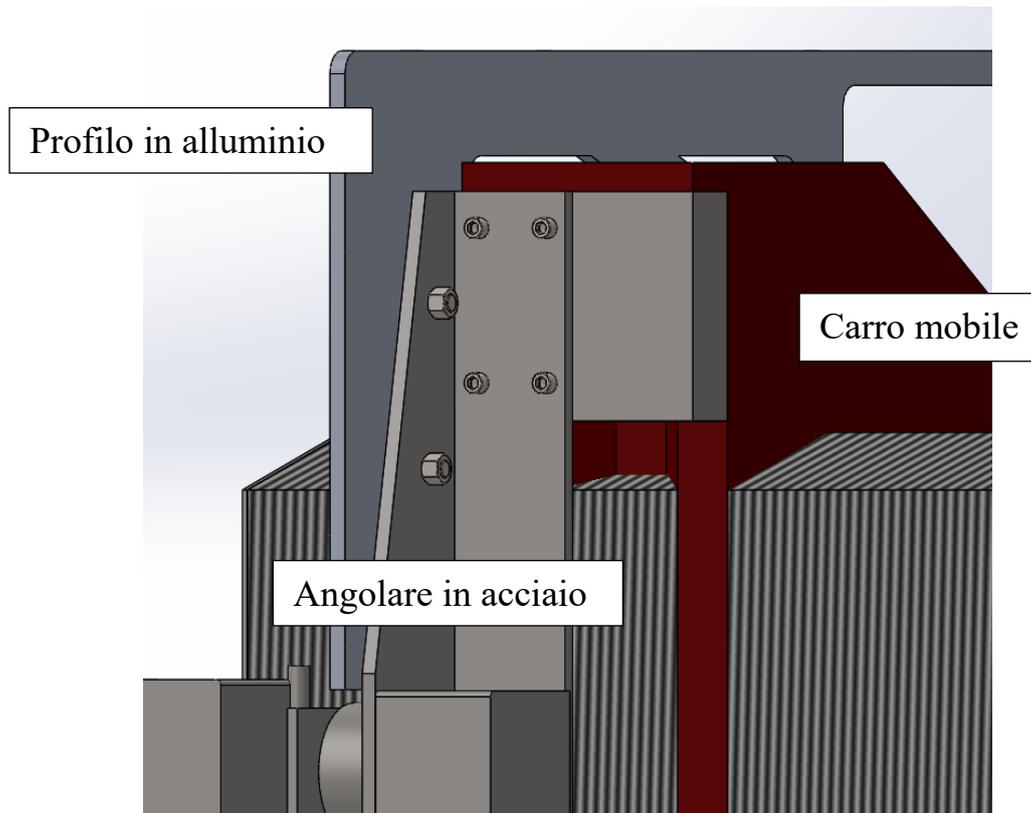


Figura 9 – Condizioni di interazione

Nel modello creato è stato utilizzato il riconoscimento automatico delle interazioni tra le parti, mentre è stata introdotta l'interazione di contatto:

- tra la faccia interna del profilo in alluminio e la faccia esterna dell'angolare in acciaio.
- tra il binario interno del carro e la piastra in acciaio che consente l'escursione della testa di taglio originaria lungo l'asse Z



4.1.1.4 Connettori

Un connettore è un meccanismo che definisce come un'entità (vertice, bordo, faccia) è collegata ad un'altra entità o al suolo. L'uso dei connettori semplifica la modellazione perchè in molti casi, è possibile simulare il comportamento desiderato senza la necessità di creare la geometria dettagliata o definire le condizioni di contatto. Tra i connettori disponibili è presente quello *bullone*. Simulation modella tale connettore come un abbinamento tra un elemento trave per rappresentare l'inclinazione del bullone e l'elemento barra rigida per rappresentare il dado e le parti della testa. L'uso dei connettori semplifica la modellazione perchè in molti casi, è possibile simulare il comportamento desiderato senza la necessità di creare

la geometria dettagliata o definire le condizioni di contatto. Infatti, nell'ambiente FEM sono state riconosciute in automatico le connessioni bullonate create nella modellazione solida attraverso l'utilizzo della libreria toolbox ed anche tutti i relativi parametri: posizione geometrica, tipo di filettatura, dati di resistenza del materiale e precarico applicato.

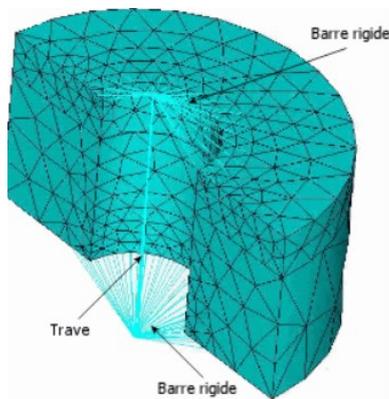


Figura 10 - schematizzazione fem dei connettori in Simulation – parametri connettori bullone

Connettori

Tipo: Dividi

21 mm

24 mm

16 mm

Tipo di connessione: Distribuito Rigida

Materiale: Libreria (Acciaio in lega) Personalizza

SI

E: 210000000000 N/m²

0,28

α: 1,3e-05 /Kelvin (K)

Includi massa

0 kg

Dati di resistenza

Area di sollecitazione a trazione conosciuta

Area di sollecitazione a trazione calcolata

156.6685106 mm²

Resistenza del bullone: 620422000 N/m²

Fattore di sicurezza: 2

Precarico: SI

Assiale Torsione

14580.08862526 N

4.1.1.5 Carichi

Esistono diversi tipi di analisi che possono essere effettuate in Simulation. L'analisi statica è uno di questi: calcola gli spostamenti, le deformazioni e le sollecitazioni in un corpo o in una struttura sotto l'effetto di carichi esterni applicati (forze, momenti, temperature, gravità, ecc.) e rispetto ai materiali e vincoli predefiniti (infixi e connessioni). È noto, infatti, che quando un corpo è sottoposto a carichi esterni, si deforma. L'effetto si diffonde su tutta la struttura perturbando l'equilibrio iniziale. L'analisi lineare aiuta ad evitare il collasso a causa di un elevato stress e permette di calcolare gli spostamenti, le forze di reazione, le deformazioni, le sollecitazioni e il fattore di sicurezza. Per effettuare ciò devono essere verificate alcune ipotesi:

- *Carichi statici*: i carichi vengono applicati lentamente e gradualmente e quando raggiungono i loro valori massimi rimangono costanti. Per essere più precisi, si considera che l'intervallo di tempo per il quale il carico aumenta di valore è maggiore di un terzo del periodo della frequenza fondamentale del corpo. [6]
- *Assunzione di linearità*: la relazione tra i carichi e la risposta è lineare, cioè, se raddoppiando i valori di tutti i carichi, anche le risposte (sollecitazione, spostamento, deformazione, reazioni, ecc.) raddoppieranno. Per convalidare questa ultima ipotesi, si deve avere che:
 - La *legge di Hooke* è applicabile e la sollecitazione è proporzionale alla deformazione.
 - Tutte le *proprietà del materiale*, come Modulo di Young e rapporto di Poisson, rimangano costanti durante l'analisi.
 - I vincoli e i carichi *non cambiano* durante la deformazione.

L'analisi scelta per il caso in esame è di tipo lineare.

Sono state prese in considerazione due differenti configurazioni ritenute le più gravose:

- *caso 1* : quando la testa di taglio si trova all'estremità della trave (massima escursione lungo l'asse Y) e alla massima escursione Z, che corrisponde alla posizione di macchina ferma e quindi la struttura in alluminio che regge la nuova testa di taglio è soggetta solo al suo peso.
- *caso 2* : quando la testa di taglio si trova all'estremità della trave (massima escursione lungo l'asse Y) e alla massima distanza di stand-off dal pezzo (fissata in 20 mm). In questo caso il braccio ausiliario è soggetto alla forza di reazione dovuta al getto idroabrasivo che fuoriesce dalla testa di taglio;

In entrambe le situazioni, la trave si considera in posizione di mezzzeria tra i due profili quadrati del basamento lungo l'asse di traslazione X (per massimizzare l'effetto flessionale)

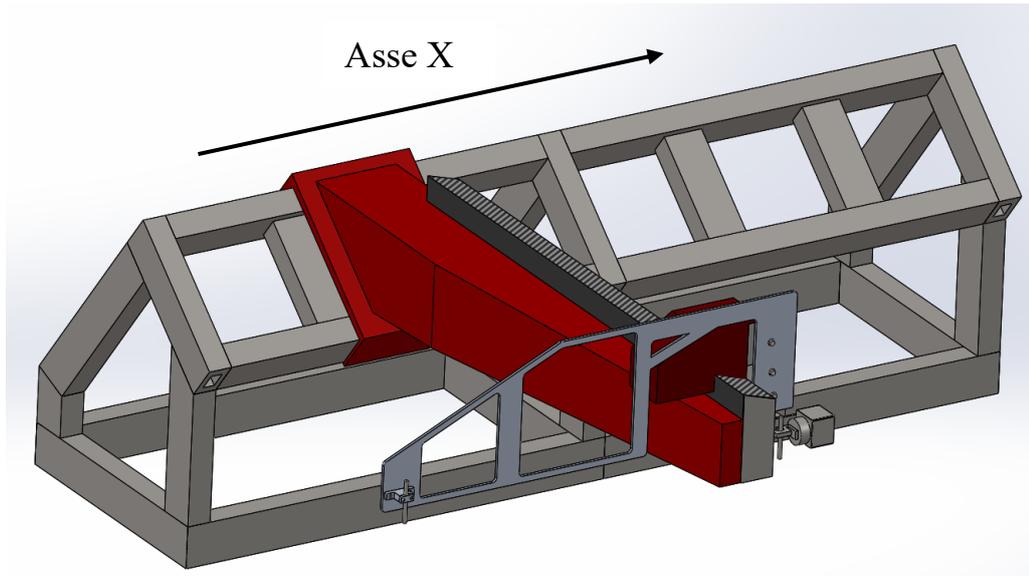


Figura 11 - modello del waterjet originale

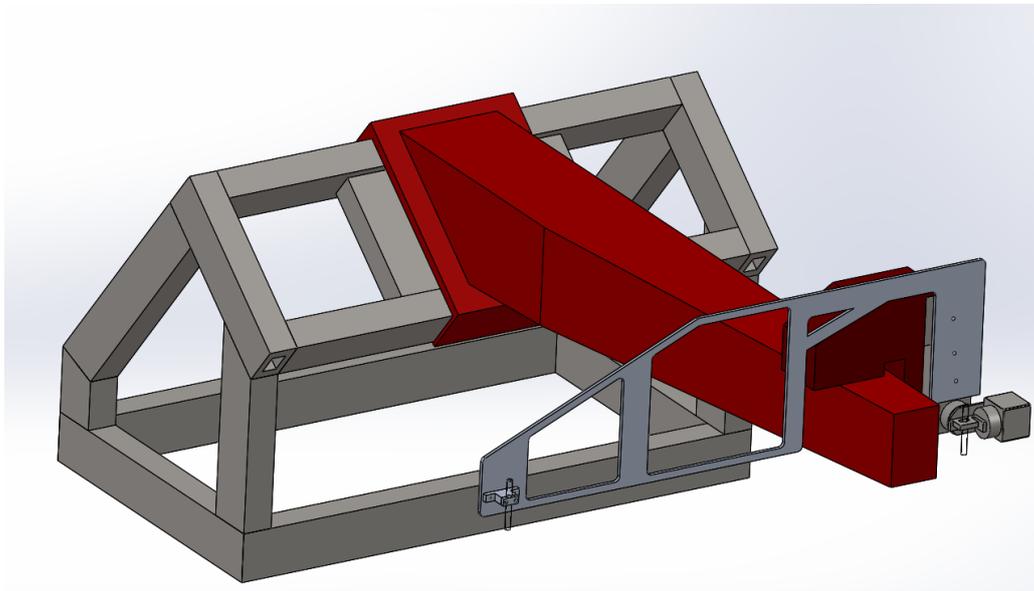


Figura 12 - modello del waterjet con il basamento ridotto e la trave situata in mezzeria per la successiva analisi con Simulation

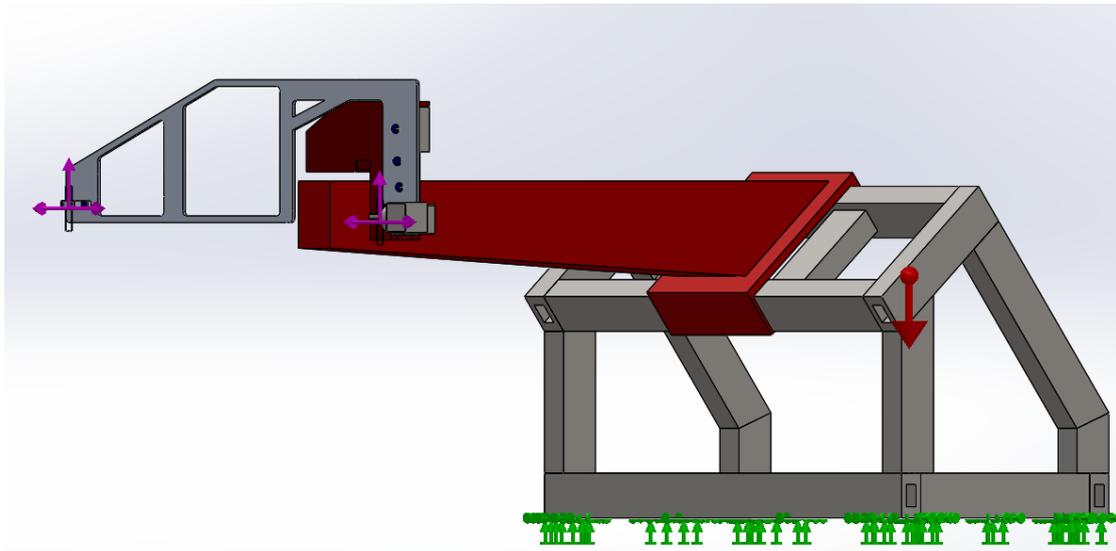


Figura 13 - modello del waterjet nell'ambiente di Simulation in cui sono evidenti i vincoli imposti

Forza di reazione caso 2 – modello di calcolo

La testa di taglio è composta da una valvola attuatrice ad alta pressione, l'ugello primario, la camera di miscelazione dell'abrasivo e il focalizzatore.

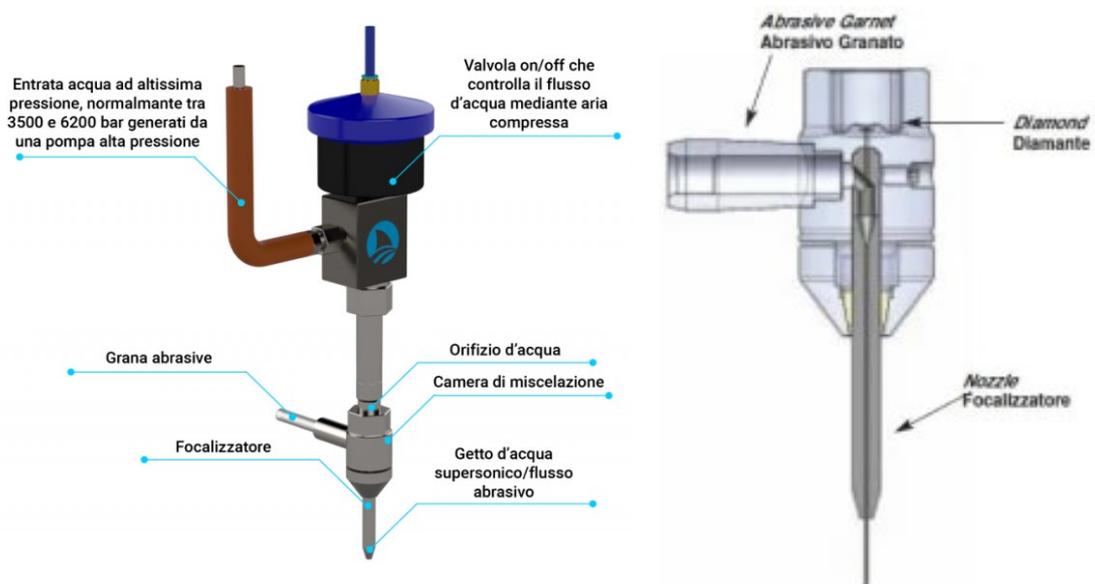


Figura 14 - componenti di una testa di taglio idroabrasiva

Quando viene attivata dal sistema di controllo, la valvola di regolazione viene contemporaneamente aperta per dar luogo al flusso di acqua ad alta

pressione la quale, attraverso l'ugello primario, fluisce verso la camera di miscelazione in cui crea un'area di vuoto parziale (per effetto Venturi) che attira le particelle di abrasivo al suo interno. Si ottiene così la miscelazione completa di acqua e particelle abrasive che attraversano ad alta velocità il tubo focalizzatore in direzione dell'ugello di lavoro.

L'ugello primario ha il compito di trasformare l'energia di pressione posseduta dall'acqua in uscita dalla pompa in energia cinetica. È costituito da una struttura in acciaio inossidabile con un inserto in zaffiro sintetico che presenta caratteristiche di facile lavorabilità ed elevata resistenza all'usura. Il diametro del foro, in dipendenza delle applicazioni industriali, può variare tra 0,05 mm e 0,40 mm. La vita utile di un ugello varia tra le 30 e le 200 ore a seconda che l'acqua della rete idrica venga trattata o meno.

Il compito dell'ugello primario è quello di trasformare l'energia di pressione in energia cinetica, pertanto è necessario analizziamo la teoria fluidodinamica che sta alla base di questa trasformazione. Ipotizzando l'acqua come un fluido incompressibile e stazionario, è possibile applicare l'equazione di Bernoulli che esprime il principio di conservazione dell'energia tra l'ingresso 1 e l'uscita 2 dell'ugello primario:

$$\frac{p_1^2}{\rho_w g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2^2}{\rho_w g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Dove:

p è la pressione del fluido [MPa]

ρ_w è la densità del getto d'acqua [kg/m³]

h è la quota piezometrica [m]

g è l'accelerazione di gravità [m/s²]

v è la velocità del fluido [m/s]

Nell'ipotesi in cui si assume nulla la velocità a monte, si considerino pressioni relative alla pressione ambiente e trascurabili le variazioni di quota e si considerino, inoltre, le perdite energetiche attraverso un opportuno "coefficiente di efficienza" ξ si ottiene:

$$v_2 = \xi \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}}$$

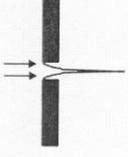
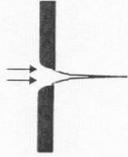
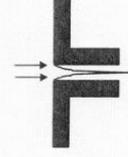
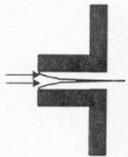
			
$\xi=0.61$ Forma a spigolo	$\xi=0.98$ Forma arrotondata	$\xi=0.80$ Tubo corto	$\xi=0.51$ Tubo inverso

Figura 15 - valori assunti dal coefficiente ξ

In realtà, poiché le pressioni operative sono elevate, l'acqua non può essere considerata incompressibile e quindi la sua densità non può essere ritenuta costante. Per tale ragione la velocità si calcola in maniera più corretta con la seguente espressione:

$$v = \sqrt{\frac{2L}{\rho_0(1-c)} \left[\left(1 + \frac{P}{L}\right)^{1-c} - 1 \right]}$$

dove con ρ_0 si indica la densità alla pressione atmosferica e $L=300$ MPa e $c=0.1368$. Nel caso del waterjet presente in azienda la pressione è 400 MPa e a tale pressione il coefficiente di comprimibilità dell'acqua è circa il 12%. Come si può notare della figura 16, l'errore sulla velocità che si commette è molto contenuto.

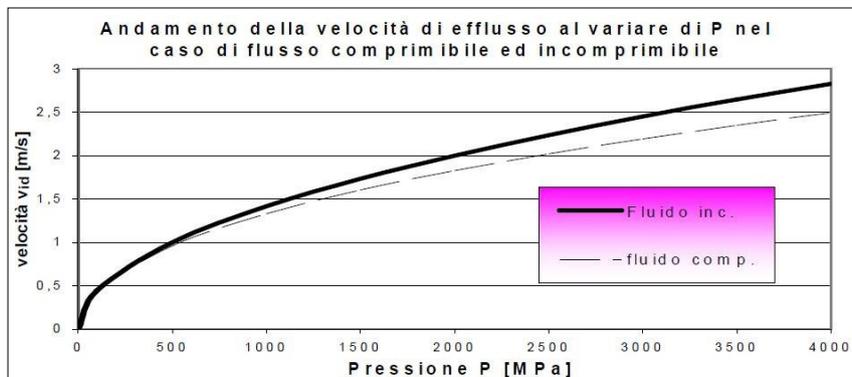


Figura 16 - velocità di efflusso per fluido comprimibile e incompressibile al variare della pressione

All'uscita dell'ugello primario, il fluido ad alta velocità penetra nella camera di miscelazione che ha la funzione di trasferire parte della quantità di moto dell'acqua alle particelle di abrasivo. In questa zona si crea una depressione (dovuta alle alte velocità raggiunte), pertanto l'abrasivo viene aspirato all'interno per effetto Venturi. Il getto uscente dalla camera di miscelazione è costituito da 3 fasi: acqua, abrasivo ed aria. Risulta inoltre marcatamente non coerente con conseguente diminuzione dell'energia specifica disponibile per il taglio. Si utilizza allora un altro elemento, il *focalizzatore* che ha dunque il compito di rifocalizzare il getto in uscita dalla camera di miscelazione. Poiché è attraversato da acqua e abrasivo ad alta velocità, viene realizzato con materiali altamente resistenti all'usura, infatti nella parte alta del focalizzatore, dove le particelle di abrasivo entrano con differenti angoli e velocità, si ha asportazione per erosione. Nella zona inferiore, invece, le particelle di abrasivo strisciano contro le pareti provocando usura per abrasione. Tipicamente il materiale utilizzato è carburo di tungsteno. Operativamente, è necessario effettuare una corretta collimazione tra getto d'acqua e focalizzatore, per evitare che quest'ultimo si usuri eccessivamente e per ottenere un taglio di migliore qualità. Per quanto riguarda le dimensioni si hanno lunghezze di circa 50, 75, 100 mm e diametro di 0.8, 1.0, 1.2 mm; diametri maggiori consentono di lavorare con portate di abrasivo più elevate. La durata del focalizzatore dipende in ampia misura dalle condizioni di lavoro: l'usura viene, ad esempio, accentuata impostando distanze di *stand-off* ridotte o portate di abrasivo elevate (indicativamente 80 – 120 ore).

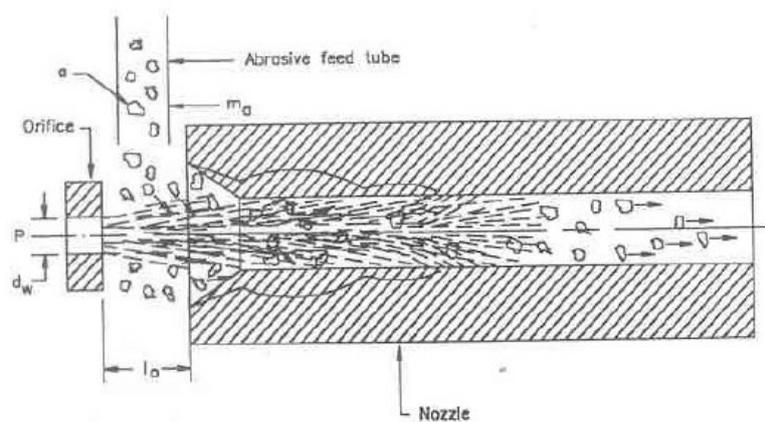


Figura 17 - comportamento delle particelle all'interno del focalizzatore



Figura 18 - - sezione usurata di un focalizzatore

La portata volumetrica totale all'uscita del focalizzatore si può esprimere come somma dei tre contributi:

$$Q_{tot} = Q_{aria} + Q_{acqua} + Q_{abrasivo}$$

Impostando un bilancio della quantità di moto tra l'ingresso della camera di miscelazione e l'uscita del focalizzatore si ha:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aria}v_{aria} + \dot{m}_{abrasivo}v_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua}v_{ugello,primario} \\ = (\dot{m}_{aria} + \dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua})v_{focaliz.} \end{aligned}$$

La densità dell'aria è minore di quella dell'acqua e quindi la portata massica può essere ritenuta nulla. La velocità del materiale abrasivo all'ingresso della camera di miscelazione è trascurabile (l'abrasivo viene aspirato per effetto Venturi). Si ottiene quindi:

$$\dot{m}_{acqua}v_{ugello,primario} = (\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua})v_{focaliz.}$$

Assumendo:

$$r = \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{\dot{m}_{acqua}}$$

Si ottiene la *velocità del getto idroabrasivo* [7]

$$v = \eta \frac{v_{ugello,primario}}{(1 + r)}$$

η è “coefficiente di quantità di moto trasferita” ed è un parametro che tiene conto della quantità di moto trasferita durante la miscelazione tra l’acqua e le particelle di abrasivo all’interno della camera di miscelazione e nel tubo focalizzatore. Per basse portate di abrasivo tale parametro è compreso tra 0.6 e 0.81. A questo punto si può calcolare:

- portata massica di acqua all’uscita dell’ugello primario

$$\dot{m}_{acqua} = \rho_w \pi C_D \frac{d_n^2}{4} v_2$$

dove:

ρ_w è la densità dell’acqua alla pressione ambiente pari a $1000 \frac{kg}{m^3}$

d_n è il diametro dell’ugello primario [m]

C_D è il coefficiente di efflusso che tiene conto della contrazione che subisce il getto all’uscita dell’ugello. Tale parametro è minore di 1

v_2 è la velocità del fluido all’uscita dell’ugello primario

- forza del getto idroabrasivo

$$F = \dot{m}_t \cdot v$$

Dove con $\dot{m}_t = \dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua}$

Nel caso in esame si ha:

Pressione	P	4000 bar
Densità acqua alla pressione ambiente	ρ_w	$1000 \frac{kg}{m^3}$
Coefficiente di efficienza	ξ	0.98
Coefficiente di efflusso	C_D	0.9
Diametro ugello primario	d_n	0.17 mm
Coefficiente di quantità di moto trasferita	η	0.98

Portata massica abrasivo (imposta dalla clessidra)	$\dot{m}_{abrasivo}$	$500 \frac{g}{min}$
Velocità all'uscita dell'ugello primario	v_2	$876.54 \frac{m}{s}$
Portata massica acqua	\dot{m}_{acqua}	$0.018 \frac{kg}{s}$
Velocità del getto idroabrasivo	v	$484.5 \frac{m}{s}$
<u>Forza del getto idroabrasivo</u>	<u>F</u>	<u>12.71 N</u>

Quindi la forza di reazione che insiste sul braccio progettato durante il funzionamento che si andrà a inserire nell'analisi sarà di 15 N.

4.1.2 Processing

Meshing

Nei problemi fisici reali il comportamento del continuo è definito da equazioni differenziali alle derivate parziali che sono estremamente difficili da risolvere in termini matematici, infatti la variabile che si considera (spostamento, temperatura, pressione, ecc..) è funzione di ciascun punto del dominio di definizione. Discretizzare il dominio di integrazione in un determinato numero di sottodomini elementari consente di passare da un modello fisico ad uno numerico. Infatti, tale processo porta alla riduzione del numero dei gradi di libertà della struttura (che nel continuo sono infiniti) ad un numero finito di gradi di libertà considerando appunto un numero finito di punti nel continuo discretizzato. Le equazioni differenziali che governano il problema verranno risolte in maniera approssimata considerando i nuovi domini di integrazione. Il nucleo dell'analisi agli elementi finiti consiste nel dividere il corpo solido oggetto dello studio in piccoli pezzi, con forme semplici chiamati *elementi finiti* (Clough 1960) che sono collegati tra loro in punti comuni detti *nodi*. [8]

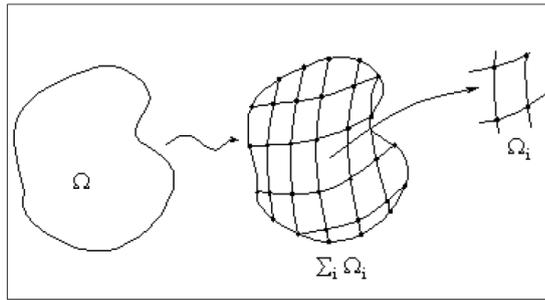


Figura 19 - discretizzazione del continuo

Il metodo agli elementi finiti (FEM) predice l'evoluzione del modello sulla base delle equazioni che descrivono il comportamento di ciascun elemento. Il processo di divisione del modello in elementi è detto *meshing* e durante questa fase Simulation genera due diversi tipi di elementi:

- Elemento solido lineare : è un elemento tetraedrico definito da 4 nodi collegati attraverso 6 spigoli dritti. Le funzioni di spostamento sono polinomi del primo ordine. La mesh generata è di *qualità bozza*.
- Elemento solido parabolico : è un elemento tetraedrico a 10 nodi situati nei vertici e nei punti medi degli spigoli che hanno forma parabolica. Infatti, anche le funzioni di spostamento sono del secondo ordine. La mesh che ne deriva è di *qualità alta*

L'utilizzo di una tipologia di elemento rispetto all'altra e la sua dimensione, influenza fortemente l'accuratezza dell'analisi.

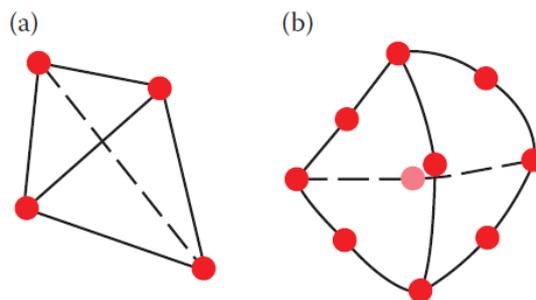


Figura 20 - (a) Elemento solido lineare – (b) Elemento parabolico

La creazione della mesh è una fase fondamentale nell'analisi di un progetto. Il mesher automatico genera una mesh basata su una dimensione di elementi globale, su una tolleranza e un controllo mesh locale. Il controllo mesh

consente di specificare dimensioni diverse degli elementi per componenti, facce, bordi e vertici. Il software calcola la dimensione globale degli elementi per il modello prendendone in considerazione il volume, l'area di superficie e altri dettagli geometrici. La dimensione (o densità) della mesh generata (numero di nodi e di elementi) dipende dalla geometria e dalla dimensione del modello e degli elementi, dalla tolleranza di mesh, dal controllo mesh e delle impostazioni di contatto. Simulation utilizza tre algoritmi per la generazione della mesh [9]:

- *Mesh standard* : attiva lo schema di mesh Voronoi-Delaunay per le operazioni di mesh successive.
- *Mesh basata su curvatura* : attiva lo schema di mesh basato sulla curvatura per le operazioni di mesh successive. Il mesher crea automaticamente una quantità maggiore di elementi nelle aree ad alta curvatura (senza la necessità di un controllo mesh). Il mesher basato su curvatura supporta la mesh di volume e superficie multi-thread per documenti di assiemi e parti multicorpo. Il mesher standard supporta solo la mesh di volume multi-thread.
- *Mesh basata su curvatura di blend*: attiva lo schema della basata su curvatura di blend. Questo mesher adatta automaticamente la dimensione dell'elemento alla curvatura locale della geometria per creare una ripetizione di mesh uniforme. Utile per i modelli che non sono riusciti a eseguire il mesher standard o basato su curvatura.

Inoltre, si possono impostare i seguenti parametri:

- *Dimensione massima elemento* : disponibile esclusivamente per mesher basati su curvatura. La dimensione di elemento massima viene usata per le delimitazioni con la curvatura più bassa.
- *Dimensione minima elemento*: disponibile esclusivamente per mesher basati su curvatura. La dimensione di elemento minima viene usata per le delimitazioni con la curvatura più alta.

Nel caso oggetto di studio, si è preferito usare la mesh basata sulla curvatura ed è stata fatta una prima analisi facendo scegliere in automatico la dimensione degli elementi. Il software suggerisce un valore di default basato sul volume e l'area della superficie del modello. Sono state condotte 3

iterazioni variando la dimensione massima degli elementi della mesh globale, in questo modo però si infittisce la maglia anche in zone di poco interesse ingegneristico in cui lo stato tensionale è basso. Per questo motivo nelle zone poco sollecitate è inutile raffinare il modello, comporterebbe solo un costo dal punto di vista computazionale al software. Quindi si è preferito utilizzare una dimensione della mesh diversificata per i vari componenti facendo un bilancio tra l'accuratezza dei risultati e il tempo di calcolo necessario alla soluzione. Definiti tutti i valori relativi alla mesh si procede alla fase di calcolo (FEA) e di risoluzione numerica delle equazioni mediante i solutori integrati nel software.

Dimensione mesh	
Basamento	40 mm
Trave	40 mm
Carro mobile	40 mm
Piastra di aggancio del braccio ausiliario	20 mm
Supporto ausiliario testa di taglio	20 mm

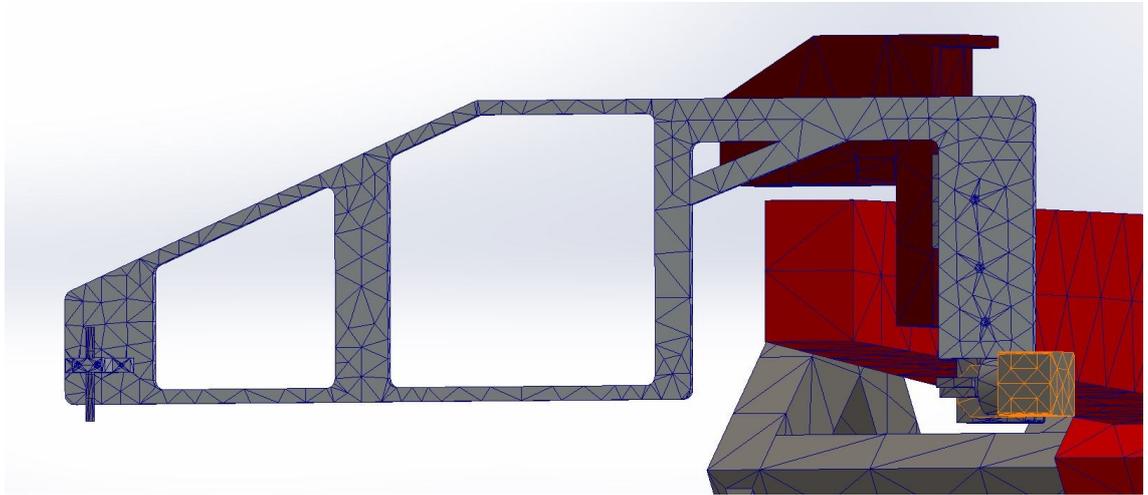
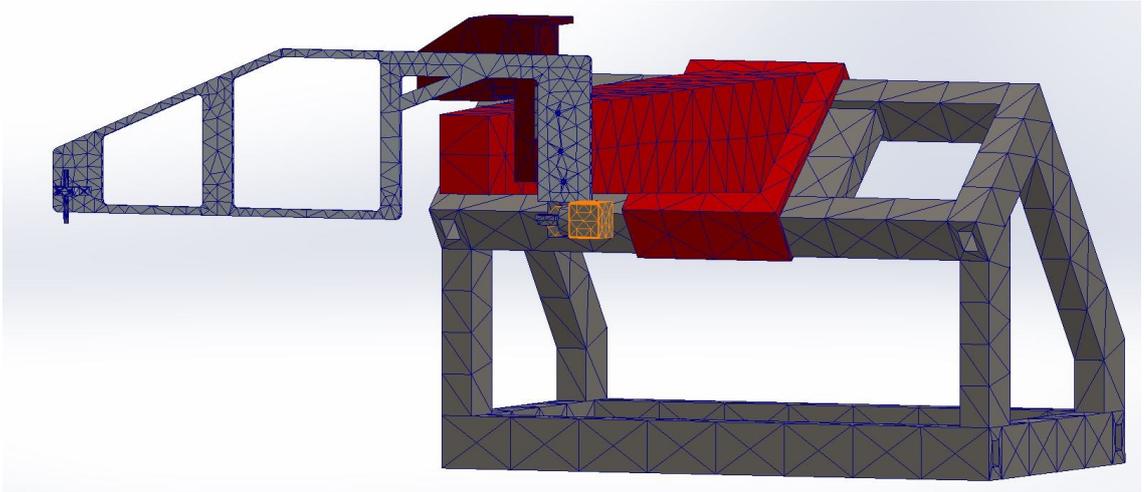


Figura 21 - Mesh globale con dimensione massima degli elementi di 200 mm

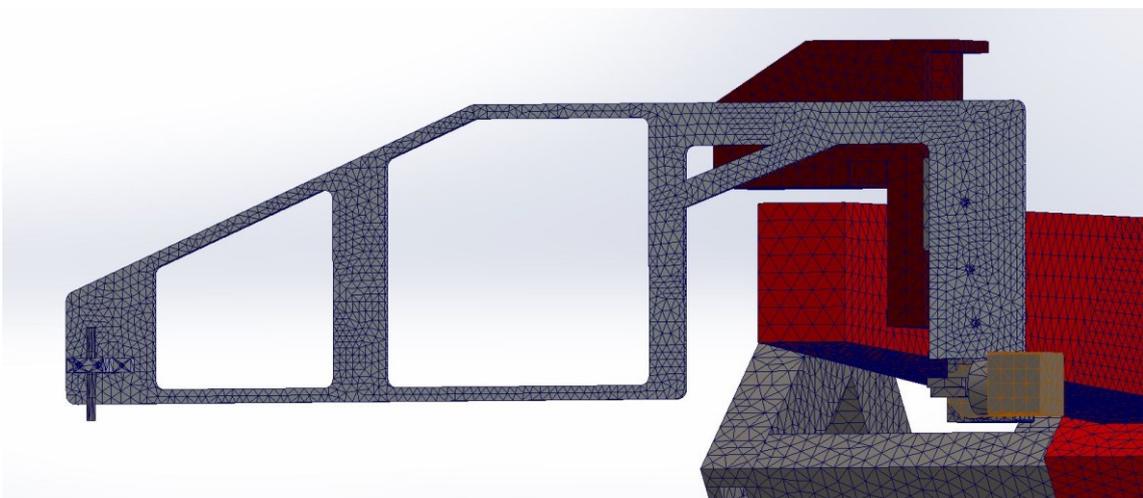
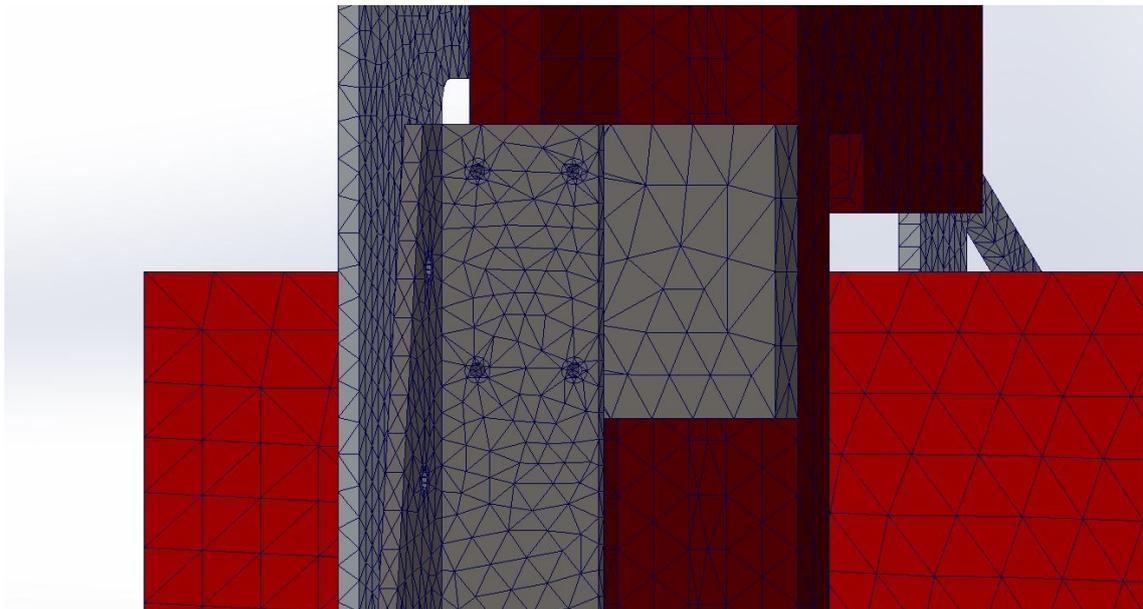
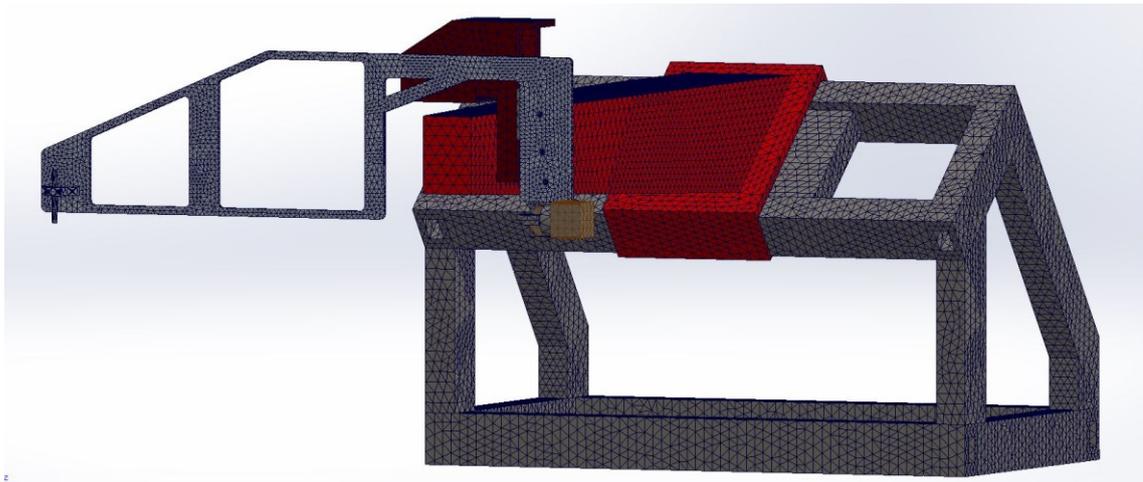


Figura 22 - Mesh globale con dimensione massima degli elementi di 40 mm e dimensione massima di 20 mm per l'angolare e il braccio ausiliario

4.1.3 Post-processor

È la fase di valutazione dei risultati e consiste nell'analisi della risposta strutturale elaborata dal risolutore numerico. In Simulation si possono analizzare i risultati in termini di tensioni-deformazioni, di caratteristiche di sollecitazione, di spostamenti e di reazioni vincolari. I risultati sono forniti per via grafica e in maniera più accurata con opportuni tabulati prodotti automaticamente dal programma di calcolo. Nel prosieguo verranno analizzati i report forniti a valle della soluzione per i due casi di funzionamento esposti precedentemente

4.1.3.1 Tensione equivalente di Von Mises

La tensione equivalente di Von Mises viene utilizzata come criterio per valutare il cedimento dei materiali duttili e viene calcolata dalle sei componenti della sollecitazione nel seguente modo:

$$VON = \{0,5 [(SX - SY)^2 + (SX - SZ)^2 + (SY - SZ)^2] + 3(TXY^2 + TXZ^2 + TYZ^2)\}^{(1/2)}$$

o in modo equivalente, dalle tre sollecitazioni principali,

$$VON = \{0,5 [(P1 - P2)^2 + (P1 - P3)^2 + (P2 - P3)^2]\}^{(1/2)}$$

Dove:

SX sollecitazione normale X

SY sollecitazione normale Y

SZ sollecitazione normale Z

TXY Sollecitazione di taglio nella direzione Y sul piano normale alla direzione X

TXZ Sollecitazione di taglio nella direzione Z sul piano normale alla direzione X

TYZ Sollecitazione di taglio nella direzione Z sul piano normale alla direzione Y

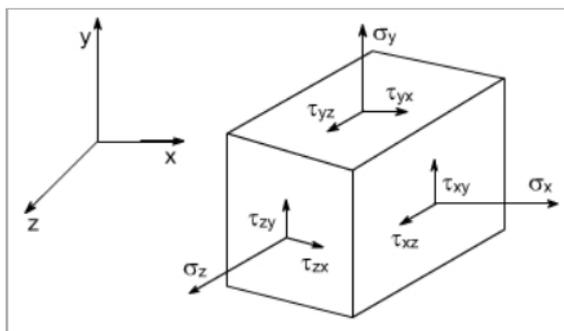


Figura 23 - Sistema di riferimento per il calcolo delle componenti delle sollecitazioni

P1 Prima sollecitazione principale (la più forte)

P2 seconda sollecitazione principale

P3 terza sollecitazione principale

VON tensione equivalente di Von Mises

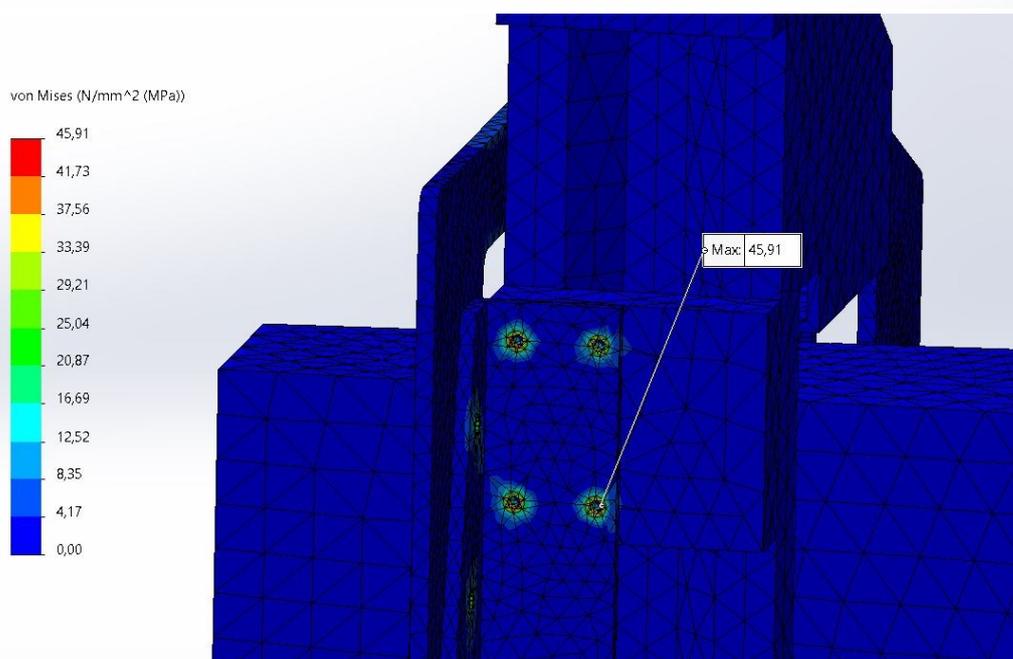
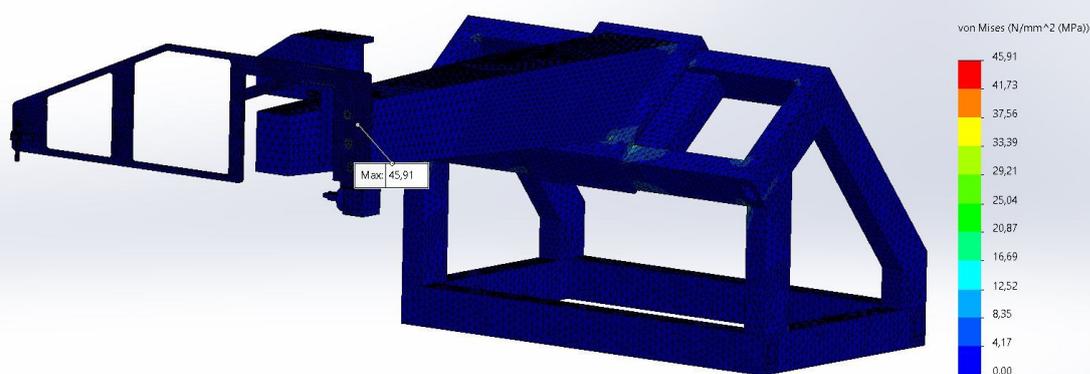


Figura 24 - Tensione equivalente di Von Mises per il caso di testa di taglio alla massima distanza di stand-off

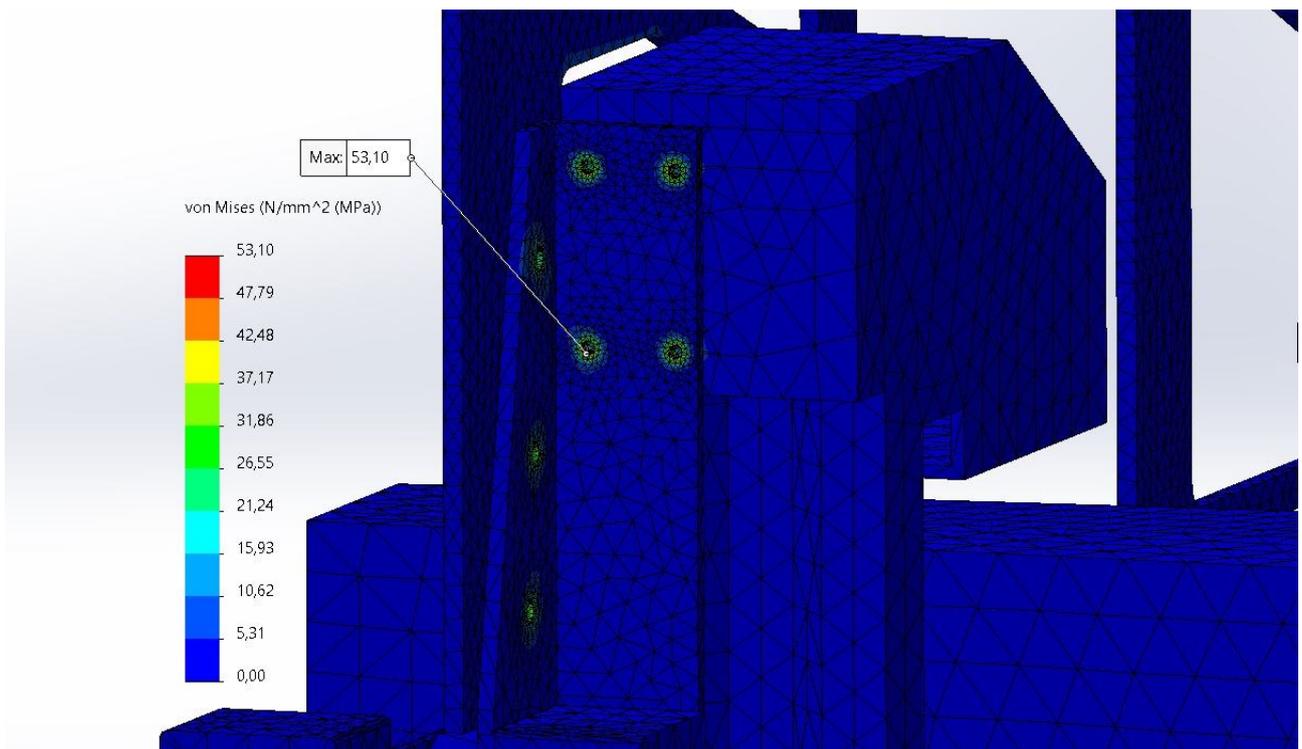
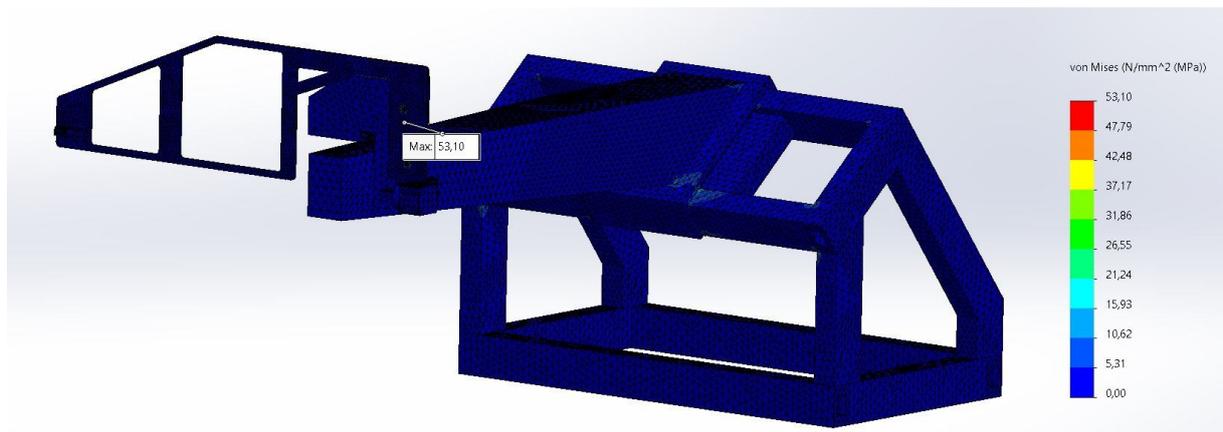


Figura 25 - Tensione equivalente di Von Mises per il caso di testa di taglio alla massima escursione lungo l'asse Z

4.1.3.2 Spostamento massimo

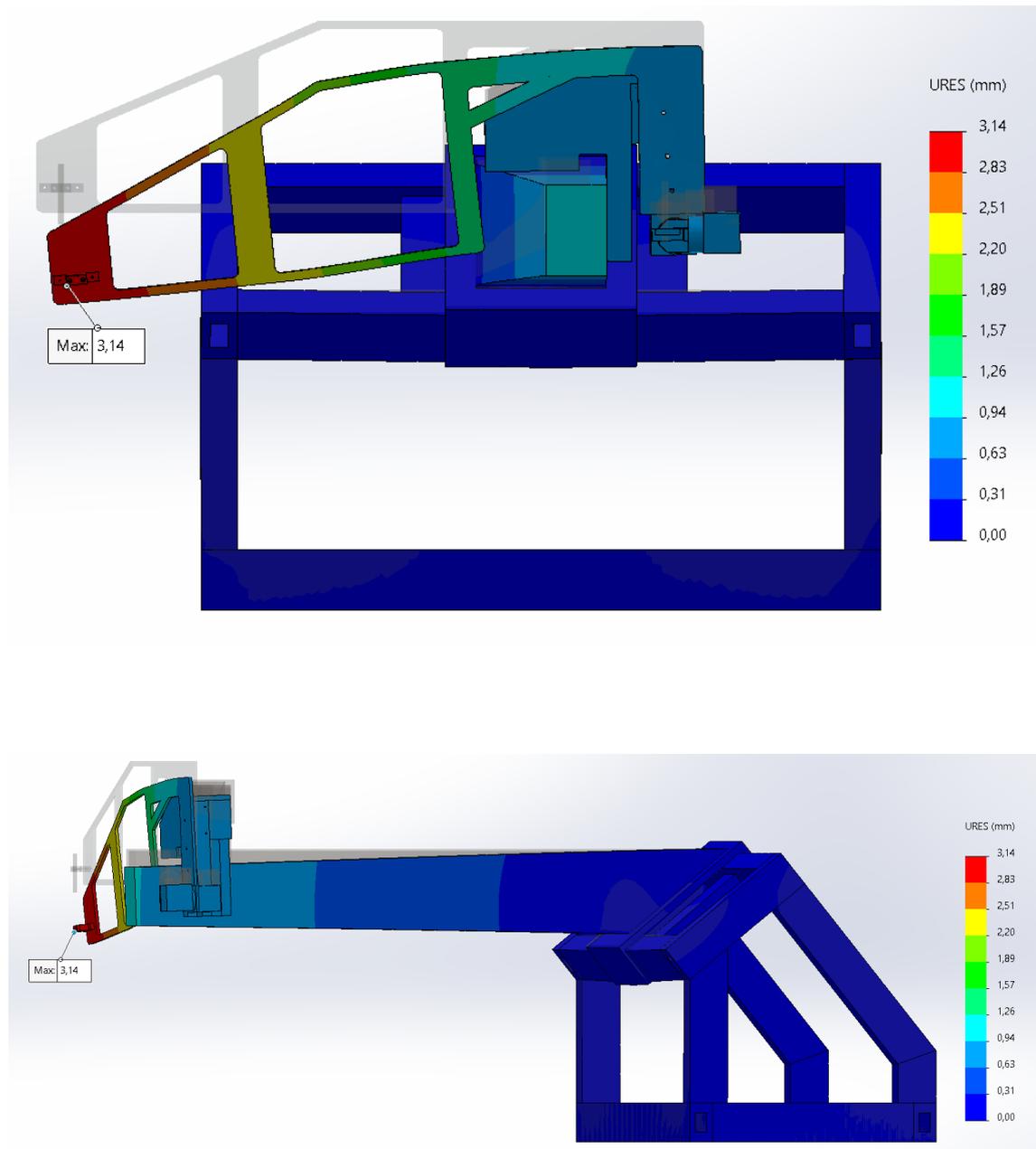


Figura 26 - spostamento massimo del braccio ausiliario dovuto solo al suo peso proprio (macchina non in funzionamento)

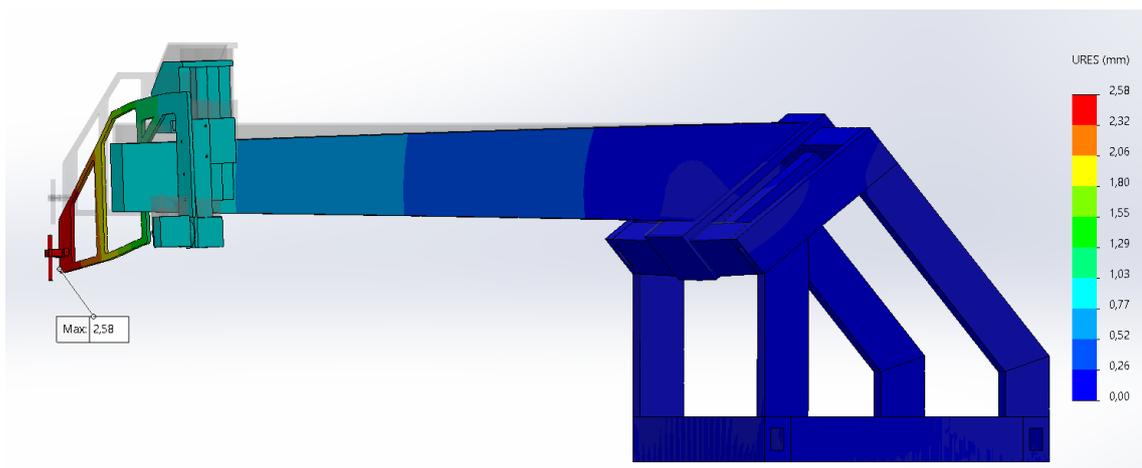
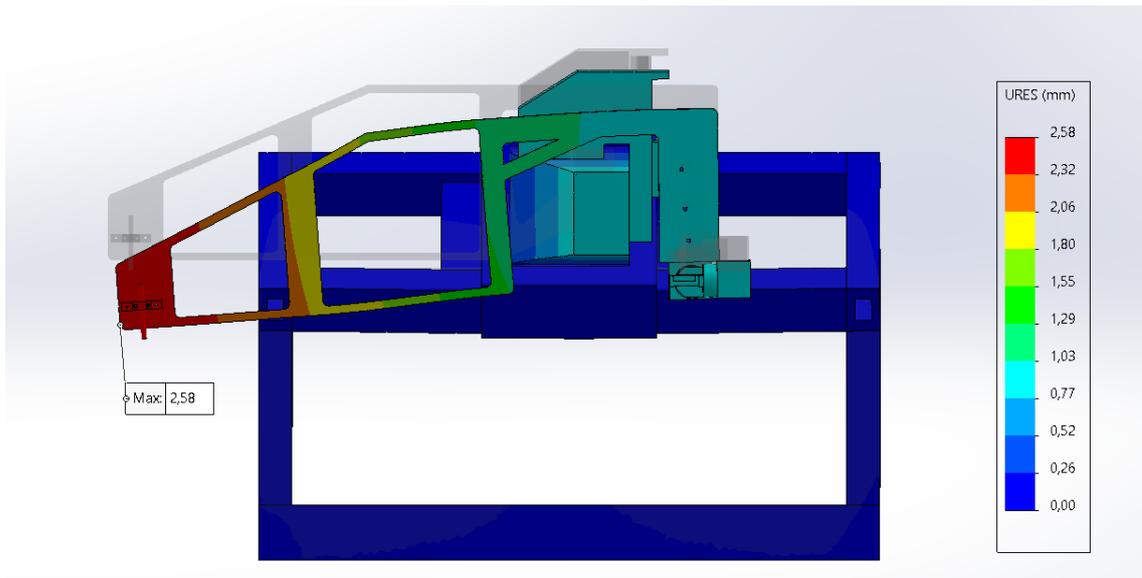


Figura 27 - spostamento massimo del braccio ausiliario nel caso in cui la testa di taglio è ad una distanza di stand-off dal pezzo pari a 20 mm

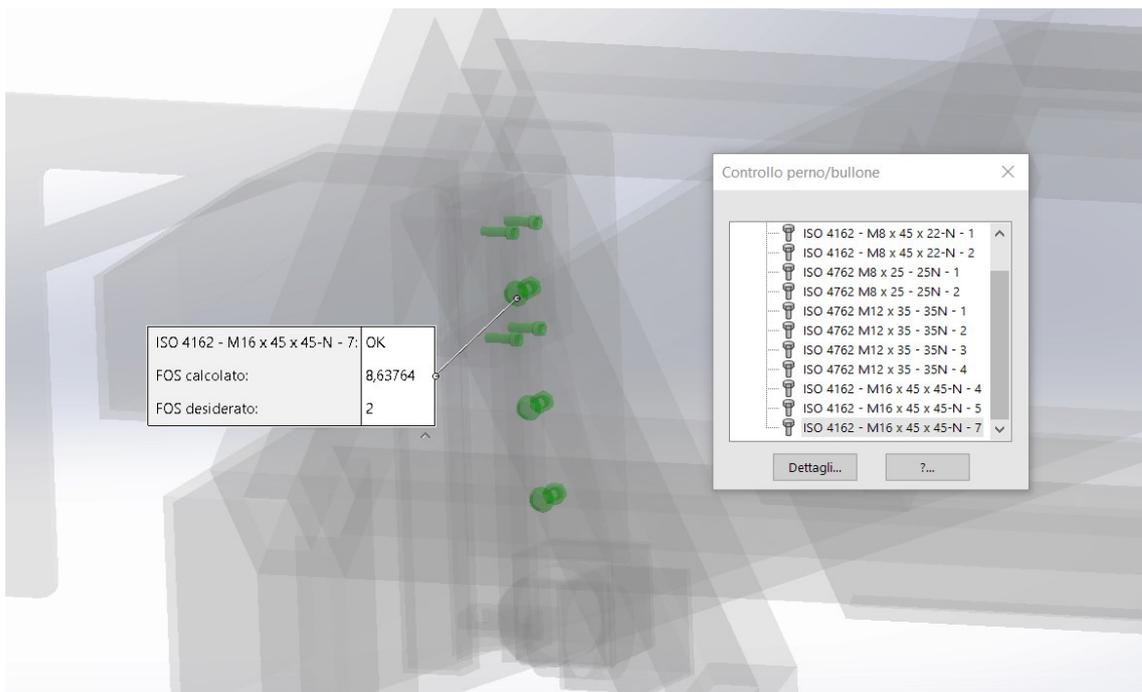
Lo spostamento massimo del braccio in alluminio rilevato a valle della simulazione non è stato ritenuto critico. Infatti, si è visto che la rotazione rispetto al punto di ancoraggio sull'angolare del carro mobile è di circa 0,11 gradi a cui corrisponde una deviazione del flusso idroabrasivo che impatta sul pezzo da tagliare di circa 0,008 mm

4.1.3.3 Analisi dei connettori bullone

È possibile determinare se un connettore a bullone in un assieme sia o non sia in grado di sopportare in sicurezza i carichi applicati.

Il software calcola il fattore di sicurezza per la resistenza del bullone (SF) in base al *rapporto di carico combinato* al quale un connettore può reggere e lo paragona al fattore di sicurezza definito dall'utente. Simulation fornisce mediante un grafico a colori i connettori che richiedono attenzione. I connettori/bulloni in verde non necessitano di ulteriori valutazioni, mentre quelli in rosso non sono ritenuti idonei alla loro funzione. Inoltre, il programma fornisce in maniera analitica le informazioni relative a:

- Coefficiente di sicurezza calcolato dal programma
- Coefficiente di sicurezza desiderato dall'utente
- Forza di taglio, assiale e momento flettente nelle tre direzioni x-y-z e il valore risultante per ogni connettore



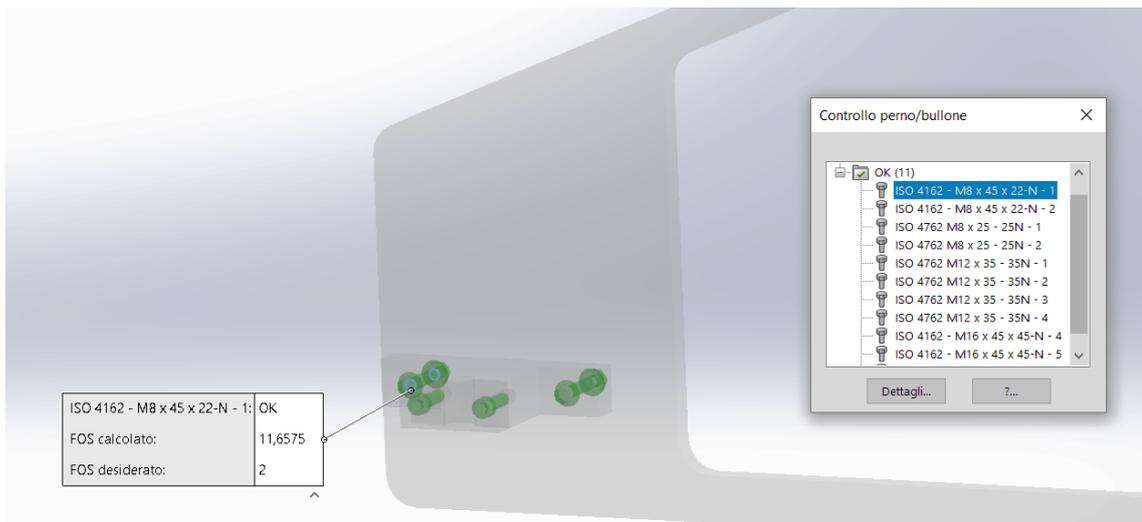


Figura 28 - valutazione della sicurezza dei bulloni del sistema di ancoraggio del supporto e della seconda testa di taglio

Nella tabella seguente è descritto il procedimento che Simulation utilizza per determinare o meno l'accettazione dei connettori bulloni (tratto dalla guida di Simulation)

<p>Rapporto di carico assiale, Ra</p>	<p>Ra è il valore massimo di:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $SF * F / (At * S)$ • $Prezarico / (At * S)$ <p>SF</p> <p>SF = fattore di sicurezza per la resistenza del bullone calcolato dal software. SF è il fattore ignoto dell'equazione di rapporto di carico combinata.</p> <p>Il software calcola il fattore di sicurezza SF due volte: SF1 viene calcolato in base al primo valore del Rapporto di carico assiale, Ra, mentre SF2 al secondo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se $(SF1 * F / (At * S)) > (Prezarico / (At * S))$, allora sarà SF1 ad essere utilizzato per il criterio riuscita/non riuscita. • Se $(Prezarico / (At * S)) > (SF1 * F / (At * S))$, allora sarà
---------------------------------------	---

	<p>SF2 ad essere utilizzato per il criterio riuscita/non riuscita.</p> <p>F Carico assiale calcolato dal software</p> <p>At Area tensile</p> <p>Precarico Precarico del bullone</p> <p>S Valore della forza del materiale o grado del connettore (può essere forza di resistenza al cedimento o assoluta a seconda dell'applicazione). Questo è il valore definito dall'utente <i>Resistenza del bullone</i>.</p>
Rapporto di carico di flessione, Rb	<p>$R_b = SF * D * M / (2 * S * I)$</p> <p>SF Fattore di sicurezza per la resistenza del bullone calcolato dal software</p> <p>M Momento di flessione calcolato dal software</p> <p>D Diametro gambo nominale</p> <p>S Valore della forza del materiale o grado del connettore (può essere forza di resistenza al cedimento o assoluta a seconda dell'applicazione). Valore definito dall'utente per Resistenza del bullone.</p> <p>$I = 0,25 * \pi * r^4$</p>
Rapporto di carico di taglio, Rs	<p>$R_s = SF * V / (0,5 * At * S)$</p> <p>SF Fattore di sicurezza per la resistenza del bullone calcolato dal software</p> <p>V Carico di taglio calcolato dal software</p> <p>At Area tensile</p> <p>S Valore della forza del materiale o grado del connettore (può essere forza di resistenza al cedimento o assoluta a seconda dell'applicazione). Valore definito dall'utente per Resistenza del bullone.</p> <p>Il fattore di 0,5 viene applicato alla resistenza allo snervamento del materiale (o resistenza alla trazione assoluta) per considerare la resistenza al taglio del materiale. Il calcolo del rapporto di carico di taglio è più esatto se si tiene conto del valore di snervamento. Tenendo in considerazione la resistenza alla trazione assoluta, si otterrà una stima conservativa.</p>

Rapporto di carico combinato	$(R_a + R_b)^2 + R_s^3 \leq 1$ La soluzione dell'equazione di terzo ordine produce il fattore di sicurezza SF ignoto della resistenza del bullone. Vengono prese in considerazione solo le radici positive o il fattore di sicurezza SF.
------------------------------	---

Verifica di sicurezza ammissione/rigetto

Criterio di ammissione del connettore a bullone Fattore di sicurezza della resistenza del bullone SF calcolato > Fattore di sicurezza definito dall'utente

Criterio di rigetto del connettore a bullone Fattore di sicurezza della resistenza del bullone SF calcolato < Fattore di sicurezza definito dall'utente

CAPITOLO 5 – ULTERIORI VERIFICHE

5.1 Guide lineari a ricircolo di sfere

I sistemi di movimentazione della trave, del carro mobile e della testa di taglio sono realizzati mediante due guide rettificate in acciaio montate in maniera parallela e 2 pattini montati su ogni guida che sono connessi tra loro mediante una piastra portapezzo, la quale viene movimentata dal sistema di vite a ricircolo di sfere. L'utilizzo di corpi volventi, come sfere o rulli interposti tra pattino e binario, consente di ottenere un moto lineare caratterizzato da un'estrema precisione. Inoltre, il coefficiente di attrito di una guida lineare è solo un cinquantesimo di quello di un sistema tradizionale a strisciamento.

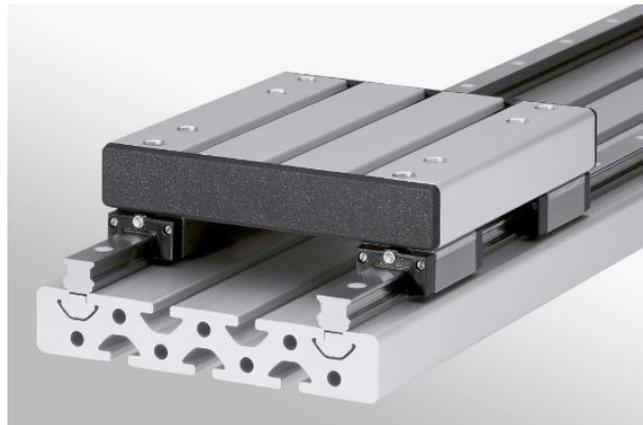


Figura 29 - schema di movimentazione di doppia guida lineare con 4 pattini e tavola portapezzo

Quindi tale sistema presenta innumerevoli vantaggi:

1) *Massima precisione di posizionamento*

Una tavola montata su una guida lineare deve solo superare l'attrito volvente. La differenza tra coefficiente di attrito statico e dinamico è trascurabile, così la forza di primo distacco è uguale, al netto delle tenute, alla forza necessaria a mantenere il moto. Gli effetti di stick-slip sono inesistenti.

2) Lunga durata ed estrema precisione di movimento

In un sistema di tipo tradizionale, le differenze di spessore del lubrificante possono causare errori di precisione. L'attrito radente e una lubrificazione spesso insufficiente aumentano l'usura, riducendo il grado di precisione. Al contrario, la guida lineare ha un attrito volvente molto ridotto, unito ad un grado di usura estremamente basso. Di conseguenza la precisione della guida rimane praticamente invariata per tutta la sua durata utile.

3) Alta velocità con una forza motrice ridotta

I bassi coefficienti di attrito permettono l'impiego di piccole forze motrici. Di conseguenza, la potenza richiesta è bassa anche in presenza di moto alternato con alta dinamica.

4) Capacità di carico costante in tutte le direzioni

Grazie a uno speciale design, una guida lineare è in grado di supportare carichi sia in direzione verticale che in direzione orizzontale.

5) Semplicità di installazione e intercambiabilità

L'installazione di una guida lineare è piuttosto semplice. Dopo aver fresato o rettificato la superficie di montaggio basta seguire la procedura di installazione per ottenere un moto estremamente preciso.

Le guide tradizionali richiedono uno sforzo di assemblaggio molto superiore, poiché le superfici di scorrimento devono essere raschiate. I componenti singoli, se non opportunamente raschiati, non sono intercambiabili. Le guide lineari sono, al contrario, intercambiabili senza alcun tipo di modifica e/o intervento.

6) Semplicità di lubrificazione

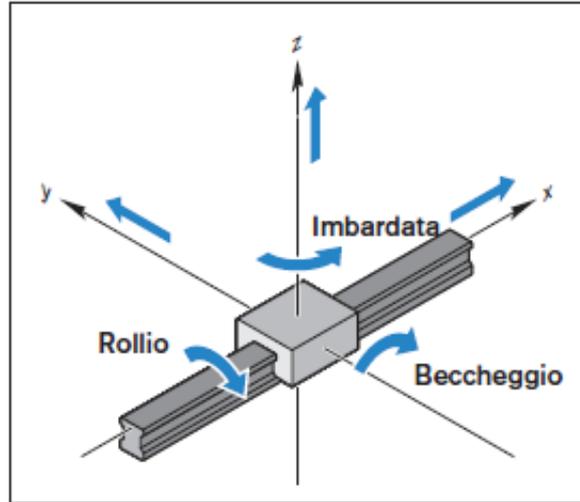
In un sistema di guida tradizionale, una lubrificazione insufficiente distrugge le superfici di contatto. Il lubrificante deve essere applicato in molti punti lungo le superfici di scorrimento. Una guida lineare richiede solo una minima lubrificazione, che può essere effettuata grazie ad un semplice sistema centralizzato direttamente sul carrello. HIWIN può inoltre fornire carrelli con un sistema di lubrificazione a olio integrato, grazie a un serbatoio intercambiabile per l'olio, per una lubrificazione prolungata, applicato frontalmente al carrello.

7) *Protezione anticorrosione*

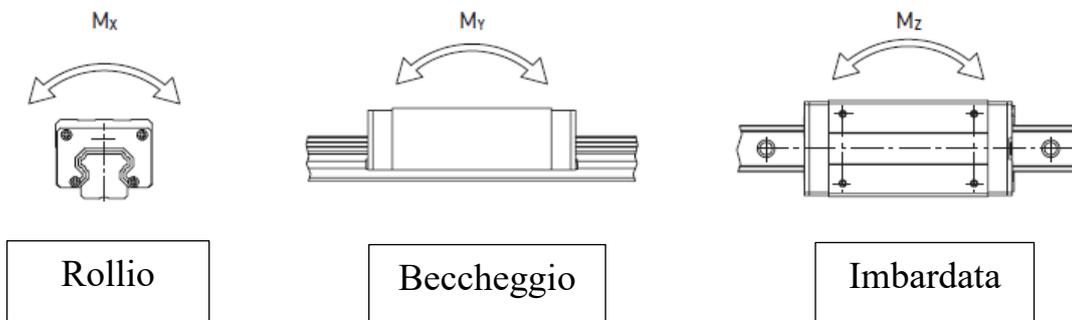
Per ottenere una protezione anticorrosione ottimale, i carrelli e le rotaie possono essere forniti con diversi rivestimenti. Le singole procedure selezionate dipendono dall'applicazione. I dati relativi alle condizioni ambientali e alle sostanze corrosive sono necessari per scegliere il rivestimento ottimale. La guida lineare miniaturizzata MG è prodotta in acciaio inox (SUS 420).

Sia in condizioni statiche che dinamiche, quando la guida lineare viene sottoposta a un carico eccessivo oppure subisce un urto, si verifica una deformazione locale permanente tra il carrello e i corpi volventi. Se supera un determinato limite, tale deformazione permanente impedisce il corretto funzionamento della guida lineare. In generale, il *coefficiente di carico statico* viene definito come il carico statico di entità e direzione costante che determina una deformazione permanente totale pari a 1/10.000 del diametro del corpo volvente, nel punto di contatto che subisce la massima sollecitazione. Tale valore è indicato nelle tabelle dimensionali delle singole guide lineari. Tali tabelle possono essere utilizzate come riferimento per scegliere la guida lineare più adatta. Il massimo carico statico applicato a una guida lineare non deve superare il coefficiente di carico statico.

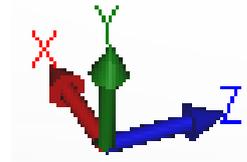
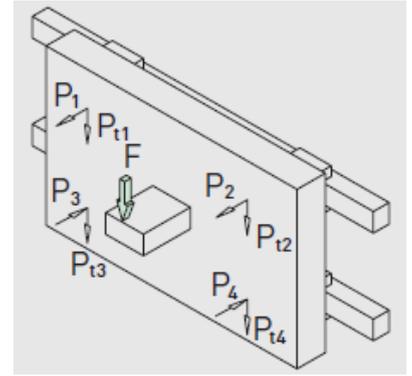
Il *momento statico ammissibile* è il momento con direzione e grandezza specifiche presente quando la massima sollecitazione dei corpi volventi è uguale alla sollecitazione indotta dal coefficiente di carico statico. Il momento statico ammissibile viene definito per tre direzioni (M_X , M_Y e M_Z) per i sistemi a movimento lineare. Le guide lineari montate sul waterjet sono fornite dalla HIWIN serie RG e sono adatte per centri di lavorazione, presse a iniezione, macchine e sistemi ad elevata rigidità, macchine per la deformazione. Sono state verificate le guide montate sul basamento, sulla trave e sul carro mobile mediante un confronto tra il momento statico ammissibile fornito dal costruttore e il momento calcolato dal programma. [10].



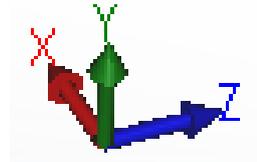
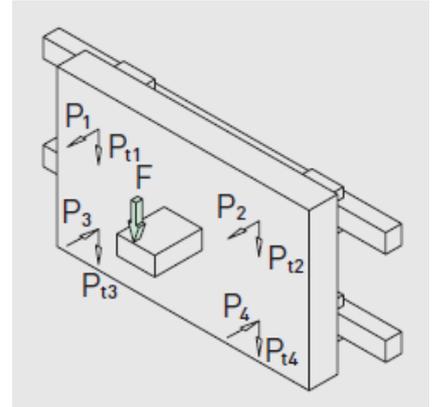
Per determinare il movimento o il cedimento del pattino, nelle guide su rotaia profilata, per convenzione si considera il sistema di coordinate sopra illustrato. La figura mostra i sei gradi di libertà del sistema : la direzione X rappresenta la direzione del movimento, mentre in tutte le altre direzioni sono possibili solo deformazioni elastiche della guida sotto carico.



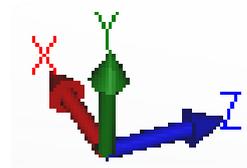
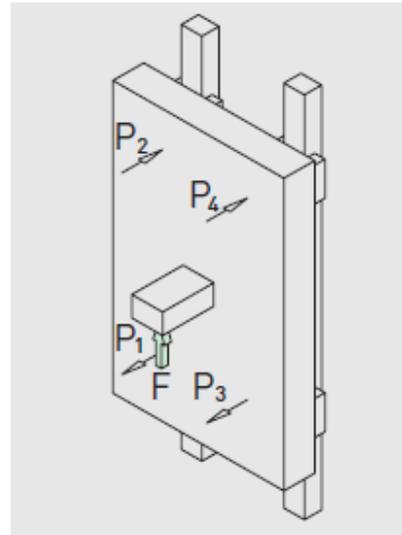
Nel seguito vengono riportati i valori dei momenti statici rilevati da Simulation e i valori ammissibili letti sul catalogo tecnico del produttore.



Trave	Momento statico ammissibile della guida lineare [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 1) [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 2) [Nm]
Mx	460	115	-7,52
My	460	0,088	-9,9E-05
Mz	647	-17	10



Basamento	Momento statico ammissibile della guida lineare [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 1) [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 2) [Nm]
Mx	1060	-129	-129
My	1060	237	-160
Mz	1445	407	-465



Carro	Momento statico ammissibile della guida lineare [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 1) [Nm]	Momento rilevato dal programma (caso 2) [Nm]
Mx	460	34,39	31,19
My	460	-11,49	-0,00011
Mz	647	14,77	12,00

5.2 Servomotori

La seconda verifica è stata effettuata sui servomotori brushless che movimentano le viti a ricircolo di sfere:

- Le due teste di taglio e il braccio di supporto in alluminio lungo l'asse di lavoro X
- Il carro mobile lungo la trave (asse di lavoro Y)
- La trave lungo il basamento (asse di lavoro X)

Si è utilizzato il procedimento descritto nei cataloghi tecnici del produttore di tali sistemi. La verifica viene effettuata confrontando la coppia massima richiesta per la movimentazione della vite con la coppia massima che ciascun servomotore può erogare.

La coppia di spunto della vite in condizione di regime si calcola:

$$T = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \eta_p}$$

Dove:

T è la coppia di spunto [Nm]

F è il carico massimo del ciclo [N]

P è il passo della vite [mm]

η_p è il rendimento pratico:

$$\eta_p = 0.9\eta$$
$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot d}{P} \mu}$$

d è il diametro nominale della vite [mm]

μ è un coefficiente relativo al tipo di vite a ricircolo che vale 0.006

Massa da movimentare		Carico massimo del ciclo [N]
massa totale che deve sollevare il servomotore del carro [kg]	61	598,41
massa totale che deve movimentare il servomotore della trave [kg]	113,46	1113,04
massa totale che deve movimentare il servomotore del basamento [kg]	725,31	7115,24
Diametro della vite [mm]	32	
Passo della vite [mm]	10	
Coppia di spunto richiesta dalla vite		Coppia max erogabile dal motore [Nm]
basamento [Nm]	13,35	35
trave [Nm]	2,09	3,5
carro [Nm]	1,12	2

CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con l'ufficio tecnico dell'azienda CTI Foodtech s.r.l. ed ha messo in evidenza il grande vantaggio di poter simulare a priori il comportamento statico del sistema di taglio ausiliario progettato affinché il waterjet potesse rispondere alle nuove richieste tecniche della produzione.

Gran parte del tempo è stato utilizzato nel rilevare le misure geometriche della macchina esistente poiché non si aveva a disposizione il file cad e conseguentemente ipotizzare una soluzione progettuale che potesse soddisfare le esigenze richieste, senza però andare a modificare in maniera eccessiva il waterjet originale.

Anche la fase di modellazione cad ha richiesto la giusta attenzione in quanto impostare il modello in maniera accurata nella fase di pre-processing consente di ottimizzare le soluzioni sia per quanto riguarda il tempo di calcolo sia per la correttezza dei risultati.

Sono state considerate in questa prima fase diverse soluzioni che potessero rispondere alla richiesta di lavorare componenti fino a 5 metri di lunghezza utilizzando le risorse interne all'azienda. L'analisi agli elementi finiti ha permesso di valutare quale tra le soluzioni ipotizzate potesse essere la migliore. La scelta di utilizzare un profilato in alluminio come supporto per il nuovo sistema di taglio (verosimilmente da realizzare mediante taglio laser con le attrezzature presenti in azienda) è stata verificata mediante l'analisi statica in Solidworks Simulation per verificare criticità nello sviluppo di tensioni eccessive o spostamenti della nuova struttura degni di attenzione, senza ricorrere a prototipi da implementare sul waterjet esistente.

I risultati così ottenuti hanno permesso di fornire una valutazione complessiva a priori della migliore scelta progettuale da poter implementare per perseguire l'intento richiesto.

Sommario

CAPITOLO 1 - L'AZIENDA CTI FOODTECH S.R.L.....	4
1.1 L'impianto produttivo.....	5
1.2 Macchine prodotte.....	8
CAPITOLO 2 - IL TAGLIO A GETTO D'ACQUA.....	10
2.1 Evoluzione storica.....	10
2.2 Utilizzi del getto d'acqua.....	11
2.2.1 Ingegneria mineraria.....	12
2.2.2 Pulitura industriale.....	12
2.2.3 Ingegneria civile.....	13
2.2.4 Usi militari.....	14
2.2.5 Usi nel campo della medicina.....	14
2.3 Il sistema waterjet.....	15
2.3.1 Impianto di trattamento dell'acqua.....	17
2.3.2 Pompa e sistema idraulico.....	17
2.3.3 Intensificatore.....	17
2.3.4 Sistema di taglio.....	19
2.3.5 Vasca di raccolta.....	20
2.3.6 Sistema di controllo.....	20
2.4 Vantaggi e svantaggi.....	21
CAPITOLO 3 - PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI TAGLIO AUSILIARIO.....	23
3.1 Descrizione della macchina esistente.....	23
3.2 Nuovi obiettivi di funzionamento del waterjet.....	27
CAPITOLO 4 - ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI (FEM).....	30
4.1 Fasi dell'analisi FEM.....	30
4.1.1 Pre-processing.....	30
4.1.2 Processing.....	44
4.1.3 Post-processor.....	50
CAPITOLO 5 - ULTERIORI VERIFICHE.....	59

5.1	Guide lineari a ricircolo di sfere	59
5.2	Servomotori.....	66
CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI		68
INDICE DELLE FIGURE.....		71
OPERE CITATE		72

Indice delle figure

Figura 1 - Schema elementare di un sistema waterjet [11]	16
Figura 2 - schema di un intensificatore idraulico	18
Figura 3 - schematizzazione di una testa di taglio idroabrasiva e del meccanismo di asportazione del materiale	20
Figura 4 - macchina waterjet presente in azienda	23
Figura 5 - clessidra per il dosaggio dell'abrasivo	25
Figura 6 - pompa installata con caratteristiche tecniche	26
Figura 7 - supporto per il nuovo sistema di taglio con un particolare dell'ancoraggio al carro mobile	31
Figura 8 - vincolo di fisso sulla parte inferiore del basamento	33
Figura 9 - Condizioni di interazione	33
Figura 10 - schematizzazione fem dei connettori in Simulation – parametri connettori bullone	35
Figura 11 - modello del waterjet originale	37
Figura 12 - modello del waterjet con il basamento ridotto e la trave situata in mezzeria per la successiva analisi con Simulation	37
Figura 13 - modello del waterjet nell'ambiente di Simulation in cui sono evidenti i vincoli imposti	38
Figura 14 - componenti di una testa di taglio idroabrasiva	38
Figura 15 - valori assunti dal coefficiente ξ	40
Figura 16 - velocità di efflusso per fluido comprimibile e incomprimibile al variare della pressione	40
Figura 17 - comportamento delle particelle all'interno del focalizzatore	41
Figura 18 - - sezione usurata di un focalizzatore	42
Figura 19 - discretizzazione del continuo	45
Figura 20 - (a) Elemento solido lineare – (b) Elemento parabolico	45
Figura 21 - Mesh globale con dimensione massima degli elementi di 200 mm	48
Figura 22 - Mesh globale con dimensione massima degli elementi di 40 mm e dimensione massima di 20 mm per l'angolare e il braccio ausiliario	49
Figura 23 - Sistema di riferimento per il calcolo delle componenti delle sollecitazioni	51
Figura 24 - Tensione equivalente di Von Mises per il caso di testa di taglio alla massima distanza di stand-off	51
Figura 25 - Tensione equivalente di Von Mises per il caso di testa di taglio alla massima escursione lungo l'asse Z	52
Figura 26 - spostamento massimo del braccio ausiliario dovuto solo al suo peso proprio (macchina non in funzionamento)	53
Figura 27 - spostamento massimo del braccio ausiliario nel caso in cui la testa di taglio è ad una distanza di stand-off dal pezzo pari a 20 mm	54
Figura 28 - valutazione della sicurezza dei bulloni del sistema di ancoraggio del supporto e della seconda testa di taglio	56
Figura 29 - schema di movimentazione di doppia guida lineare con 4 pattini e tavola portapezzo	59

Opere citate

- [1] «CTI Foodtech s.r.l.,» <https://www.ctifoodtech.com/>.
- [2] P. Tronci, «L'effetto fisico del getto d'acqua ad alta velocità sulle terre,» Tesi di Dottorato , 2006/2007.
- [3] Valletti, Sviluppo di un modello per la simulazione del segnale di pressione in un impianto a getto d'acqua. Tesi di laurea .Politecnico di Milano, 2002/2003.
- [4] Vendramini, Tecniche innovative di taglio dei materiali metallici, Publitec.
- [5] K. waterjet.<https://www.kmtwaterjet.com>.
- [6] R. V. Petrova, «Introduction to static analysis using Solidworks Simulation,» CRC Press, 2015.
- [7] D. Summers, «Waterjetting Technology,» CRC Press.
- [8] A. Bacchetto, «Introduzione al metodo degli elementi finiti e alla modellazione fem,» Adepron.
- [9] Guida in linea Solidworks Simulation.
- [10] Catalogo HWIN - Guide lineari.