**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di laurea triennale in **Ingegneria Meccanica**

# Analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment) di componenti di bulloneria per turbine a vapore

# Life Cycle Assessment (LCA) of Steam Turbine Bolting

Relatore:

Prof. Ing. **Michele Germani**

Laureando:

**Chiara Priori**

Correlatrice:

Prof.ssa **Marta Rossi**

---

Anno accademico 2025/2026

# Sommario

Introduzione ..... 1
1. Sostenibilità e sviluppo sostenibile ..... 3
1.1 Le tre dimensioni della sostenibilità e l'Agenda 2030 ..... 3
1.2 Sostenibilità ambientale ..... 5
1.3 Metodologie di analisi e stima degli impatti: l'approccio LCA ..... 6
1.3.1 Metodologia LCA ..... 7
2. Baker Hughes ..... 9
2.1 Profilo aziendale ..... 9
2.2 Evoluzione e impegno verso la sostenibilità (ESG) ..... 10
3. Caso studio della bulloneria ..... 12
3.1 Definizione dell'obiettivo e dell'ambito ..... 13
3.1.1 Obiettivo ..... 13
3.1.2 Unità funzionale e flusso di riferimento ..... 13
3.1.3 Confini del sistema ..... 13
3.1.4 Regole di cut-off ..... 14
3.1.5 Categorie, modelli e indicatori dell'impatto ambientale ..... 14
3.1.6 Requisiti e qualità dei dati ..... 15
3.2 Analisi dell'inventario nel ciclo di vita ..... 16
3.2.1 Descrizione del prodotto: prigionieri (stud bolts) ..... 17
3.2.2 Descrizione del prodotto: tiranti (tie rods) ..... 19
3.2.3 Descrizione del prodotto: dadi (nuts) ..... 21
3.3 Inventario del ciclo vita ..... 23
3.3.1 Limiti, assunzioni e cut-off ..... 45
3.4 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) ..... 46
3.4.1 Prigionieri ..... 46
3.4.2 Tiranti ..... 50
3.4.3 Dadi ..... 52
3.5 Interpretazione dei risultati ..... 55
3.5.1 Confronto tra componenti di pari diametro e differente lunghezza ..... 56



Baker Hughes Confidential

3.5.2 Confronto tra componenti di pari lunghezza e differente diametro .... 62
3.5.3 Confronto tra prigionieri e tiranti ..... 68
Conclusioni ..... 75
Bibliografia ..... 77



Baker Hughes Confidential

# Indice delle figure

Figura 1. 1 7 Sustainable Development Goals (SDGs) - Agenda 2030 ..... 5
Figura 2. Esempi reali delle famiglie di bulloneria analizzati: Stud bolts, Tie rods e Nuts ..... 16
Figura 3. Esempio di modellazione prigionieri cassa esterna, Turbina 3 ..... 24
Figura 4. Input dei materiali per l'acciaio 40CrMoV4-6 ..... 25
Figura 5. Input di energia elettrica per l'acciaio 40CrMoV4-6 ..... 25
Figura 6. Esempio di modellazione del processo di forgiatura per i prigionieri ..... 26
Figura 7. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita dei prigionieri ..... 28
Figura 8. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita dei tiranti ..... 30
Figura 9. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita per i dadi ..... 31
Figura 10. Massa della billetta in funzione della massa finita del prigioniero per il riscaldamento ..... 32
Figura 11. Massa della billetta in funzione della massa finita del tirante per il riscaldamento ..... 33
Figura 12. Massa della billetta in funzione della massa finita del dado per il riscaldamento ..... 34
Figura 13. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i prigionieri ..... 36
Figura 14. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i tiranti ..... 37
Figura 15. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i dadi ..... 38
Figura 16. Massa della billetta in funzione della massa finita del prigioniero per la sgrossatura ..... 39
Figura 17. Massa semifinita in funzione della massa finita del prigioniero per la sgrossatura ..... 40
Figura 18. Massa della billetta in funzione della massa finita dei tiranti per la sgrossatura ..... 41



Baker Hughes Confidential

Figura 19. Massa semifinita in funzione della massa finita dei tiranti per la sgrossatura ..... 41
Figura 20. Massa della billetta in funzione della massa finita del dado per la sgrossatura ..... 43
Figura 21. Massa semifinita in funzione della massa finita del dado per la sgrossatura ..... 43
Figura 22. Impatto ambientale totale dei prigionieri- M45_L225 ..... 47
Figura 23. Impatto ambientale della materia prima del prigioniero..... 48
Figura 24. Impatto ambientale della forgiatura del prigioniero. ..... 49
Figura 25. Impatto ambientale totale dei tiranti- M45_L450..... 50
Figura 26. Impatto ambientale della materia prima del tirante. ..... 51
Figura 27. Impatto ambientale della forgiatura del tirante. ..... 52
Figura 28. Impatto ambientale totale dei dadi M64 ..... 53
Figura 29. Impatto ambientale della forgiatura dei dadi. ..... 54
Figura 30. Confronto dei tiranti e prigionieri per turbine a vapore per la categoria d'impatto del cambiamento climatico. ..... 56
Figura 31. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M16. ..... 57
Figura 32. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M24. ..... 57
Figura 33. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M36. ..... 58
Figura 34. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M42. ..... 58
Figura 35. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M45. ..... 59
Figura 36. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M64. ..... 59
Figura 37. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M30..... 60
Figura 38. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M64..... 61
Figura 39. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M125..... 61
Figura 40. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L120 ..... 62
Figura 41. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L190. ..... 63
Figura 42. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L245. ..... 63
Figura 43. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L275. ..... 64
Figura 44. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L290. ..... 64
Figura 45. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L340. ..... 65
Figura 46. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L400. ..... 65
Figura 47. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L440..... 66



Baker Hughes Confidential

Figura 48. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L450. ..... 67
Figura 49. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L500. ..... 67
Figura 50. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L1140. ..... 68
Figura 51. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M45. ..... 69
Figura 52. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M52. ..... 69
Figura 53. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M125. ..... 70
Figura 54. Confronto dei prigionieri – stesso diametro M45, lunghezze differenti. 71
Figura 55. Confronto dei prigionieri – diametri differenti, stessa lunghezza L245. 71
Figura 56. Confronto dei tiranti – stesso diametro M125, lunghezze differenti. ..... 72
Figura 57. Confronto dei tiranti – diametri differenti, stessa lunghezza L500. ..... 72
Figura 58. Modello prigioniero + 1 dado. ..... 73
Figura 59. Modello tirante + 2 dadi - 40CrMoV4-6. ..... 73
Figura 60. Grafico cumulativo dell'impatto sul cambiamento climatico tra prigionieri e tiranti. ..... 74



Baker Hughes Confidential

# Indice delle tabelle

Tabella 1. Requisiti e qualità dei dati per la rappresentatività geografica ..... 16
Tabella 2. Requisiti e qualità dei dati per la rappresentatività tecnologica ..... 16
Tabella 3. Esempi di modelli 3D NX di prigionieri ..... 17
Tabella 4. Prigionieri- Life Cycle Inventory (LCI) ..... 18
Tabella 5. Esempi di modelli 3D NX di tiranti ..... 19
Tabella 6. Tiranti - Life Cycle Inventory (LCI) ..... 20
Tabella 7. Esempi di modelli 3D NX di dadi ..... 21
Tabella 8. Dadi - Life Cycle Inventory (LCI) ..... 22
Tabella 9. Materie prime, semifiniti e prodotti finiti modellati per la bulloneria generale ..... 24
Tabella 10. Parametri della funzione "sega da taglio" per i prigionieri ..... 28
Tabella 11. Parametri della funzione “sega da taglio” per i tiranti ..... 29
Tabella 12. Parametri della funzione "sega da taglio" per i dadi ..... 30
Tabella 13. Parametri della funzione di riscaldamento per i prigionieri ..... 32
Tabella 14. Parametri della funzione di riscaldamento per i tiranti ..... 33
Tabella 15. Parametri della funzione di riscaldamento per i dadi ..... 34
Tabella 16. Parametri della funzione pressa idraulica per i prigionieri ..... 35
Tabella 17. Parametri della funzione pressa idraulica per i tiranti ..... 37
Tabella 18. Parametri della funzione pressa idraulica per i dadi ..... 38
Tabella 19. Parametri di sgrossatura per i prigionieri ..... 39
Tabella 20. Parametri di sgrossatura per i tiranti ..... 41
Tabella 21. Parametri di sgrossatura per i dadi ..... 42
Tabella 22. Trattamenti termici per gli elementi di fissaggio ..... 44
Tabella 23. Dataset modificati per la personalizzazione di dettaglio ..... 44
Tabella 24. Dati relativi alla fase di trasporto ..... 45



Baker Hughes Confidential

# Introduzione

Il seguente documento ha l'obiettivo di presentare il lavoro svolto nell'ambito della sostenibilità ambientale, con particolare riferimento alla valutazione degli impatti associati ai prodotti e processi industriali. Negli ultimi anni, infatti, la sostenibilità ha assunto un ruolo di primaria importanza nel settore industriale, guidando le scelte progettuali e promuovendo l'innovazione verso tecnologie più efficienti e sostenibili.

In questo contesto, tra le metodologie riconosciute a livello internazionale per la valutazione delle prestazioni ambientali vi è il *Life Cycle Assessment* (LCA), che permette di analizzare gli impatti di un prodotto considerando le varie fasi del suo ciclo di vita, dall' estrazione delle materie prime fino alle fasi finali di smaltimento o recupero. Questo approccio sistematico è standardizzato dalle norme ISO 14040 e ISO 14044 e costituisce uno strumento essenziale per individuare le principali fonti di impatto ambientale. Ciò consente di supportare le decisioni progettuali, orientandole verso soluzioni più sostenibili e caratterizzate da un minore impatto sull' ambiente.

Il lavoro nasce dall'esperienza di tirocinio in collaborazione con *Baker Hughes*, azienda operante nel settore delle tecnologie energetiche e impegnata nello sviluppo di soluzioni a supporto della transizione energetica. L' attività è stata condotta nell'ambito della *business unit Industrial & Energy Technology* (IET), con l'obiettivo di approfondire il tema della sostenibilità e applicare la metodologia LCA a un caso concreto in ambito aziendale. In particolare, il tirocinio ha riguardato l'analisi di componenti di bulloneria impiegati nelle turbine a vapore, analizzati nelle diverse configurazioni oggetto dello studio.

L' obiettivo principale è stato quello di applicare la metodologia LCA allo studio dei componenti analizzati, al fine di valutare gli impatti ambientali lungo il ciclo di vita e individuare i principali fattori che contribuiscono a tali impatti. L' analisi è stata condotta a partire da dati tecnici e produttivi disponibili, con l'obiettivo di ottenere una valutazione ambientale utile al confronto tra differenti configurazioni e al supporto delle successive attività di progettazione e sviluppo. L' attività ha inoltre permesso di approfondire l'impiego degli strumenti e delle metodologie utilizzati in ambito aziendale per l'analisi della sostenibilità dei prodotti.

Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo di un approccio parametrico, finalizzato a mettere in relazione gli impatti ambientali con le principali variabili



Baker Hughes Confidential

progettuali e produttive dei componenti analizzati. Tale approccio ha permesso di confrontare differenti configurazioni e di supportare l'individuazione di possibili opportunità di miglioramento, favorendo l'integrazione della valutazione ambientale all' interno dell'attività di progettazione.



Baker Hughes Confidential

# 1. Sostenibilità e sviluppo sostenibile

Nato per fare fronte alle crescenti criticità climatiche, al rincaro dell'energia e al progressivo esaurimento delle risorse naturali, negli ultimi anni il panorama scientifico globale è stato fortemente segnato dal concetto di *sostenibilità*, il quale si è gradualmente trasformato in un requisito fondamentale per la competitività aziendale.

Le prime discussioni in merito alla sostenibilità e al modello di *sviluppo sostenibile* per le aziende hanno preso avvio a Stoccolma nel 1972, in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente Umano. Tuttavia, il momento chiave per la formalizzazione di questo concetto coincide con la stesura del *Rapporto Brundtland* del 1987, all'interno del quale lo sviluppo sostenibile viene inteso come «lo sviluppo in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri». [1]

Tale formulazione, oramai consolidata in ambito accademico e scientifico, promuove una prospettiva sistemica dello sviluppo che supera la classica contrapposizione tra espansione economica, salvaguardia ambientale e progresso sociale. In quest'ottica, la sostenibilità non viene intesa come un traguardo finale statico, ma piuttosto come un percorso dinamico e in costante evoluzione, concepito per bilanciare la sfera ambientale, quella economica e quella sociale.

## 1.1 Le tre dimensioni della sostenibilità e l'Agenda 2030

La nozione di sostenibilità non nasce soltanto dalla necessità di garantire un contesto ambientale più sano e un abbattimento delle emissioni, ma mira a supportare contemporaneamente anche la crescita economica e quella sociale.

Gli studi accademici e le maggiori istituzioni internazionali concordano nel delineare tre componenti essenziali che definiscono la sostenibilità:

- *Sostenibilità ambientale*: attiene al rispetto e alla salvaguardia delle risorse naturali, al contenimento dell'inquinamento, alla difesa della biodiversità e alla riduzione dei danni causati dalle attività umane sugli ecosistemi. Questo comporta l'adozione di dinamiche produttive e di consumo in grado di preservare le capacità rigenerative della Terra.



Baker Hughes Confidential

- *Sostenibilità economica***:** riguarda la capacità di creare valore nel tempo mediante modelli economici solidi, orientati all'innovazione e non fondati sul degrado delle risorse naturali o sull'aumento dei divari sociali. Un sistema economico sostenibile persegue efficienza, circolarità e continuità nel tempo.
- *Sostenibilità sociale***:** comprende principi come l'equità, l'inclusione, il rispetto dei diritti umani, il tenore di vita, la fruibilità dei servizi di base e la partecipazione attiva dei cittadini. La dimensione sociale riconosce che il benessere della comunità costituisce un fattore indispensabile per qualunque forma di progresso duraturo.

Tali ambiti non operano in modo isolato: il raggiungimento della sostenibilità presuppone una visione d'insieme capace di cogliere le strette relazioni e le reciproche dipendenze tra natura, economia e collettività.

Per tale ragione, nel 2015 l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha approvato *l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*, un piano d'azione internazionale fondato su 17 *Sustainable Development Goals* (SDGs), concepiti per rispondere a sfide cruciali quali povertà, accesso all'istruzione, transizione energetica, innovazione, crisi climatica, modelli di consumo responsabili e tutela della vita sulla terra e nei mari. Di fatto, l'Agenda 2030 definisce «un programma d'azione globale per le persone, il pianeta e la prosperità: 17 Obiettivi e 169 traguardi adottati dai 193 Stati Membri delle Nazioni Unite per guidare il mondo verso un futuro più sostenibile, equo e pacifico entro il 2030». [2]

Questo quadro di riferimento costituisce oggi la guida fondamentale per le decisioni di politica pubblica, i piani strategici d d'impresa e le attività di studio e ricerca scientifica. Esplicita un linguaggio condiviso e parametri quantificabili attraverso cui misurare l'apporto reale fornito da settori, tecnologie e metodologie operative verso uno sviluppo davvero sostenibile.



Baker Hughes Confidential




*Figura 1. 1 7 Sustainable Development Goals (SDGs) - Agenda 2030*

## 1.2 Sostenibilità ambientale

Con il termine *sostenibilità ambientale* si definisce quel processo evolutivo in cui l'impiego delle risorse, la destinazione degli investimenti, la direzione del progresso tecnologico e le trasformazioni degli assetti istituzionali procedono in modo armonico, con l'obiettivo di preservare la capacità di soddisfare le necessità e le aspettative umane sia presenti sia future.

Le strategie volte ad accrescere la sostenibilità ambientale del pianeta sono molteplici e spaziano dall'ampliamento degli spazi verdi urbani alla razionalizzazione della mobilità, fino al contenimento dei consumi energetici. In ambito industriale, il tema centrale risiede nella contrazione delle emissioni di carbonio mediante l'integrazione delle tecnologie più avanzate, l'impiego di fonti rinnovabili all'interno dei cicli produttivi, la riduzione degli sprechi e la corretta gestione del ciclo dei rifiuti. Un elemento nodale della sostenibilità ambientale è rappresentato dalla prospettiva temporale con cui viene programmata: molte delle azioni aventi incidenza sull'ambiente non generano infatti riscontri immediati, ma manifestano le proprie conseguenze solo nel lungo periodo. Di conseguenza, la tutela delle risorse della natura esige una governance strategica ben ponderata e proiettata nel tempo.

Tra gli strumenti di misurazione più diffusi per stimare l'impatto delle attività umane sulla biosfera figura l'*impronta ecologica* (*Ecological Footprint*). Tale misura quantifica la superficie complessiva di territorio e mare biologicamente produttivi necessaria a



Baker Hughes Confidential

produrre le risorse consumate da una determinata comunità. Questo parametro riassume il bilancio tra il fabbisogno generato dall'uomo e la reale biocapacità degli ecosistemi.

A questo concetto si lega in modo diretto l'*Earth Overshoot Day*, ossia la data dell'anno in cui il consumo di risorse naturali da parte dell'umanità eccede la capacità produttiva e rigenerativa annuale del pianeta. Questo indicatore mette in luce il marcato disallineamento tra gli attuali volumi di consumo e i limiti fisici della Terra, sottolineando l'esigenza impellente di convertire le dinamiche di sviluppo verso modelli sostenibili.

## 1.3 Metodologie di analisi e stima degli impatti: l'approccio LCA

Come evidenziato nella sezione precedente, la sostenibilità in ambito ambientale risiede nella capacità delle filiere produttive di tutelare le risorse naturali, salvaguardare il territorio e abbattere i livelli di inquinamento. In termini più generali, il contesto naturale svolgere tre funzioni primarie:

- Approvvigionatore di risorse;
- Recettore dei prodotti di scarto;
- Fonte diretta di utilità.

Affinché il patrimonio naturale preservi tali funzionalità, risulta indispensabile non valicare la soglia massima di assorbimento della biosfera di fronte ai cambiamenti di origine antropica. È dunque fondamentale proteggere i beni offerti dall'ambiente minimizzando le attività estrattive e contraendo gli output emissivi.

A integrazione degli obiettivi dell'Agenda 2030, l'*European Green Deal* punta a convertire l'Unione Europea in un modello economico moderno, efficiente e competitivo, con il traguardo della neutralità climatica e l'azzeramento delle emissioni nette di gas ad effetto serra entro il 2050. Tale percorso fa leva sull'implementazione di metodologie pratiche basate sulla prospettiva del ciclo di vita (*Life Cycle Approach*). Le risorse disponibili in questo ambito si articolano in tre macro-categorie: metodologie analitiche, soluzioni digitali e strumenti di supporto alla progettazione. Tali approcci sono concepiti per tracciare l'impronta ecologica lungo i differenti passaggi della filiera, individuando le fasi a maggior impatto per guidare interventi mirati sul prodotto. Tra le principali metodologie analitiche rientrano:



Baker Hughes Confidential

- *Life Cycle Assessment*: strumento fondamentale per l'analisi integrata di prodotti e organizzazioni.
- *Environmental Footprint*: quadro metodologico sviluppato dalla Commissione Europea per uniformare il calcolo dell'impronta ambientale di beni e imprese.
- *Carbon Footprint*: indirizzata in modo specifico alla quantificazione dell'impronta carbonica e dei gas ad effetto serra.

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) rappresenta un quadro metodologico rigoroso ideato per stimare le esternalità ambientali associate a un bene, processo o servizio durante l'intero suo ciclo di vita: dalla fase di approvvigionamento delle materie prime fino alla gestione del fine vita. La finalità risiede nell'offrire un quadro sistemico e misurabile delle pressioni ambientali, scongiurando valutazioni parziali o fuorvianti. Attraverso l'acquisizione delle informazioni, la mappatura dei flussi e la stima degli impatti, la metodologia LCA consente di evidenziare gli stadi più critici per indirizzare scelte progettuali orientate alla sostenibilità.

I principi teorici dell'LCA prescindono dalla specifica piattaforma informatica impiegata; solitamente, tra gli applicativi software più diffusi a supporto di tali analisi si annoverano SimaPro, GaBi e openLCA, i quali permettono di valutare le singole fasi produttive e di effettuare comparazioni dirette tra scenari differenti. Tali sistemi informatici attingono a *database ambientali* strutturati fornitori di dati secondari, ossia *dataset* di supporto utilizzabili nella fase di modellazione in assenza di rilievi primari sul campo. Tra le basi di dati più autorevoli nel settore spicca *Ecoinvent,* riconosciuta tra le banche dati più esaustive a livello internazionale in virtù dell'elevata qualità delle informazioni relative a materiali, processi e filiere. Ciascun dataset descrive nel dettaglio una specifica unita di processo in riferimento alla propria unità funzionale, costituendo un elemento portante per le principali suite di analisi LCA.

### 1.3.1 Metodologia LCA

*La Valutazione del Ciclo di Vita* costituisce una procedura standardizzata e oggettiva finalizzata alla misurazione degli impatti ambientali potenziali associati a un bene, a un processo o a un'attività antropica, esaminando sia il prelievo di risorse naturali sia gli output emissivi correlati.



Baker Hughes Confidential

Le direttive di riferimento per la condotta di una ricerca LCA sono stabilite dagli standard internazionali ISO 14040:2006[1] e ISO 14044:2006[2] [4], le quali assicurano che l'indagine venga eseguita con criteri scientifici, favorendo il confronto tra esiti e contesti differenti. Come precedentemente evidenziato, i risultati ottenuti mediante l'applicazione della metodologia LCA esulano dall'applicativo informatico adottato. Ciò è dovuto al fatto che l'articolazione in fasi del processo analitico resta identica per ciascuna piattaforma e si suddivide in:

1. *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione*: fase introduttiva nella quale si puntualizzano le finalità dell'indagine e si determinano con esattezza l'unità funzionale, i criteri di qualità dei dati e i confini del sistema analizzato.
2. *Analisi di inventario (LCI)*: momento operativo incentrato sulla classificazione e strutturazione delle informazioni e dei dati quantitativi raccolti; questa fase risulta indispensabile per la corretta riuscita dell'elaborazione. Una mappatura dei flussi dettagliata richiede un impegno temporale notevole e condiziona direttamente la validità scientifica dell'intero lavoro. Di norma, l'inventario viene impostato mediante specifici fogli di calcolo volti alla redazione della *Bill of Materials* (BOM), ovvero una struttura dati comprendente tutti i componenti del prodotto, la documentazione CAD – organizzata in assiemi e sottoassiemi nei relativi livelli gerarchici – e l'indicazione dei singoli materiali impiegati. Una volta completata, la BOM viene importata nel software di modellazione.
3. *Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA):* fase in cui si individuano le diverse categorie d'impatto e si calcolano i valori quantitativi delle pressioni ambientali. Questo passaggio si articola a sua volta in quattro momenti principali: classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione.
4. *Interpretazione dei risultati:* stadio conclusivo volto all'esame critico dei dati per valutarne la coerenza, la completezza e il livello di accuratezza complessivo.

[1] **ISO 14040:2006**, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework definisce i principi e il quadro di riferimento della Life Cycle Assessment, fornendo una panoramica della pratica, delle applicazioni e dei limiti dell'LCA.
[2] **ISO 14044:2006**, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, specifica i requisiti e le linee guida per la preparazione, l'implementazione e la revisione critica dello studio LCA. Include inoltre indicazioni sulla valutazione degli impatti, sull'interpretazione dei risultati e sulla qualità dei dati raccolti.



Baker Hughes Confidential

# 2. Baker Hughes

Baker Hughes è una realtà tecnologica globale attiva nei comparti dell'energia e dell'industria, focalizzata sul ciclo di progettazione, fabbricazione e distribuzione di soluzioni ad alto valore innovativo destinate al mercato internazionale. La *mission* aziendale si orienta verso la promozione di una transizione energetica progressivamente più efficiente e sostenibile a beneficio degli attori industriali dei diversi segmenti operativi. Sostenuta da un capitale umano di circa 58.000 risorse e da una copertura capillare in più di 120 Nazioni, Baker Hughes applica un *Portfolio approach*, identificabile come «un approccio olistico che prevede la coesistenza di diverse soluzioni tecnologiche e che persegue la collaborazione lungo tutta la catena del valore, comprese le nuove frontiere energetiche come ad esempio l'idrogeno, la cattura e l'utilizzo della CO2 (*Carbon Capture, Utilization and Storage* - CCUS) e lo stoccaggio di energia.» [5]

L'operatività dell'organizzazione si struttura in modo da contenere l'impronta ecologica delle attività e amplificare la ricaduta positiva sul territorio. Mediante la ricerca su sistemi a ridotta intensità emissiva, il gruppo persegue il traguardo della neutralità carbonica (*net-zero*) per i propri siti e processi entro il 2050.

Nata negli Stati Uniti con quartier generale situato a Houston, Baker Hughes si colloca tra i principali player globali nell'ambito dei servizi per l'energia. Nel contesto italiano, il gruppo si esprime in prevalenza tramite la controllata *Nuovo Pignone*, polo tecnologico di riferimento per la progettazione e la realizzazione di turbine a gas e a vapore, compressori sia alternativi sia centrifughi, pompe e sistemi valvolari. Attraverso questo presidio industriale, la multinazionale mantiene solide sinergie con l'ecosistema universitario, istituzioni ed entità private, promuovendo iniziative di ricerca e sviluppo su scala locale e internazionale.

## 2.1 Profilo aziendale

L'organizzazione si presenta sul mercato come una realtà unitaria articolata in due divisioni strategiche e complementari, modellate per coprire l'intera catena del valore nei comparti dell'energia e dell'industria:

- *Oilfield Services & Equipment* (OFSE): focalizzata sulla fornitura di beni e servizi destinati alla fase di esplorazione, estrazione e gestione dei bacini energetici. In questo ambito, l'azione del gruppo si concentra in modo prioritario sullo sviluppo



Baker Hughes Confidential

tecnologico, sulle tecniche di completamento e sulle architetture avanzate per l'ottimizzazione produttiva dei campi.

- *Industrial & Energy Technology* (IET)*:* orientata alla progettazione di soluzioni ad alto contenuto tecnologico per l'abbattimento dell'impronta emissiva nei processi industriali e per la realizzazione di infrastrutture energetiche a ridotto impatto ecologico. Il portafoglio d'offerta della divisione include apparati per la generazione di potenza, turbine a gas, sistemi per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno, tecnologie di elettrificazione, gestione delle reti energetiche e metodologie per la rilevazione continua delle emissioni.

## 2.2 Evoluzione e impegno verso la sostenibilità (ESG)

All'interno del panorama energetico globale, il gruppo orienta la propria cultura organizzativa ai criteri *ESG* (*Environmental, Social, Governance*), recependo tali principi nelle scelte tattiche e gestionali [6]. L'operato aziendale mira ad armonizzare sfide spesso complesse, bilanciando la continuità degli approvvigionamenti energetici, l'avanzamento tecnologico e il contenimento dell'impronta ecologica, preservando al contempo l'efficienza e la stabilità economica.

Per delineare le proprie traiettorie di sviluppo nel breve, medio e lungo periodo, l'impresa ha adottato il piano strategico *Three Horizons for Growth*, una roadmap d'azione distribuita su tre distinte finestre temporali:

- *Horizon One* (2023-2025): dedicato al consolidamento della sostenibilità finanziaria e alla razionalizzazione dell'assetto organizzativo interno, con l'obiettivo di rafforzare la leadership tecnologica nei comparti dell'energia e dell'industria.
- *Horizon Two* (2026-2028): focalizzato sull'impronta generata nei mercati internazionali. Durante questo arco temporale, il gruppo mira a perfezionare l'offerta tecnologica per i propri partner, incrementando la resa energetica e abbattendo i volumi emissivi.
- *Horizon Three* (2028+): indirizzato alla sperimentazione e diffusione di soluzioni tecnologiche di nuova generazione volte a guidare le dinamiche future del mercato energetico.

Di conseguenza, il percorso di crescita d'impresa poggia su tre direttrici fondamentali:



Baker Hughes Confidential

- *People:* centralità della risorsa umana, attraverso la valorizzazione delle tutele lavorative e del benessere dei collaboratori.
- *Principles:* adesione a rigorosi standard internazionali, percorsi di aggiornamento professionale continuo e governance etica della *supply chain*.
- *Planet*: impegno sul piano della tutela ambientale mediante il contenimento dell'impronta carbonica, l'ottimizzazione dei consumi di risorse e l'integrazione di energia da fonti rinnovabili.



Baker Hughes Confidential

# 3. Caso studio della bulloneria

In seguito all'inquadramento teorico sulla sostenibilità, sui principi operativi della Life Cycle Assessment (LCA) e sul contesto tecnologico-industriale di *Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l.* nell'ambito delle turbine a vapore, la presente sezione traduce tali premesse metodologiche in un'applicazione concreta su scala industriale, condotta in sinergia tra la realtà aziendale e il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

L' obiettivo dell'indagine risiede nella caratterizzazione del profilo d'impatto ecologico proprio della bulloneria utilizzata per la giunzione di mezzeria della cassa esterna e delle casse interne della turbina a vapore. Trattandosi di organi meccanici soggetti a sollecitazioni severe e critici per la stabilità strutturale dell'intero impianto, la loro fabbricazione richiede l'impiego di acciai legati ad altissime prestazioni e sequenze di lavorazione meccanica e termica ad alta intensità energetica, fattori che determinano un'impronta ambientale di primaria rilevanza nell'intero ciclo produttivo.

Nello specifico, l'analisi prende in esame: *prigionieri* (stud bolts), *tiranti* (tie rods) e *dadi* (nuts), valutati su un'ampia variabilità di geometrie e scale dimensionali impiegate nei diversi modelli di turbina. Nel presente documento è strutturata solamente la valutazione dell'impatto ambientale della bulloneria, però lo studio complessivo consiste nel valutare le emissioni generate – nelle diverse categorie di impatto scelte – di sei turbine a vapore. L'approccio metodologico segue con il massimo rigore le direttive degli standard ISO 14040 e ISO 14044, articolandosi attraverso la perimetrazione dello studio (Goal and Scope Definition), la strutturazione dell'inventario dei flussi di materia ed energia (Life Cycle Inventory), la stima degli indicatori di impatto e prestazione ambientale (Life Cycle Impact Assessment) e la successiva analisi critica delle evidenze emerse. Il confine del sistema adottato è di tipo "cradle-to-gate", prendendo in considerazione le risorse a partire dalla fase estrattiva sino al completamento delle lavorazioni presso i siti produttivi.

Un nodo centrale del lavoro riguarda l'individuazione puntuale dei nodi critici (hotspot), ovvero la diagnostica dei passaggi di processo e dei consumi materiali che generano la maggior quota di impatto. Contestualmente, lo studio sviluppa un modello matematico di regressione capace di stimare in modo predittivo gli indicatori LCA a partire dalle sole grandezze geometriche fondamentali del componente (in particolare diametro e lunghezze). Tale integrazione è stata resa possibile dall'elaborazione di ampio



Baker Hughes Confidential

insieme informativo aziendale, comprendente modelli tridimensionali CAD, disegni costruttivi, tempari di lavorazione, archivi del software di preventivazione parametrica LeanCOST e normative tecniche interne (BH).

L'applicazione svolta intende mostrare l'efficacia della metodologia LCA non soltanto quale strumento analitico ex-post, ma come vero e proprio driver strategico di Eco-design, in grado di supportare l'ingegnerizzazione di prodotto verso soluzioni a ridotto impatto, in piena sintonia con le direttive di transizione ecologica di Nuovo Pignone e con le istanze di sostenibilità del comparto energetico globale.

## 3.1 Definizione dell'obiettivo e dell'ambito

### 3.1.1 Obiettivo

L'obiettivo dello studio è valutare gli impatti ambientali associati a: prigionieri, tiranti di collegamento e dadi di montaggio.

### 3.1.2 Unità funzionale e flusso di riferimento

L'*unità funzionale* è la produzione del singolo elemento di bulloneria finito, rappresentativo del componente analizzato. Il *flusso di riferimento* considerato nello studio è costituito dai diversi elementi di bulloneria (prigionieri, tiranti e dadi) nelle dimensioni specificate:

- *12 versioni di prigionieri*: M16_L90, M16_L100, M36_L195, M36_L295, M45_L225, M45_L365, M64_L335, M64_L550, M100_L450, M100_L575, M125_L575 e M125_L975;
- *4 versioni di tiranti*: M45_L310, M45_L450, M125_L840 e M125_L1450;
- *5 versioni di dadi*: M16, M36, M64, M90 e M125.

### 3.1.3 Confini del sistema

Il presente studio copre le seguenti fasi del ciclo di vita del prodotto:

- *Estrazione delle materie prime* (Materie prime): include l'estrazione delle risorse naturali e i processi chimico-metallurgici necessari alla loro produzione;



Baker Hughes Confidential

- *Pre-produzione*: include i processi di deformazione plastica (forgiatura) e le risorse energetiche/ausiliarie necessarie all'ottenimento dei prodotti semifiniti;
- *Trasporti*: include la logistica di trasporto dei semifiniti dal fornitore verso il sito produttivo (Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l.);
- *Produzione*: include le lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo realizzate all'interno o all'esterno dell'azienda per trasformare i semifiniti nel prodotto finito assemblabile.

Sono escluse dal confine di analisi:

- Il trasporto dal sito produttivo aziendale al cliente finale;
- La manutenzione e l'assistenza operativa durante l'esercizio della macchina;
- La fase di fine vita (*End of Life* - EoL) e smantellamento del componente.

### 3.1.4 Regole di cut-off

Nel caso studio in esame, l'approccio adottato prevede l'applicazione di un criterio di cut off a tutti i componenti con una massa inferiore al 5% della massa totale del prodotto, al fine di semplificare le attività di raccolta dati e la fase di modellazione.

### 3.1.5 Categorie, modelli e indicatori dell'impatto ambientale

La quantificazione delle cariche ambientali è stata strutturata applicando la metodologia *Environmental Footprint 3.1* (EF 3.1) [7], che rappresenta il quadro tecnico di riferimento definito dalla Commissione Europea (con il recepimento dei coefficienti di ponderazione e normalizzazione aggiornati al novembre 2022) per i bilanci d'impronta ecologica di prodotto.

Attraverso questo approccio è possibile mappe in modo sistematico l'insieme delle interazioni tra il sistema manifatturiero e l'ambiente, considerando sia i prelievi di risorse naturali ed energetiche (*input*), sia le emissioni in aria, acqua e suolo unitamente alla produzione di scarti (*output*).

Nel caso specifico dei componenti di serraggio, l'indagine si è focalizzata sui quattro indicatori maggiormente rappresentativi per il comparto della metallurgia e delle lavorazioni ad asportazione di truciolo e deformazione a caldo:



Baker Hughes Confidential

- *Cambiamento climatico* (*Climate change*): stima l'impronta di carbonio complessiva legata all'emissione di gas ad effetto serra lungo la filiera. L'indicatore esprime i risultati in chilogrammi di $CO_2$ equivalente ($kg\ CO_2\ eq$), convertendo i diversi contributi molecolari tramite i potenziali di riscaldamento globale (GWP a 100 anni).
- *Uso delle risorse fossili* (*Resource use, fossil*): quantifica il prelievo di vettori energetici non rinnovabili (quali idrocarburi, gas naturale e carbon fossile). La stima si basa sul potere calorifico inferiore (LHV) delle fonti primarie impiegate ed è espressa in megajoule ($MJ$).
- *Uso delle risorse minerali e metalliche* (*Resource use, mineral and metals*): misura l'esaurimento delle riserve minerarie e dei giacimenti metalliferi dovuto all'impiego di acciai speciali legati. Tale parametro adotta il modello del potenziale di depauperazione abiotica (ADP) e si misura in chilogrammi di antimonio equivalente ($kg\ Sb\ eq$).
- *Consumo idrico* (*Water use*): analizza il volume netto d'acqua sottratto ai bacini idrici per le operazioni di raffreddamento e trasformazione industriale. L'indicatore sfrutta la formulazione *AWARE* [8], che pesa i volumi utilizzati in funzione dello stress idrico e della scarsità locale della risorsa, con risultati espressi in metri cubi equivalenti ($m^3\ eq$).

Infine, relativamente all'integrazione dei processi di background prelevati dalla banca dati *Ecoinvent v3.10*, la gestione dei flussi riciclati e dei sottoprodotti è stata impostata secondo il criterio *"Allocation, cut-off by classification"*. Tale scelta metodologica imputa interamente gli impatti dell'estrazione e della prima raffinazione della materia prima al primo ciclo di vita del componente, mentre i processi di recupero a fine vita e i materiali riciclati vengono attribuiti esclusivamente ai sistemi produttivi che li reimpiegano come materia seconda, evitando qualunque sovrapposizione o doppio conteggio nei bilanci finali.

### 3.1.6 Requisiti e qualità dei dati

Nel rispetto dei criteri metodologici stabiliti per l'analisi, si è proceduto alla selezione e personalizzazione dei dataset valutando accuratamente il contesto produttivo e logistico di riferimento. La successiva fase di raccolta dati ha quindi garantito un'elevata



Baker Hughes Confidential

rappresentatività geografica e tecnologica, consentendo la definizione di scenari puntuali sia per le fasi di lavorazione sia per la modellazione dei flussi di trasporto.

*Tabella 1. Requisiti e qualità dei dati per la rappresentatività geografica*

| Fase del ciclo di vita | Parametri principali | Rappresentatività geografica | Area geografica suggerita |
|---|---|---|---|
| Materia prima | Materiale e lega | Differenziata in base al Paese o area di reale fabbricazione | Globale (GLO) |
| Trasporti | Mezzo di trasporto e carburante | Differenziata in base alle tratte commerciali | Europeo (RER) |
| Pre-produzione | Tipo di processo produttivo | Specificità in base al Paese in cui avviene la lavorazione | Paese del processo (Italia) |
| Produzione | Tipo di lavorazione meccanica | Specificità in base al Paese in cui avviene la lavorazione | Paese in cui avviene il processo (Italia) |

*Tabella 2. Requisiti e qualità dei dati per la rappresentatività tecnologica*

| Fase del ciclo di vita | Parametri principali | Rappresentatività tecnologica |
|---|---|---|
| **Materia prima** | Composizione del materiale | Dati di mix medio di consumo di mercato. |
| **Trasporti** | Tipologia di veicolo e carburante | Dati di mix medio di consumo di mercato |
| **Pre-produzione** | Tipologia di processo tecnologico | Dati di mix medio di consumo industriale |

## 3.2 Analisi dell'inventario nel ciclo di vita

L'approccio generale adottato è stato quello di ricostruire i modelli 3D per ciascuna delle tre famiglie in esame, applicando opportuni fattori di scala in funzione delle dimensioni nominali. L'azienda non disponeva dei modelli CAD 3D per tutte le varianti commerciali analizzate. Un esempio reale delle tre tipologie di componenti è mostrato in (Figura 2).




*Figura 2. Esempi reali delle famiglie di bulloneria analizzati: Stud bolts, Tie rods e Nuts*



Baker Hughes Confidential

### 3.2.1 Descrizione del prodotto: prigionieri (stud bolts)

Le 12 dimensioni analizzate sono state individuate per garantire un'ampia rappresentatività dimensionale dei prigionieri impiegati nelle turbine a vapore seguendo gli standard interni BH, permettendo di valutare la correlazione tra parametri di progetto e indicatori ambientali.

Per i prigionieri definiti da BH_stud bolt_1 (documento interno BH analogo alla BH_stud bolt_1), è stato adottato lo stesso modello geometrico di BH_stud bolt_2 per le seguenti applicazioni:

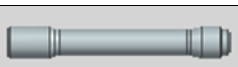
- Cassa interna della turbina 2;
- Primo porta palette della turbina 1;
- Terzo e quarto porta palette della turbina 5.

Gli acciai standard prescritti per i prigionieri delle casse esterne sono 40CrMoV4-6 e X19CrMoNbV11-1. L'analisi di processo parametrica in LeanCOST è stata effettuata prendendo come riferimento il materiale 40CrMoV4-6.

A partire dai disegni 2D, i prigionieri sono stati modellati in ambiente 3D tramite il software Siemens NX. La (Tabella 3) mostra alcuni dei componenti generati nel sistema CAD. La topologia geometrica rimane costante tra le diverse taglie, variando unicamente il diametro e la lunghezza del componente.

Per ottimizzare le routine computazionali all'interno del software LeanCOST, le filettature sono state omesse nel modello 3D NX e modellate analiticamente all'interno del software di stima dei costi.

*Tabella 3. Esempi di modelli 3D NX di prigionieri*

| | |
|---|---|
| M36_L195 |  |
| M45_L225 |  |
| M64_L335 |  |
| M125_L975 |  |



Baker Hughes Confidential

*Tabella 4. Prigionieri- Life Cycle Inventory (LCI)*

| Machine | Item | Quantity | Size | Length [mm] | Material | Billet [kg] | Finished mass [kg] | Applicable document |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | - | M36 | 195 | 40CrMoV4-6 | 6,89 | 1,25 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M36 | 295 | | 9,91 | 1,75 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M45 | 225 | | 10,18 | 2,30 | BH_stud bolt_21 |
| Turbina 3 | External casing | 2 | M45 | 365 | | 15,71 | 3,41 | BH_stud bolt_2 |
| Turbina 2 | External casing | 2 | M64 | 335 | | 22,69 | 6,78 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M64 | 550 | | 37,19 | 10,30 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M100 | 450 | | 67,01 | 23,61 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M100 | 575 | | 87,13 | 29,00 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M125 | 575 | | 87,13 | 48,20 | BH_stud bolt_2 |
| - | - | - | M125 | 975 | | 142,71 | 75,21 | BH_stud bolt_2 |



Baker Hughes Confidential

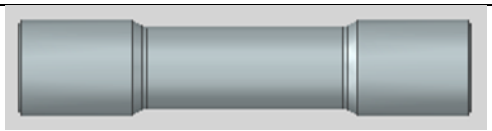
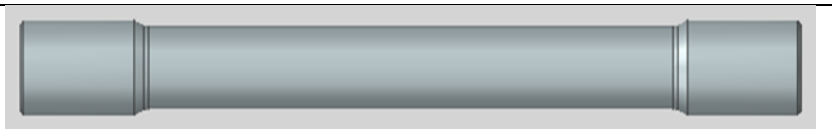
### 3.2.2 Descrizione del prodotto: tiranti (tie rods)

Le quattro dimensioni analizzate sono state selezionate per rappresentare le diverse configurazioni dei tiranti utilizzati, in conformità con le specifiche interne BH per l'acciaio 40CrMoV4-6 e per l'acciaio X19CrMoNbV11-1. Tale scelta mira a garantire un'adeguata variabilità nei risultati, consentendo di valutare successivamente le correlazioni esistenti tra i parametri di progettazione e le prestazioni ambientali.

A partire dalle tavole bidimensionali (2D), i componenti sono stati modellati in ambiente 3D mediante il software Siemens NX. La (Tabella 5) illustra le modalità di modellazione dei quattro prodotti all'interno dell'ambiente CAD. L'approccio di modellazione si mantiene uniforme per tutte le varianti, differendo unicamente per il diametro e la lunghezza della barra.

Al fine di ottimizzare e semplificare le successive elaborazioni all'interno del software LeanCOST, le filettature (*thread*) sono state omesse dai modelli CAD. Tali lavorazioni vengono infatti introdotte e gestite direttamente all'interno della struttura di calcolo di LeanCOST.

*Tabella 5. Esempi di modelli 3D NX di tiranti*

| | |
|---|---|
| M45_L310 |  |
| M45_L450 |  |
| M125_L840 |  |
| M125_L1450 |  |



Baker Hughes Confidential

*Tabella 6. Tiranti - Life Cycle Inventory (LCI)*

| **Machines** | **Item** | **Quantity** | **Size** | **Length [mm]** | **Material** | **Billet [kg]** | **Finished mass [kg]** | **Applicable document** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | - | M45 | 310 | X19CrMoNbVn 11-1 | 13,16 | 2,81 | BH_tie rod_1 |
| - | - | - | M45 | 450 | | 18,58 | 3,85 | BH_tie rod_1 |
| Turbina 6 | External casing | 2 | M125 | 840 | 40CrMoV4-6 | 121,16 | 67,22 | BH_tie rod_1 |
| - | - | - | M125 | 1450 | X19CrMoNbVn 11-1 | 205,54 | 108,41 | BH_tie rod_1 |



Baker Hughes Confidential

### 3.2.3 Descrizione del prodotto: dadi (nuts)

Le cinque dimensioni analizzate sono state selezionate per garantire un'adeguata variabilità nei risultati, consentendo di valutare le correlazioni esistenti tra i parametri di progettazione e le relative prestazioni ambientali. Nello specifico, il campione comprende:

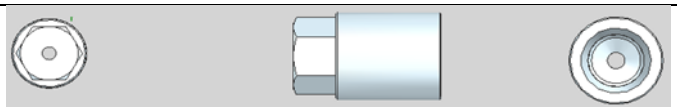
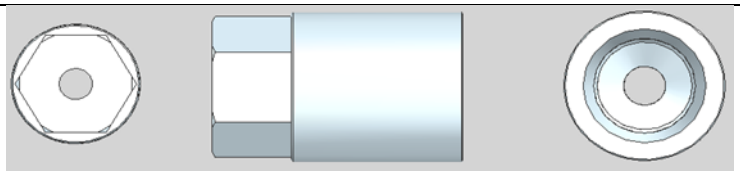
- Dadi ciechi: varianti M16, M36 e M64 conformi alla specifica BH_nut_1, destinate all'impiego sui porta-palette;
- Dadi passanti: varianti M90 e M125 conformi alla specifica BH_nut_2, utilizzate per il serraggio della cassa esterna.

Tutti i dadi vengono ottenuti tramite lavorazione meccanica a partire da barre forgiate. Poiché la quota maggioritaria dell'impatto ambientale complessivo è riconducibile alla fase di estrazione ed elaborazione della materia prima, si è scelto di valutare e analizzare contestualmente le diverse opzioni dimensionali.

A partire dai disegni bidimensionali (2D), i dadi sono stati modellati in ambiente 3D mediante il software Siemens NX. La (Tabella 7) illustra i modelli CAD realizzati per i cinque prodotti; l'approccio di modellazione risulta uniforme per tutte le varianti, differendo unicamente per le dimensioni e il diametro del dado.

Infine, al fine di ottimizzare e semplificare le successive elaborazioni in LeanCOST, le filettature interne (*thread*) sono state omesse dai modelli CAD 3D, venendo poi gestite e introdotte direttamente all'interno della struttura di calcolo del software gestionale.

*Tabella 7. Esempi di modelli 3D NX di dadi*

| | |
|---|---|
| M16 |  |
| M36 |  |
| M64 |  |



Baker Hughes Confidential

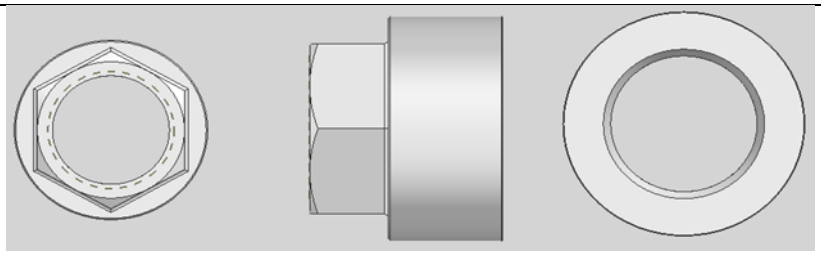
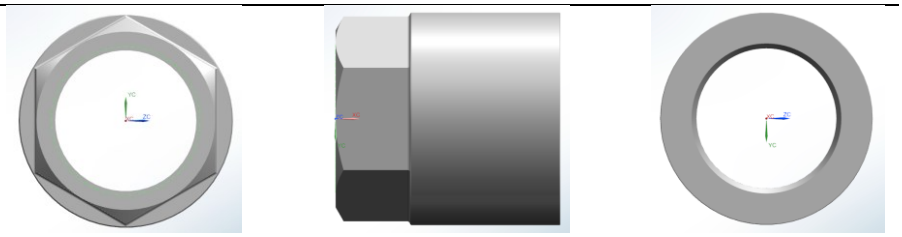
| | |
|---|---|
| M90 |  |
| M125 |  |

*Tabella 8. Dadi - Life Cycle Inventory (LCI)*

| **Machines** | **Item** | **Quantity** | **Size** | **Material** | **Billet [kg]** | **Finished mass [kg]** | **Applicable document** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Turbina 3 | Blade carrier | 2 | M16 | 40CrMoV4-6 | 1,55 | 0,10 | BH_nut_1 |
| Turbina1 | | 6 | | | 1,55 | | |
| Turbina 2 | Blade carrier | 4 | M36 | | 5,69 | 0,87 | |
| Turbina 3 | External casing | 32 | M64 | X19CrMoNbVn11-1 | 17,76 | 4,41 | BH_nut_1 |
| Turbina 2 | | | | 40CrMoV4-6 | 17,76 | | |
| Turbina 4 | External casing | 36 | M90 | 40CrMoV4-6 | 19,84 | 6,24 | BH_nut_2 |
| Turbina 6 | External Casing | 28 | M125 | X19CrMoNbVn11-1 | 54,37 | 3,82 | BH_nut_2 |
| Turbina 6 | External Casing | 4 | M125 | 40CrMoV4-6 | 54,37 | 3,82 | BH_nut_2 |



Baker Hughes Confidential

## 3.3 Inventario del ciclo vita

L'analisi dell'Inventario del Ciclo di Vita (*Life Cycle Inventory* – LCI) fornisce la catalogazione e la quantificazione dei flussi di materia ed energia in ingresso, nonché delle emissioni rilasciate verso l'ambiente per ciascun processo unitario compreso nei confini del sistema di prodotto in esame.

**Raccolta dati e fonti**

La caratterizzazione dei processi unitari e la successiva modellazione dell'inventario sono state condotte combinando fonti primarie e secondarie. Nello specifico, i dati sono stati raccolti mediante:

- Schede tecniche di raccolta dati: schede aziendali predisposte per la quantificazione dei componenti, fornite direttamente da *Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l.*;
- Interazioni e comunicazioni dirette: confronto costante con il personale tecnico dell'azienda tramite corrispondenza e-mail e sessioni di lavoro da remoto;
- Consultazione della letteratura scientifica: analisi di studi di settore, report tecnici e banche dati di riferimento.

**Modellazione in SimaPro con database EcoInvent v3.10**

Di seguito vengono fornite tutte le informazioni relative alla raccolta dei dati, necessarie per l'analisi ambientale delle 18 varianti considerate, unitamente al successivo processo di modellazione di tutte le fasi comprese nei confini del sistema.

Lo strumento utilizzato per tale attività è il software SimaPro (versione 9.1), impiegato in combinazione con il database EcoInvent v3.10. I processi disponibili all'interno del database EcoInvent, afferenti sia alla fase di preproduzione delle materie prime sia alle lavorazioni meccaniche principali, sono stati opportunamente selezionati e successivamente personalizzati. Tale personalizzazione ha previsto la modifica e l'adattamento dei dataset al fine di renderli maggiormente rappresentativi del caso specifico analizzato, ad esempio attraverso l'adattamento della localizzazione geografica dei processi produttivi o la definizione del mix energetico effettivamente impiegato.



Baker Hughes Confidential

**Materie prime, prodotti semifiniti e processi produttivi**

L'azienda forniva le liste di materiali dei prodotti, dividendo gli assemblaggi in sottoassiemi. Il materiale e il processo di fabbricazione-formatura per il prodotto semifinito e finito erano definiti a livello di componente.

*Tabella 9. Materie prime, semifiniti e prodotti finiti modellati per la bulloneria generale*

| Description | Material dataset (EcoInvent v3.10) - customized | Semi-finished machining dataset (EcoInvent v3.10) - customized | Finished machining dataset (EcoInvent v3.10) - customized |
|---|---|---|---|
| Component – bolting | 40CrMoV4-6<br>X19CrMoNbV11-1 | _Forging BH process – Stud_bolt item<br>_Forging BH process – Tie_rods item<br>_Forging BH process – Nuts item | Steel removed by turning, average, conventional {Italy}\| steel turning, average, conventional \| Cut-off, U |

Di seguito è stata riportata, come esempio, la modellazione all'interno del software SimaPro della bulloneria della cassa esterna relativa alla Turbina 3.

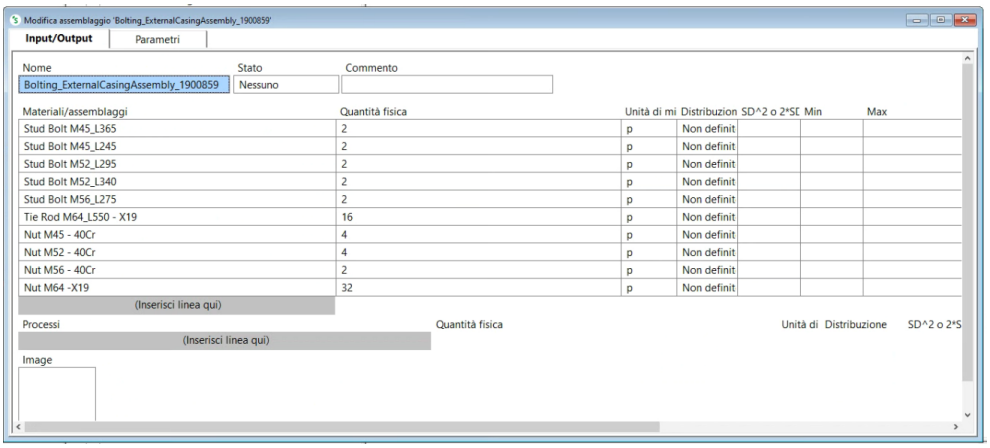



*Figura 3. Esempio di modellazione prigionieri cassa esterna, Turbina 3*



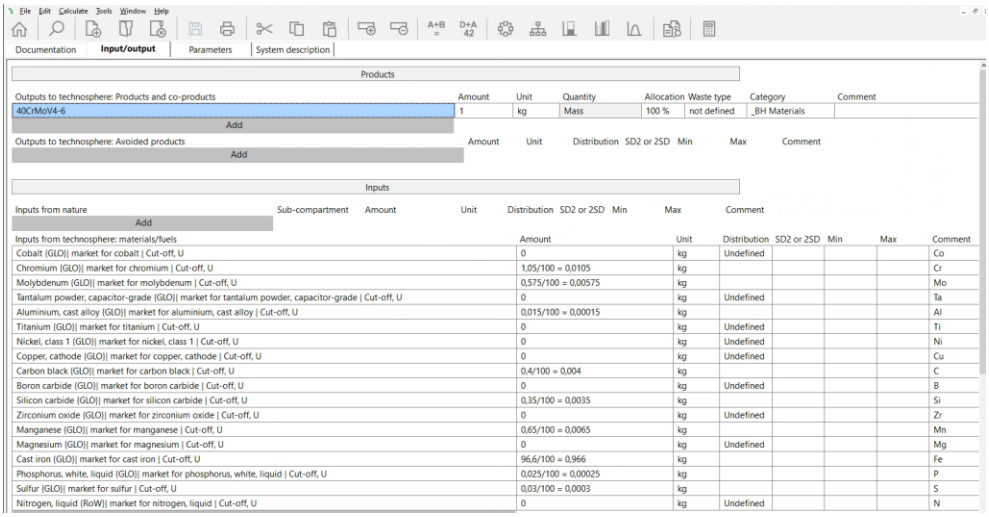
Baker Hughes Confidential

**Materie prime**

La caratterizzazione dei materiali per l'analisi LCA è stata effettuata a partire dalla composizione chimica delle singole leghe, valutando sia l'apporto delle materie prime sia il fabbisogno energetico teorico necessario al processo di fusione. I dati relativi agli elementi costitutivi sono stati ricavati dalla letteratura tecnica e implementati all'interno del software SimaPro attingendo ai dataset del database EcoInvent v3.10.

Oltre alla modellazione dei materiali, lo studio ha previsto l'adattamento dei dataset energetici in funzione del contesto geografico di produzione. Per rispecchiare in modo accurato le reali condizioni operative, i mix elettrici regionali (estratti come dati *market for electricity, high voltage*) sono stati personalizzati tenendo conto della specifica intensità emissiva e della struttura tecnologica dei Paesi coinvolti.

A tal fine, i vettori energetici primari della rete sono stati aggregati in macro-categorie omogenee (fonti fossili, nucleare, idroelettrico e biomasse), escludendo i flussi d'importazione secondari per evitare doppi conteggi. Tale approccio garantisce la costruzione di insiemi elettrici armonizzati, consentendo un confronto coerente e diretto tra le diverse configurazioni produttive dal punto di vista dell'impatto ambientale. In (Figura 4) e (Figura 5) sono riportati gli esempi per l'acciaio 40CrMoV4-6.



Products

| Outputs to technosphere: Products and co-products | Amount | Unit | Quantity | Allocation | Waste type | Category | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40CrMoV4-6 | 1 | kg | Mass | 100 % | not defined | _BH Materials | |

Add

| Outputs to technosphere: Avoided products | Amount | Unit | Distribution | SD2 or 2SD | Min | Max | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

Add

Inputs

| Inputs from nature | Sub-compartment | Amount | Unit | Distribution | SD2 or 2SD | Min | Max | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Add

| Inputs from technosphere: materials/fuels | Amount | Unit | Distribution | SD2 or 2SD | Min | Max | Comment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cobalt (GLO)\| market for cobalt \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Co |
| Chromium (GLO)\| market for chromium \| Cut-off, U | 1,05/100 = 0,0105 | kg | | | | | Cr |
| Molybdenum (GLO)\| market for molybdenum \| Cut-off, U | 0,575/100 = 0,00575 | kg | | | | | Mo |
| Tantalum powder, capacitor-grade (GLO)\| market for tantalum powder, capacitor-grade \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Ta |
| Aluminium, cast alloy (GLO)\| market for aluminium, cast alloy \| Cut-off, U | 0,015/100 = 0,00015 | kg | | | | | Al |
| Titanium (GLO)\| market for titanium \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Ti |
| Nickel, class 1 (GLO)\| market for nickel, class 1 \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Ni |
| Copper, cathode (GLO)\| market for copper, cathode \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Cu |
| Carbon black (GLO)\| market for carbon black \| Cut-off, U | 0,4/100 = 0,004 | kg | | | | | C |
| Boron carbide (GLO)\| market for boron carbide \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | B |
| Silicon carbide (GLO)\| market for silicon carbide \| Cut-off, U | 0,35/100 = 0,0035 | kg | | | | | Si |
| Zirconium oxide (GLO)\| market for zirconium oxide \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Zr |
| Manganese (GLO)\| market for manganese \| Cut-off, U | 0,65/100 = 0,0065 | kg | | | | | Mn |
| Magnesium (GLO)\| market for magnesium \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | Mg |
| Cast iron (GLO)\| market for cast iron \| Cut-off, U | 96,6/100 = 0,966 | kg | | | | | Fe |
| Phosphorus, white, liquid (GLO)\| market for phosphorus, white, liquid \| Cut-off, U | 0,025/100 = 0,00025 | kg | | | | | P |
| Sulfur (GLO)\| market for sulfur \| Cut-off, U | 0,03/100 = 0,0003 | kg | | | | | S |
| Nitrogen, liquid (RoW)\| market for nitrogen, liquid \| Cut-off, U | 0 | kg | Undefined | | | | N |

*Figura 4. Input dei materiali per l'acciaio 40CrMoV4-6*



| Inputs from technosphere: electricity/heat | Amount | Unit | Distribution | SD2 or 2SD |
|---|---|---|---|---|
| Electricity, medium voltage (GLO)\| market group for electricity, medium voltage \| Cut-off, U | 0,65 | kWh | Undefined | |

Add

*Figura 5. Input di energia elettrica per l'acciaio 40CrMoV4-6*



Baker Hughes Confidential

**Pre-produzione (forgiatura)**

Il dataset di fabbrica disponibile all'interno del database EcoInvent v3.10 per il servizio di forgiatura dell'acciaio fa riferimento alla lavorazione di grandi elementi cilindrici o a blocchi realizzati con presse aperte, con masse dei pezzi forgiati comprese tra 2 e 25 tonnellate. Poiché tale dataset non risulta rappresentativo della scala produttiva dei componenti di bulloneria di Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l. (avendo gli oggetti dimensioni differenti), si è proceduto alla sua personalizzazione.

Le singole fasi del processo di forgiatura per gli elementi di bullonaggio sono state definite integrando l'analisi condotta mediante il software LeanCOST con la documentazione tecnica (BH) fornita dall'azienda. Nello specifico, è stata utilizzata una versione di LeanCOST personalizzata con i parametri di processo specifici di *Nuovo* Pignone Tecnologie S.r.l., garantendo che i risultati rispecchiassero informazioni reali sulla produzione.

La quantificazione dell'impatto ambientale di ciascuna fase del processo di forgiatura è stata suddivisa considerando due tipologie di risorse:

- *Elettricità:* quantificazione dell'energia elettrica consumata durante la fase corrispondente;
- *Materiale:* quantificazione delle altre risorse fisiche e dei combustibili consumati nel corso della medesima fase.

L'approccio generale adottato è stato quello di parametrizzare ogni risorsa in funzione della massa finita dell'elemento di bulloneria corrispondente. In figura seguente è presente un esempio di modellazione.

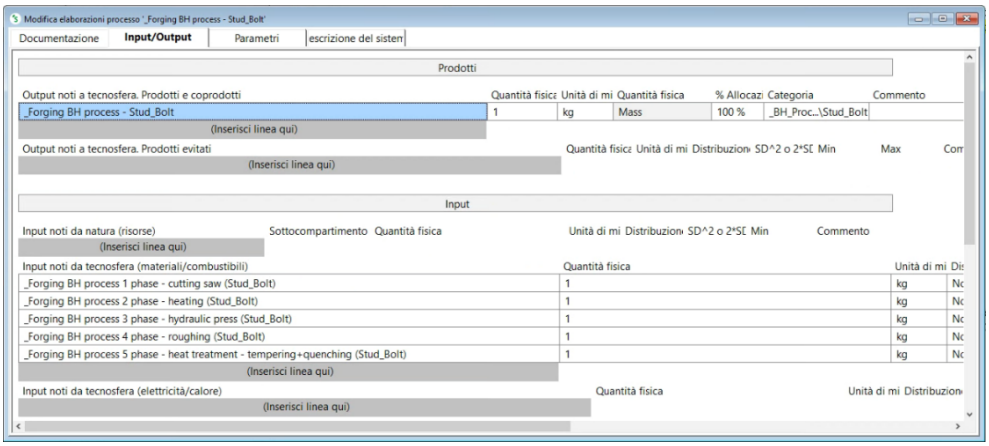



*Figura 6. Esempio di modellazione del processo di forgiatura per i prigionieri*



Baker Hughes Confidential

Le fasi del processo di forgiatura sono:

## 1. Sega da taglio

La fase di taglio tramite sega rappresenta la prima operazione del processo di forgiatura, necessaria per sezionare la materia prima di partenza e ottenere la barra nelle dimensioni e lunghezze desiderate. La metodologia utilizzata per l'analisi dei prigionieri (bulloni a perno) è stata applicata in modo analogo anche alle famiglie dei tiranti e dei dadi.

Per la caratterizzazione di questa specifica fase, sono stati trattati tre parametri fondamentali estratti dai risultati dell'analisi LeanCOST:

- *Tempo di processo* [h]: è il tempo netto necessario per eseguire l'operazione effettiva (derivato dalla scheda “Processo di produzione”, sotto le colonne “Tempo di processo & costo”, prendendo il valore “Tempo per operazione (h)” nella sezione “Taglio a trave”). I tempi di installazione e gli altri tempi accessori non sono inclusi.
- *Costo energetico della macchina* [€/h]: rappresenta il costo orario relativo alla specifica macchina o operazione considerando esclusivamente il consumo di energia elettrica, senza includere l'intero costo operativo (derivato dalla sezione “Analisi dei costi della macchina”). Poiché tale valore non era temporaneamente disponibile nella versione personalizzata del software, è stata impiegata la versione standard di LeanCOST, stimando il costo energetico delle macchine di *Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l.* come comparabile a quello dello strumento standard; il valore adottato è pari a 1,179 €/h per la macchina da taglio a travi.
- *Costo unitario dell'elettricità* (EC) [€/kWh]: è il costo unitario dell'energia elettrica derivato da LeanCOST. Essendo un valore soggetto ad aggiornamenti periodici, è stato selezionato il dato relativo al periodo di esecuzione delle analisi, pari a 0,3932 €/kWh.

Infine, per la parametrizzazione del valore temporale di processo in funzione della massa finita dell'elemento di bullonatura, è stata definita un'apposita funzione matematica basata sulle elaborazioni ottenute dall'analisi LeanCOST.



Baker Hughes Confidential

**Prigionieri**

Per la famiglia dei prigionieri, l'analisi iniziale ha preso in considerazione dodici configurazioni. Correlando la massa dei singoli elementi con i tempi di processo estratti dalle elaborazioni in LeanCOST, è stato possibile definire una funzione di regressione lineare. Ai fini della modellazione, è stata adottata un'approssimazione metodologica assumendo tale relazione lineare come estendibile e applicabile all'intera gamma di componenti appartenenti alla medesima famiglia dei prigionieri.

*Tabella 10. Parametri della funzione "sega da taglio" per i prigionieri*

| Size | Length [mm] | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|---|
| M36 | 195 | 1.25 | 0.05 |
| M36 | 295 | 1.75 | 0.05 |
| M45 | 225 | 2.3 | 0.06 |
| M45 | 365 | 3.41 | 0.06 |
| M64 | 335 | 6.78 | 0.09 |
| M64 | 550 | 10.3 | 0.09 |
| M100 | 450 | 23.61 | 0.21 |
| M100 | 575 | 29 | 0.21 |
| M125 | 575 | 48.2 | 0.21 |
| M125 | 975 | 75.21 | 0.21 |

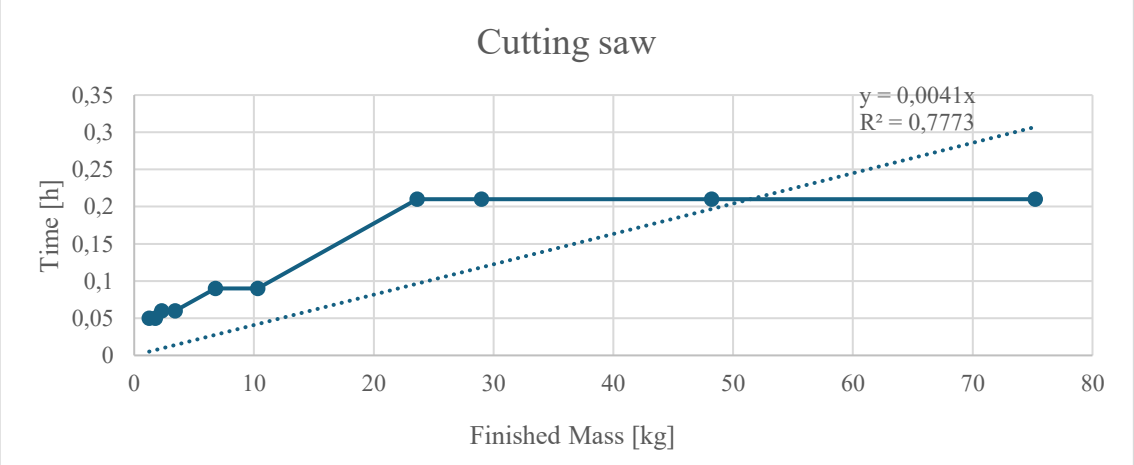



*Figura 7. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita dei prigionieri*



Baker Hughes Confidential

Con l'aiuto di questa funzione[3], si può determinare qualsiasi tempo di processo di sega da taglio correlato alla massa finita dell'elemento del bullone del perno. In particolare, la relazione lineare utilizzata per stimare il tempo delle operazioni di taglio in funzione della massa del componente finito è la seguente:

$$y = 0{,}0041x$$

Dove:

- $(y)$ – appunto sull'asse delle ordinate, rappresenta il "cutting time" cioè il tempo dell'operazione di taglio tramite macchina segatrice (espresso in ore [h]).
- $(x)$ – appunto sull'asse delle ascisse, rappresenta la "finished mass" cioè la massa del componente finito (espressa in [kg]).

Come mostrato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}7773$, evidenziando il trend di correlazione tra la massa finita dell'organo di serraggio e il tempo richiesto per la fase di taglio iniziale.

**Tiranti**

Per quanto riguarda la famiglia dei tiranti, la valutazione iniziale si è basata su quattro configurazioni caratterizzate da differenti diametri e lunghezze. La massa delle singole varianti è stata messa in relazione con i tempi di processo ottenuti dall'analisi **LeanCOST**, consentendo la formulazione di una relazione di tipo lineare. Analogamente a quanto fatto per i bulloni a perno, è stata adottata un'approssimazione metodologica che considera la funzione lineare così derivata come rappresentativa ed estendibile all'intera gamma di componenti della famiglia dei tiranti.

*Tabella 11. Parametri della funzione "sega da taglio" per i tiranti*

| Size | Length [mm] | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|---|
| M45 | 310 | 2,81 | 0,06 |
| M45 | 450 | 3,85 | 0,06 |
| M125 | 840 | 67,22 | 0,21 |
| M125 | 1450 | 108,41 | 0,21 |

[3] La funzione $y = f(x)$ in questo caso è stata approssimata utilizzando il **metodo della retta ai minimi quadrati** e quindi interpolando i singoli punti e determinando il coefficiente angolare della retta che media tutti i punti e passante per l'origine.



Baker Hughes Confidential

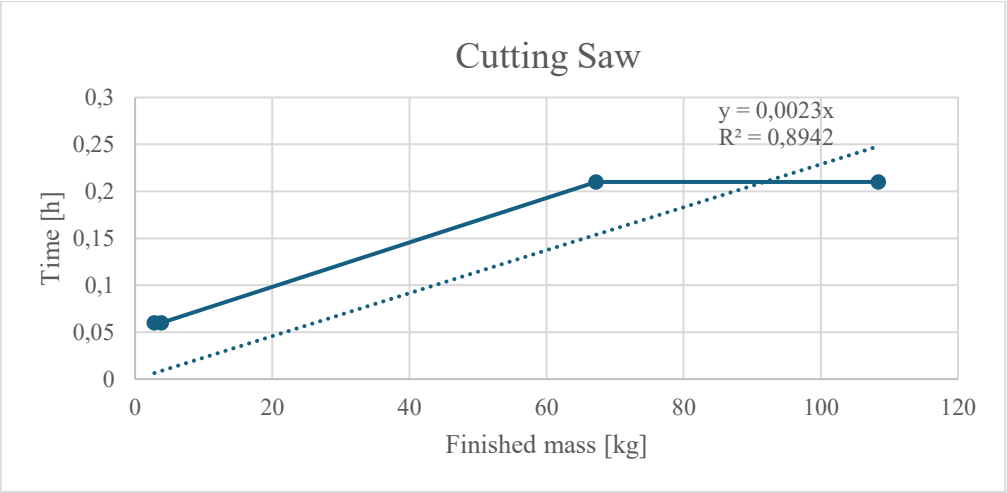



*Figura 8. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita dei tiranti*

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare il tempo delle operazioni di taglio in funzione della massa finita del componente sterzo è la seguente:

$$y = 0{,}0023x$$

Come indicato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}8942$. Ciò indica che, per questa specifica famiglia di componenti (sterzo), la correlazione lineare tra massa finita e tempo di taglio è piuttosto robusta. Si noti, tuttavia, che l'andamento effettivo dei dati (punti e linea blu continua) suggerisce una certa deviazione dalla linearità, specialmente per valori di massa più elevati.

**Dadi**

Per la famiglia dei dadi, l'analisi iniziale ha preso in considerazione cinque dimensioni differenti. La massa dei singoli elementi è stata messa in relazione con il parametro temporale di processo ricavato dalle analisi in **LeanCOST**, consentendo la definizione di una funzione di regressione lineare. Anche in questo caso, è stata adottata un'approssimazione metodologica considerando la relazione lineare ottenuta come estendibile e applicabile all'intera gamma di componenti della famiglia dei dadi.

*Tabella 12. Parametri della funzione "sega da taglio" per i dadi*

| Size | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|
| M16 | 0,1 | 0,03 |



Baker Hughes Confidential

| | | |
|---|---|---|
| M36 | 0,87 | 0,08 |
| M64 | 4,41 | 0,14 |
| M90 | 6,24 | 0,21 |
| M125 | 18,48 | 0,38 |

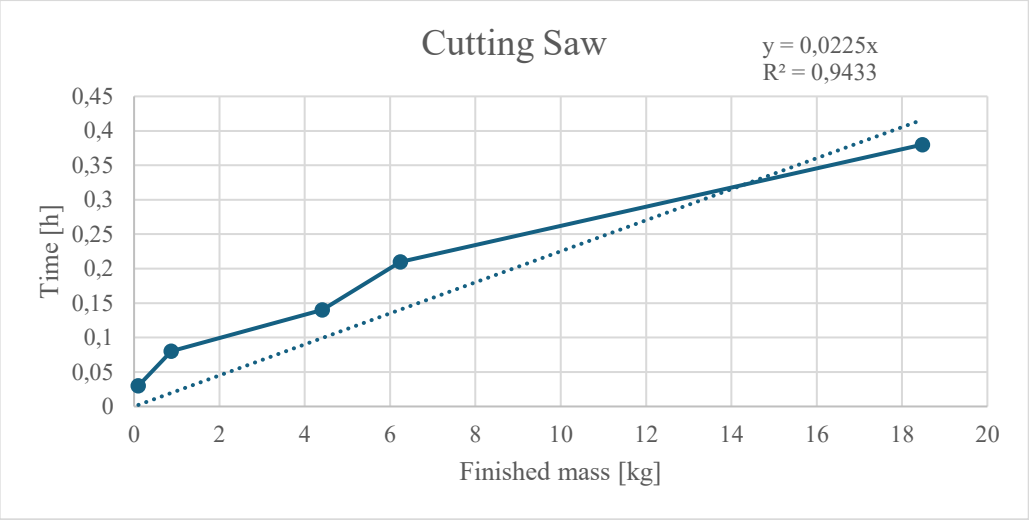



*Figura 9. Tempo di processo della sega da taglio in funzione della massa finita per i dadi*

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare il tempo delle operazioni di taglio in funzione della massa finita del dado è la seguente:

$$y = 0{,}0225x$$

Come indicato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}9433$, a indicare un'ottima correlazione lineare tra la massa finita e il tempo di taglio per questa specifica famiglia di dadi.

## 2. Riscaldamento

La fase di riscaldamento viene effettuata in preparazione alla successiva operazione di formatura mediante pressa idraulica. Grazie alle elevate temperature raggiunte, il materiale subisce una deformazione plastica che ne facilita la modellazione. Occorre evidenziare che la fase di preriscaldamento del forno non è stata inclusa nel modello di calcolo, in quanto si ipotizza che l'impianto sia in regime di funzionamento continuo e che tale stadio avvenga in concomitanza con l'operatività delle altre apparecchiature, rendendo superflua la contabilizzazione di un preriscaldamento dedicato.

Analogamente a quanto fatto per la fase di taglio tramite sega, si è resa necessaria una parametrizzazione per mettere in relazione la massa della billetta grezza con la massa



Baker Hughes Confidential

del prodotto finito. Per ciascun componente sono stati quindi raccolti i dati relativi alla massa iniziale della billetta e alla massa finita dell'elemento, ricavando una funzione lineare di correlazione denominata *Funzione di massa della billetta* (FB).

**Prigionieri**

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i prigionieri, ottenuti dall'analisi della funzione di riscaldamento.

*Tabella 13. Parametri della funzione di riscaldamento per i prigionieri*

| Size | Length [mm] | Finished mass [kg] | Billet [kg] |
|---|---|---|---|
| M36 | 195 | 1,25 | 6,89 |
| M36 | 295 | 1,75 | 9,91 |
| M45 | 225 | 2,3 | 10,18 |
| M45 | 365 | 3,41 | 15,71 |
| M64 | 335 | 6,78 | 22,69 |
| M64 | 550 | 10,3 | 37,19 |
| M100 | 450 | 23,61 | 67,01 |
| M100 | 575 | 29 | 87,13 |
| M125 | 575 | 48,2 | 87,13 |
| M125 | 975 | 75,21 | 142,71 |

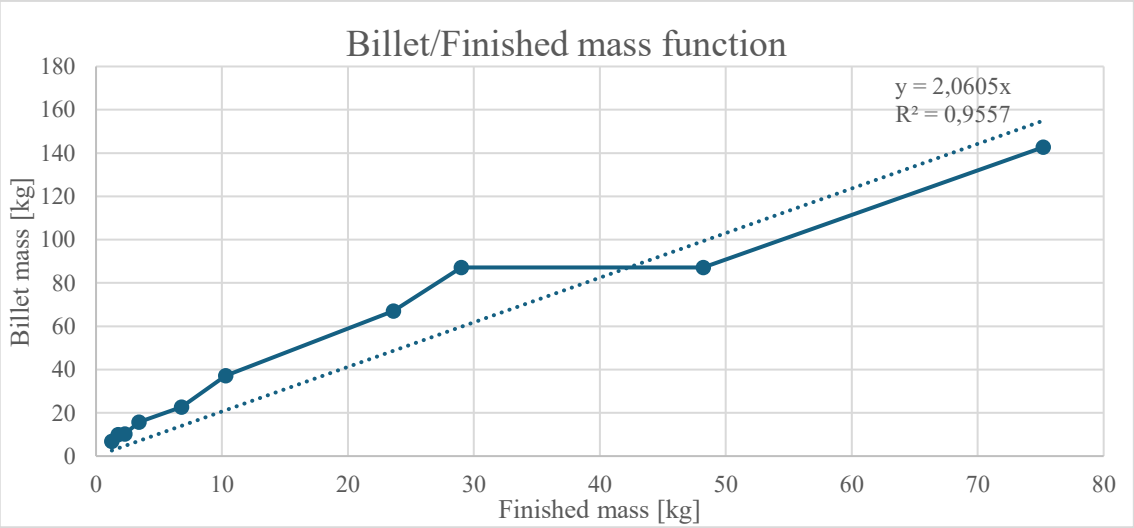



*Figura 10. Massa della billetta in funzione della massa finita del prigioniero per il riscaldamento*



Baker Hughes Confidential

In particolare, la relazione lineare utilizzata per stimare la massa del blocco di partenza (*billet*) necessaria in funzione della massa del prigioniero finito è la seguente:

$$y = 2{,}0605x$$

Dove:

- $y$ = *Billet mass* (massa del blocco di partenza/billetta) [kg].
- $x$ = *Finished mass* (massa del prigioniero finito) [kg].

Come mostrato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione elevato, pari a $R^2 = 0{,}9557$, confermando la forte proporzionalità tra la quantità di materia prima in ingresso al processo e la massa finale dell'organo di serraggio.

**Tiranti**

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i tiranti, ottenuti dall'analisi della funzione di riscaldamento.

*Tabella 14. Parametri della funzione di riscaldamento per i tiranti*

| Size | Length [mm] | Finished mass [kg] | Billet [kg] |
|---|---|---|---|
| M45 | 310 | 2,81 | 13,16 |
| M45 | 450 | 3,85 | 18,58 |
| M125 | 840 | 67,22 | 121,16 |
| M125 | 1450 | 108,41 | 205,54 |

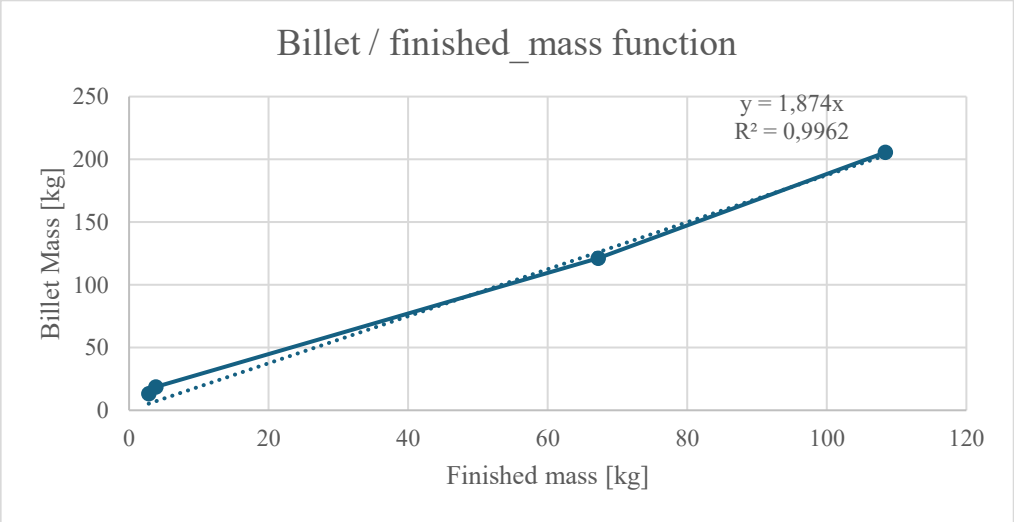



*Figura 11. Massa della billetta in funzione della massa finita del tirante per il riscaldamento*



Baker Hughes Confidential

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare la massa del blocco di partenza (*billet*) necessaria in funzione della massa del tirante finito è la seguente:

$$y = 1{,}874x$$

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione estremamente elevato, pari a $R^2 = 0{,}9962$. Questo valore conferma un'eccellente correlazione lineare tra il quantitativo di materiale grezzo iniziale e la massa finale del tirante dopo le lavorazioni.

**Dadi**

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i dadi, ottenuti dall'analisi della funzione di riscaldamento.

*Tabella 15. Parametri della funzione di riscaldamento per i dadi*

| Size | Finished mass [kg] | Billet [kg] |
|---|---|---|
| M16 | 0,1 | 1,55 |
| M36 | 0,87 | 5,69 |
| M64 | 4,41 | 17,76 |
| M90 | 6,24 | 19,84 |
| M125 | 18,48 | 54,37 |

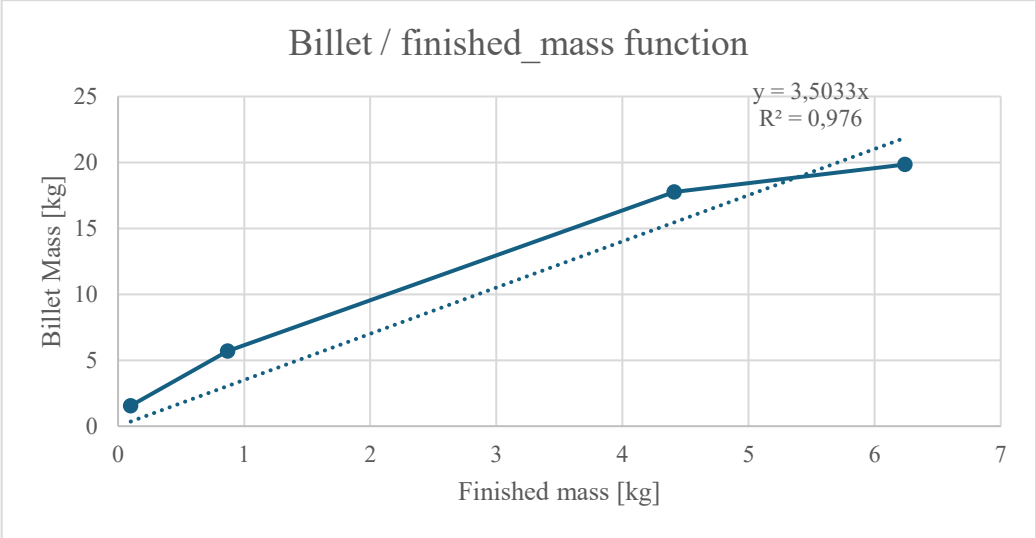



*Figura 12. Massa della billetta in funzione della massa finita del dado per il riscaldamento*



Baker Hughes Confidential

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare la massa del blocco di partenza (*billet*) necessaria in funzione della massa del dado finito è la seguente:

$$y = 3{,}025x$$

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione elevato, pari a $R^2 = 0{,}9909$. Questo valore attesta un'ottima correlazione lineare tra il quantitativo di materiale grezzo iniziale e la massa finale del dado.

## 3. Pressa idraulica

L'approccio metodologico adottato per stimare il consumo energetico della fase di pressa idraulica segue il medesimo criterio applicato per la sega da taglio.

**Prigionieri**

Dall'analisi condotta tramite LeanCOST, la massa dei diversi elementi è stata correlata al parametro del tempo di processo per definire una funzione di regressione lineare. Come per le fasi precedenti, è stata applicata un'approssimazione metodologica considerando la relazione matematica così ottenuta come estendibile e valida per tutti i componenti appartenenti alla famiglia dei prigionieri.

*Tabella 16. Parametri della funzione pressa idraulica per i prigionieri*

| Size | Length [mm] | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|---|
| M36 | 195 | 1.25 | 0.05 |
| M36 | 295 | 1.75 | 0.05 |
| M45 | 225 | 2.3 | 0.05 |
| M45 | 365 | 3.41 | 0.05 |
| M64 | 335 | 6.78 | 0.09 |
| M64 | 550 | 10.3 | 0.09 |
| M100 | 450 | 23.61 | 0.17 |
| M100 | 575 | 29 | 0.17 |
| M125 | 575 | 48.2 | 0.17 |
| M125 | 975 | 75.21 | 0.25 |



Baker Hughes Confidential

La massa delle diverse dimensioni è stata correlata al parametro del tempo di elaborazione della pressa idraulica, consentendo la definizione di una funzione-lineare mediante interpolazione. Analogamente alle fasi precedenti, si è ottenuta una linea di tendenza passante per l'origine. La pendenza di tale retta, variabile in funzione della tipologia di componente considerato, risulta fondamentale per modellare il processo di forgiatura idraulica dei prigionieri all'interno del software SimaPro. Il medesimo approccio metodologico è stato applicato anche ai tiranti e ai dadi.

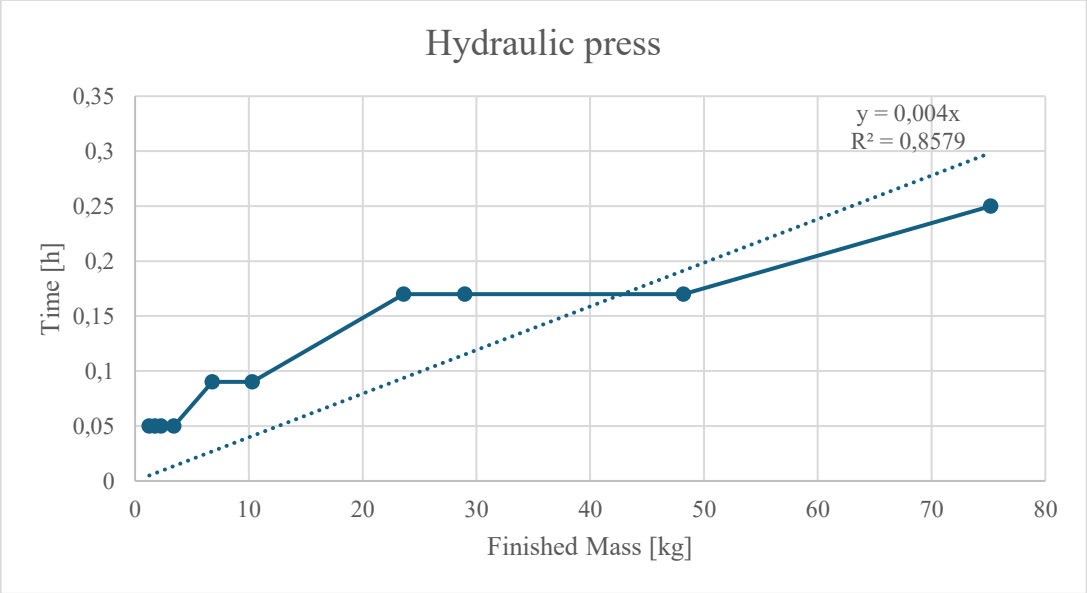



*Figura 13. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i prigionieri*

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare il tempo operativo di pressatura in funzione della massa del prigioniero finito è la seguente:

$$y = 0{,}004x$$

Dove:

- $y$ = *Time* (tempo di lavorazione alla pressa idraulica) $[h]$.
- $x$ = *Finished Mass* (massa del prigioniero finito) $[kg]$.

Come illustrato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}8579$, confermando una buona correlazione lineare tra la massa finita del componente e il tempo necessario per il processo di deformazione/pressatura.



Baker Hughes Confidential

**Tiranti**

Analogamente al processo di pressa idraulica per i prigionieri, il modello lineare si ottiene per i tiranti.

*Tabella 17. Parametri della funzione pressa idraulica per i tiranti*

| Size | Length [mm] | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|---|
| M45 | 310 | 2,81 | 0,05 |
| M45 | 450 | 3,85 | 0,1 |
| M125 | 840 | 67,22 | 0,25 |
| M125 | 1450 | 108,41 | 0,33 |

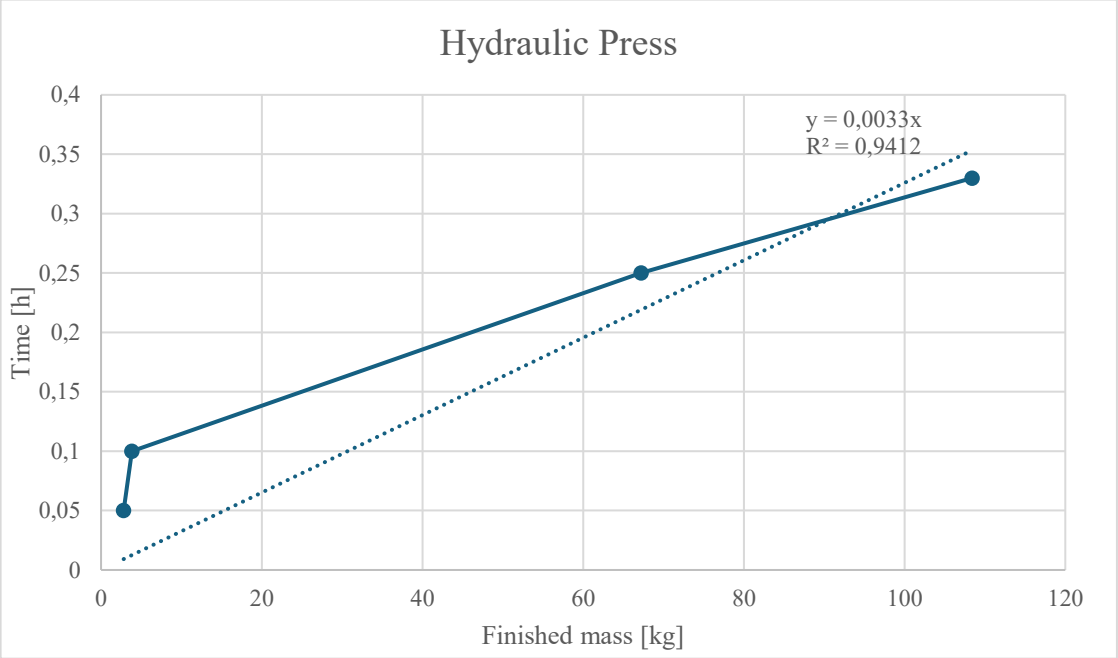



*Figura 14. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i tiranti*

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare il tempo operativo di pressatura in funzione della massa del tirante finito è la seguente:

$$y = 0{,}0033x$$

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione elevato, pari a $R^2 = 0{,}94112$, confermando un'ottima correlazione lineare tra la massa finita del tirante e la durata dell'operazione di pressatura idraulica.



Baker Hughes Confidential

**Dadi**

Analogamente ai prigionieri e tiranti, si ottiene per i dadi e dimostra che con la variazione del diametro, il tempo di lavorazione della pressa idraulica rimane costante.

*Tabella 18. Parametri della funzione pressa idraulica per i dadi*

| Size | Mass [kg] | Process time [h] |
|---|---|---|
| M16 | 0,1 | 0,05 |
| M36 | 0,87 | 0,05 |
| M64 | 4,41 | 0,05 |
| M90 | 6,24 | 0,05 |
| M125 | 18,48 | 0,09 |

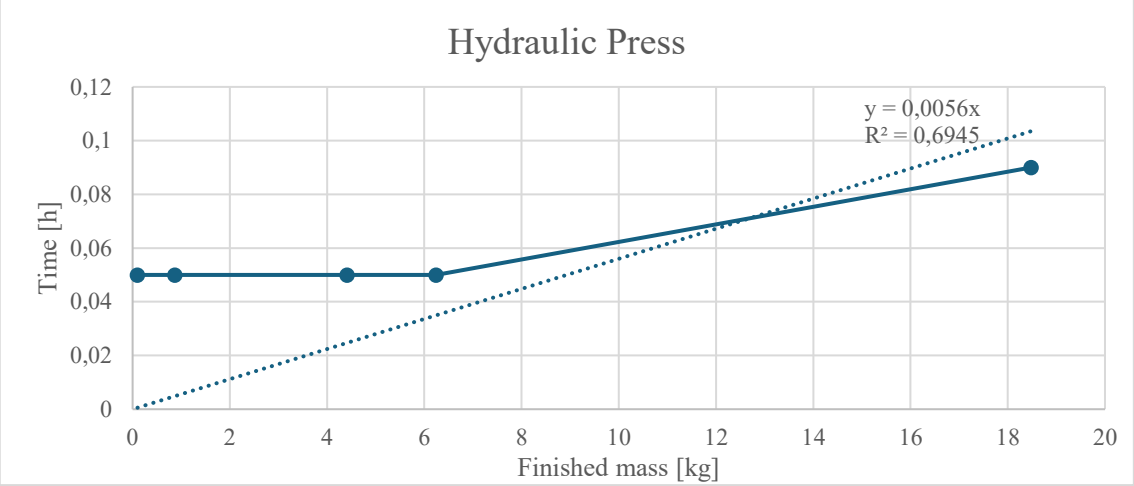



*Figura 15. Tempo di processo della pressa idraulica in funzione della massa finita per i dadi*

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare il tempo operativo di pressatura in funzione della massa del dado finito è la seguente:

$$y = 0{,}0056x$$

Come mostrato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}6945$. L'andamento dei dati evidenzia un tempo fisso/costante (pari a circa $0{,}05\,h$) per le masse inferiori a $6\,kg$, per poi mostrare un incremento proporzionale alla massa per i valori più elevati.



Baker Hughes Confidential

## 4. Sgrossatura

Asportazione del sovra-materiale grezzo mediante tornitura preliminare. La modellazione della massa asportata sfrutta due relazioni: la funzione massa billetta-finito ($FB$) e la funzione massa semifinito-finito ($FF$), descritte nelle Tabelle 19, 20 e 21 e nelle Figure 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

### Prigionieri

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i prigionieri, ottenuti dall'analisi della funzione di sgrossatura.

*Tabella 19. Parametri di sgrossatura per i prigionieri*

| Size | Length [mm] | Finished Mass [Kg] | Semifinished Mass [kg] | Billet [kg] | Roughing mass [kg] |
|---|---|---|---|---|---|
| M36 | 195 | 1,25 | 6,04 | 6,89 | 0,85 |
| M36 | 295 | 1,75 | 8,72 | 9,91 | 1,19 |
| M45 | 225 | 2,3 | 8,83 | 10,18 | 1,35 |
| M45 | 365 | 3,41 | 13,68 | 15,71 | 2,03 |
| M64 | 335 | 6,78 | 19,86 | 22,69 | 2,83 |
| M64 | 550 | 10,3 | 32,64 | 37,19 | 4,55 |
| M100 | 450 | 23,61 | 49,95 | 67,01 | 17,06 |
| M100 | 575 | 29 | 65,04 | 87,13 | 22,09 |
| M125 | 575 | 48,2 | 80,91 | 87,13 | 6,22 |
| M125 | 975 | 75,21 | 132,7 | 142,71 | 10,01 |

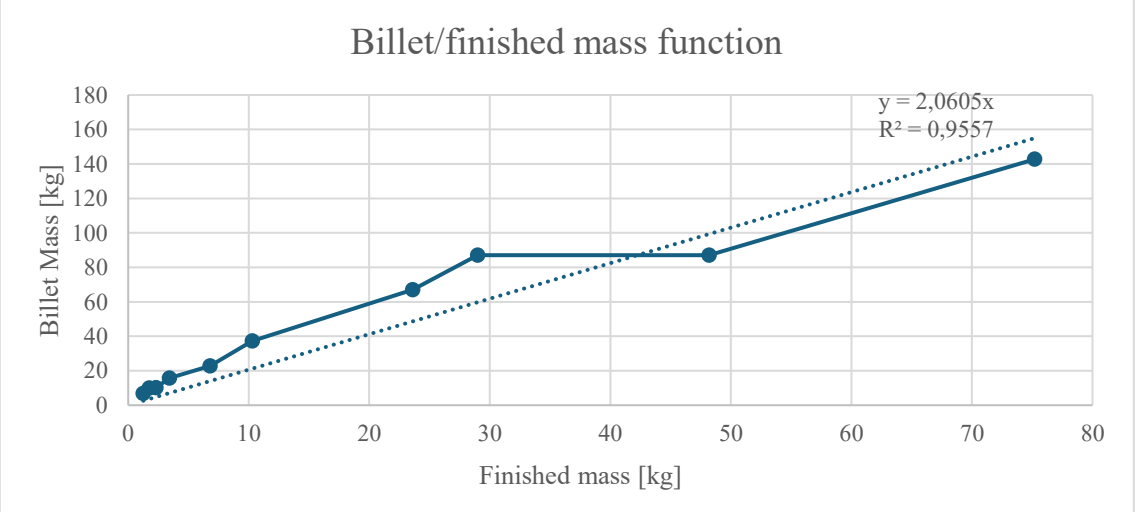



*Figura 16. Massa della billetta in funzione della massa finita del prigioniero per la sgrossatura*



Baker Hughes Confidential

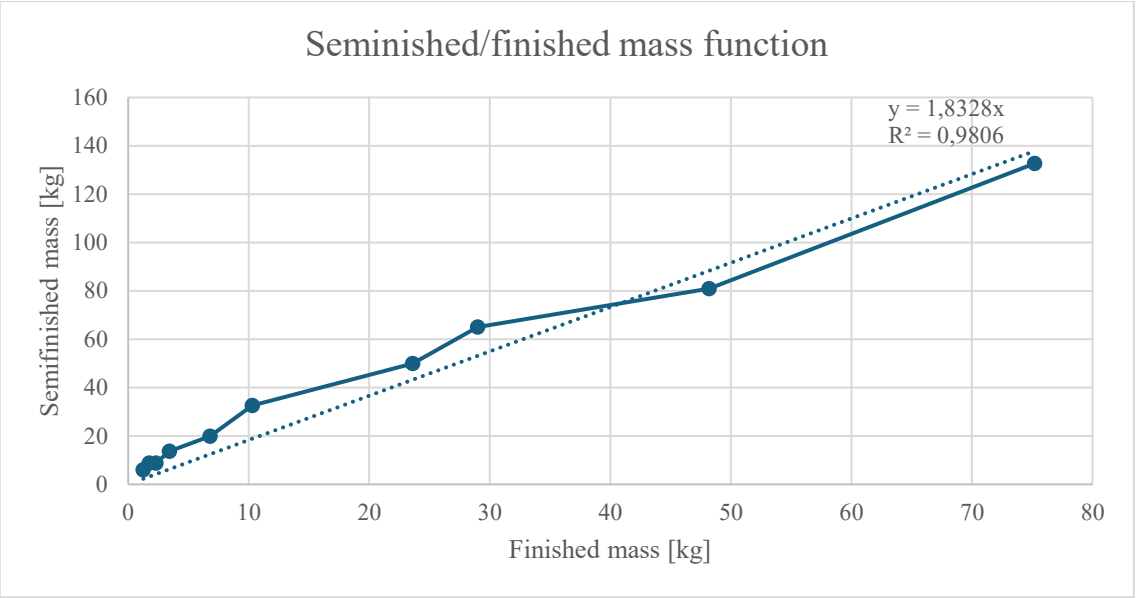



*Figura 17. Massa semifinita in funzione della massa finita del prigioniero per la sgrossatura*

Per il primo grafico (Billet/finished mass function): in particolare, la relazione lineare ricavata per stimare la massa della billetta di partenza in funzione della massa finita del prigioniero è la seguente:

$$y = 2{,}0605x$$

Dove:

- $y$ = *Billet Mass* (massa del blocco di partenza/billetta) $[kg]$.
- $x$ = *Finished Mass* (massa del prigioniero finito) $[kg]$.

La retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}9557$, confermando una solida proporzionalità lineare tra la materia prima impiegata e la massa finale del componente.

Per il secondo grafico (Semifinished/finished mass function): la relazione lineare utilizzata per stimare la massa del semilavorato in funzione della massa finita del prigioniero è la seguente:

$$y = 1{,}8328x$$

Dove:

- $y$ = *Semifinished mass* (massa del semilavorato) $[kg]$ .
- $x$ = *Finished mass* (massa del prigioniero finito) $[kg]$.

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione molto elevato, pari a $R^2 = 0{,}9806$, attestando un'eccellente correlazione tra lo stato intermedio di lavorazione e il prodotto finito.



Baker Hughes Confidential

## Tiranti

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i tiranti, ottenuti dall'analisi della funzione di sgrossatura.

*Tabella 20. Parametri di sgrossatura per i tiranti*

| Size | Length [mm] | Finished Mass [kg] | Semifinished Mass [kg] | Billet [kg] | Roughing mass [kg] |
|---|---|---|---|---|---|
| M45 | 310 | 2,81 | 11,55 | 13,16 | 1,61 |
| M45 | 450 | 3,85 | 16,31 | 18,58 | 2,27 |
| M125 | 840 | 67,22 | 113,02 | 121,16 | 8,14 |
| M125 | 1450 | 108,41 | 191,75 | 205,54 | 13,79 |

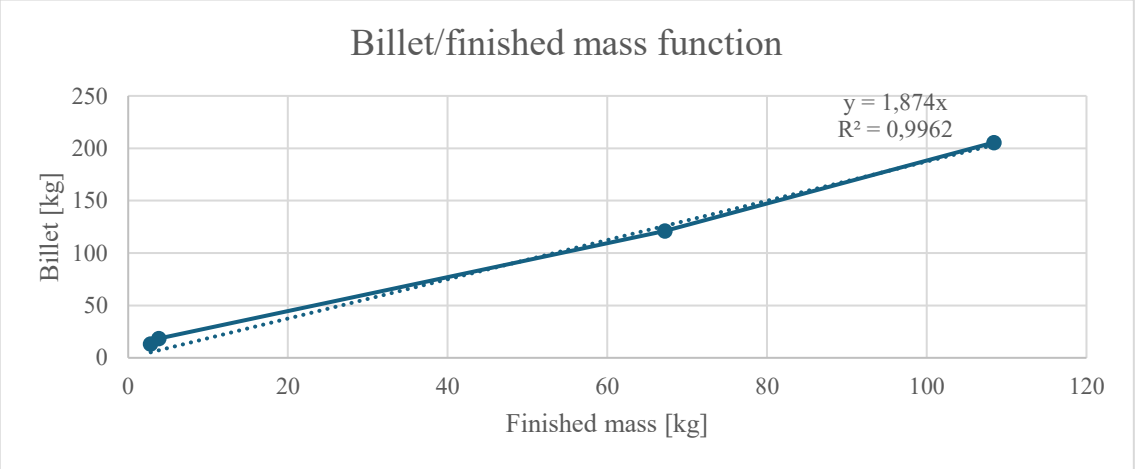



*Figura 18. Massa della billetta in funzione della massa finita dei tiranti per la sgrossatura*

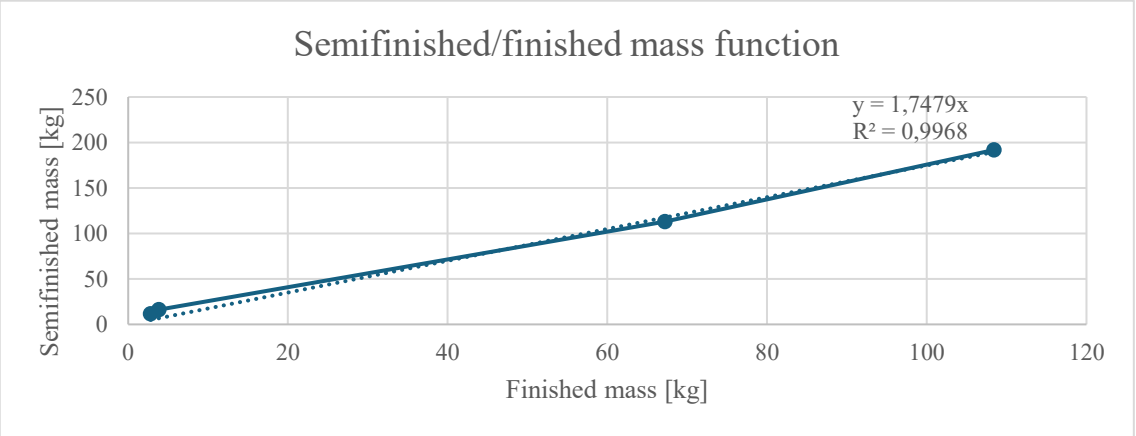



*Figura 19. Massa semifinita in funzione della massa finita dei tiranti per la sgrossatura*



Baker Hughes Confidential

In particolare, la relazione lineare ricavata per stimare la massa della billetta di partenza in funzione della massa finita del tirante è la seguente:

$$y = 1{,}874x$$

Dove:

- $y$ = *Billet* (massa del blocco di partenza/billetta) $[kg]$.
- $x$ = *Finished mass* (massa del tirante finito) $[kg]$.

Come mostrato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione estremamente elevato, pari a $R^2 = 0{,}9962$, confermando un'eccellente correlazione lineare tra il materiale grezzo d'ingresso e il prodotto finito.

Per la (*Semifinished/finished mass function*) invece, la relazione lineare utilizzata per stimare la massa del semilavorato in funzione della massa finita del tirante è la seguente:

$$y = 1{,}7479x$$

Dove:

- $y$ = *Semifinished mass* (massa del semilavorato) $[kg]$.
- $x$ = *Finished mass* (massa del tirante finito) $[kg]$.

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione quasi unitario, pari a $R^2 = 0{,}9968$, attestando la quasi totale proporzionalità diretta tra la massa nello stato intermedio di lavorazione e quella del componente finito.

**Dadi**

Di seguito vengono riportati i dati e le correlazioni relative i dadi, ottenuti dall'analisi della funzione di sgrossatura.

*Tabella 21. Parametri di sgrossatura per i dadi*

| Size | Finished Mass [kg] | Semifinished Mass [kg] | Billet [kg] | Roughing mass [kg] |
|---|---|---|---|---|
| M16 | 0,1 | 1,35 | 1,55 | 0,2 |
| M36 | 0,87 | 4,89 | 5,69 | 0,8 |
| M64 | 4,41 | 13,36 | 17,76 | 4,4 |
| M90 | 6,24 | 18,88 | 19,84 | 0,96 |
| M125 | 18,48 | 46,87 | 54,37 | 7,5 |



Baker Hughes Confidential

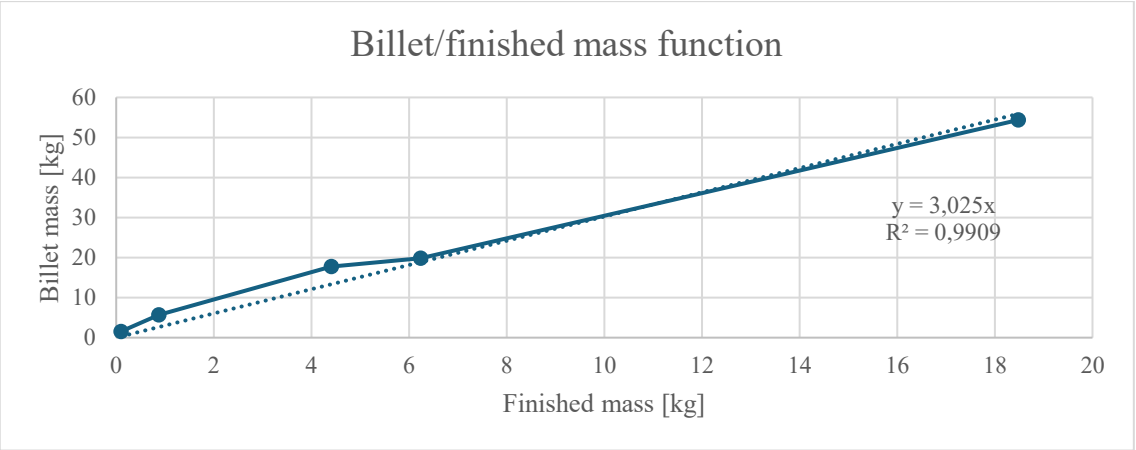



*Figura 20. Massa della billetta in funzione della massa finita del dado per la sgrossatura*

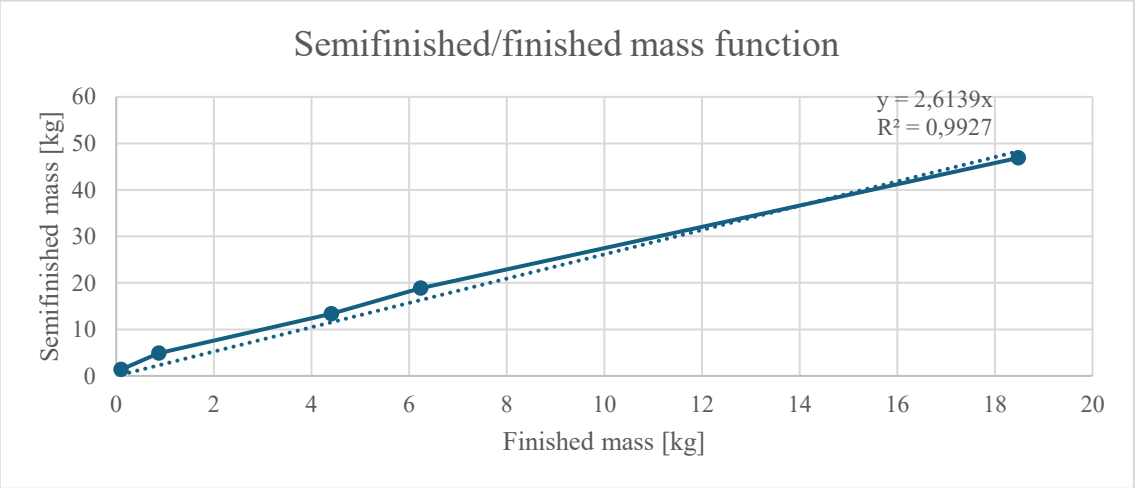



*Figura 21. Massa semifinita in funzione della massa finita del dado per la sgrossatura*

In (Figura 20) e (Figura 21) si possono vedere i modelli parametrici di correlazione tra la massa del grezzo in ingresso (*Billet mass*), la massa del semilavorato (*Semifinished mass*) e la massa finita per la lavorazione dei dadi (sgrossatura/sgrossatura ruvida).

Per il primo grafico (*Billet/finished mass function*), in particolare, la relazione lineare ricavata per stimare la massa della billetta di partenza in funzione della massa finita del dado è la seguente:

$$y = 3{,}025x$$

Dove:

- $y$ = *Billet mass* (massa del blocco di partenza/billetta) $[kg]$.
- $x$ = *Finished mass* (massa del dado finito) $[kg]$.



Baker Hughes Confidential

La retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione elevato, pari a $R^2 = 0{,}9909$, confermando un'ottima proporzionalità lineare tra la quantità di materia prima in ingresso e la massa finale del componente.

Per il secondo grafico (*Semifinished/finished mass function*), la relazione lineare utilizzata per stimare la massa del semilavorato in funzione della massa finita del dado è la seguente:

$$y = 2{,}6139x$$

Dove:

- $y$ = *Semifinished mass* (massa del semilavorato) $[kg]$.
- $x$ = *Finished mass* (massa del dado finito) $[kg]$.

Come evidenziato nel grafico, la retta di regressione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0{,}9927$, attestando una correlazione lineare estremamente solida tra lo stato intermedio di lavorazione e il dado finito.

## 5. Trattamento termico

I trattamenti termici previsti per le diverse categorie di componenti sono riportati in (Tabella 22).

*Tabella 22. Trattamenti termici per gli elementi di fissaggio*

| | Prigionieri | Tiranti | Dadi |
|---|---|---|---|
| Trattamento termico | Tempra + Raffreddamento | Indurimento + Tempra | Indurimento + Tempra |

**Lavorazione meccanica di finitura**

I dataset di lavorazione sono stati personalizzati in termini di localizzazione geografica (Tabella 23).

*Tabella 23. Dataset modificati per la personalizzazione di dettaglio*

| Dataset | Nuova area geografica |
|---|---|
| Acciaio rimosso tramite fresatura, media {RoW}\| acciaieria, media \| Cut-off, U | Acciaio rimosso tramite fresatura, media {Italy}\| acciaieria, media \| Cut-off, U |



Baker Hughes Confidential

Come singolo dataset è una composizione di dataset che descrivono i flussi principali dell'attività specifica, cambiare un dataset significa anche modificare i dataset dei livelli posteriori. Per ogni flusso è stata scelta la versione italiana, se disponibile; in caso contrario, quella europea (RER) o globale (GLO).

**Trasporti**

La fase di trasporto comprende la movimentazione dei componenti dal sito di pre-produzione a quello di produzione. Nello specifico, le operazioni di pre-produzione sono svolte presso il fornitore, mentre le successive fasi produttive sono realizzate direttamente dall'azienda.

La distanza di trasporto è stata impostata pari a 300 km. Tale misura corrisponde al valore standard previsto dal software SimaPro ed è stata mantenuta inalterata in virtù dell'impatto ambientale trascurabile associato alla fase di trasporto (parametro *Dist_Bolting*).

*Tabella 24. Dati relativi alla fase di trasporto*

| Means | Dataset |
|---|---|
| Lorry | Trasporti, merci, camion 16-32 tonnellate metriche, euro4 {RER}\| mercato per trasporti, merci, camion 16-32 tonnellate metriche, EURO4 \| cut-off, U |

### 3.3.1 Limiti, assunzioni e cut-off

**Ipotesi e assunzioni dell'analisi ambientale**

Le principali ipotesi alla base dello studio di analisi ambientale sono le seguenti:

- Confini del sistema: i confini dell'analisi adottano un approccio “dalla culla al cancello” (*cradle-to-gate*), comprendendo tutte le fasi operative dall'estrazione delle materie prime fino alla consegna presso lo stabilimento di Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l.
- Modellazione dei materiali: la caratterizzazione dei materiali si basa su uno studio interno aziendale anziché su database standard, introducendo un certo grado di approssimazione. Il materiale finale è stato modellato come somma degli elementi di lega nella loro quantità effettiva, unitamente all'energia necessaria per la



Baker Hughes Confidential

fusione. Alcuni elementi non presenti nel database Ecoinvent v3.10 sono stati trascurati; nello specifico, per gli acciai da bulloneria (40CrMoV4-6 e X19CrMoNbV11-1), la percentuale di Vanadio è stata omessa a causa della sua assenza nel database.

- Modellazione dei processi di forgiatura: la caratterizzazione delle lavorazioni si basa sulle elaborazioni del software LeanCOST, adottando le seguenti assunzioni specifiche:
- Il costo energetico di ciascuna operazione è stato ricavato dalla versione standard di LeanCOST, in quanto la versione personalizzata aziendale non integrava ancora tali informazioni al momento dell'analisi.
- Per la stima del fabbisogno energetico delle singole operazioni, sono state definite funzioni lineari parametrizzate in funzione della massa finale del componente. Sebbene ciò introduca lievi scostamenti per il singolo elemento, il metodo consente una modellazione scalabile ed estendibile a componenti di diversa taglia per analisi future.
- Per la stima delle risorse ausiliarie e dei materiali operativi, si è fatto riferimento ai dataset relativi a operazioni analoghe disponibili nel database Ecoinvent v3.10.

## 3.4 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)

In questo capitolo vengono presentati i risultati della modellazione dei tre componenti (tiranti, prigionieri e dadi), basata rispettivamente sull'impiego di dataset standard di EcoInvent e di dataset personalizzati mediante dati provenienti dalla letteratura, dai fornitori e da LeanCOST.

### 3.4.1 Prigionieri

I risultati dettagliati vengono illustrati prendendo come riferimento il prigioniero M45_L225.



Baker Hughes Confidential

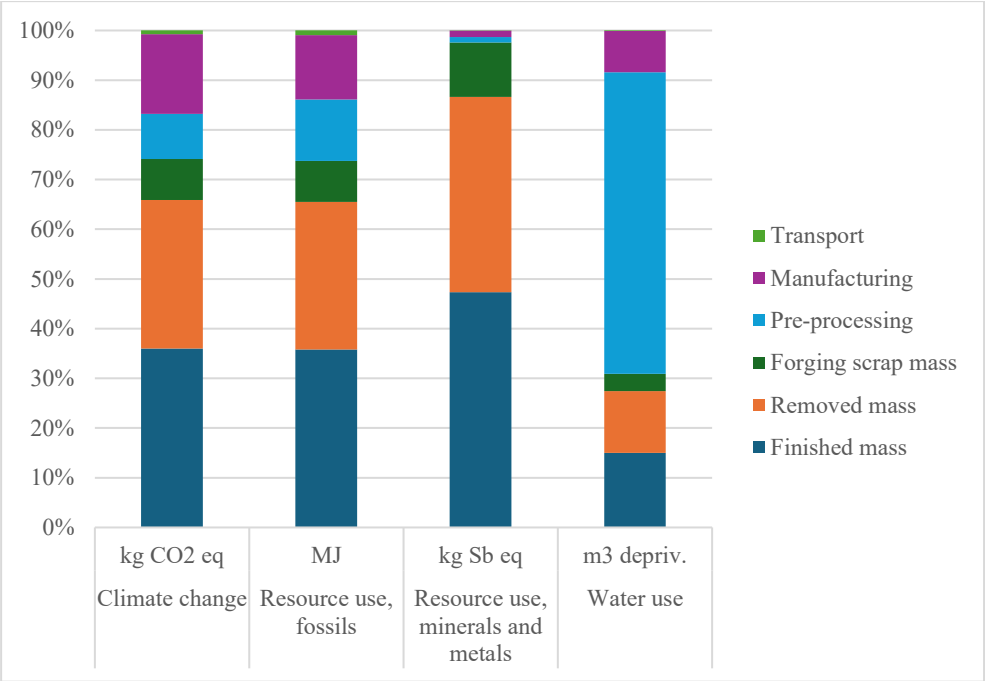



*Figura 22. Impatto ambientale totale dei prigionieri- M45_L225*

I risultati dell'analisi hanno evidenziato che:

- *Fase delle materie prime*: comprensiva della massa finita del componente, dello sfrido di lavorazione e del sovra materiale richiesto per il processo di forgiatura, costituisce il contributo dominante in termini di impatto sui cambiamenti climatici e sul consumo complessivo di risorse, rappresentando circa il 70% dell'impatto totale. La fase di approvvigionamento è seguita da quelle di pre-lavorazione e produzione, che coprono la quota rimanente. La medesima fase incide in maniera pressoché esclusiva, con un contributo pari a circa il 100%, nella categoria relativa all'uso delle risorse minerali e metalliche.
- *Fase di pre-lavorazione* (forgiatura): risulta preminente nella categoria d'impatto legata al consumo idrico (*water use*), determinando circa il 60% del valore totale, seguita in ordine di rilevanza dalla fase delle materie prime e dalla produzione.
- *Fase di trasporto*: presenta un contributo del tutto trascurabile rispetto all'impatto complessivo dell'intero ciclo di vita.

L'attenzione ora è sulla materia prima del prigioniero 40CrMoV4-6.



Baker Hughes Confidential

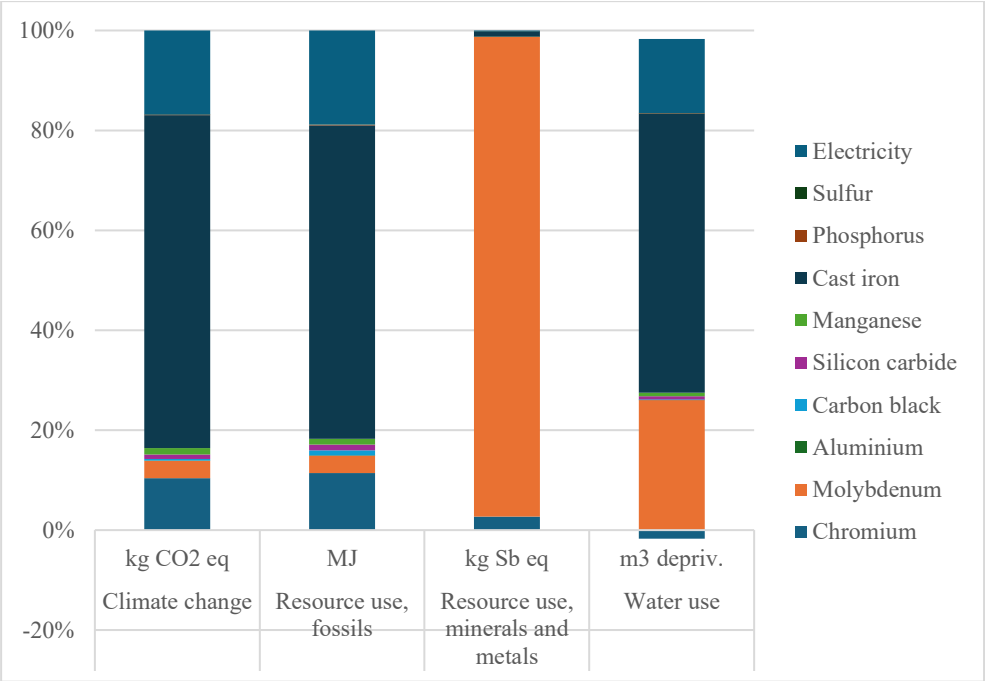



*Figura 23. Impatto ambientale della materia prima del prigioniero*

I risultati dell'analisi mostrano che:

- *Ferro*: costituisce il contributo preminente sul totale per quanto riguarda le categorie di impatto relative ai cambiamenti climatici, all'uso delle risorse fossili e all'impiego idrico, seguita in ordine di rilevanza dal consumo di energia elettrica, dal cromo e dal molibdeno.
- *Molibdeno*: incide per circa il 100% nella categoria di impatto legata all'uso delle risorse minerali e metalliche.
- *Cromo e bilancio idrico*: l'impatto dell'elemento cromo nella categoria relativa al consumo d'acqua risulta negativo. L'interpretazione ritenuta più plausibile, supportata dalla documentazione del software SimaPro, attribuisce tali valori negativi alle modalità di contabilizzazione e allocazione dei flussi nei dataset e nei metodi di valutazione. Il database EcoInvent considera quale perdita effettiva unicamente l'acqua evaporata in atmosfera, omettendo il computo dei volumi restituiti a fiumi o laghi per prevenire distorsioni numeriche. Inoltre, in presenza di co-prodotti che condividono il medesimo dataset, gli impatti vengono allocati prevalentemente al prodotto di maggior valore economico, alterando potenzialmente il bilancio idrico complessivo. A ciò si aggiunge che l'acqua prelevata e quella restituita possono derivare da contesti geografici differenti; ad



Baker Hughes Confidential

esempio, l'acqua per irrigazione può essere classificata come generica ("Resto del Mondo") mentre la coltivazione avviene in una regione specifica. Tale discrepanza può indurre alcuni metodi ad attribuire punteggi negativi al consumo d'acqua qualora i fattori regionali non coincidano. Essendo SimaPro basato su dati idrici regionalizzati a differenza di EcoInvent, i rispettivi risultati sul consumo d'acqua non risultano perfettamente sovrapponibili.

- *Altri contributi*: la quota d'impatto associata agli altri elementi e componenti risulta trascurabile rispetto al totale.

Ora si consideri l'impatto della fase di preproduzione, che sta per la fase di forgiatura.

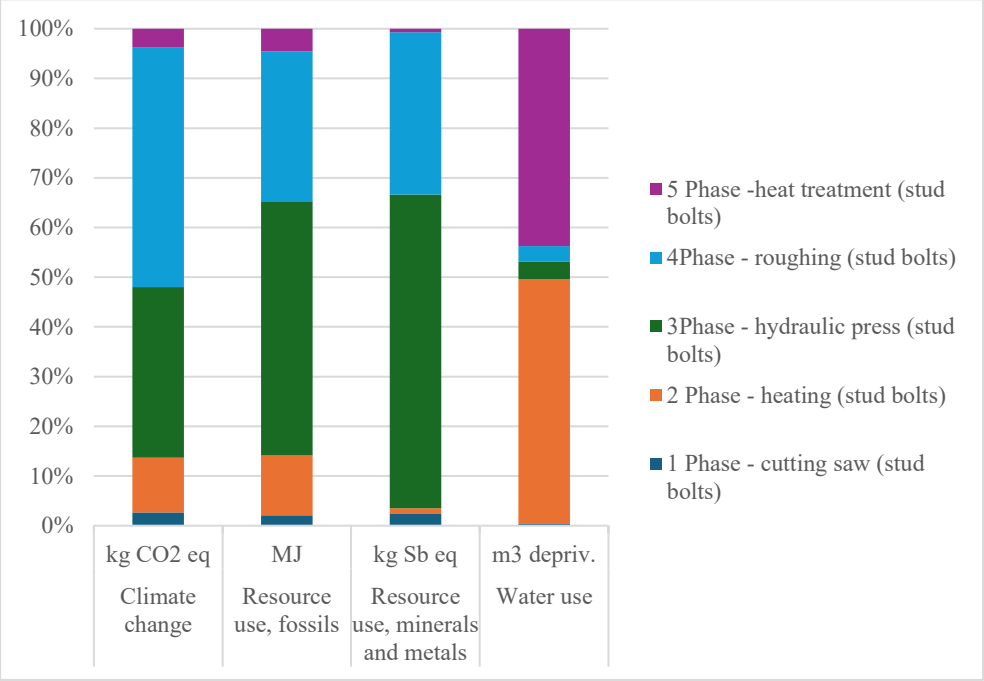



*Figura 24. Impatto ambientale della forgiatura del prigioniero.*

L'analisi degli impatti evidenzia che:

- *Materia prima e pressa idraulica*: le fasi di approvvigionamento del materiale grezzo e di deformazione mediante pressa idraulica costituiscono il contributo ampiamente preminente, coprendo circa il 90-100% dell'impatto totale nelle categorie relative ai cambiamenti climatici e al consumo complessivo di risorse.
- *Consumo idrico*: l'impatto associato alla categoria di utilizzo dell'acqua (*water use*) risulta ripartito prevalentemente tra le fasi di riscaldamento del materiale e di successivo trattamento termico.
- *Sega da taglio*: la prima fase di sezionamento tramite sega presenta un contributo del tutto trascurabile sul totale dell'impatto ambientale complessivo.



Baker Hughes Confidential

### 3.4.2 Tiranti

I risultati per i tiranti sono illustrati sulla variante M45_L450 in X19CrMoNbV11-1.

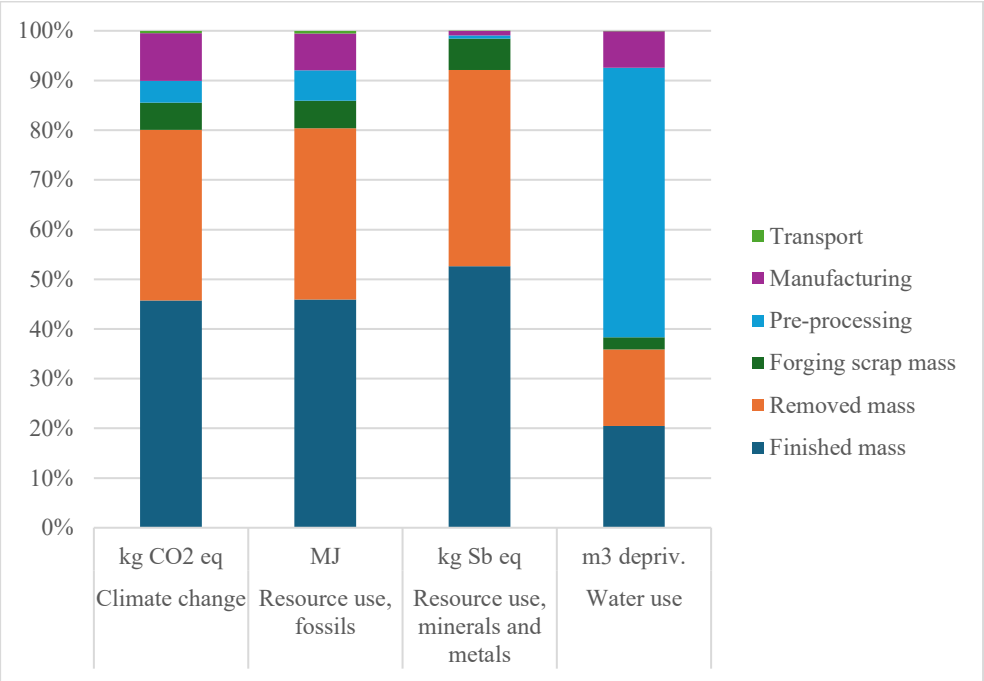



*Figura 25. Impatto ambientale totale dei tiranti- M45_L450*

I risultati hanno mostrato che:

- *Fase della materia prima*: comprensiva della massa finita del componente, dello sfrido rimosso durante le lavorazioni e del sovra materiale necessario per la forgiatura, costituisce il contributo dominante rispetto all'impatto sui cambiamenti climatici e sull'uso delle risorse, rappresentando circa l'85% del totale. Ad essa seguono le fasi di pre-lavorazione e produzione, che coprono la quota rimanente. La medesima fase incide in maniera ampiamente preminente, con un contributo pari a circa il 100%, nella categoria relativa all'uso delle risorse minerali e metalliche.
- *Fase di pre-lavorazione* (forgiatura): risulta preminente nella categoria d'impatto legata al consumo idrico (*water use*), rappresentando circa il 50% del valore complessivo, seguita in ordine di rilevanza dalla fase delle materie prime e dalla produzione.
- *Fase di trasporto*: presenta un contributo del tutto trascurabile sul totale dell'impatto ambientale.



Baker Hughes Confidential

La materia prima domina il totale (oltre l'85% sul Cambiamento Climatico). Il contributo dell'acciaio X19CrMoNbV11-1 è dettagliato in Figura.

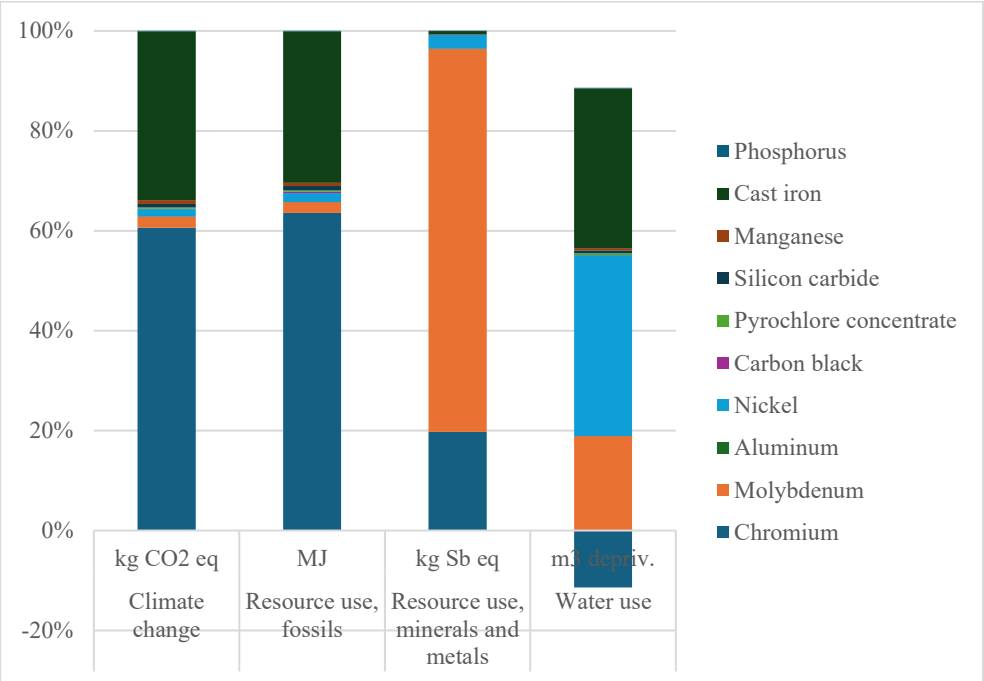



*Figura 26. Impatto ambientale della materia prima del tirante.*

I risultati mostrano che:

- *Cromo*: costituisce il contributo preminente sul totale nelle categorie di impatto relative ai cambiamenti climatici, all'uso delle risorse complessive e all'impiego di risorse fossili, seguito in ordine di rilevanza dal ferro e dal consumo di energia elettrica.
- *Molibdeno*: incide per circa l'80% nella categoria d'impatto legata all'uso delle risorse minerali e metalliche.
- *Nichel e bilancio idrico*: il nichel presenta un impatto di circa il 30% del totale nella categoria relativa al consumo d'acqua (*water use*), seguito da ferro e molibdeno. L'impatto associato al cromo risulta negativo, secondo le dinamiche di allocazione e contabilizzazione idrica descritte precedentemente.
- **Altri contributi:** la quota d'impatto associata agli altri elementi e componenti risulta trascurabile rispetto al totale complessivo.

Ora si consideri l'impatto della fase di preproduzione, che sta per la fase di forgiatura.



Baker Hughes Confidential

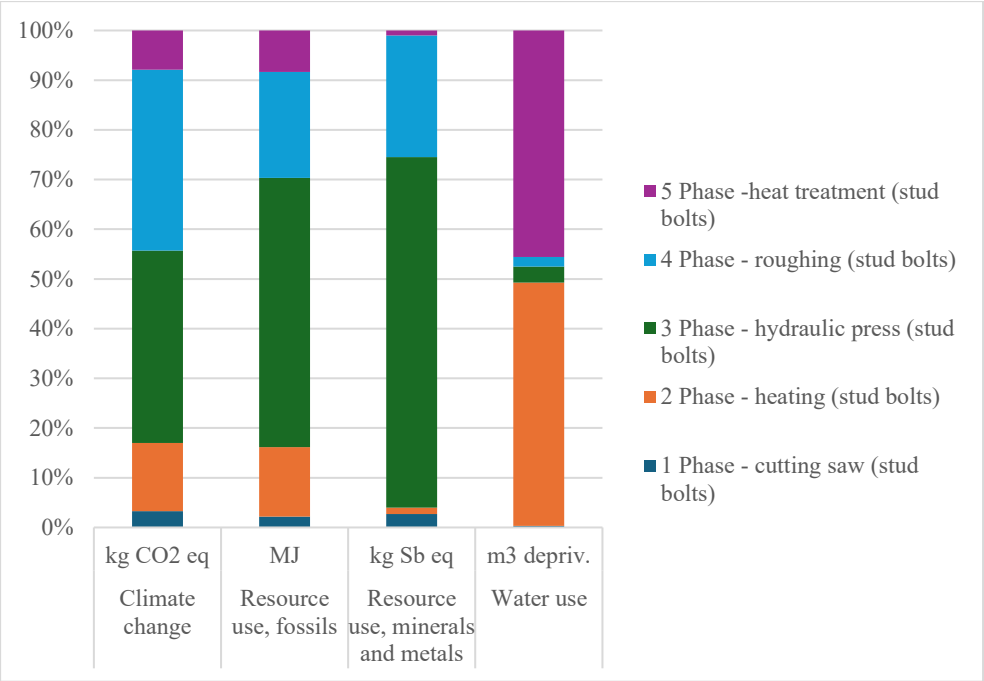



*Figura 27. Impatto ambientale della forgiatura del tirante.*

L'impatto dimostra che:

- Le fasi di sgrossatura e pressa idraulica coprono quasi l'80-100% dell'impatto totale nelle categorie di impatto sul cambiamento climatico e sull'uso delle risorse;
- L'impatto della categoria di utilizzo dell'acqua è suddiviso tra le fasi di riscaldamento e trattamento termico;
- La fase della sega da taglio è trascurabile sul totale.

### 3.4.3 Dadi

Ora vengono presentati i risultati per i dadi, un dado di dimensione 64 secondo BH_nuts_1 e il materiale X19CrMoNbV11-1 viene preso come riferimento.



Baker Hughes Confidential

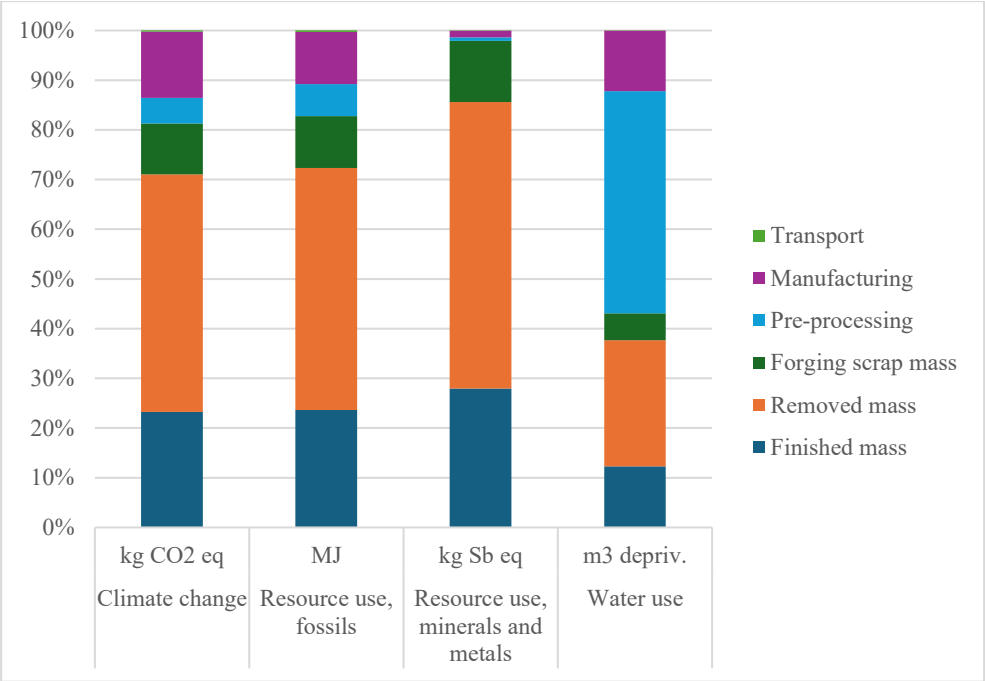



*Figura 28. Impatto ambientale totale dei dadi M64*

I risultati hanno mostrato che:

- *Fase della materia prima*: comprensiva della massa finita del componente, dello sfrido rimosso durante la produzione e del sovra materiale necessario per la forgiatura, costituisce il contributo dominante in termini di impatto sui cambiamenti climatici e sull'uso delle risorse, rappresentando circa l'80% dell'impatto totale. A essa seguono le fasi di pre-lavorazione e produzione, che coprono la quota rimanente. La medesima fase incide in maniera pressoché esclusiva, con un contributo pari a circa il 100%, nella categoria relativa all'uso delle risorse minerali e metalliche.
- *Fase di pre-lavorazione* (forgiatura): risulta preminente nella categoria d'impatto legata al consumo idrico (*water use*), rappresentando circa il 40% del totale, seguita in ordine di rilevanza dalla fase delle materie prime e dalla produzione.
- *Fase di trasporto*: presenta un contributo del tutto trascurabile rispetto all'impatto complessivo dell'intero ciclo di vita.

Materiale non discusso dato che è lo stesso per i tiranti. Ora si consideri l'impatto della fase di preproduzione, cioè la forgiatura.



Baker Hughes Confidential

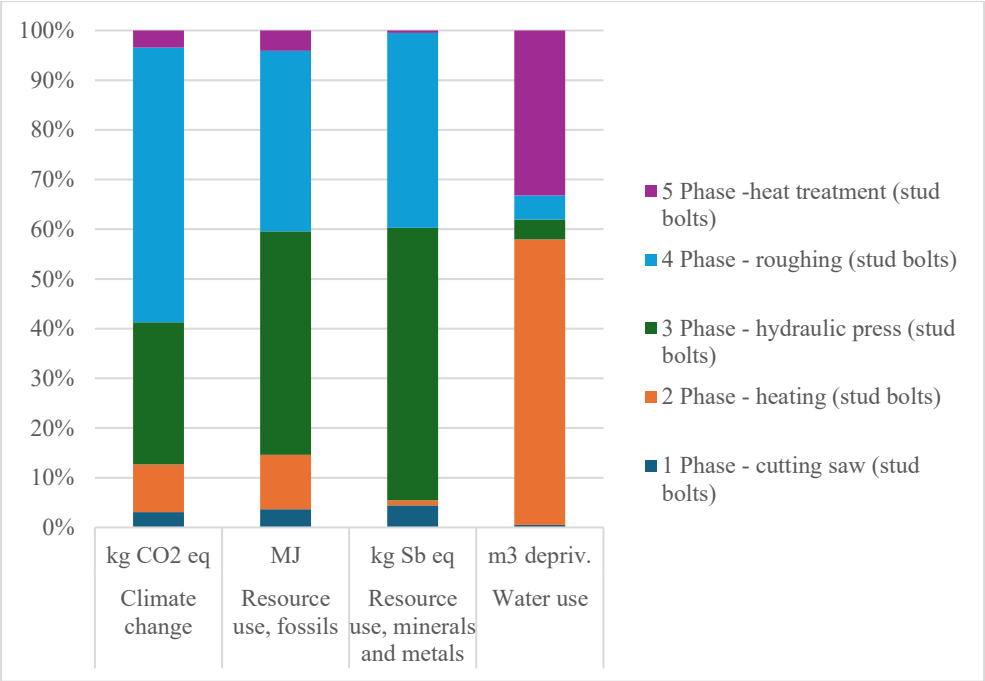



*Figura 29. Impatto ambientale della forgiatura dei dadi.*

L'analisi degli impatti evidenzia che:

- *Materia prima e pressa idraulica*: le fasi relative all'approvvigionamento del materiale grezzo e alla lavorazione mediante pressa idraulica rappresentano la quasi totalità dell'impatto complessivo, coprendo una quota compresa tra il 90% e il 100% nelle categorie dei cambiamenti climatici e del consumo di risorse.
- *Consumo idrico*: l'impatto associato alla categoria dell'utilizzo dell'acqua (*water use*) è riconducibile prevalentemente alla fase di riscaldamento, la quale determina da sola circa l'85% del totale.
- *Sega da taglio*: la fase iniziale di sezionamento tramite sega presenta un contributo del tutto trascurabile sul totale degli impatti ambientali.



Baker Hughes Confidential

## 3.5 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione dei risultati dell'analisi LCA è stata condotta in conformità alle prescrizioni delle norme ISO 14040 e ISO 14044, identificando le fasi del ciclo di vita e i componenti che contribuiscono maggiormente agli impatti ambientali complessivi, oltre a valutare l'influenza delle principali assunzioni modellistiche e dei parametri geometrici.

I risultati evidenziano come la fase di estrazione e produzione delle materie prime (inclusi i processi di estrazione, fusione e preparazione delle leghe metalliche, come gli acciai legati 40CrMoV4-6 e X19CrMoNbV11-1 impiegati nella bulloneria) rappresenti di gran lunga il principale fattore di impatto per tutte le categorie considerate. Questa fase comprende in particolare:

- La massa finita del componente (prigionieri, tiranti o dadi);
- La massa di materiale rimossa durante le lavorazioni meccaniche (scarti di lavorazione);
- La massa del materiale d'apporto eventualmente impiegato.

Seguono, per ordine di rilevanza, la fase di pre-produzione (processi di forgiatura e ottenimento dei semifiniti) e la fase di produzione (taglio lamiere, saldatura e lavorazioni meccaniche di precisione come l'asportazione di materiale e la filettatura).

Al contrario, gli impatti associati alle attività di trasporto dei semifiniti verso lo stabilimento produttivo e ai processi di verniciatura risultano trascurabili rispetto al totale, per tutte le categorie di impatto considerate.

Al fine di approfondire il comportamento del modello parametrico e valutarne la capacità di rappresentare componenti di dimensioni differenti, il confronto non si limita alle configurazioni standard iniziali, ma estende l'analisi a un set più ampio di varianti dimensionali (differiscano per diametro nominale e lunghezza, come nel caso dei diversi formati di prigionieri, tiranti e dadi analizzati per le casse e i porta-palette delle turbine a vapore). L'analisi prosegue pertanto con la valutazione dell'influenza dei parametri geometrici e di massa sugli impatti ambientali complessivi. Al fine di approfondire il comportamento del modello parametrico e valutarne la capacità di rappresentare componenti di dimensioni differenti, il confronto seguente non si limita alle varianti geometriche iniziali (come, ad esempio, i prigionieri di riferimento), ma viene esteso a un numero più ampio di configurazioni dimensionali.



Baker Hughes Confidential

Viene ora presentato il confronto tra l'assemblaggio complessivo della bulloneria di sei diverse turbine a vapore 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

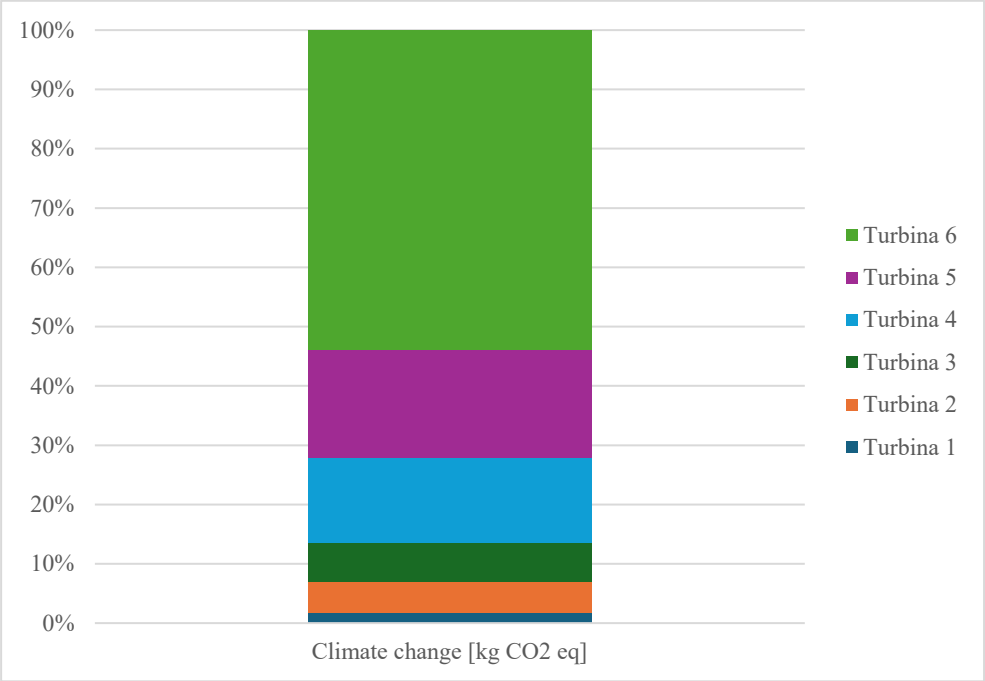



*Figura 30. Confronto dei tiranti e prigionieri per turbine a vapore per la categoria d'impatto del cambiamento climatico.*

Dall'analisi dei risultati emerge che l'impatto ambientale, con particolare riferimento alla categoria relativa ai cambiamenti climatici, risulta direttamente proporzionale alla massa della turbina a vapore.

### 3.5.1 Confronto tra componenti di pari diametro e differente lunghezza

**Prigionieri (Stud Bolts)**

Viene proposto un confronto tra prigionieri caratterizzati dal medesimo diametro e da lunghezze differenti. I diametri normalizzati selezionati per la presente analisi corrispondono a M16, M24, M36, M42, M45 e M64. Prendendo in esame, in primo luogo, i componenti con filettatura M16, la figura sottostante illustra i risultati dell'analisi condotta.



Baker Hughes Confidential

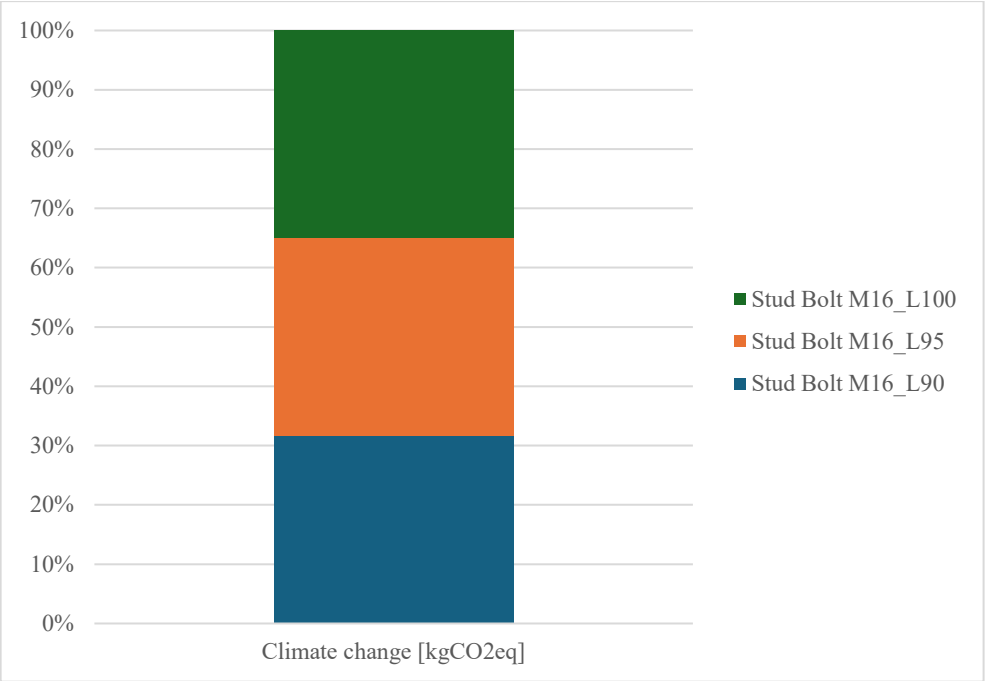



*Figura 31. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M16.*

Passando all'esame dei prigionieri M24, la figura sottostante illustra i risultati dell'analisi comparativa.

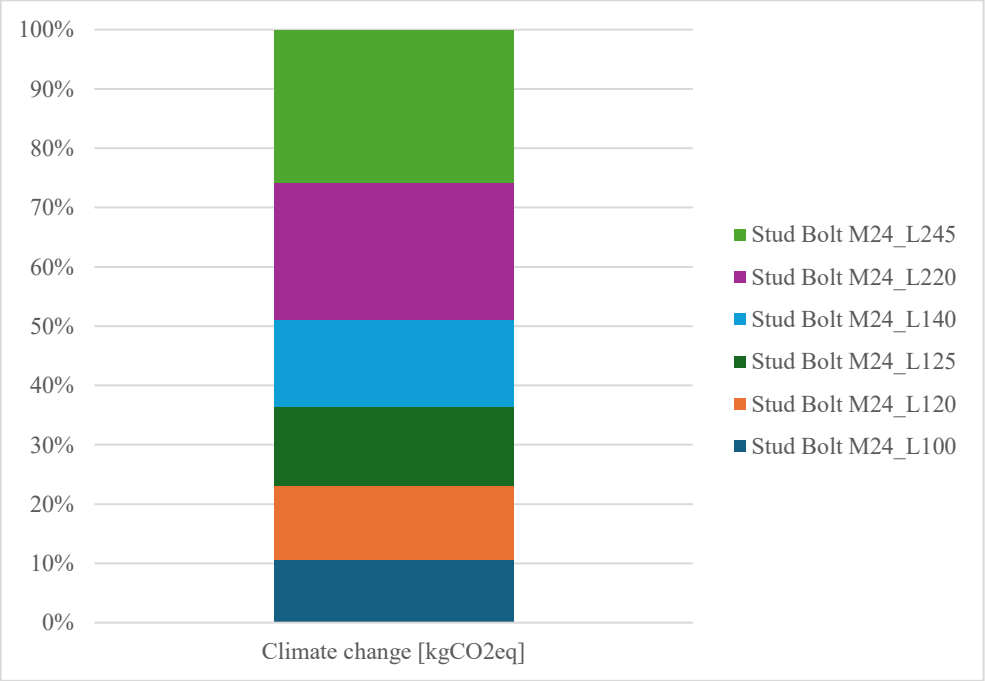



*Figura 32. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M24.*



Baker Hughes Confidential

Relativamente alla dimensione M36, gli impatti ambientali in termini di cambiamento climatico vengono illustrati nel grafico sottostante.

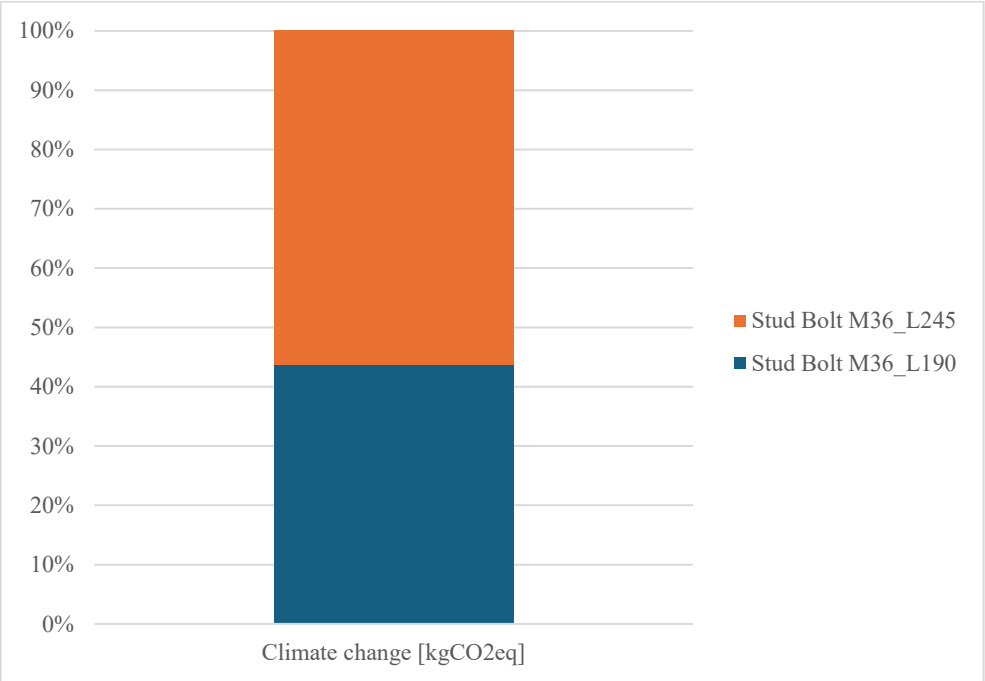



*Figura 33. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M36.*

Per quanto concerne i prigionieri M42, i relativi risultati vengono presentati di seguito.

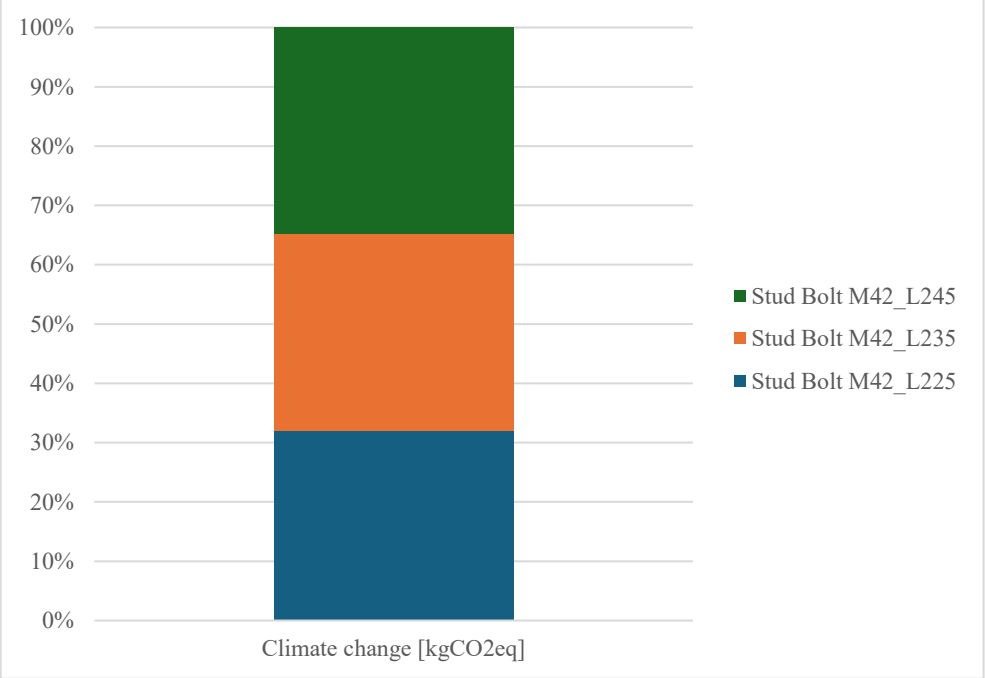



*Figura 34. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M42.*



Baker Hughes Confidential

Il diagramma relativo alla dimensione M45 mostra i seguenti andamenti.

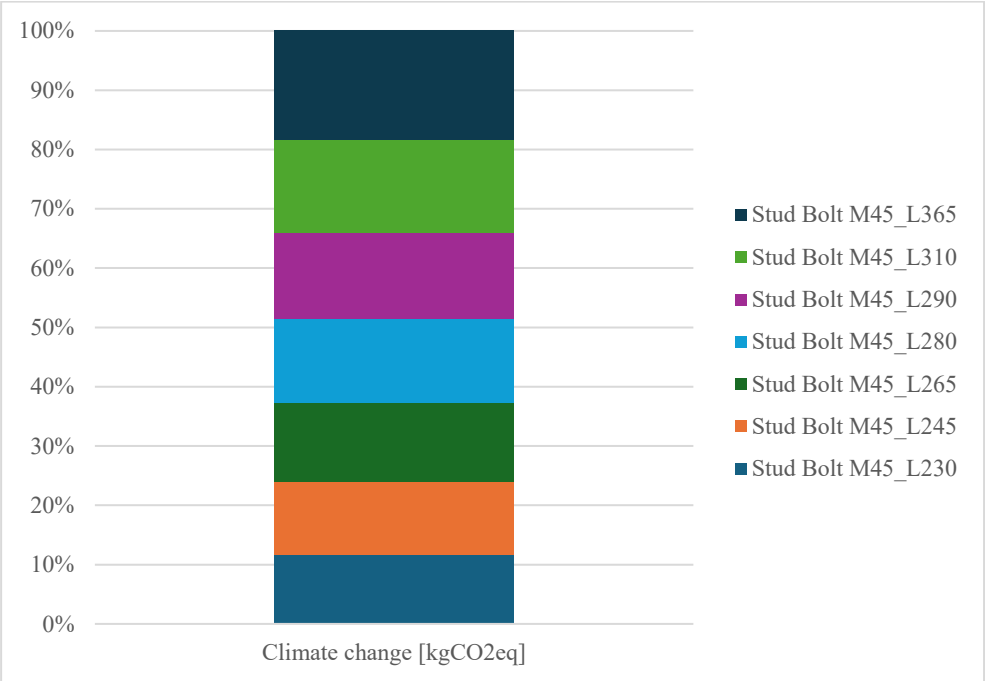



*Figura 35. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M45.*

Il grafico seguente illustra i risultati relativi alla taglia M64.

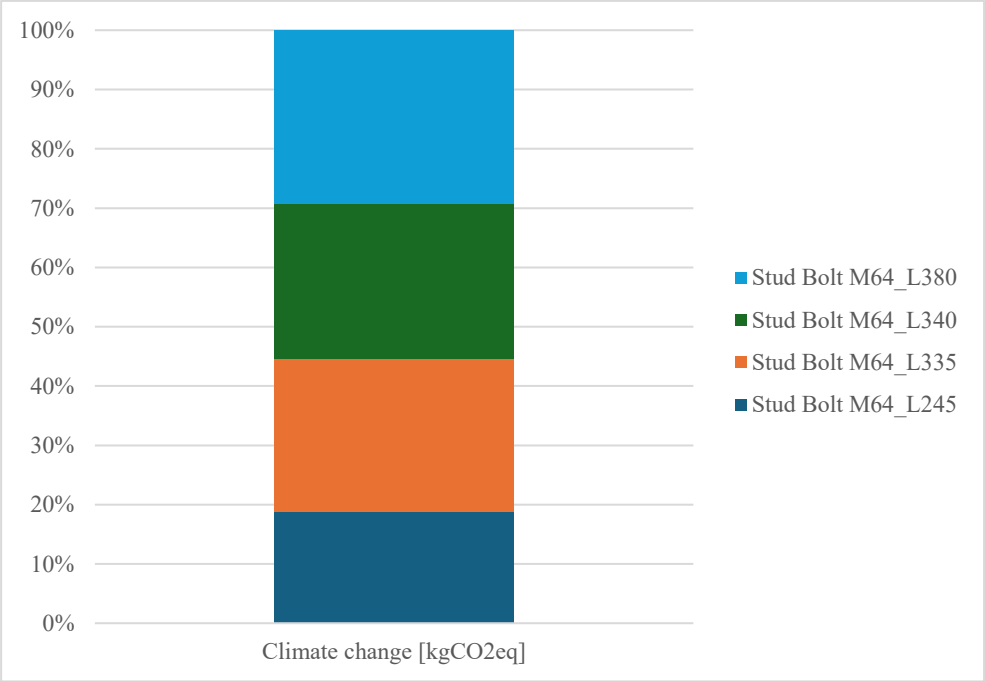



*Figura 36. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - M64.*



Baker Hughes Confidential

Dall'analisi comparativa condotta sui prigionieri a parità di diametro nominale e a lunghezza variabile, emerge in modo evidente come l'impatto ambientale, valutato in termini di *climate change*, risulti strettamente correlato all'incremento della lunghezza del componente.

Osservando i diagrammi per ciascuna taglia (da M16 a M64), si nota che l'aumento della lunghezza del prigioniero comporta una crescita proporzionale dell'impatto percentuale complessivo, riflettendo la maggiore quantità di materiale impiegato (massa) e, di conseguenza, l'aggravio energetico e produttivo associato. Tale andamento conferma che la geometria longitudinale, a parità di sezione resistente (diametro), gioca un ruolo determinante nella quantificazione dell'impronta climatica del singolo elemento di fissaggio, validando la necessità di ottimizzare non solo la scelta del diametro ma anche il dimensionamento in lunghezza all'interno del complessivo della turbina.

**Tiranti (Tie Rods)**

Analoga analisi può essere condotta per i tiranti caratterizzati dal medesimo diametro nominale e da lunghezze differenti. I diametri nominali selezionati per tale analisi corrispondono a M30, M64 e M125. Prendendo in esame in primo luogo i tiranti M30, i grafici sottostanti ne illustrano i risultati.

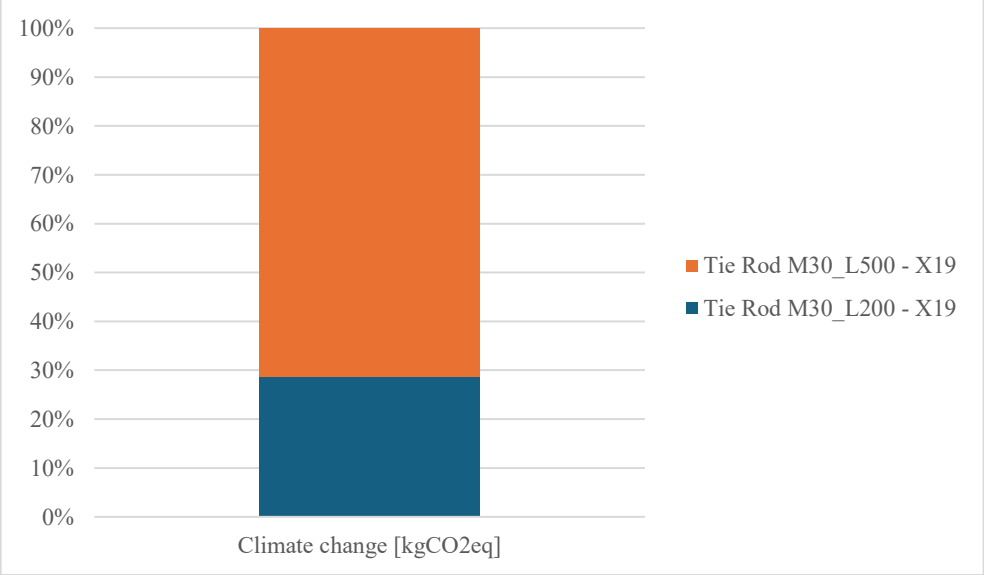



*Figura 37. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M30.*



Baker Hughes Confidential

Per quanto concerne la taglia M64, gli impatti ambientali sono di seguito riportati.

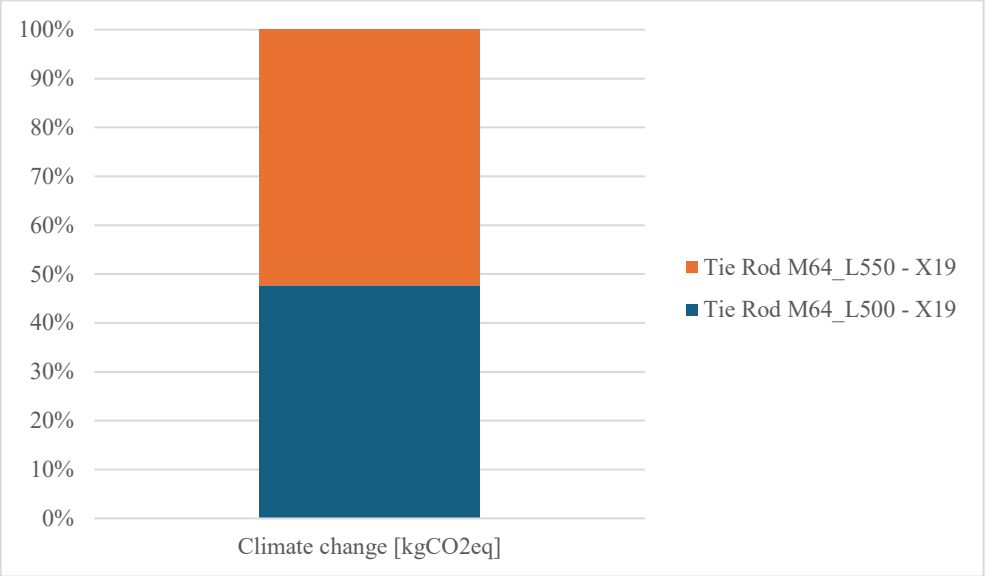



*Figura 38. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M64.*

Infine, i risultati relativi alla taglia maggiore, M125, vengono mostrati di seguito.

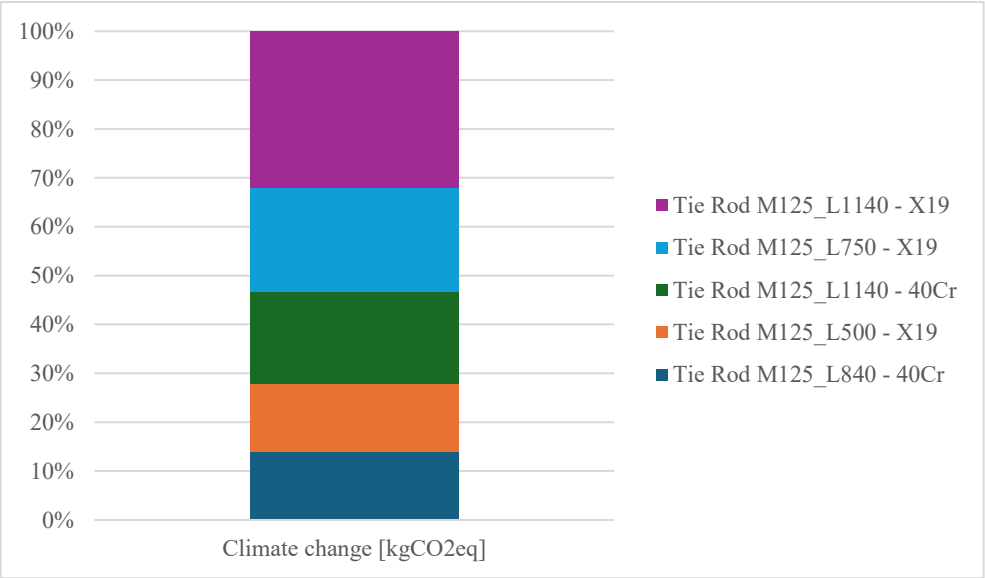



*Figura 39. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - M125.*

In conclusione, sia i prigionieri sia i tiranti manifestano il medesimo comportamento ambientale. In tutti i casi esaminati si riscontra una correlazione diretta tra la lunghezza del componente e la relativa impronta ecologica: componenti di maggiori dimensioni richiedono un volume superiore di materia prima (acciaio), il che si traduce direttamente in un incremento delle emissioni in tutte le categorie di impatto analizzate. Tale



Baker Hughes Confidential

andamento marcato anche dal tipo di materiale: a parità di lunghezza (come nel caso dei tiranti da 1140 mm), l'impiego della lega X19CrMoNbV11-1 comporta emissioni sensibilmente superiori rispetto al 40CrMoV4-6, evidenziando come la composizione e i trattamenti specifici del materiale influenzino il bilancio emissivo complessivo.

### 3.5.2 Confronto tra componenti di pari lunghezza e differente diametro

**Prigionieri (Stud Bolts)**

Viene effettuato un confronto tra prigionieri a parità di lunghezza e con diametri differenti; un'analisi analoga viene condotta anche per i tiranti. L'obiettivo è verificare come vari l'impatto ambientale all'aumentare delle dimensioni, impiegando dati non normalizzati. Le lunghezze normalizzate impiegate nel presente studio corrispondono a L120, L190, L245, L275, L290, L340 e L400.

Il risultato relativo all'impatto ambientale per la lunghezza L120 è illustrato nel grafico sottostante.

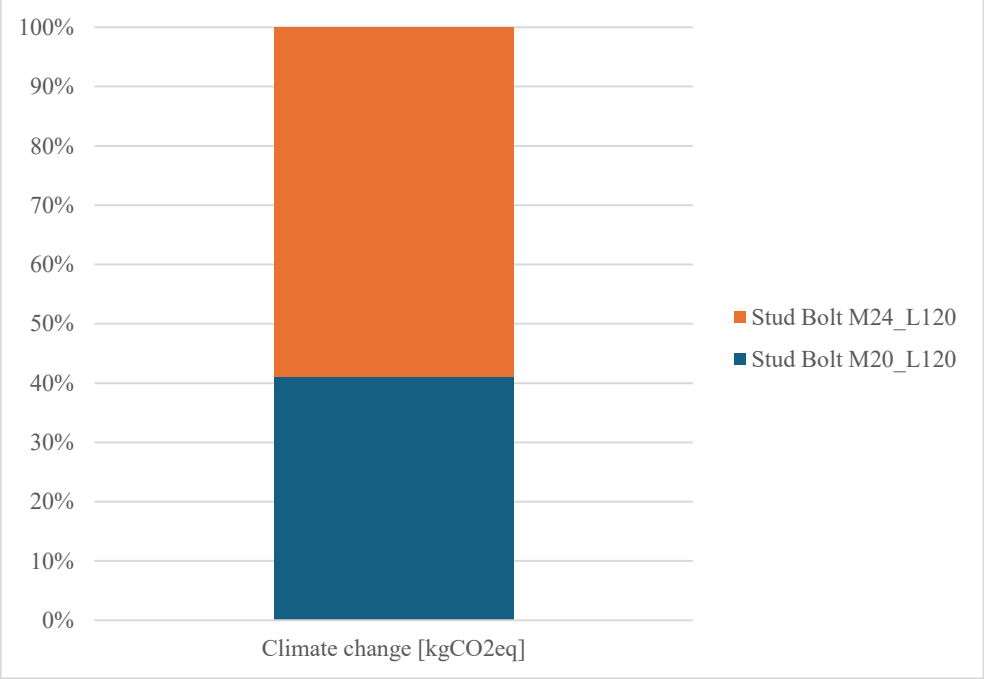



*Figura 40. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L120*

Il grafico sottostante illustra i risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L190.



Baker Hughes Confidential

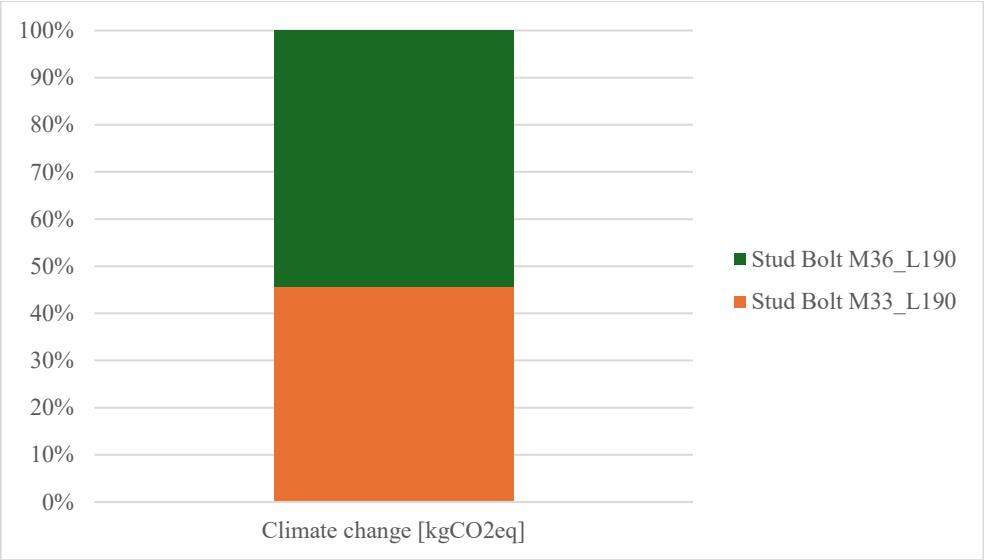



*Figura 41. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L190.*

Il grafico seguente illustra gli impatti ambientali relativi alla lunghezza L245.

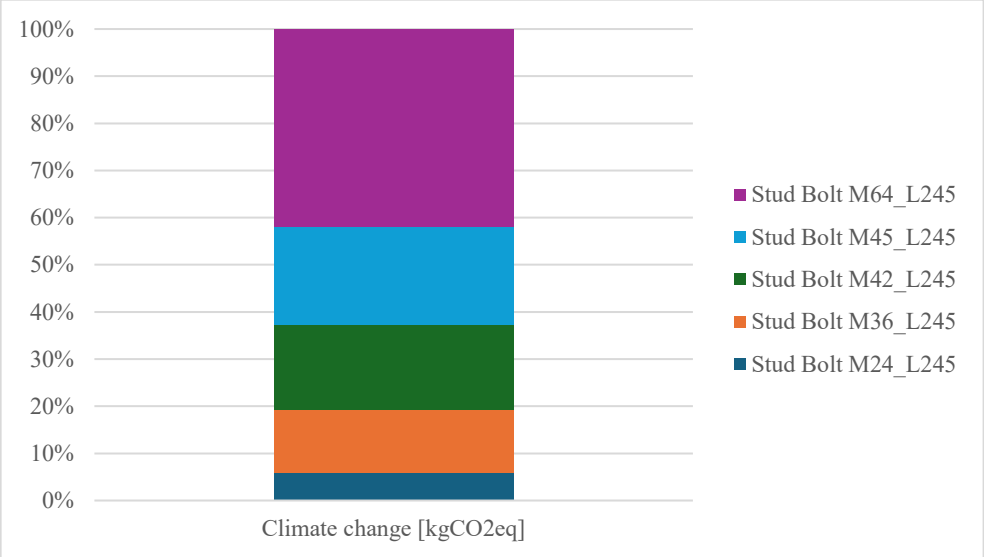



*Figura 42. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L245.*

I valori dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L275 sono mostrati nella figura sottostante.



Baker Hughes Confidential

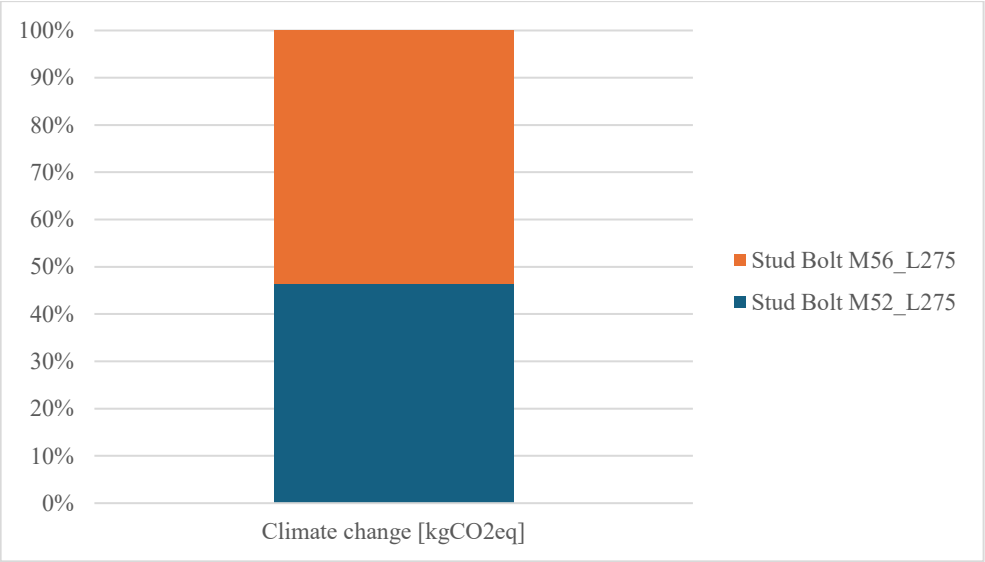



*Figura 43. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L275.*

I risultati relativi alla lunghezza L290 sono illustrati nel grafico sotto.

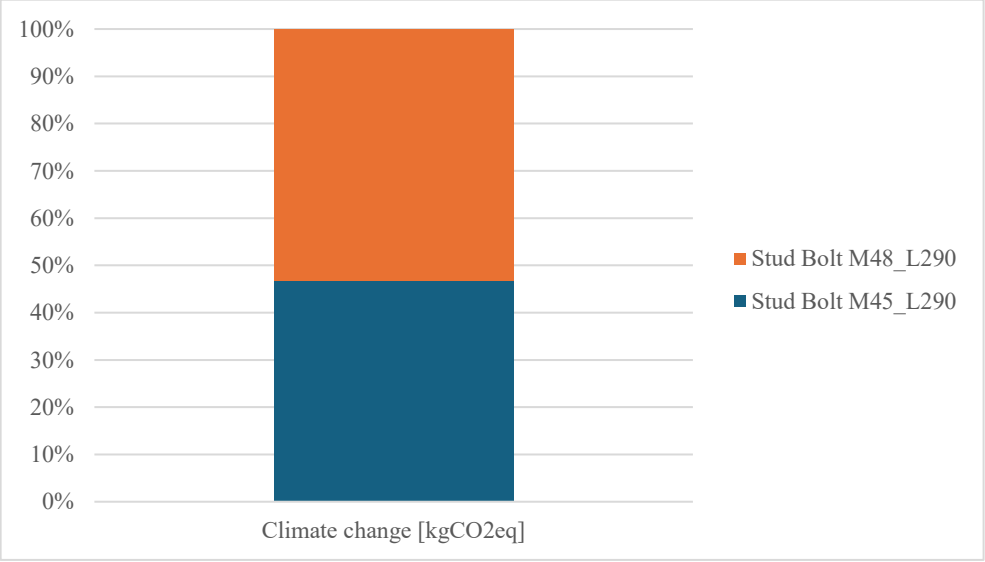



*Figura 44. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L290.*

Il grafico sottostante riassume i risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L340.



Baker Hughes Confidential

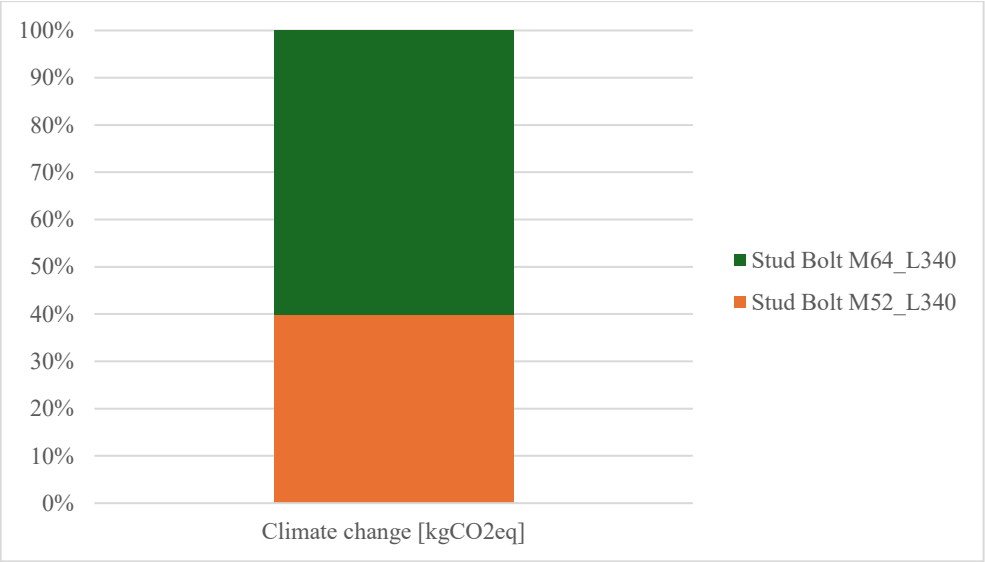



*Figura 45. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L340.*

Il grafico seguente presentano i risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L400.

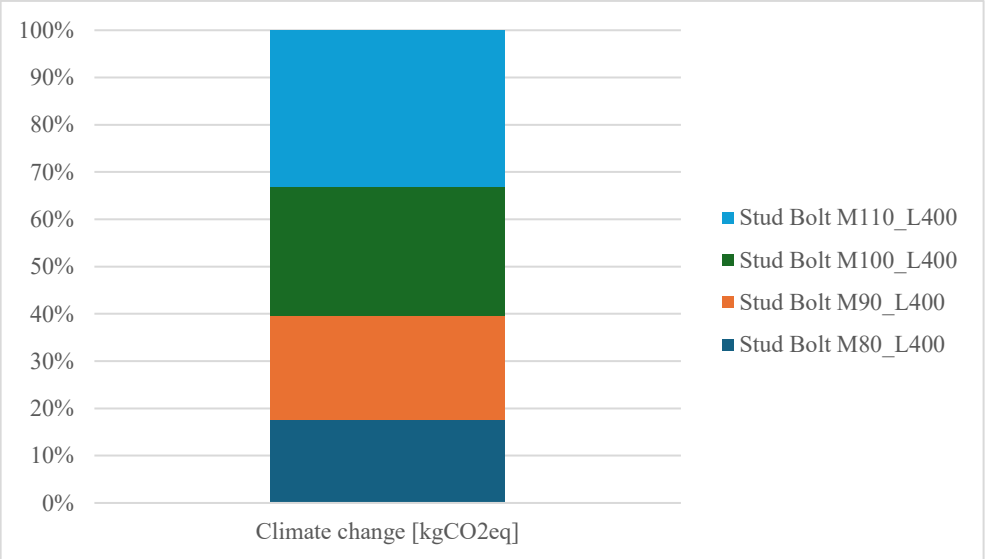



*Figura 46. Confronto dei prigionieri (Cambiamento climatico) - L400.*

L'analisi comparativa condotta a parità di lunghezza e diametro variabile evidenzia come l'impatto ambientale cresca proporzionalmente all'aumentare della sezione trasversale.

Indipendentemente dal componente analizzato, l'incremento del diametro comporta un maggiore impiego di materia prima e un conseguente aggravio dell'impronta climatica. Tali risultanze confermano che il dimensionamento diametrale, analogamente a quello



Baker Hughes Confidential

longitudinale, rappresenta un parametro determinante ai fini della sostenibilità ecologica del componente industriale.

**Tiranti (Tie Rods)**

Un'analisi analoga può essere condotta per i tiranti di pari lunghezza e diametro differente. In particolare, sono stati selezionati tiranti caratterizzati da una medesima lunghezza e da almeno due differenti diametri, in corrispondenza dei valori L440, L450, L500 e L1140.

Il grafico sottostante presenta i risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L440.

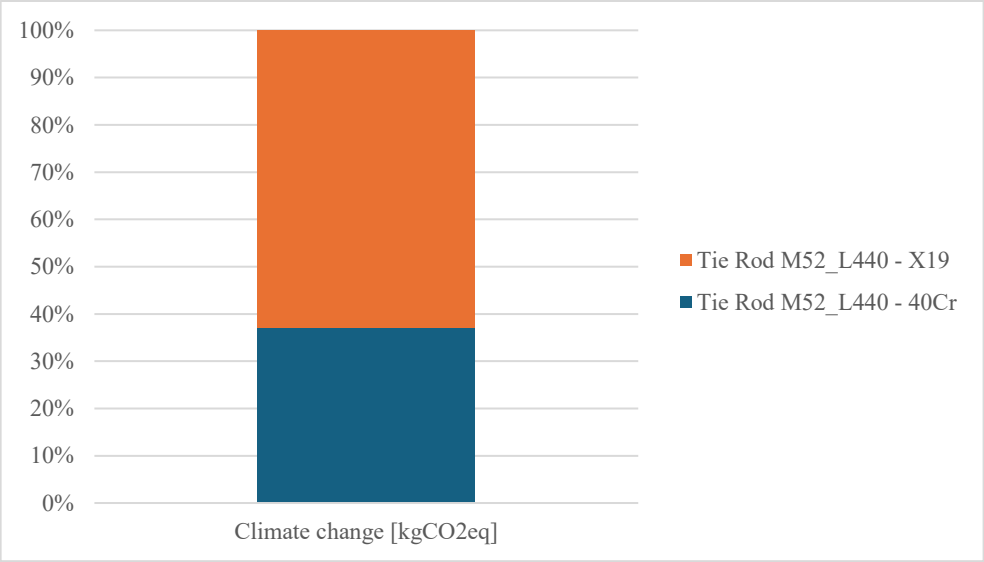



*Figura 47. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L440.*

I risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L450 sono illustrati nel grafico sottostante.



Baker Hughes Confidential

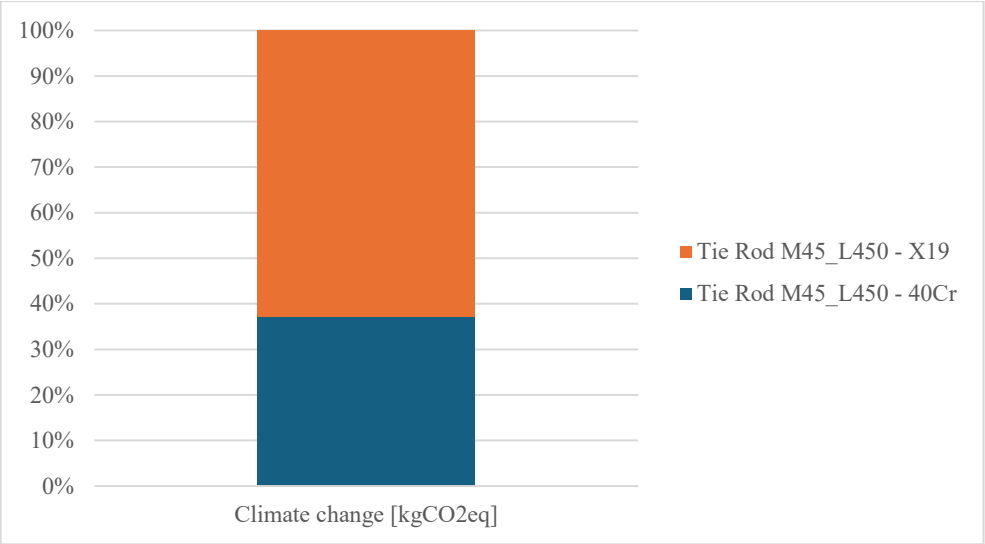



*Figura 48. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L450.*

I valori dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L500 sono mostrati nel grafico sottostante.

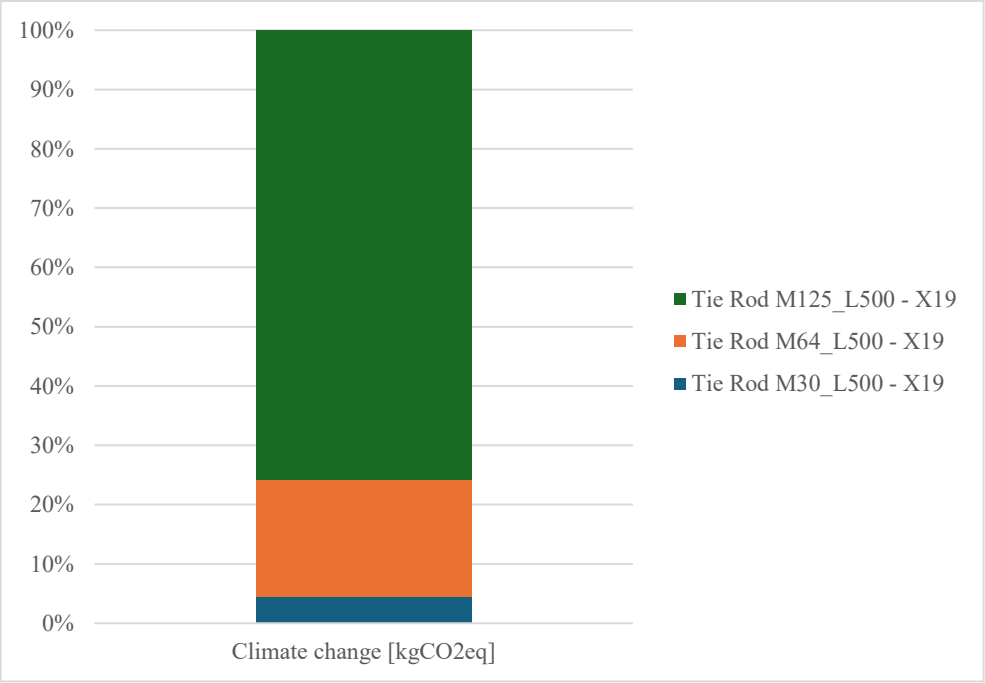



*Figura 49. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L500.*

Il grafico seguente presenta i risultati dell'impatto ambientale relativi alla lunghezza L1140.



Baker Hughes Confidential

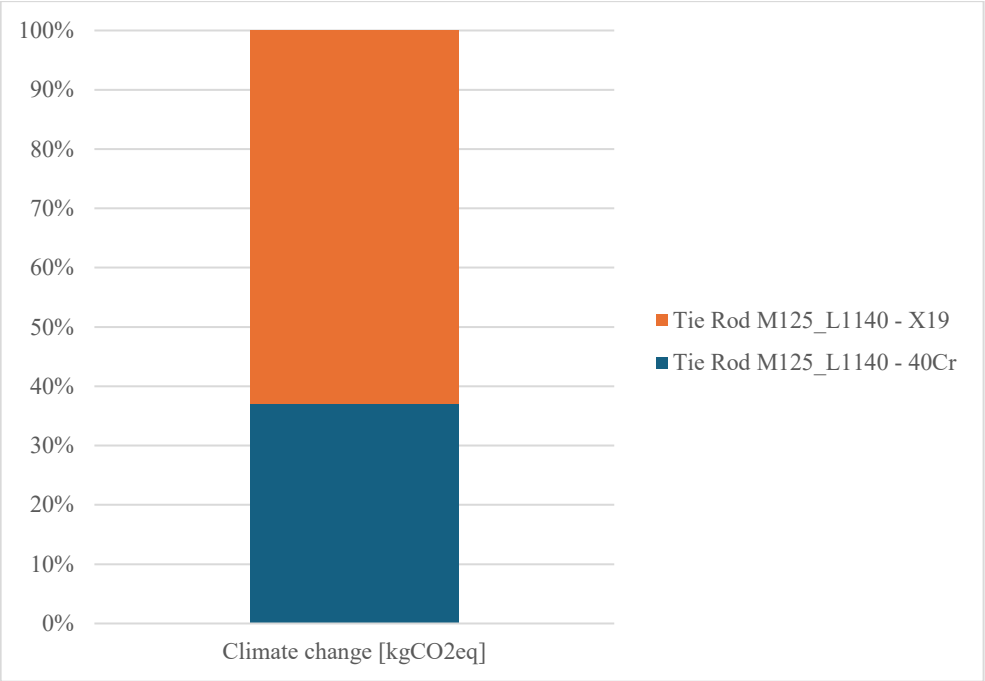



*Figura 50. Confronto dei tiranti (Cambiamento climatico) - L1140.*

In linea generale, le risultanze evidenziano che l'impatto ambientale aumenta all'aumentare della lunghezza dei prigionieri. Componenti di maggiore sviluppo longitudinale richiedono un maggiore impiego di materiale e di energia durante la fase produttiva, determinando un incremento dei valori in tutte le categorie di impatto. Tale andamento si dimostra coerente e costante in corrispondenza di tutte le lunghezze analizzate.

### 3.5.3 Confronto tra prigionieri e tiranti

La sezione successiva presenta un'analisi comparativa tra i prigionieri di tre differenti taglie dimensionali (M45, M52 e M125) e i tiranti caratterizzati dalle medesime dimensioni e da lunghezze differenti.

In apertura, il primo confronto valuta il modello di prigioniero M45 rispetto alle corrispondenti configurazioni di tirante.



Baker Hughes Confidential

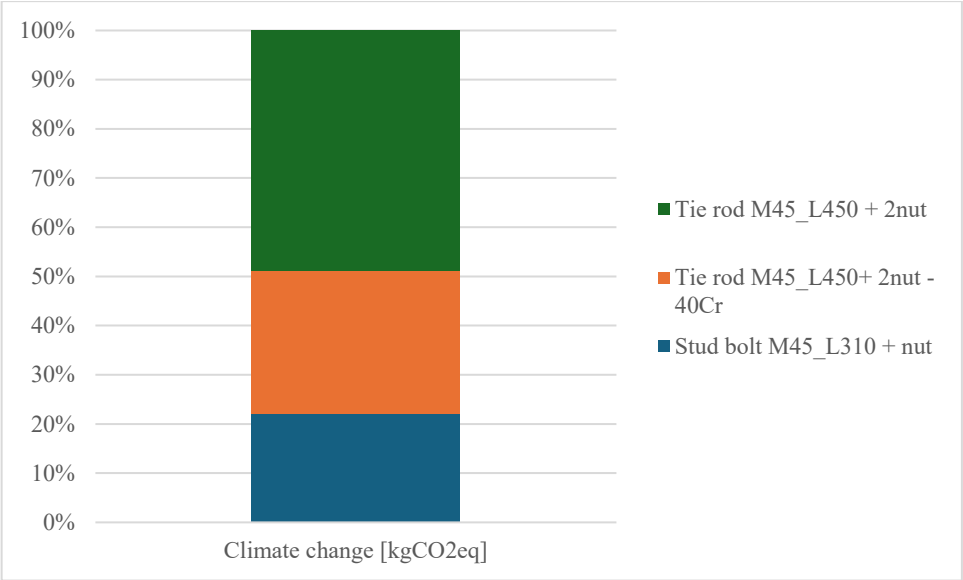



*Figura 51. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M45.*

Passando al secondo confronto, il modello di prigioniero M52 viene esaminato in relazione alle rispettive varianti di tirante.

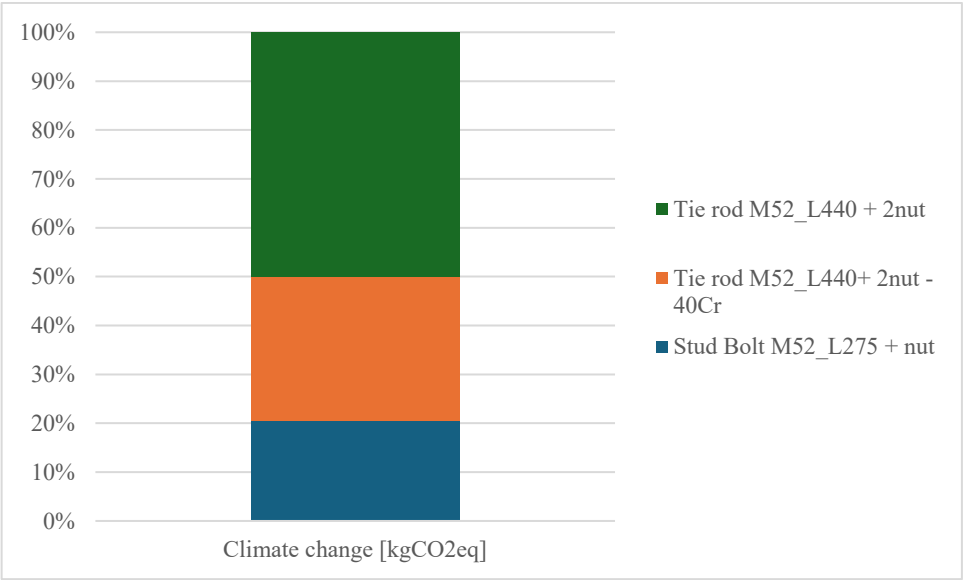



*Figura 52. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M52.*

Infine, il terzo confronto analizza il modello di prigioniero M125 affiancato alle corrispondenti configurazioni di tirante.



Baker Hughes Confidential

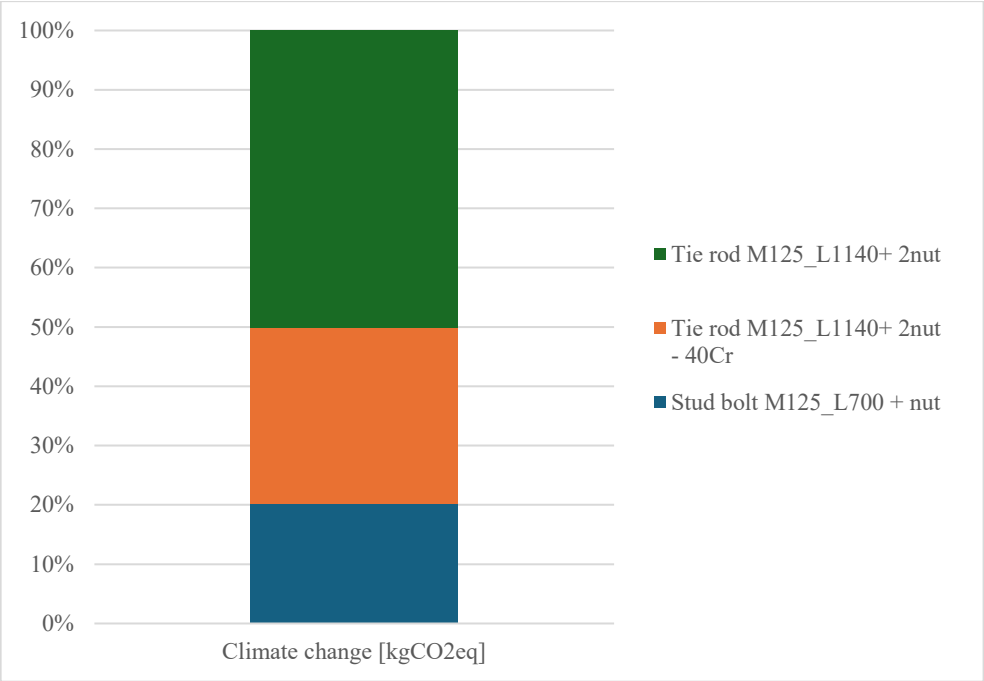



*Figura 53. Confronto dell'impatto sul cambiamento climatico per le configurazioni di prigioniero e tirante M125.*

Dall'analisi complessiva delle tre configurazioni dimensionali esaminate (M45, M52 e M125), emerge in modo sistematico come la soluzione a prigioniero garantisca costantemente il minore impatto ambientale globale e la più ridotta impronta climatica (*carbon footprint*). Tali risultanze sono riconducibili principalmente alla minore massa complessiva del componente e alla configurazione geometrica caratterizzata da un unico dado.

Parallelamente, nell'ambito delle varianti di tirante, l'opzione realizzata in acciaio 40CrMoV4-6 evidenzia prestazioni ambientali marginalmente più favorevoli rispetto alla configurazione X19CrMoNbV11-1. In conclusione, alla luce dei dati elaborati, i prigionieri si configurano complessivamente come l'alternativa progettuale ambientalmente più sostenibile per l'applicazione industriale considerata.

Al fine di comprendere l'impatto ambientale correlato alle caratteristiche geometriche e di razionalizzarne la stima durante la fase di ITO (*Inquiry to Order*), viene ora presentato il confronto relativo ai prigionieri a parità di taglia e a differente lunghezza.



Baker Hughes Confidential

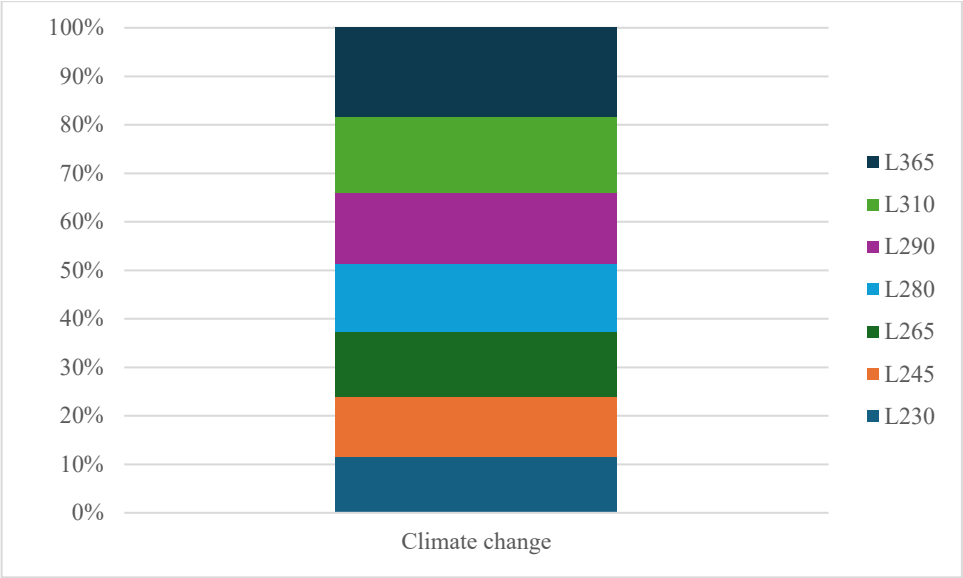



*Figura 54. Confronto dei prigionieri – stesso diametro M45, lunghezze differenti.*

I risultati evidenziano una correlazione diretta tra le dimensioni dei prigionieri e il relativo impatto ambientale. Viene ora presentato il confronto relativo ai prigionieri a parità di lunghezza e a differente taglia dimensionale.

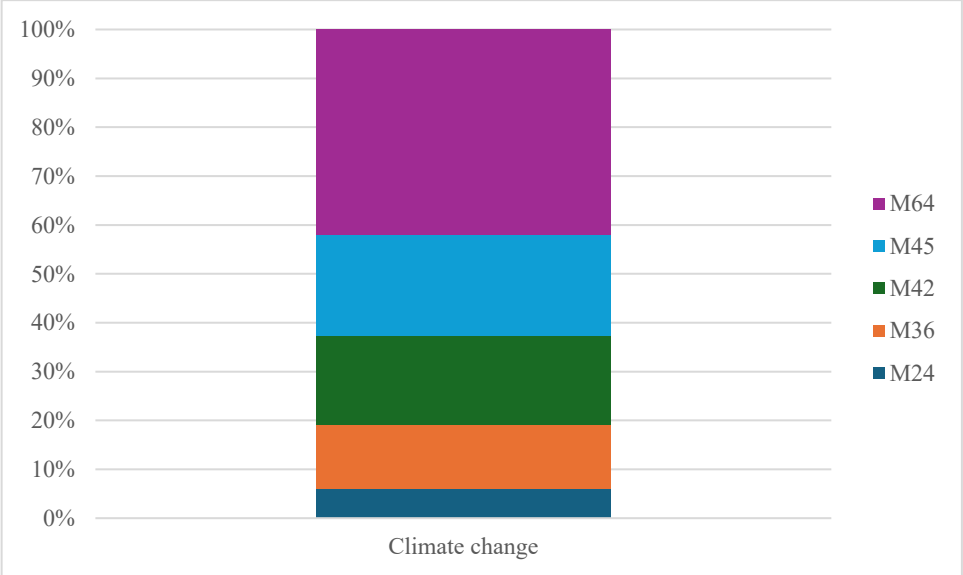



*Figura 55. Confronto dei prigionieri – diametri differenti, stessa lunghezza L245.*

I risultati mostrano il medesimo andamento osservato nel caso a parità di taglia e a differente lunghezza, evidenziando una chiara correlazione tra le dimensioni dei prigionieri e il relativo impatto ambientale.



Baker Hughes Confidential

Viene ora presentato il confronto relativo ai tiranti a parità di taglia dimensionale e a differente lunghezza.

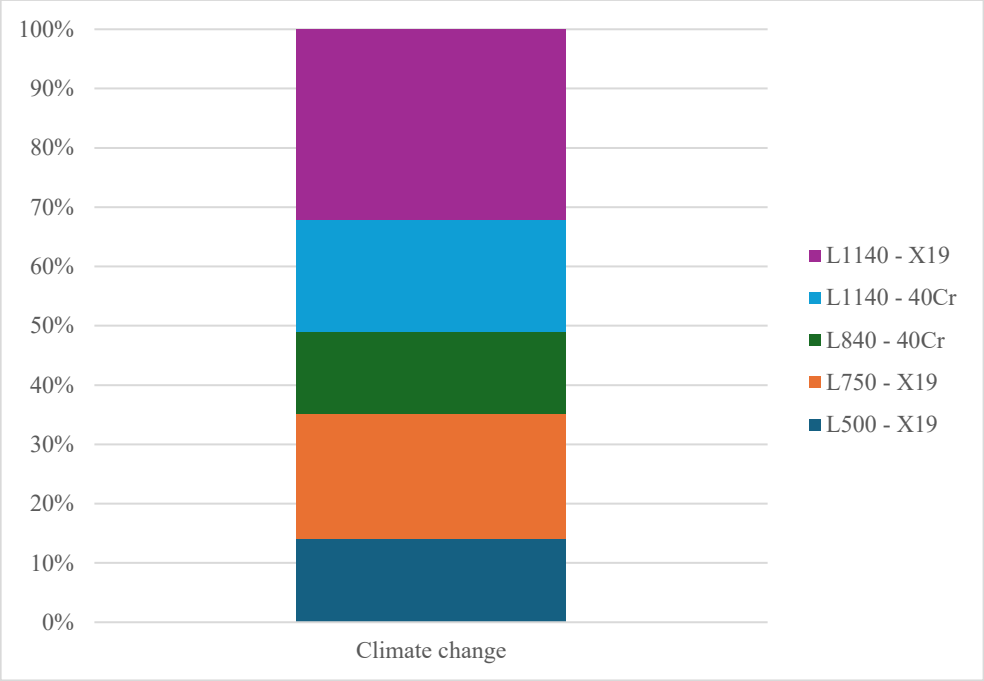



*Figura 56. Confronto dei tiranti – stesso diametro M125, lunghezze differenti.*

I risultati evidenziano una correlazione diretta tra le dimensioni dei tiranti e il relativo impatto ambientale. Tale impatto è influenzato anche dal tipo di materiale: a parità di condizioni, l'utilizzo della lega X19 genera emissioni superiori rispetto al 40Cr.

Viene ora presentato il confronto relativo ai tiranti a differente taglia dimensionale e a parità di lunghezza.

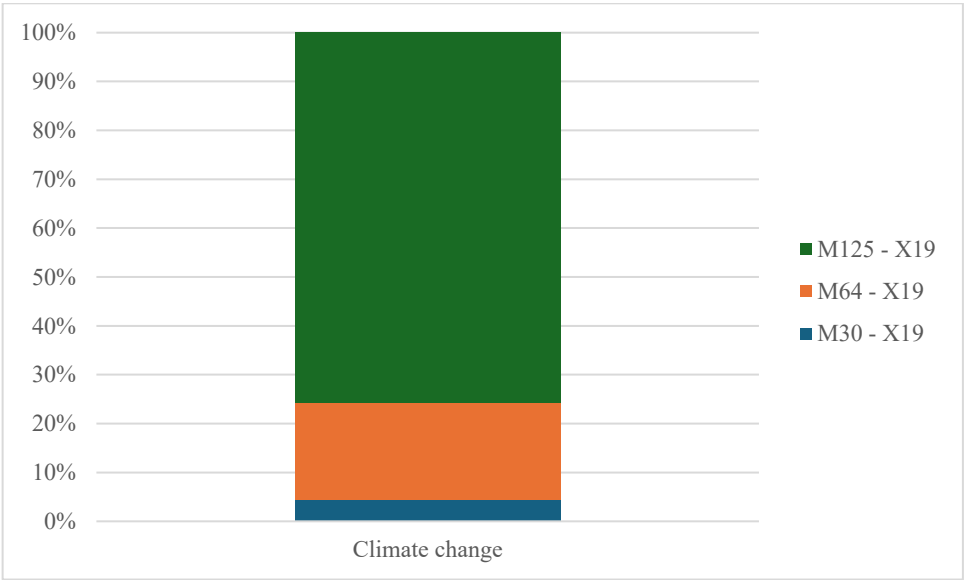



*Figura 57. Confronto dei tiranti – diametri differenti, stessa lunghezza L500.*



Baker Hughes Confidential

I risultati mostrano il medesimo andamento osservato nel caso a parità di taglia e a differente lunghezza, evidenziando una chiara correlazione tra le dimensioni dei tiranti e il relativo impatto ambientale.

I modelli relativi ai prigionieri e ai tiranti sono illustrati nei seguenti grafici.

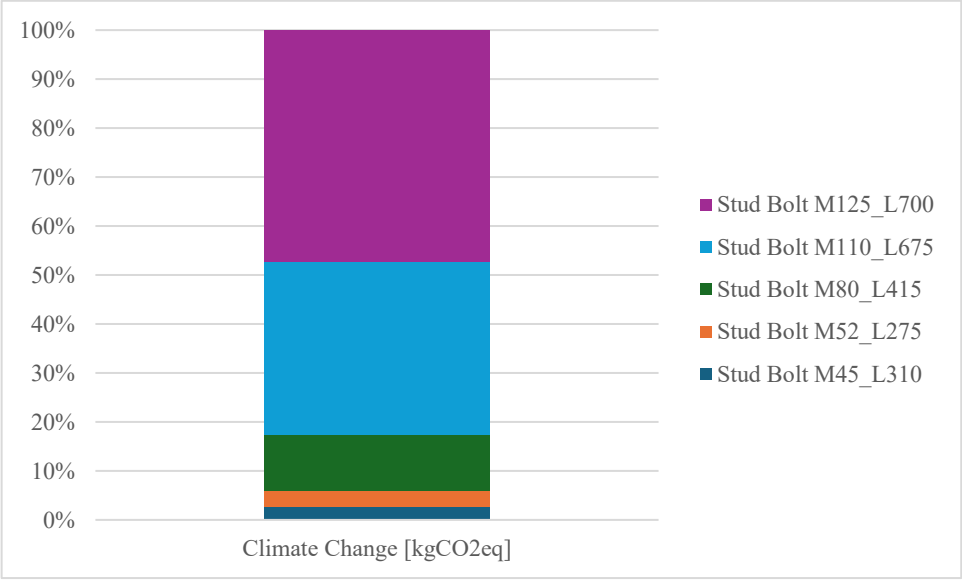



*Figura 58. Modello prigioniero + 1 dado.*

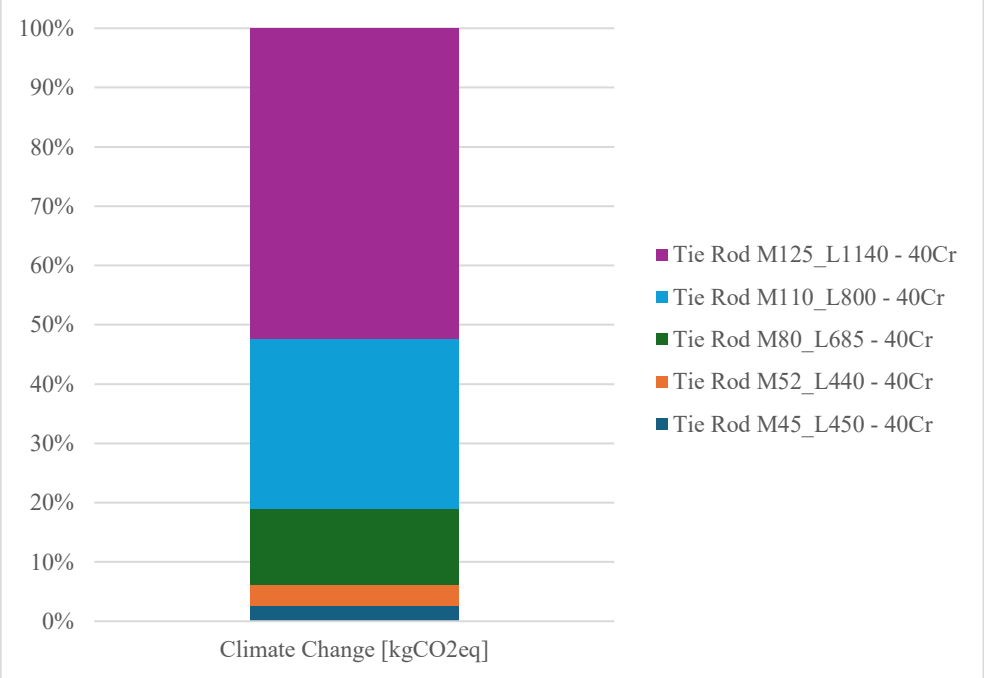



*Figura 59. Modello tirante + 2 dadi - 40CrMoV4-6.*



Baker Hughes Confidential

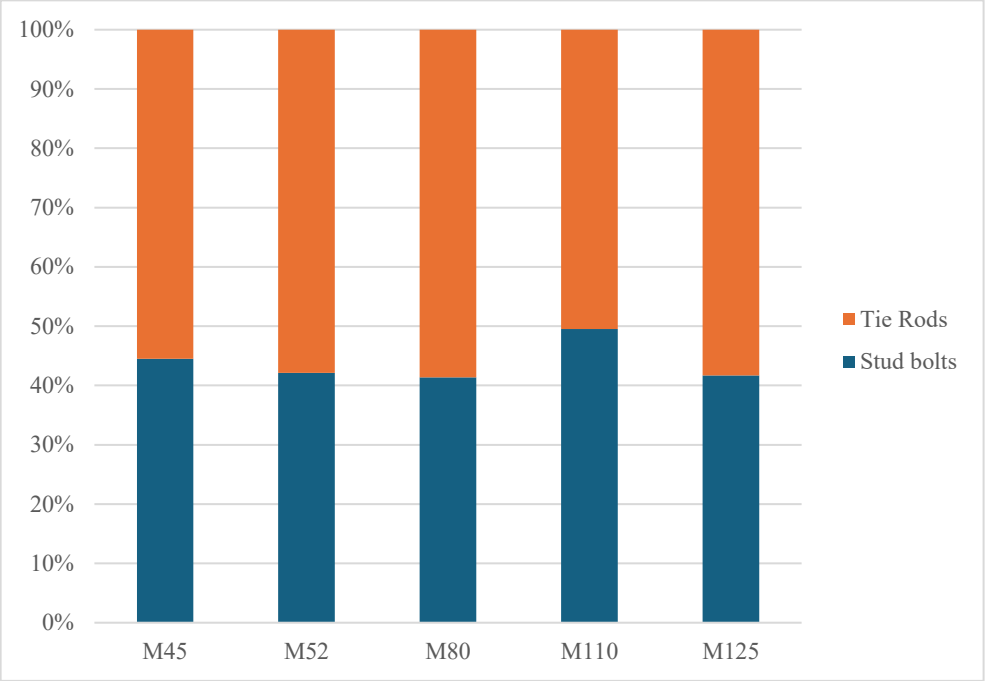



*Figura 60. Grafico cumulativo dell'impatto sul cambiamento climatico tra prigionieri e tiranti.*



Baker Hughes Confidential

# Conclusioni

Il presente studio ha avuto come obiettivo la valutazione dell'impatto ambientale associato alla produzione di componenti di collegamento filettato per turbine a vapore. In particolare, mediante l'applicazione della metodologia e degli strumenti di analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment - LCA), condotta in conformità alle norme UNI EN ISO 14040/44, sono state analizzate tre tipologie principali di componenti: prigionieri, tiranti e dadi.

Dall'analisi comparativa emerge che i tre elementi presentano una distribuzione degli impatti analoga tra le diverse fasi del ciclo di vita. La valutazione quantitativa evidenzia che il principale fattore di contribuzione, secondo la metodologia EF 3.1, è rappresentato dalle materie prime, seguite dai processi di pre-produzione (forgiatura), e tale comportamento si riscontra in modo trasversale per le categorie di impatto relative al cambiamento climatico (Climate Change), all'uso di risorse fossili e all'uso di risorse minerali e metalliche. Le restanti fasi del ciclo di vita risultano invece marginali ai fini del bilancio ambientale complessivo.

Un riscontro fondamentale risiede nella stretta proporzionalità tra l'impatto ambientale e la massa del componente finito: incrementi ponderali corrispondono sistematicamente a un aggravio delle prestazioni ambientali. In tale contesto, le materie prime impiegate sono costituite principalmente da acciai legati 40CrMoV4-6 e X19CrMoNbVn11-1. A questo proposito, l'analisi dimostra che il passaggio dalla lega 40Cr MoV4-6 alla lega X19 CrMoNbVn11-1 comporta un incremento sensibile delle emissioni a parità di dimensioni; tuttavia, nel complesso del componente, la taglia dimensionale (e quindi la massa) rimane il fattore predominante, mentre la scelta del materiale agisce come una componente secondaria ma comunque rilevante nel definire l'entità complessiva dell'impronta ecologica.

Si segnala inoltre che la fase di forgiatura assume un ruolo predominante esclusivamente per la categoria di impatto relativa al consumo idrico (*water use*). Il relativo processo modellistico è stato opportunamente modificato rispetto al database EcoInvent v3.10 integrando il software proprietario LeanCOST Nuovo Pignone srl, al fine di rispecchiare fedelmente le reali condizioni operative aziendali. A tal fine, i dati desunti dal manuale LeanCOST – *"Forging book of knowledge"* (nella versione corrente) sono stati integrati con la documentazione interna d'impresa, con particolare riferimento



Baker Hughes Confidential

alle specifiche tecniche (BH). La modellizzazione finale ha quindi integrato le informazioni di natura materiale ed energetica, tratte dal database Ecoinvent v3.10, con il patrimonio conoscitivo e documentale dell'azienda.



Baker Hughes Confidential

# Bibliografia


[1] **Enciclopedia Treccani**, *Sostenibilità*, Treccani.it. Disponibile all'indirizzo: https://www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita/

[2] **UNRIC – Centro di Informazione delle Nazioni Unite**, *Agenda 2030: I 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile*, Unric.org. Disponibile all'indirizzo: https://unric.org/it/agenda-2030-i-17-obiettivi-di-sviluppo-sostenibile/

[3] **Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B.** (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The international journal of life cycle assessment, 21(9), 1218-1230*.

[4] **Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H. J.** (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The international journal of life cycle assessment, 11(2), 80-85.*

[5] **Baker Hughes**, *Baker Hughes Italia*, BakerHughes.com. Disponibile all'indirizzo: https://www.bakerhughes.com/baker-hughes-italia

*[6]* **Tenuta, P., & Cambrea, D. R. (2022)**. Corporate Sustainability. *Springer International Publishing: Cham, Switzerland.*

[7] **Andreasi, B. S., Biganzoli, F., Ferrara, N., Amadei, A., Valente, A., Sala, S., & Ardente, F.** (2023). *Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method*.

[8] **Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Pfister, S.** (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment, 23(2), 368-378.*




Baker Hughes Confidential