

**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale**

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura**



**Impatto della temperatura di miscelazione e della tipologia di bitume nelle caratteristiche meccaniche di conglomerato bituminoso di recupero**

**Effect of the bitumen type and the pre-heating temperature on the mechanical characteristics of Hot Mix Asphalt made with 50% of RAP**

Relatore:  
**Prof. Maurizio Bocci**

Tesi di laurea di:  
**Luca Chiariotti**

---

Anno Accademico 2019-2020



# SOMMARIO:

## 1. INTRODUZIONE

## 2. CAPITOLO 1 – IL CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO

2.1. <i>Pavimentazione Stradale ed il suo recupero</i> .....	6
2.2. <i>Vantaggi economici ed ambientali del riciclaggio delle pavimentazioni</i> .....	8
2.3. <i>Il Fresato stradale</i> .....	9
2.4. <i>Tecniche di riciclaggio e vantaggi e svantaggi nell'utilizzo della tecnica a caldo</i> .....	11
2.5. <i>Impianti di produzione del conglomerato bituminoso e loro modifica per elevate quantità di fresato</i> .....	21
2.6. <i>Tecniche di produzione del bitume (differenza fra vis-breaking (API) e primario)</i> .....	28
2.7. <i>Invecchiamento del bitume</i> .....	33
2.8. <i>Additivi rigeneranti</i> .....	37

## 3. CAPITOLO 2 – PROGRAMMA SPERIMENTALE

3.1. <i>Scopo della ricerca</i> .....	39
3.2. <i>Materiali</i> .....	40
3.3. <i>Analisi di laboratorio</i> .....	58

## 4. CAPITOLO 3 – RISULTATI SPERIMENTALI

4.1. <i>00RAP API</i> .....	98
4.2. <i>00RAP PRIMARIO</i> .....	108
4.3. <i>50RAP API</i> .....	118
4.4. <i>50RAP PRIMARIO</i> .....	128
4.5. <i>50RAP API CON ACF1000 (6%)</i> .....	138
4.6. <i>50RAP PRIMARIO CON ACF1000 (6%)</i> .....	148
4.7. <i>50RAP API CON ACF1000 (9%)</i> .....	158
4.8. <i>50RAP PRIMARIO CON ACF1000 (9%)</i> .....	168
4.9. <i>Valutazione dell'impatto della variazione di contenuto di additivo</i> .....	178
4.10. <i>Impatto del tipo di bitume nelle caratteristiche del conglomerato bituminoso</i> .....	188
4.11. <i>Valutazione finale generalizzata</i> .....	198

## 5. CONCLUSIONI

## 6. BIBLIOGRAFIA

# 1. INTRODUZIONE

Con il termine pavimentazione stradale si fa riferimento alla sovrastruttura a contatto diretto con i veicoli, la quale ha il compito di assicurare nel tempo condizioni di comfort e sicurezza, per quanto riguarda il transito del traffico veicolare, e di ripartire sul terreno le azioni indotte dai mezzi di trasporto.

L'Italia, tra i principali produttori di conglomerato bituminoso è, secondo i dati, fanalino di coda in Europa nel riciclo e nel recupero delle pavimentazioni stradali, nonostante la sua ipotetica applicazione potrebbe portare a un risparmio di 1.200 milioni di euro e ad una riduzione di emissioni inquinanti pari a quelle generate da 3 raffinerie di medie dimensioni o dalla circolazione continua di 330.000 autocarri sul territorio.

Dalla norma tecnica UNI EN 13108-8, possiamo identificare la definizione di "fresato d'asfalto" come: *"conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati del rivestimento stradale, che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo"*. Attraverso il decreto 28 marzo 2018, n. 69 il conglomerato bituminoso cessa di essere qualificato come rifiuto ed è definito come granulato di conglomerato bituminoso se soddisfa contemporaneamente tre criteri specificati nell'articolo 3.

Per ottenere pavimentazioni stradali riciclate con prestazioni meccaniche idonee è necessario un processo di lavorazione adeguato che segua le normative previste. Negli ultimi anni le varie tecnologie si sono sviluppate mettendo a punto prodotti e procedimenti nuovi capaci di venire incontro a qualsiasi esigenza produttiva. Si possono distinguere quattro macro-categorie di tecniche di riciclaggio: a caldo in impianto o in situ, a freddo in impianto o in situ.

Tutti gli impianti possono essere configurati in due diverse tipologie che si distinguono in funzione alla metodologia della miscelazione che può essere discontinua o continua; in entrambe le tipologie si necessita di opportune modifiche rispetto agli impianti tradizionali, riportate poi in seguito.

Da definizione il bitume è un "materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell'asfalto nativo; attualmente, il bitume viene principalmente prodotto come residuo della lavorazione del petrolio con diversi metodologie che permettono di ottenere diverse tipologie del prodotto: Primario o Vis-Breaking

Vedremo che il principale problema che può incombere nel riciclo del fresato stradale riguarda l'invecchiamento del bitume, che consiste in un processo di deterioramento delle proprietà causato dai processi di ossidazione e dalla perdita dei componenti volatili.

Per sopperire a tali problematiche nel conglomerato si ricorre quindi all'utilizzo di additivi rigeneranti, i quali migliorano le proprietà meccaniche delle miscele riciclate. Alla luce dell'eventuale invecchiamento e della diversa composizione chimica del RAP rispetto al bitume

vergine, la ricostituzione della composizione chimica del bitume RAP è essenziale per bilanciare l'effetto di irrigidimento e di aumento della fragilità.

Lo scopo della nostra ricerca consisterà quindi nello studio e nell'osservazione delle caratteristiche prestazionali dei diversi impasti di conglomerati riciclati ottenuti attraverso differenti tipologie di bitume vergine, differenti temperature e percentuali di additivo utilizzate.

## **2. IL CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO**

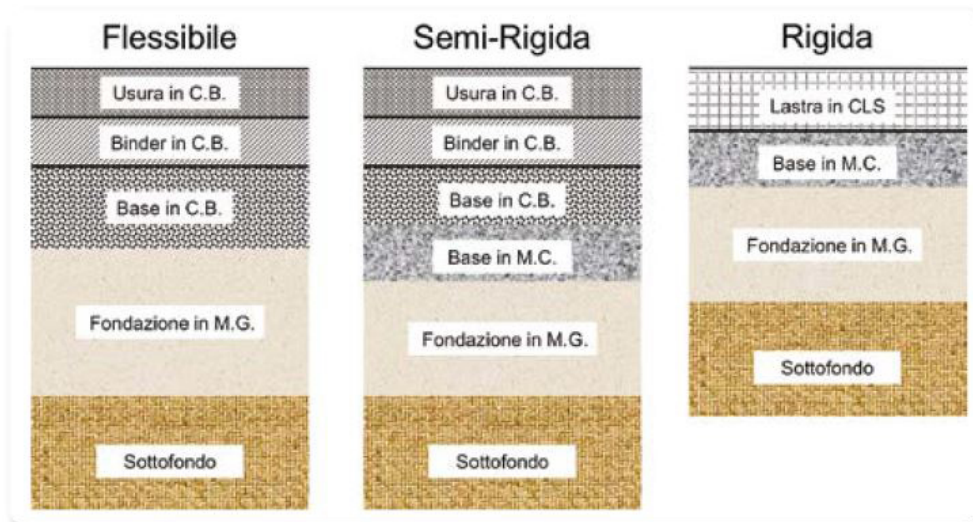
### **2.1 Pavimentazione stradale e il suo recupero**

Con il termine pavimentazione stradale si indica sinteticamente la sovrastruttura interessata dal moto dei veicoli, atta a garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di comfort e sicurezza. Essa deve ripartire sul terreno le azioni statiche e dinamiche dei mezzi di trasporto, fornire una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile e proteggere il terreno sottostante dagli agenti atmosferici.

La pavimentazione deve pertanto assolvere sia requisiti strutturali che funzionali. I requisiti strutturali comprendono la portanza (capacità di sopportare i carichi veicolari) e la durabilità (resistenza ai fenomeni di degrado) e sono principalmente in funzione dalla tipologia di sovrastruttura (spessore e materiali). Quelli funzionali, direttamente dipendenti dall'interazione pneumatico-pavimentazione e strettamente connessi a comfort e sicurezza di guida, includono regolarità del piano viabile e aderenza pneumatico-piano di rotolamento.

La pavimentazione stradale è costituita da più strati sovrapposti realizzati con materiali differenti. Ciascuno strato assolve funzioni specifiche e presenta pertanto caratteristiche peculiari, che possono differire sia in ragione della tipologia costruttiva della sovrastruttura stradale, che in funzione delle sollecitazioni (di traffico e ambientali) cui la stessa si prevede sarà soggetta nell'arco della propria vita utile.

Sulla base della qualità e delle caratteristiche dei materiali costituenti e dello spessore degli strati, si distinguono generalmente tre macro-tipologie costruttive di pavimentazioni: flessibili, semi-rigide e rigide.



Composizione stratigrafica delle possibili tipologie di pavimentazione

Figura 1.1: Stratigrafia delle diverse tipologie di pavimentazione

In generale, risalendo da quote più profonde verso la superficie, si possono individuare i seguenti strati di qualità via, via crescente:

- sottofondo;
- fondazione;
- base;
- binder;
- usura.

La stragrande maggioranza della rete viaria urbana ed extra-urbana italiana risulta costituita da pavimentazioni flessibili o semi-rigide. In ambo i casi, la principale peculiarità risiede nell'impiego di conglomerato bituminoso per il confezionamento degli strati legati del pacchetto strutturale (base, binder, usura). Essi poggiano sullo strato di fondazione che a sua volta ripartisce i carichi verso il terreno di appoggio (sottofondo).

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture, in modo particolare le vie di comunicazione, hanno conosciuto uno sviluppo senza precedenti. Molte di esse sono in uso da parecchio tempo e, avendo raggiunto il limite della loro vita utile, necessitano di crescenti interventi di manutenzione.

Il derivante incremento del traffico, il maggiore carico per asse e "l'età avanzata" sono tutti fattori che concorrono al deterioramento delle sedi stradali; da ciò deriva la necessità di destinare una quota maggiore del budget per la rete stradale alla sola manutenzione delle pavimentazioni preesistenti. Visto quindi il concorrere di questi fattori incombe la necessità di individuare un metodo più redditizio di ripristino della sede stradale, e il riciclaggio rappresenta una valida opzione. Nel settore delle pavimentazioni stradali col termine "riciclare", si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Per conglomerato bituminoso di recupero o riciclato si fa

riferimento al materiale originato dalla fresatura e dalla demolizione di pavimentazioni stradali a fine vita utile o da scarti di produzione in impianto. Esso è composto da aggregati, bitume e filler miscelati tra loro, sotto forma di elementi di diverse dimensioni e struttura. Fino ad oggi il conglomerato bituminoso di recupero è stato considerato un rifiuto, seppur non pericoloso in quanto non contenente catrame da carbone. Tuttavia, il recente Decreto 69/2018 ha ufficializzato che il fresato, se opportunamente trattato e gestito, cambia la sua qualifica da "rifiuto" a "granulato di conglomerato bituminoso". Per la realizzazione delle nuove opere, l'utilizzo di fresato deve essere previsto sin dalla fase progettuale e le Norme Tecniche devono essere redatte in modo tale da prevedere tutte le necessarie prove a garanzia di miscele bituminose prestazionali: prima (prequalifica, mix design ed eventuale campo prove), durante (verifiche di produzione) e dopo (prove in sito) la produzione e la posa in opera delle stesse.

## **2.2 Vantaggi economici ed ambientali del riciclaggio delle pavimentazioni**

L'Italia, tra i principali produttori di conglomerato bituminoso, è, secondo i dati di una ricerca condotta da SITEB (Associazione Strade Italiane e Bitumi), fanalino di coda in Europa nel recupero. Ogni anno il totale recupero delle pavimentazioni stradali rimosse potrebbe portare a un risparmio di materie prime pari a 1.200 milioni di euro, senza contare la riduzione di emissioni inquinanti equivalenti a quelle generate da 3 raffinerie di medie dimensioni e all'inquinamento prodotto dalla circolazione continua di 330.000 autocarri sul territorio nazionale.

Una stima di massima valuta in circa 20 milioni di tonnellate il materiale da utilizzare e/o smaltire nei lavori di manutenzione e adeguamento della rete stradale ordinaria: una dimensione enorme, calcolata considerando una fresatura di tre centimetri di pavimentazione (ma normalmente si arriva a dieci centimetri), e stimando di intervenire solo sul dieci per cento della rete.

Le percentuali di riciclo delle pavimentazioni stradali nel nostro Paese si attestano su livelli decisamente bassi: solo il 25% del fresato disponibile viene avviato a recupero, con grave spreco di risorse economiche.

Siteb ha calcolato che il riutilizzo del 25% del fresato comporta ogni anno il minor impiego di 300.000 tonnellate di bitume vergine (riduzione del fabbisogno di petrolio) e il recupero di 7.500.000 tonnellate di inerti, equivalenti in termini economici ad un risparmio di circa 300-320 milioni di euro di sole materie prime. Riciclando il 100% delle pavimentazioni rimosse, il risparmio economico salirebbe fino a 1.200 milioni di euro/anno di sole materie prime, senza considerare tutti i vantaggi ambientali dovuti a minori importazioni di petrolio, al minor ricorso alle cave, ai minori trasporti di materie, ai minori costi di lavorazione e alle minori emissioni in atmosfera.



La dimensione economica risulta ancora più evidente se si guarda a singoli aspetti della manutenzione/gestione, come ad esempio il consumo di conglomerati bituminosi, che sulla viabilità ordinaria – secondo dati forniti dall’Associazione italiana bitume asfalto strade (Siteb) – è di circa 36/38 milioni di tonnellate ogni anno, mentre sulle autostrade è meno di 2 milioni; di questi 40 milioni di tonnellate totali la gran parte è utilizzata nella manutenzione e nei rifacimenti dei manti stradali esistenti (si stima oltre l’85 per cento) essendo ben poche le nuove realizzazioni. Parallelamente la produzione di fresati provenienti da demolizione delle pavimentazioni bituminose si attesta su circa 13 milioni di tonnellate annue, e circa un terzo di quanto si stende viene fresato annualmente, ma non più del 20/25% è reimpiegato.

### **2.3 Il fresato stradale**

Per fresato d’asfalto possiamo ricavare la definizione dalla norma tecnica UNI EN 13108-8, la quale lo definisce come: *“conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati del rivestimento stradale, che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo”*.

Dal decreto DECRETO 28 marzo 2018, n. 69 il conglomerato bituminoso cessa di essere qualificato come rifiuto ed è definito come granulato di conglomerato bituminoso se soddisfa contemporaneamente i seguenti 3 criteri specificati nell’articolo 3:

- è utilizzabile per gli scopi specifici di cui alla parte a) dell’Allegato 1; il quale enuncia : *“per le miscele bituminose prodotte con un sistema di miscelazione a caldo nel rispetto della norma UNI EN 13108 (serie da 1-7); per le miscele bituminose prodotte con un sistema di miscelazione a freddo; per la produzione di aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l’impiego nella costruzione di strade, in conformita' alla norma armonizzata UNI EN 13242, ad esclusione dei recuperi ambientali .*
- risponde agli standard previsti dalle norme UNI EN 13108-8 (serie da 1-7) o UNI EN 13242 in funzione dello scopo specifico previsto;
- risulta conforme alle specifiche di cui alla parte b) dell’Allegato 1; il quale fa riferimento alle verifiche sui rifiuti in ingresso nella prima parte, alle verifiche sul granulato di conglomerato bituminoso nella seconda parte e alle caratteristiche prestazionali del granulato di conglomerato bituminoso nella terza

Raccogliendo quindi le definizioni possiamo esplicitare il conglomerato bituminoso da recupero (detto anche Fresato o RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) come il materiale ottenuto dalla fresatura delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso a fine vita utile e dallo scarto di produzione direttamente in impianto. Esso è costituito da aggregati, bitume e filler uniti tra loro, formando così elementi di varia composizione e dimensione. Per ottenere pavimentazioni

con conglomerato bituminoso da recupero di adeguate prestazioni e vita utile, il fresato deve essere trattato e immesso nel ciclo produttivo dei nuovi conglomerati bituminosi secondo regola d'arte e seguendo i criteri della normativa vigente. Rispetto alla tecnica di produzione tradizionale, l'uso del fresato non comporta sostanziali cambiamenti, ma devono essere eseguite le seguenti implementazioni:

- integrazione del sistema qualità;
- utilizzo di un impianto di produzione dotato di sistemi meccanici per l'integrazione del fresato;
- caratterizzazione del fresato quantomeno secondo la Normativa vigente;
- implementazione delle prequalifiche dei conglomerati;
- verifica delle caratteristiche secondo metodi prestazionali.

La peculiarità del fresato sono garantite dalle proprietà viscoelastiche del conglomerato, le quali non si alterano in maniera irreversibile con la prima messa in opera. A differenza dei leganti idraulici il bitume conserva le caratteristiche leganti e di adesione che possono essere rigenerate nei cicli successivi.

In base alla tipologia di impiego per cui sarà destinato, il fresato può essere sottoposto a processi di lavorazione convenzionali di frantumazione, segregazione e selezione in classi granulometriche predefinite. Il ciclo di vita è riportato nella figura seguente:

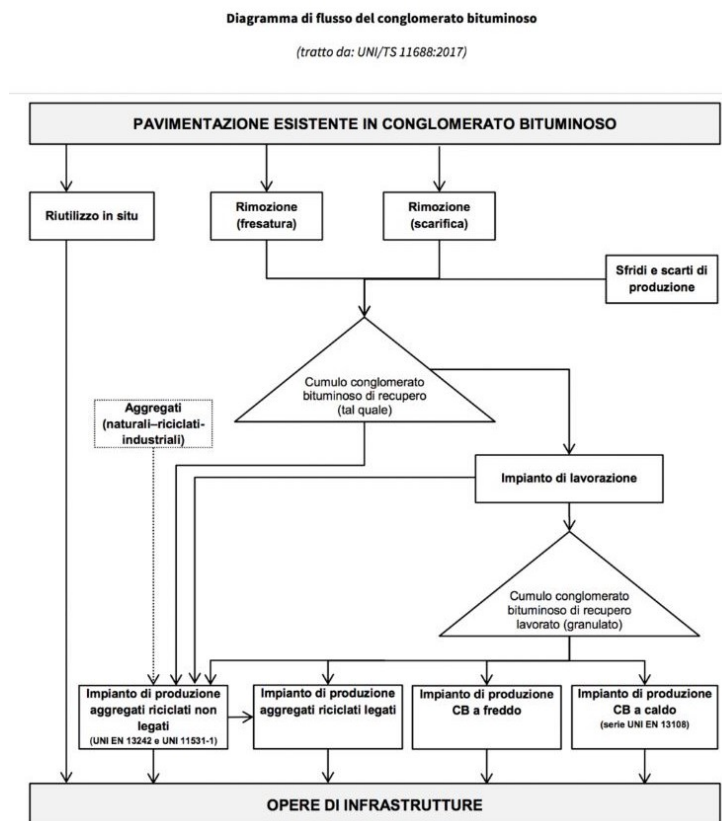


Figura 1.2: Diagramma di flusso del conglomerato

Le operazioni di asportazione possono essere eseguite mediante l'impiego di diverse apparecchiature in modo più o meno selettivo:

- *Fresatrici*: offrono la possibilità di ricavare idonei profili e pendenze trasversali della pavimentazione sottostante e sono capaci di demolire tratti fino a due metri di larghezza e profondità variabili fino ad un massimo di 40 centimetri. Tali macchine consentono la rimozione selettiva dei vari strati, in modo che il successivo stoccaggio del conglomerato possa essere organizzato in cumuli di caratteristiche omogenee. Il materiale di risulta può essere trasportato a bordo di appositi mezzi di trasporto, qual ora non venga immediatamente reimpiegato in sito.
- *Scarificatrici*: utilizzate nel caso in cui non sia necessaria la regolarità della superficie ad operazione conclusa. Per scarificatrici si intendono apparecchi come escavatori, ripper o altri mezzi simili.

In maniera generica si può descrivere con una buona approssimazione le caratteristiche proprie del fresato: la densità di volume post-trattamenti è di poco inferiore a quella degli aggregati vergini e si può quantificare circa tra 1940 e 2600 kg/m<sup>3</sup>; l'umidità naturale del materiale si verifica intorno al 5%, salvo esposizione alle precipitazioni atmosferiche che può causare un incremento fino al 7/8%; il contenuto di legante invece è compreso tra il 4.5 e 6%.

## **2.4 Tecniche di riciclaggio e vantaggi e svantaggi nell'utilizzo della tecnica a caldo**

Per ottenere pavimentazioni stradali con prestazioni meccaniche idonee, nonostante la presenza di elevate percentuali di fresato, è necessario un processo di lavorazione adeguato che segua le normative previste, in particolare la UNI EN 13108-8, la UNI TS 11688 e che risulti conforme al D.Lgs 69/2018. Per garantire quindi delle buone caratteristiche prestazionali delle miscele bituminose riciclate, è indispensabile conoscere tutte le tecnologie a disposizione per il riutilizzo del fresato e le relative peculiarità intrinseche. Negli ultimi anni le varie tecnologie hanno fatto notevoli passi in avanti, mettendo a punto prodotti e procedimenti nuovi per soddisfare qualsiasi esigenza produttiva. Si possono distinguere quattro macro-categorie di tecniche di riciclaggio, da scegliersi in base a considerazioni strutturali e funzionali, alla disponibilità di attrezzature, all'esperienza delle imprese, ai vincoli finanziari e ai criteri adottati per la pianificazione della manutenzione:

- Riciclaggio a caldo in impianto;
- Riciclaggio a freddo in impianto;
- Riciclaggio a caldo in situ;
- Riciclaggio a freddo in situ.

Inoltre, può essere considerata un'ulteriore tipologia definita come "Riciclaggio Tiepido", la quale però trova solamente applicazione attraverso impianti fissi.

### **2.4.1 Le tecniche di riciclaggio a caldo**

La tecnica del riciclaggio a caldo prevede il confezionamento delle miscele bituminose alle temperature di produzione caratteristiche delle miscele vergini; in queste tipologie l'aggregato lapideo di primo impiego viene preventivamente riscaldato e portato ad una temperatura omogenea con il resto dell'impasto.

Attraverso il riciclaggio a caldo si ottengono miscele, composte nell'insieme da:

- aggregati vergini;
- fresato pre-vagliato in quantità variabile;
- bitume vergine;
- eventuali additivi ACF rigeneranti;

*Il riciclaggio a caldo in impianto* viene eseguito nelle comuni centrali di produzione dei conglomerati bituminosi ed è caratterizzato dall'inserimento di specifici additivi all'interno di determinati organi della catena di produzione. Il materiale di risulta, ottenuto dalla demolizione delle pavimentazioni, viene miscelato con aggregati vergini, in percentuali generalmente comprese tra il 10 e il 30% (in casi più estremi fino al 50%), e con bitume di aggiunta, così da elaborare nuovo conglomerato a caldo per strati di base, binder e usura. Per fruire quindi di questa tecnologia, le diverse tipologie di impianti devono però essere opportunamente modificate attraverso l'aggiunta di specifici dispositivi ausiliari o con variazione degli organi preesistenti. Il conglomerato bituminoso riciclato deve essere vagliato prima del suo reimpiego per eliminare eventuali elementi (grumi, placche, ecc.) di dimensioni superiori al  $D_{max}$  consentito per la miscela. Nel caso sia previsto l'impiego di conglomerato di recupero di provenienza esterna al cantiere, esso deve essere preventivamente qualificato in conformità alla norma UNI EN 13108-8. La granulometria del conglomerato di recupero deve essere eseguita per via umida sul materiale prelevato all'impianto, dopo la vagliatura.

*Il riciclaggio a caldo in situ* si realizza mediante impianti mobili e semoventi, definiti "treni di riciclaggio", costituiti una serie di attrezzature che hanno lo scopo di svolgere le seguenti operazioni:

- scarifica della pavimentazione preriscaldata;
- riscaldamento del materiale fresato, all'interno del tamburo essiccatore;
- aggiunta di materiali vergini come bitume e inerti e eventuali additivi rigeneranti;
- miscelazione del conglomerato riciclato;

- stesa del conglomerato riciclato per mezzo di barra finitrice e compattazione con rullo tradizionale.



*Figura 1.3: impianto mobile di riciclaggio a caldo*

Nella progettazione di queste attrezzature si tiene atto del fattore “termorigenerazione” del materiale per cui a causa del calore si evita di alterare la granulometria degli aggregati ma allo stesso tempo si danneggia le caratteristiche del legante. Proprio per questo motivo quindi i macchinari utilizzano propano o altri gas, per riscaldare la pavimentazione mediante appositi pannelli (anche detti preriscaldatori) che riscaldano la superficie fino ad una temperatura di circa 110°C, per agevolare le operazioni di scarifica; successivamente il materiale fresato verrà surriscaldato ulteriormente fino a una temperatura indicativa di 170°C, alla quale potrà essere lavorato senza però danneggiare il legante. Inoltre, mediante questo meccanismo, anche lo sviluppo di fumi dovuti all’umidità e di gas prodotti dal bitume è sensibilmente ridotto, e ciò comporta una maggior sicurezza anche dal punto di vista lavorativo. Questa tipologia di intervento può essere impiegata per strati di profondità di 5 o 6 cm, come ad esempio i tappeti di usura, e provvede al risanamento di alcune forme di ammaloramento come le fessurazioni superficiali e al ripristino della rugosità della pavimentazione e quindi dell’aderenza. Questa tecnica è stata molto sfruttata in passato, ottenendo risultati prestazionali soddisfacenti; tuttavia però fu presto completamente abbandonata soprattutto per motivi di ordine ambientale e di salvaguardia degli operatori del settore, ad eccezione del processo per i conglomerati drenanti.

## 2.4.2 Le tecniche di riciclaggio a freddo

Per *riciclaggio a freddo* intendiamo qualsiasi metodologia di riciclaggio in cui l'aggregato lapideo vergine non è preventivamente riscaldato ma aggiunto a temperatura ambiente; il RAP viene miscelato con emulsioni bituminose o bitume schiumato che assolvono la funzione di leganti, agenti rigeneranti, acqua di aggiunta per un miglioramento della stabilità ed eventualmente con inerti vergini e/o filler. Questi due tipi di legante, sopra elencati, agiscono con modi e tempi diversi, ma raggiungono prestazioni comparabili. Nel dettaglio, vengono definite emulsioni bituminose sostanze composte da due liquidi immiscibili, uno disperdente, cioè l'acqua, e l'altro disperso, cioè il bitume, in cui si aggiunge una sostanza attiva in superficie con funzione emulsionante. L'emulsione si attiva successivamente alla miscelazione con il materiale: l'acqua inizia ad evaporare e le particelle di bitume tendono ad aggregarsi, formando una pellicola che riveste l'inerte. A questo processo si attribuisce il nome di "rottura dell'emulsione". Per quanto riguarda invece il bitume schiumato, il procedimento di elaborazione consiste nell'iniettare acqua fredda nel bitume riscaldato a circa 180°C in un'apposita camera di espansione. Quando l'acqua entra in contatto con il bitume caldo si riscalda fino a diventare vapore e innescando una reazione di espansione; le bolle di vapore coperte da una pellicola di bitume, scoppiano e il bitume si disperde tra gli aggregati lapidei creando un legante tra gli elementi.

Il *riciclaggio a freddo in impianto* fisso può essere effettuato sia con macchinari ed attrezzature specifiche allestite in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri. Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto: discontinuo, del quale si può ribadire che la particolarità si riscontra nell'introduzione del materiale, che verrà pesato e successivamente inviato al ciclo produttivo, solamente raggiunto un certo quantitativo; continuo, in questo caso invece, l'alimentazione avviene in maniera continua, in base a volumi prestabiliti. La scelta tra le due tipologie viene effettuata sulla base delle diverse peculiarità che li contraddistinguono: nel dettaglio nel primo caso la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso, mentre nel secondo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- un sistema di frantumazione e selezionatura del fresato;
- due o più dosatori per il fresato e per gli aggregati;
- un silos per il cemento;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa e/o bitume da schiumare;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore;
- un mescolatore di tipo continuo;
- rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratore e rampa per emulsione;
- attrezzature e strumenti di controllo e pesatura;

- apparecchiatura di scarico dal mescolatore all'autocarro



*Figura 1.4: impianto fisso di riciclaggio a freddo*

Dopo una fase iniziale di frantumazione e selezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini vengono convogliati al mescolatore; qui avviene la miscelazione e viene introdotto il legante, sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, assieme all'acqua, per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per cui non si prevede alcun silo di stoccaggio.

*Il riciclaggio a freddo in situ* rappresenta la tecnologia che implica i maggiori vantaggi economici ed ambientali e che contemporaneamente garantisce anche una buona resa del risultato finale, motivi per cui risulta sempre più diffusa. Questa tecnica viene eseguita mediante l'utilizzo, di apposite apparecchiature, con le quali si provvede alla miscelazione in continuo del materiale in sito, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie (calce o più comunemente cemento), acqua e aggregati vergini di integrazione.

I treni di riciclaggio impiegati, sono costituiti da un insieme di macchine operatrici semoventi:

- fresatrice/riciclatrice;
- mescolatrice (cisterna per l'acqua nel caso di bitume schiumato o cisterna contenente l'emulsione, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento);
- autocisterna contenente bitume a caldo;
- autocisterna per il rifornimento di acqua;
- rullo vibrante per la compattazione

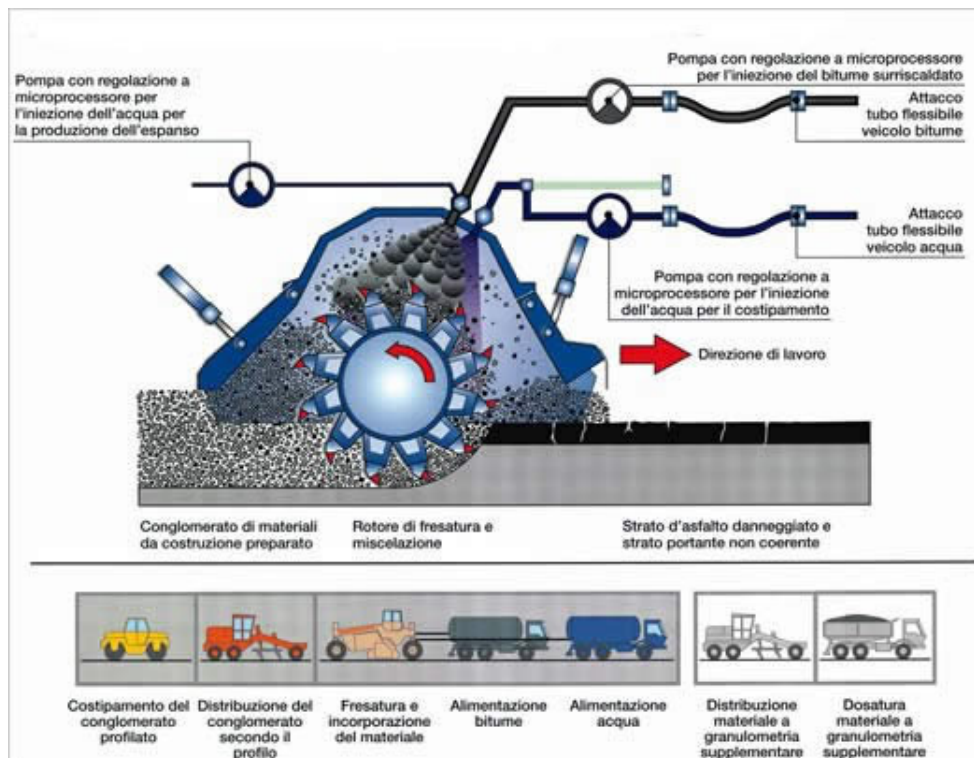


Figura 1.5: Impianto mobile di riciclaggio a freddo

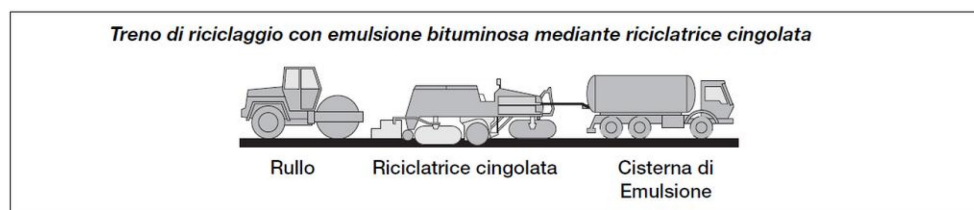


Figura 1.6: Impianto mobile di riciclaggio a freddo (2)

Nel caso in cui il legante utilizzato sia il bitume schiumato, successivamente alla fresatura, esso viene incorporato al materiale ottenuto, insieme poi a cemento e acqua; successivamente si esegue una miscelazione molto energica ed estremamente rapida, che tiene conto del tempo di decadimento della schiuma e la miscela ottenuta viene immediatamente posta in opera e compattata. Nel secondo caso, invece, si additiva al fresato stradale una miscela di bitume, acqua e emulsionanti che assicura coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

Il riciclaggio a freddo può essere classificato secondo tre diverse tipologie, in base all'area di applicazione:

- riciclaggio in profondità: è la tecnica più utilizzata nel caso in cui si debba effettuare un intervento strutturale, ossia di consolidamento con profondità d'intervento generalmente superiore ai 15 cm.



- riciclaggio superficiale: si ricorre a questo tipo di tecnica nei casi in cui la sottofondazione sia integra tranne che per alcuni punti deboli, in cui si provvede ad eliminare gravi fenditure e contemporaneamente si migliora la transitabilità. Il riciclaggio superficiale si svolge a profondità variabili tra 8÷15 cm
- miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate: è possibile migliorare le strade inghiaiate non asfaltate, mediante bitumatura, riciclando la ghiaia preesistente e addizionandola ad emulsione bituminosa o a bitume schiumato. Le profondità di questa tipologia di intervento vanno dai 10 ai 15 cm.

### **2.4.3 Vantaggi e svantaggi delle tecniche a caldo**

Analizzando quindi ogni metodologia di riciclo e focalizzandoci sulle loro caratteristiche peculiari se ne possono evidenziare gli aspetti positivi e negativi, in maniera da porli a confronto e poter così scegliere sempre la tecnologia più adeguata.

In particolare, per quanto riguarda le tipologie a caldo, rispetto a quelle a freddo, tra i vantaggi si possono elencare:

- migliori prestazioni del conglomerato riciclato ottenuto, dove con le dovute attenzioni in fase di confezione e grazie all'impiego di specifici additivi, si possono ottenere caratteristiche e prestazioni assimilabili a miscele con soli aggregati vergini. Nel caso di riciclo a freddo, l'elevato volume dei vuoti del prodotto confezionato (mai inferiori al 10%) fa sì che presenti un basso valore della densità e di conseguenza, può comportare una scarsa capacità portante e limitate performance meccaniche;
- idoneità e versatilità di impiego per tutte le tipologie d'intervento, dagli strati di base a quelli di usura;
- semplicità nell'allestimento delle attrezzature, sia per l'elevato numero di impianti fissi preesistenti, sia per le modeste modifiche tecniche da apportare.
- capacità di rivitalizzazione del bitume preesistente e di omogeneizzazione con il nuovo, grazie alle sue proprietà reologiche e all'ausilio di additivi. Nel caso del riciclaggio a freddo la percentuale di riutilizzo del materiale, prossima al 100%, è riferita esclusivamente agli aggregati, poiché la mancanza di elevate temperature limita la fusione dei bitumi e comporta quindi l'impiego di un surplus di legante vergine.
- Relativa semplicità nello studio della miscela rispetto al corrispettivo a freddo, in cui si necessita invece di uno studio approfondito in laboratorio per regolare le quantità di fresato, acqua, emulsione e cemento.

Per quanto riguarda invece gli svantaggi, in relazione al confronto con le tecnologie a freddo sono:

- maggiore consumo energetico legato alle operazioni di riscaldamento dei materiali: nel caso di riciclo a caldo si necessita di ricorrere all'energia termica nei processi di produzione, mentre contrariamente a questo procedimento, il riciclaggio a freddo non consuma alcuna energia di processo nella fase di produzione della miscela, vista la possibilità di applicare il legante con inerti freddi e umidi, e spende esclusivamente energia dovuta alla logistica. Ciò comporta quindi notevoli svantaggi dal punto di vista economico, energetico ed ambientale rispetto alle tecniche a freddo.
- resa inferiore nelle quantità di riutilizzo di materiale inteso come aggregato: nel caso di riciclaggio a caldo si può raggiungere percentuali comprese tra il 30 e il 50%, mentre nel caso del freddo si può prevedere anche il riutilizzo della intera quantità degli aggregati, con quindi una resa prossima al 100%. Il limite in merito alle percentuali è dovuto principalmente al problema del riscaldamento del fresato, alla difficoltà di tenere sotto controllo la granulometria, alla necessità di dover garantire determinate prestazioni e al rischio di un eccesso di bitume. Questi fattori comportano quindi svantaggi ambientali legati al non completo recupero dalla pavimentazione preesistente, con conseguente aperture di nuove cave e maggiore apporto di materiali vergini.
- problemi di lavorabilità legati al raffreddamento del materiale fresato a caldo, che per essere utilizzato senza ulteriori operazioni richiederebbe l'immediato reimpiego; la fresatura a freddo, invece, fornisce un conglomerato di recupero che resta sciolto e lavorabile e può, quindi, essere riutilizzato sia nei processi di riciclaggio in sito sia in quelli in centrale senza ulteriori operazioni previste.
- problemi di inquinamento ambientale dovuti sia ai consumi energetici legati alle procedure di riscaldamento, sia alle emissioni di fumi nocivi generate dal bitume; il problema risulta particolarmente rilevante nel caso "in situ" vista l'impossibilità pratica di portare su strada sistemi di depurazione efficaci (ad esempio, per questo motivo la tecnologia non è utilizzabile nelle gallerie). Nel caso del riciclaggio a freddo si verifica invece una minima produzione di emissioni, permettendo riduzioni fino al 45% in CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> e 60% in NO<sub>x</sub> per miscele con temperature più basse di 38 °C. In questa maniera oltre che garantire un minor impatto ambientale, si tutela la salute dei lavoratori, evitandone l'esposizione alle alte temperature e ai fumi nocivi, e di conseguenza si semplificano anche le misure di sicurezza da prevedere per quest'ultimi. La produzione del conglomerato a freddo quindi, non avendo bisogno del calore per l'essiccazione del materiale e per il mantenimento della fluidità del bitume, consente un risparmio energetico rilevante e l'azzeramento dei problemi connessi a fumi e polveri.
- problemi di invecchiamento del legante, causati dall'esposizione alle elevate temperature del bitume, che invece può evitarsi nel caso del riciclaggio a freddo;

- problemi causati dall'invecchiamento del bitume presente nel RAP che viene riattivato durante la procedura di miscelazione e compattazione. Tale legante ha subito, nel corso della sua vita utile passata, un grave invecchiamento a lungo termine ed occorre progettare un corretto mix design ed un adeguato contenuto di additivo rigenerante affinché tale bitume provochi un'eccessiva rigidità e fragilità al conglomerato bituminoso finale;
- un tradizionale impianto di realizzazione di conglomerato bituminoso necessita di modifiche tecniche al fine di poter gestire contenuti elevati di fresato. Infatti, per produrre conglomerato bituminoso di recupero con percentuali di RAP superiori al 20% la filiera di produzione deve essere modificata e studiata appositamente per garantire un corretto riscaldamento del fresato senza incidere sulle emissioni che tale procedura produce. Per un maggiore approfondimento si rimanda al paragrafo successivo, dove tali modifiche sono esposte in maniera esaustiva.

Per quanto riguarda le tecnologie in situ possiamo riscontrare determinate peculiarità, comuni sia alla metodologia a caldo che a freddo. Nel dettaglio le caratteristiche più rilevanti da elencare sono:

- l'assenza di asporto del materiale comporta una riduzione in merito alle operazioni di trasporto, permettendo così una diminuzione della produzione dei gas di scarico, dei prodotti volatili e dei danni acustici, i quali rappresentano ripercussioni negative sull'ambiente: grazie al riciclaggio dell'asfalto scarificato normalmente fresato non sono necessari trasporti fino alla discarica ma solo, eventualmente, piccoli spostamenti all'interno del cantiere;
- diminuzione delle tempistiche grazie all'utilizzo di moderni treni di riciclaggio, i quali presentano una produttività elevata e di conseguenza minimizzano tutti i fastidi che derivano dalla presenza di un cantiere, soprattutto in termini di circolazione. La limitazione dei tempi di chiusura al traffico è ulteriormente rimarcata nel riciclaggio a freddo poiché non necessita dei tempi di raffreddamento del conglomerato steso. Nel caso di riciclaggio in centrale, il continuo transito dei mezzi che riforniscono il cantiere di materie prime si va a sommare al traffico esistente, generando ritardi nei rifornimenti che si ripercuotono sulla produttività, riducendola anche di 4-5 volte con notevoli danni per l'impresa esecutrice e per l'ente appaltatore;
- riduzione di eventuali problemi di sicurezza della circolazione, dovuti ad ingombri maggiori, che si potrebbero evitare nel caso specifico della tecnologia a freddo in situ, viste le minori dimensioni che consentono la collocazione in una sola corsia stradale del treno di riciclaggio. Questi accorgimenti permettono di scongiurare maggiori pericoli per gli operatori e per l'utenza della rete viaria; inoltre consentono la possibilità di impiego in piccole strade, risultando adatti al rinnovamento delle piccole arterie. Tuttavia, realisticamente parlando, non è applicabile in ogni ambito stradale, in

particolare in quei casi in cui si verifica l'impossibilità di chiudere al traffico intere carreggiate per consentire i lavori.

- riutilizzo completo del materiale già presente sulla rete autostradale, con la conseguente riduzione della necessità di smaltimento di rifiuti e maggiore assenza di materiali vergini: il riutilizzo della materia di recupero contribuisce alla salvaguardia e al rispetto dell'ambiente;
- comportano un risparmio economico legato al calo dei consumi di combustibile, vista l'umidità ridotta che necessita un preriscaldamento minore, e di materie prime, all'assenza delle spese di stoccaggio e di trasporto del materiale fresato e alla riduzione dei tempi di lavoro.
- si possono riscontrare difficoltà nella lavorazione dell'impasto: per motivi pratici i mezzi impiegati non possono avere dimensioni eccessive e quindi avere camere di miscelazione sufficientemente ampie da garantire una buona amalgamazione del conglomerato.
- i treni di riciclaggio, essendo macchinari moderni e costosi, non sono sempre facilmente reperibili e richiedono inoltre una preparazione tecnica adeguata delle imprese, che invece risultano più competenti e preparate nel caso delle tecniche in impianto. In generale questa è una tecnologia più acerba che necessita quindi di un maggiore studio di approfondimento per lo sviluppo del mezzo; contrariamente gli impianti di riciclaggio fissi, essendo ormai utilizzati da molti anni, risultano sfruttati in maniera più efficiente, anche se in propensione futura risulteranno surclassabili dalle più recenti tecnologie sopracitate.

## **2.5 Impianti di produzione del conglomerato bituminoso e loro modifica per elevate quantità di fresato**

Tutti gli impianti possono essere configurati in due diverse tipologie, in funzione che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo:

### **2.5.1 Impianto discontinuo**

Negli impianti discontinui gli inerti, dopo una fase iniziale di essiccazione, vagliatura e pesata, vengono miscelati tra loro e col bitume in maniera da ottenere un impasto omogeneo, poi riversato dal mescolatore.

I principali vantaggi di questa configurazione consistono in:

- maggior flessibilità di applicazioni;
- migliore qualità del prodotto finito;
- controllo superiore sull'emissione dei fumi per merito della presenza del filtro.

In termini di svantaggi si elencano i seguenti:

- costo a causa della presenza della torre di mescolazione, del vaglio vibrante, degli elevatori a caldo;
- produttività inferiore rispetto all'impianto continuo.

Analizziamo ora il processo di funzionamento dell'impianto e la composizione della catena esecutiva. Le materie prime successivamente immesse nel ciclo produttivo vengono generalmente importate e stoccate in apposite aree all'interno dell'impianto stesso. Da qui vengono dosati i quantitativi di ogni diversa granulometria e trasportate mediante pale meccaniche in apposite tramogge, definite predosatori, che riversano poi in un essiccatore, ovvero un forno a tamburo che si presenta come un cilindro d'acciaio rotante, inclinato nel verso di avanzamento del materiale. La funzione principale dei forni è quella di eliminare l'umidità contenuta negli inerti in prima fase e di portarli in seguito alla temperatura di mescolazione prescelta. I forni a tamburo rotante sono costituiti da un cilindro rotante e da un bruciatore, e sono in grado di operare sia in "equicorrente" che in "controcorrente" (solitamente gli "equicorrenti" vengono utilizzati in impianti continui mentre in questo caso sono di tipo "controcorrente"). Durante la fase di attività, all'interno del tamburo, si generano una rilevante quantità di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione, che vengono espulsi in atmosfera, previa purificazione, attraverso un condotto collegato alla ciminiera. Quando gli aggregati caldi, ad una temperatura di circa 150-160°C, lasciano l'essiccatore, cadono in un elevatore a tazze che li conduce nella parte più alta della torre di mescolazione in cui è presente il vaglio vibrante, a seguito del quale è collocato il mescolatore. Il bitume viene invece fornito in impianto in stato semisolido mediante autocisterne, ed è stoccato in serbatoi

metallici coibentati e rivestiti con un mantello di alluminio. Il bitume viene riscaldato a 130-150°C dalla caldaia oleotermica, alimentata con olio combustibile, e successivamente mantenuto a temperatura costante con olio diatermico per omogeneizzarne la composizione. Il bitume viene poi inviato e dosato nel mescolatore tramite una pompa volumetrica. Predisposti i giusti quantitativi di bitume e di aggregati vergini, si procede alla miscelazione del materiale all'interno di un recipiente che ospita un doppio albero a pale controrotanti per un tempo compreso tra i 35 e i 50 secondi, in funzione della potenzialità della macchina e dell'umidità residua; i miscelatori sono dotati di vasche con il fondo apribile con il quale viene scaricato il materiale impastato, che attraverso un apposito convogliatore può essere trasportato alle tramogge di carico e quindi successivamente agli automezzi, oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

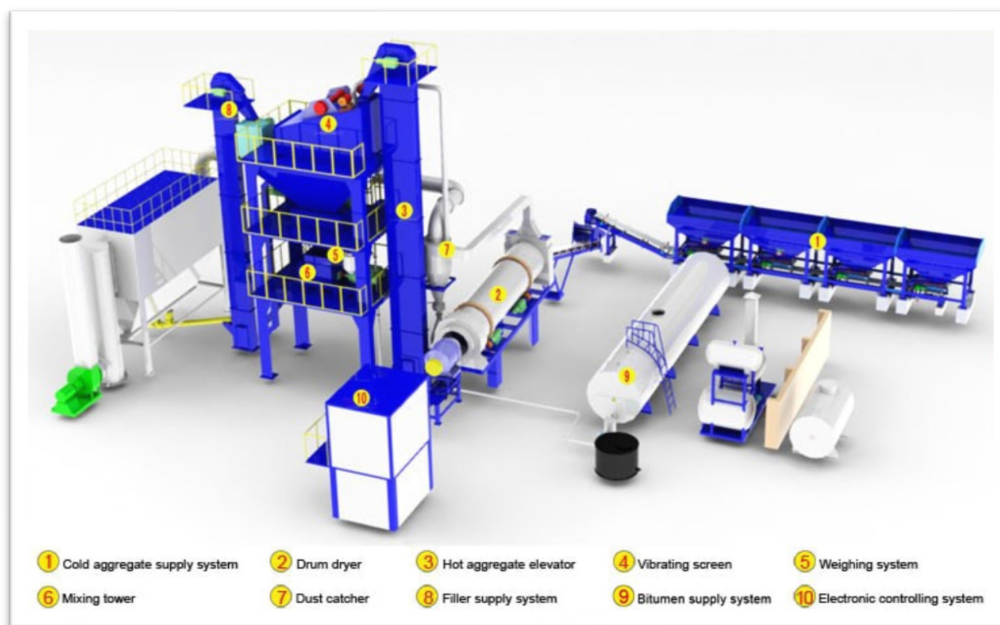


Figura 1.7: Impianto fisso discontinuo generico di riciclaggio del conglomerato

In merito al riciclaggio, l'impianto deve essere modificato in modo da evitare il passaggio del materiale fresato, contenente bitume, attraverso la fiamma del cilindro essiccatore poiché potrebbe significare crackizzare il bitume e rilasciare in atmosfera sostanze nocive.

La configurazione risulta fondamentale poiché le percentuali di materiale riciclabile nella miscela variano in relazione all'impianto utilizzato e agli equipaggiamenti di cui lo stesso dispone.

Le soluzioni di riciclaggio utilizzate più largamente sono le seguenti:

- *introduzione del riciclato freddo al piede dell'elevatore caldo*: in questa configurazione è sufficiente aggiungere un dosatore volumetrico ed un nastro trasportatore. A contatto con gli inerti vergini caldi, il fresato subisce una prefase di riscaldamento prima del mescolatore. I punti deboli di questa tecnica sono nella quantità di calore degli inerti vergini, non sufficiente a rendere omogenea la temperatura, tempi di scambio termico insufficienti per fluidificare il materiale riciclato e nella possibilità di cracking del bitume. La quantità di riciclo utilizzabile è quindi limitata a circa il 15-20%, dalla possibilità di riscaldamento degli inerti vergini e dal tasso di umidità contenuto nel fresato.

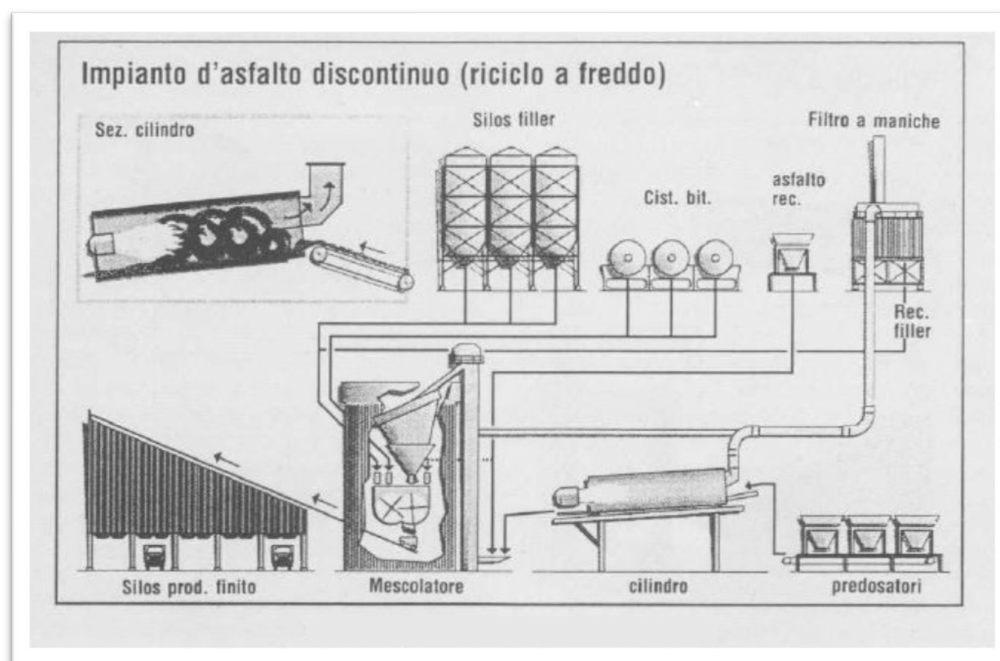


Figura 1.8: Impianto fisso di riciclaggio discontinuo con introduzione a piede del fresato freddo

Esiste inoltre una variante in cui l'introduzione del riciclato a freddo avviene nella vasca di miscelazione, direttamente attraverso una tramoggia tampone installata sulla torre. La tramoggia tampone viene rifornita attraverso un dosatore, un nastro trasportatore ed un elevatore a tazze. Nel miscelatore avviene lo scambio termico attraverso l'aggiunta degli aggregati vergini surriscaldati, con una diminuzione della  $T^\circ$  del prodotto finale in funzione del tasso di materiale riciclato utilizzato, della sua umidità e della  $T^\circ$  ambiente. L'efficienza del metodo è pressoché la medesima.

- *essiccazione e riscaldamento del riciclato in essiccatore “equicorrente”*: Con questo metodo il materiale riciclato viene preriscaldato attraverso l’utilizzo di un secondo tamburo essiccatore, all’interno del quale il materiale fresato viene surriscaldato, asciugato e trasportato al mescolatore ove incontra i materiali vergini. I dispositivi che contraddistinguono il sistema sono: un predosatore con sistema di estrazione a nastro, un nastro alimentatore di trasporto, un tamburo di riscaldamento del riciclo e un elevatore raschiante riscaldato con olio diatermico, munito di tramogge che scaricano direttamente all’interno del mescolatore. Con questa tecnica sono possibili percentuali di riciclaggio comprese tra il 30 e il 70% e i limiti sono rappresentati dalla qualità e dalla specificazione di miscelazione.

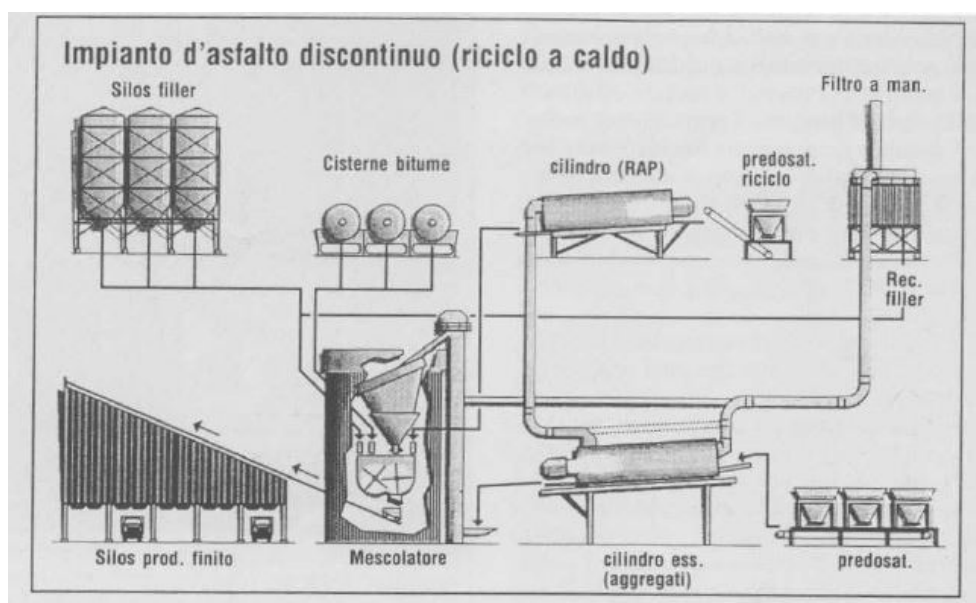


Figura 1.9: Impianto fisso di riciclaggio discontinuo con fresato riscaldato

In Italia risulta però più diffuso il metodo “Recyclean” il quale utilizza un unico cilindro, in cui gli inerti vengono introdotti in due diverse posizioni. Il riciclato, attraverso un apposito anello esterno al tamburo, cade direttamente dentro l’essiccatore, ma successivamente alla fiamma, così evitando il surriscaldamento del bitume riciclato. Questo metodo consente di utilizzare percentuali di fresato fino al 35%.



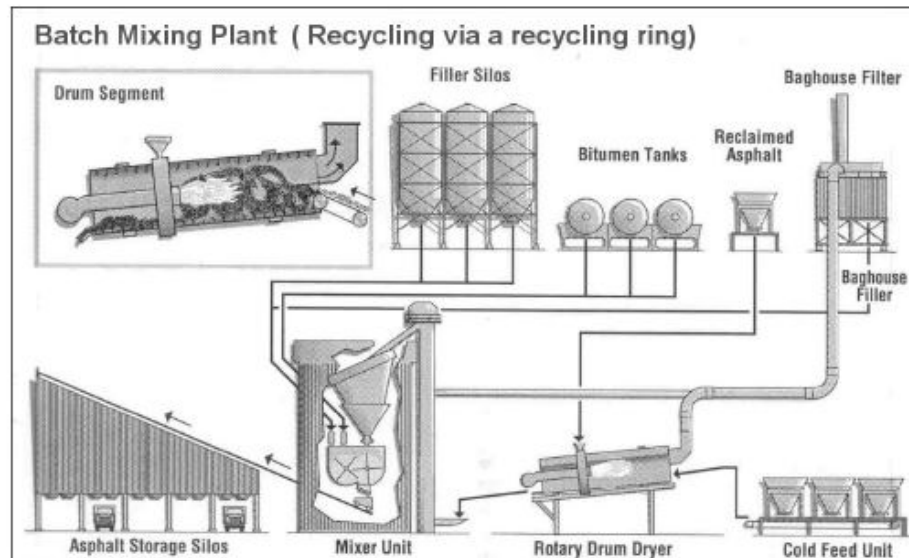


Figura 1.10: Impianto fisso di riciclaggio discontinuo metodo "Recyclean"

Oltre ai metodi sopra citati, esiste una combinazione di utilizzo contemporaneo dei due metodi suddetti (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore) per raggiungere percentuali di riciclato fino al 40% complessivi;

Una particolare estensione mirata al risparmio energetico può essere rappresentata da un impianto con modulo "Hot Stock". Si tratta di un grosso contenitore inserito tra il vaglio e il mescolatore, suddiviso in diverse parti e totalmente coibentato, che contiene inerti caldi preselezionati. In questo modo è possibile separare il processo di essiccazione da quello di mescolazione, così da evitare le frequenti accensioni e spegnimenti della fiamma del tamburo che, nel caso di impianti con approvvigionamenti variabili, sono la principale causa di un elevato consumo di combustibili.

Alte soluzioni con maggiore efficienza sono in via di sviluppo ma risultano ancora non completamente disponibili o economicamente non vantaggiose come ad esempio: cilindro essiccatore a due bruciatori, impianti con riscaldamento elettrico e impianti a microonde.

Come considerazione finale di questi metodi osserviamo che il fresato preventivamente riscaldato all'interno di un forno separato, seppur caratterizzata da un maggior costo per la fase produttiva, garantisca percentuali di RAP maggiori; nel caso di aggiunta a freddo invece, il calore viene originato dal riscaldamento degli inerti di primo impiego a circa 250°C, e pertanto la quantità di materiale riciclato sarà più limitata. In quest'ultimo caso però si ha il vantaggio di poter avere un maggior controllo sulla granulometria degli inerti, mediante vagliatura e selezione del fresato di dimensioni minori, al fine di produrre conglomerati bituminosi adatti anche alla realizzazione di strati di usura, per i quali le prestazioni richieste sono molto più elevate. Il RAP può essere introdotto all'interno del conglomerato caldo senza alcuna

prescrizione, fino ad un massimo del 10% per lo strato di usura, e del 20% per strati di collegamento e di base: in caso contrario si effettuerà un'analisi granulometrica sugli aggregati, una valutazione della percentuale di legante invecchiato presente, nonché della sua natura, affinché la miscela finale venga progettata in maniera corretta.

### **2.5.2 Impianti continui (tipo Drum Mixer):**

In un impianto continuo per la produzione di conglomerato bituminoso la differenza principale rispetto al discontinuo è che la miscelazione del materiale avviene all'interno del tamburo essiccatore. Quest'ultimo risulterà più lungo, dovendo essere contemporaneamente essiccatore e mescolatore. Anche in questo tipo di impianto, il processo produttivo prevede il riscaldamento e l'essiccamento degli aggregati, i quali vengono mescolati in continuo all'interno del tamburo insieme a bitume e filler. È possibile individuare tra i vantaggi che i costi dell'impianto sono notevolmente ridotti in merito all'assenza di dispositivi come la torre di miscelazione e il vaglio vibrante per la selezione degli aggregati; inoltre permette una maggiore produttività rispetto al discontinuo. Tra gli svantaggi abbiamo però una qualità del prodotto finito inferiore, a causa dei minori controlli effettuati in fase di produzione, e problematiche legate all'inquinamento, dovute alla presenza di bitume in prossimità di elevate temperature che provocano la formazione di vapori volatili ed oleosi. Questi impianti risultano più semplici rispetto ad un impianto a ciclo discontinuo: gli aggregati vergini entrano dal lato del bruciatore e nella parte iniziale del cilindro avviene il loro riscaldamento, mentre nella rimanente parte viene spruzzato il bitume fluido ed introdotto il filler. Il ciclo produttivo ha inizio dalle tramogge-alimentatori degli inerti, mediante le quali è possibile proporzionare la miscela e avere un controllo totale della dosatura regolando la velocità dei nastri trasportatori e mantenendo le proporzioni desiderate. A questo punto del ciclo produttivo si sottopone un controllo sulla qualità degli inerti, i quali vengono poi portati al sistema di pesatura, che permette istante per istante di conoscere il peso lordo degli inerti (comprensivo dell'umidità), permettendo così di poter regolare al meglio il rapporto inerti/bitume. In seguito, gli aggregati vengono immessi alla fine del bruciatore nel tamburo di miscelazione, così che possano muoversi in direzione concorde al gas; grazie a questa precauzione i gas più caldi si generano nella fase finale del tamburo e pertanto il bitume viene tutelato dagli effetti nocivi che deriverebbero dalla sua ossidazione e dal contatto diretto con la fiamma di combustione. Una delle principali differenze tra il sistema di miscelazione tradizionale, e quello di miscelazione nel tamburo, consiste nella diversa modalità di rivestimento dell'inerte. Al termine della miscelazione il conglomerato verrà trasportato tramite un nastro trasportatore inclinato, portato in un serbatoio di stoccaggio e conservato ad una temperatura costante fino al momento dell'uso. Questa tipologia di impianto, sottoposta a modifiche, permette di produrre conglomerati con notevoli percentuali di materiali di recupero (fino al 70%). Risulterà fondamentale evitare che il bitume in ogni sua

forma venga a diretto contatto con la fiamma del bruciatore, scongiurando così qualsiasi rischio di ossidazione del legante stesso.

Per garantire il rispetto di questa precauzione sono stati ideati diversi sistemi:

- *sistema a doppia alimentazione (dual-feed)*: il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore mentre il materiale di recupero viene introdotto a metà cilindro, evitando la fiamma del bruciatore; il riscaldamento del fessato dunque si verifica per contatto grazie al mescolamento con gli inerti vergini
- *sistema del cilindro nel cilindro (drum-in-drum)*: il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore in uno speciale cilindro, interno al principale, mentre il materiale di recupero viene introdotto poco dopo tra i due cilindri ed inizia a riscaldarsi, evitando comunque la fiamma, grazie al cilindro interno che si interpone tra i due ed evita loro qualsiasi possibile contatto. Ad una certa distanza di sicurezza dalla fiamma, il cilindro interno termina e i due materiali (vergine e di recupero) si mescolano nella restante parte del cilindro principale;
- *sistema Pyrocone (o a diffusione di fiamma)*: è un sistema di controllo della combustione in cui la fiamma è completamente schermata da un cono taglia-fiamma costituito da materiale altamente refrattario e dotato di speciali fori;
- *sistema "shield" (a schermo)*: uno schermo metallico è posto di fronte alla fiamma ed il materiale di recupero è immesso dalla parte opposta;
- *sistema con nervature*: il materiale di recupero è inserito nel tamburo dalla parte opposta a quella del bruciatore e mantenuto attraverso speciali nervature.

## **2.6 Tecniche di produzione del bitume (differenza fra vis-breaking (API) e primario)**

Come definito nella norma UNI EN 12597 “Bitumen and bituminous binders”, il bitume è un “materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”. Esso rappresenta la componente legante dei conglomerati bituminosi, responsabile di tenere insieme le particelle di aggregato garantendo consistenza e coesione sotto carico. Attualmente, il bitume viene principalmente prodotto come residuo della lavorazione del petrolio. La ASTM (American Society for Testing and Materials) definisce bitumi quella classe di materiali, composti prevalentemente da idrocarburi ad alto peso molecolare, solubili in disolfuro di carbonio. Non tutti i grezzi sono adatti alla produzione del bitume e in base alla loro idoneità possono essere catalogati in: grezzi asfaltici i quali risultano particolarmente efficaci per la loro resa in bitume, grezzi semi-asfaltici i quali offrono rese accettabili in bitume e grezzi non-asfaltici raramente impiegati per la produzione del bitume vista la scarsa resa.

Le principali metodologie di produzione sono:

- ***distillazione frazionata:*** Nell’ambito delle tecniche di produzione dei bitumi essa è da considerarsi come un processo primario. Il grezzo viene riscaldato fino ad una temperatura di circa 400°C ed introdotto nella colonna di frazionamento a pressione atmosferica, dove le sue componenti caratterizzate da un punto di ebollizione più basso iniziano ad evaporare elevandosi attraverso la colonna. In questo modo i vapori entrano in contatto con una corrente discendente detta riflusso, in corrispondenza di piatti di frazionamento posti lungo l’altezza della colonna. Lo scambio termico che si origina produce la condensazione delle frazioni meno volatili dei vapori caldi, che si dispone nei piatti, e l’evaporazione di quelle più volatili del riflusso. Attraverso questo processo quindi, le frazioni più volatili si distribuiscono sui piatti posti più in alto nella colonna mentre il deposito delle frazioni meno volatili avverrà sui piatti a livello più basso. Le frazioni che si depongono sul fondo della colonna vengono definite come “residuo atmosferico” e corrispondono alla porzione di grezzi impiegata per la produzione di bitume.

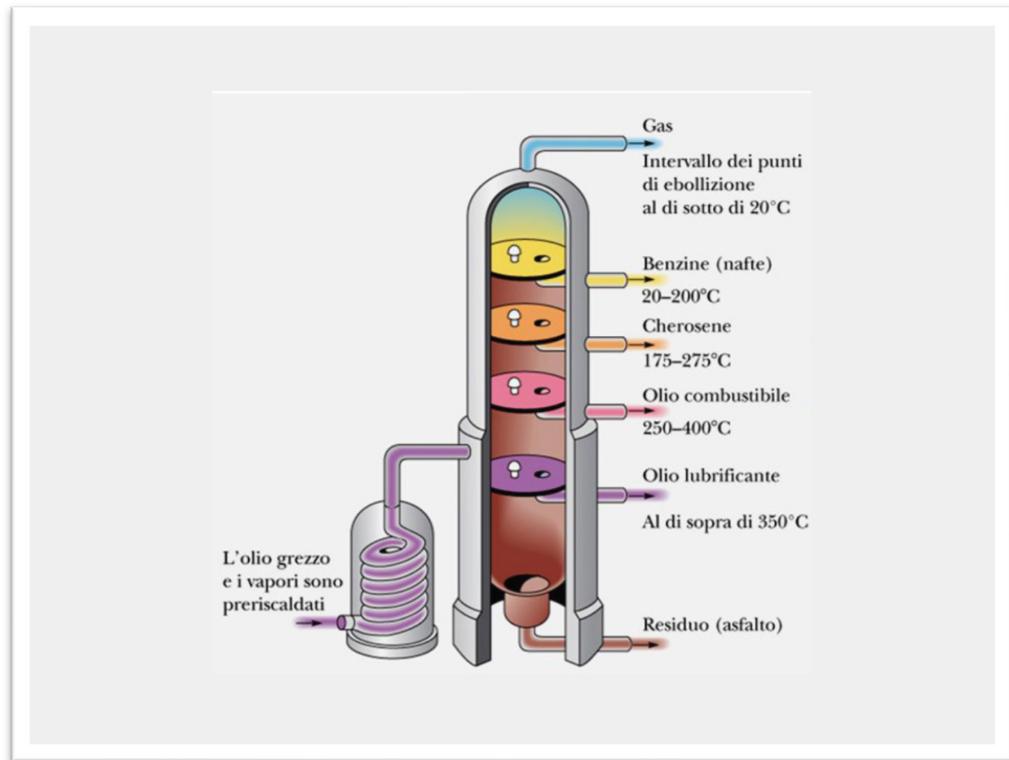


Figura 1.11: Colonna di distillazione frazionata

La presenza di oli idrocarburici nel residuo atmosferico rende, però, necessario un successivo frazionamento all'interno di una seconda colonna, a pressione inferiore all'atmosferica e, quindi, in condizioni di sottovuoto. L'estrazione delle frazioni più leggere viene favorita mediante vapore acqueo introdotto dal fondo della colonna. Il bitume viene infine estratto dal fondo della colonna sottovuoto, denominata colonna vacuum. Questo bitume si indica come "straight run" o "Bitume Primario".

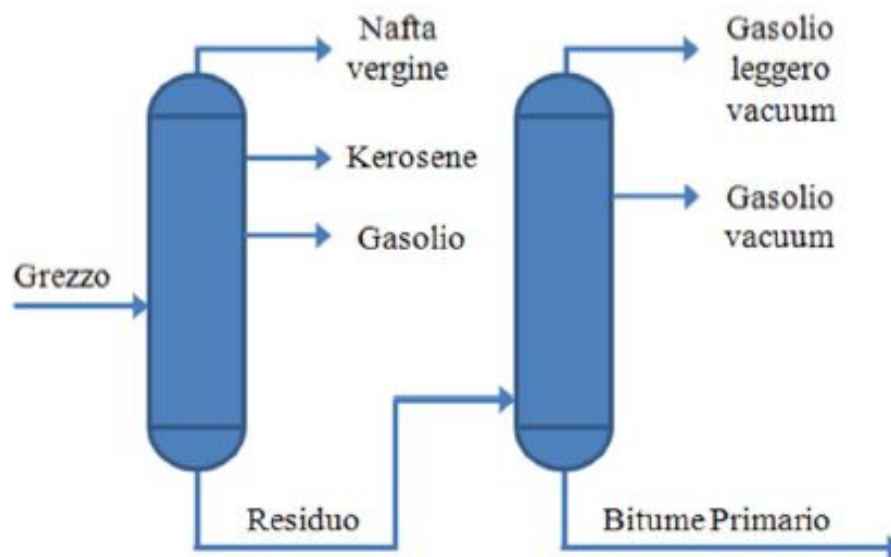


Figura 1.12: Colonna di distillazione frazione con colonna vacuum

Le principali variabili che regolano il funzionamento del processo a due stadi sono le seguenti:

- grado di vuoto applicato;
- caratteristiche, portata e temperatura del residuo atmosferico in entrata;
- temperatura del fondo colonna;
- portata e temperatura del vapore acqueo;
- condizioni di riflusso.

Regolando queste caratteristiche operative si otterranno bitumi con differenti gradi di penetrazione.

- **trattamento termico dei residui (Visbreaking):** si applica a quei processi di raffinazione del petrolio grezzo in cui si desidera ottenere una maggiore resa di prodotti leggeri. Ci sono vari tipi di processi termici tutti assimilati da l'utilizzo di valori di temperatura e pressione molto elevati, così da indurre modifiche strutturali di tipo chimico. È evidente che più il processo risulta severo più il residuo tende a indurirsi, e quindi, il bitume che ne deriva sarà più fragile. Uno dei processi termici più diffusi e meno severo è il processo visbreaking diffusamente impiegato nelle raffinerie italiane.

Il Visbreaking è un processo di decomposizione termica, a temperature che oscillano tra i 430 e i 485°C, dei residui viscosi in uscita dalla distillazione diretta a pressione atmosferica o sottovuoto. L'etimologia del termine deriva da una contrazione delle parole "viscosity" e "breaking" (riduzione della viscosità), poiché uno dei punti focali del processo consiste nel ridurre la viscosità dei residui decomponendo o sottoponendo a cracking le molecole più grandi per tramutarle in molecole più piccole. La tecnica del Visbreaking permette alla raffineria di ridurre la quantità di olio combustibile prodotto: oltre a ridurre la viscosità, si ottiene anche una parziale conversione a prodotti più leggeri e di conseguenza si riduce la quantità di flussante necessaria per ottenere una determinata viscosità.

Il Visbreaking è una forma di processo di cracking termico blando, poiché la conversione viene limitata per salvaguardare la stabilità dell'olio combustibile, ottenuto aggiungendo un flussante al tar residuo del processo. Il Visbreaking è stato commercializzato come processo di raffineria e, negli anni Trenta del 20° secolo, come sviluppo di un precedente processo di cracking termico; oggi può essere considerato una tecnologia matura.

Il processo di visbreaking può essere considerato come un processo in fase mista vista sia la fase liquida in cui si ritrova il residuo sia quella gassosa dovuta alla formazione di vapori, in quanto nelle reazioni di cracking si formano anche componenti compresi nell'intervallo della benzina e più leggeri. Le reazioni di visbreaking sono condotte con tempi di contatto relativamente brevi (pochi minuti) o nei tubi di un forno (unità di tipo coil visbreaker) o, nel caso delle unità dotate di camera di reazione (soaker visbreaker), in una camera di reazione separata, detta soaker.

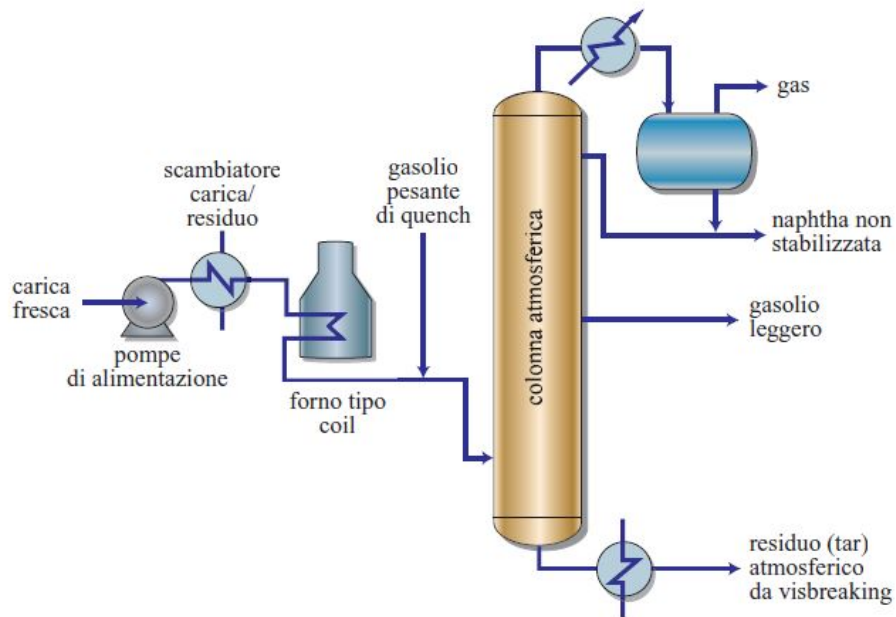


Figura 1.13: Colonna di distillazione frazionata di tipo "coil visbreaker"

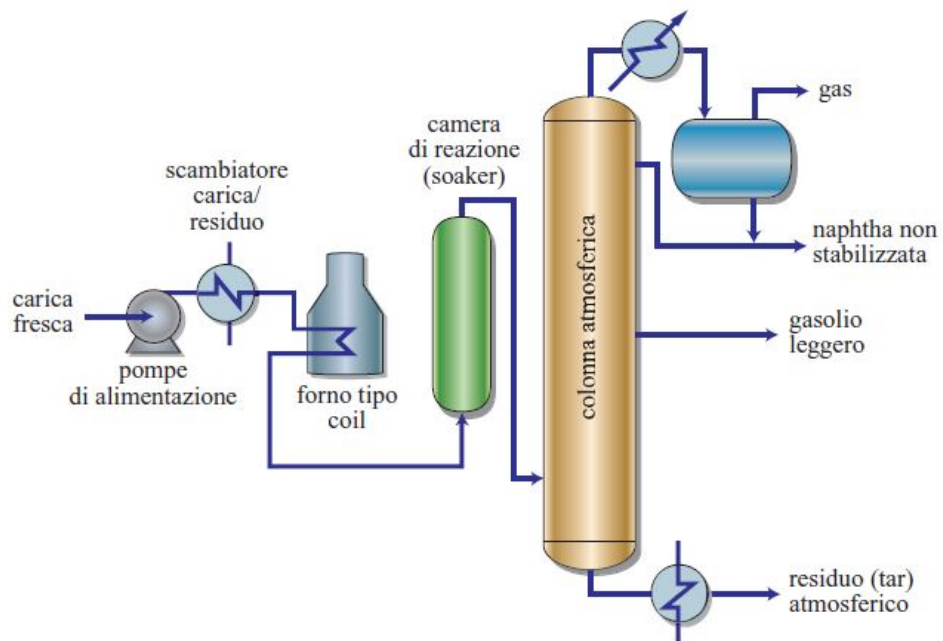


Figura 1.14: Colonna di distillazione frazionata dotata di "soaker visbreaker"

Nelle unità di tipo coil il forno, tipicamente a doppia camera, oltre a riscaldare, fornisce il calore endotermico di reazione. Nelle unità dotate di soaker invece, le reazioni debolmente endotermiche hanno luogo principalmente nella camera di reazione con circa 20-25 °C di gradiente tra ingresso e uscita. La temperatura di uscita dal forno è in questo caso inferiore a quella delle unità senza camera di reazione, per far sì che la

maggior parte delle reazioni avvenga nel soaker. Il grado di severità del processo viene misurato in funzione della stabilità degli asfalteni, diluiti con solvente paraffinico.

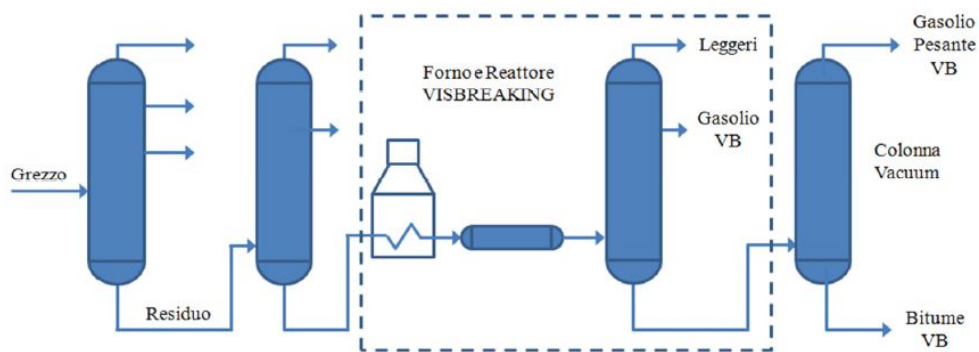


Figura 1.15: Produzione di bitume attraverso visbreaking

Le reazioni che avvengono in processi termici come il visbreaking e il cracking termico sono molte e complesse nelle loro interazioni: scissione del legame C-C, solitamente con formazione di molecole paraffiniche e olefiniche più piccole; deidrogenazione (rottura del legame C-H) con formazione di olefine e di aromatici, oltre che di idrogeno. La scissione del legame C-C è termodinamicamente favorita rispetto alla deidrogenazione in quanto la sua entalpia è minore di quella del legame C-H. Una volta formati, i prodotti di queste reazioni, specialmente le olefine, possono reagire ulteriormente tramite polimerizzazione o condensazione. Tali reazioni procedono con un meccanismo con radicali liberi, che comprende iniziazione, propagazione e terminazione, e sono debolmente esotermiche.

Il residuo del visbreaking oltre che per la produzione di bitume può essere generalmente impiegato per i seguenti usi: olio combustibile e alimentazione per una unità di deasphalting con solvente o per una unità di gassificazione.

Il bitume da visbreaking, specie se proveniente da processi poco severi, è usato comunemente per le applicazioni stradali e si è dimostrato particolarmente adatto per la produzione di membrane bituminose. L'ampia diffusione sul mercato italiano dei bitumi da visbreaking, accompagnata dall'esperienza applicativa maturata nel corso di circa due decenni, consente un utilizzo ottimale di questi prodotti, purché inseriti nel quadro generale di un'applicazione sorretta da adeguati studi formulativi, come, peraltro, la buona pratica delle costruzioni stradali suggerisce di fare in tutti i casi a prescindere dal reale livello qualitativo dei materiali da utilizzare. Per quanto attiene le differenze con i bitumi straight-run esse si evidenziano, in funzione della severità del processo di produzione, sia nel campo della suscettibilità termica sia in quello dell'ossidabilità. Il limite principale del processo di visbreaking è che i prodotti possono essere instabili. Il cracking termico a bassa pressione dà olefine che, a loro volta,



producono un materiale molto instabile tendente a subire reazioni secondarie (ossidazione) per formare residui intrattabili.

Dalla scheda tecnica del produttore (API) la composizione e il processo di produzione viene descritto dalla seguente descrizione qui riportata: “Combinazione molto complessa di idrocarburi organici ad alto peso molecolare, contenente una quantità relativamente elevata di idrocarburi con numero di atomi di carbonio prevalentemente superiore a C25 ed alti rapporti carbonio-idrogeno. Contiene anche piccole quantità di metalli quali nickel, ferro o vanadio. Si ottiene come residuo non volatile della distillazione del petrolio grezzo, o mediante separazione in forma di raffinato da un olio residuo, in un processo di deasfaltazione o decarbonizzazione”): 0-100 % e/o Residui (petrolio), da cracking termico (CAS 92062-05-0/EINECS 295-518-9): “Combinazione complessa di idrocarburi ottenuta dalla distillazione dei prodotti di un processo di cracking termico. È costituiti prevalentemente da idrocarburi con un numero di atomi di carbonio prevalentemente maggiore di C34 e punto di ebollizione superiore a 495° C ca”: 0-100%

Esistono inoltre altri due processi di produzione, qui citati in maniera sintetica, cioè produzione per sintesi o ricostruzione in cui avviene la miscelazione di componenti idrocarburi di natura asphaltica come asfalteni, resine ed oli, ottenuti prevalentemente dai processi utilizzati per la deasfaltazione e produzione per ossidazione, dove si procede ad ossidare i residui della distillazione primaria mediante la soffiatura con aria in condizioni controllate ad alta temperatura (230-280°C) e per un certo periodo di tempo.

## **2.7 Invecchiamento del bitume**

Con il termine “invecchiamento” si identifica il processo di deterioramento delle proprietà del bitume, causato dai processi di ossidazione e dalla perdita dei componenti volatili. Tale alterazione avviene nel tempo e causa un cambiamento delle proprietà chimiche, fisiche, colloidali e reologiche del bitume stesso incidendo sulla vita utile della pavimentazione stradale. I problemi di durabilità e di deterioramento sono quindi dipendenti dalla suscettibilità del bitume all’invecchiamento sia reversibile che irreversibile, il primo è di natura fisica, il secondo di natura chimica. L’invecchiamento fisico del bitume dipende dal cambiamento di struttura durante il raffreddamento, dalla perdita di sostanze volatili, dall’assorbimento selettivo da parte degli aggregati lapidei e dall’azione dell’acqua. La variazione della struttura del bitume causa una modifica delle caratteristiche meccaniche e comporta una perdita di adesività e un incremento di rigidità assumendo un comportamento sempre più fragile. L’invecchiamento chimico è la causa immediata di deterioramento del bitume, provocato da alterazioni di natura chimica della composizione del bitume stesso. I cambiamenti chimici sono provocati dall’ossidazione, in cui la temperatura e la luce fungono da catalizzatori delle reazioni.

L'ossidazione dei bitumi comporta la formazione di elementi più polari, che tendono ad associarsi per mezzo di legami ad idrogeno o altre interazioni.

Il fenomeno di "invecchiamento" del bitume può essere diviso principalmente in due parti distinte dal fattore "tempo":

- *Invecchiamento primario o a breve termine*: il fenomeno è legato all'esposizione del legante ad elevatissime temperature, superiori ai 130°C, durante le fasi di miscelazione e posa in opera.
- *Invecchiamento secondario o a lungo termine*: si manifesta invece in sito durante tutto l'arco della vita utile della pavimentazione ed è fondamentalmente determinato dall'esposizione del materiale agli agenti atmosferici (irraggiamento solare, acqua, vento).

Per capire bene i meccanismi di deterioramento, dal punto di vista chimico-fisico, il bitume può essere rappresentato come un sistema multifase che comprende una componente oleosa, composta da saturi e aromatici, all'interno della quale sono disperse sostanze insolubili dette "asfalteni", che consistono in molecole ad alto peso molecolare con struttura chimica complessa, e i quali risultano ricoperti da resine. L'insieme di saturi, aromatici e resine viene definita "malteni". Descritta la natura chimica, osserviamo che in entrambi i casi il degrado prestazionale avviene poiché il bitume subisce fenomeni di ossidazione che comportano la perdita progressiva ed irreversibile dei malteni, cioè componenti volatili più leggere. Come conseguenza, il legante risulterà progressivamente più ricco di asfalteni, che costituiscono la componente più dura e consistente, e quindi tenderà a diventare più rigido, ma anche potenzialmente più fragile e maggiormente esposto al fenomeno della fessurazione visto il calo della duttilità. L'aumento della viscosità del bitume, durante questi processi, è dovuto al crescere della tendenza dei gruppi polari ad unirsi in molecole di peso maggiore.

Nel grafico sottostante possiamo notare come i valori di penetrazione diminuiscano a causa dell'aumento della rigidità mentre quelli ottenuti dalla prova "palla & anello" aumenti in conseguenza di un aumento della viscosità e del punto di rammollimento:

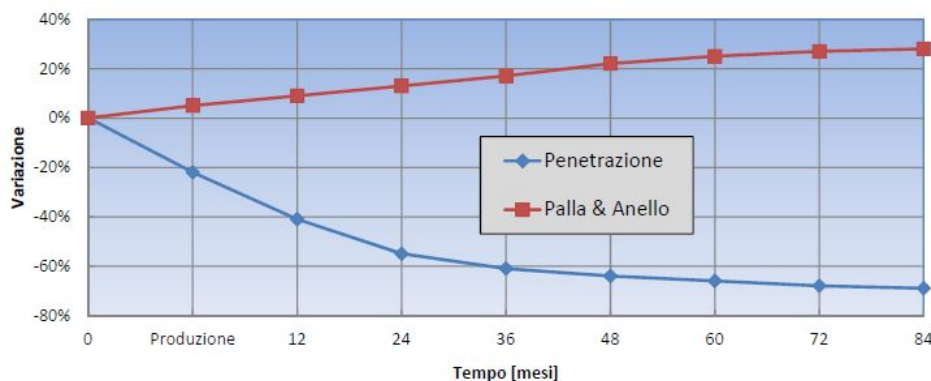


Figura 1.16: Variazione dei dati sperimentali in funzione del tempo di "invecchiamento".

I fenomeni di volatilizzazione, cioè di perdita delle componenti più leggere del materiale, sono contraddistinte da bassi punti di ebollizione e avvengono quasi del tutto già nella fase di miscelazione del bitume con gli aggregati dove le temperature sono piuttosto elevate, tra i 130 e i 170 °C. L'ossidazione invece consiste in reazioni tra l'ossigeno e le molecole idrocarburiche, le quali inducono ad una rottura dei legami di base e quindi un incremento della polarità delle molecole stesse ed è responsabile anche dell'invecchiamento a lungo termine.

La maggior parte dell'invecchiamento del bitume si verifica a breve termine dove inoltre si assiste ad un assorbimento di costituenti oleosi, resine e asfalteni da parte degli aggregati.

La quantità di invecchiamento che si verifica a lungo termine invece, dipende in gran parte dal contenuto di vuoti nella pavimentazione e i meccanismi di invecchiamento che si verificano nel dettaglio sono:

- ossidazione a causa della costante fornitura di aria fresca;
- polimerizzazione (formazione di legami intermolecolari che portano alla riorganizzazione della struttura interna verso elementi di dimensione maggiore.)
- foto-ossidazione per strati superficiali;
- sineresi dovuta all'essudazione di componenti oleosi.

Gli effetti dell'invecchiamento possono essere valutati in laboratorio attraverso procedure sperimentali che consistono nella comparazione di caratteristiche quali la penetrazione, il punto di rammollimento, la viscosità dinamica e la massa, prima e dopo aver sottoposto il bitume ad un invecchiamento accelerato.

Tali prove risultano molto importanti in quanto far riferimento alla reologia del bitume vergine può comportare errori considerevoli anche per il conglomerato appena steso, per via dei fenomeni a breve termine.

Per quanto riguarda le prove a breve termine, solitamente viene usata la prova RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) la quale simula l'invecchiamento nelle specifiche condizioni citate.

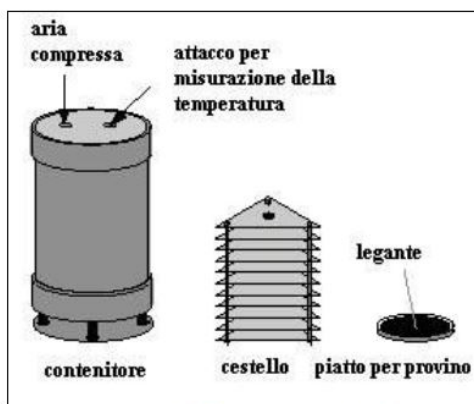
L'esecuzione di questa prova si effettua attraverso l'ausilio di un forno dotato di una struttura metallica, sostenuta da un apposito telaio e costituita da due dischi distanziati disposti in verticale e dotati di otto fori ciascuno. In questi fori vengono depositati in orizzontale dei cilindri di vetro contenenti bitume in quantità prefissate.

Durante la prova la struttura ruota attorno al proprio asse orizzontale con velocità costante con una temperatura mantenuta a 163°C. Da un ugello esce un flusso d'aria che investe ciascun bicchierino contenenti il bitume al loro interno. La durata di questo processo si prolunga per 85 minuti in maniera da creare una pellicola di materiale uniforme che accelera l'invecchiamento, così da renderlo comparabile a quello del breve periodo.



Figura 1.17: Dispositivo utilizzato per la prova RTFOT

Focalizzando l'attenzione sulle prove mirate a simulare l'invecchiamento a lungo termine il dispositivo impiegato solitamente viene caratterizzata dalla sigla PAV (Pressure Aging Vessel). I campioni di bitume, precedentemente sottoposti alla prova RTFOT, vengono successivamente depositi all'interno di una camera a pressione controllata, nella quale viene impostata a 2070 kPa ed una temperatura compresa tra 90 e 110°C per una durata di circa 20 ore. Il grado di invecchiamento simulato riproduce le condizioni che si verificano in opera dopo circa 5-10 anni.



Componenti PAV



Apparecchiatura PAV

Figura 1.18: Componenti dell'apparecchiatura PAV

Ricapitolando gli effetti causati del processo di invecchiamento sulle proprietà reologiche del bitume sono l'aumento di viscosità, di rigidità e di conseguenza la fragilità. L'irrigidimento del materiale rende lo stesso più suscettibile agli sforzi ciclici di compressione e trazione in quanto, a parità di deformazione imposta dal passaggio dei veicoli o dai gradienti termici, le tensioni nel materiale sono maggiori e possono raggiungere i valori di rottura, con la formazione delle prime fessure negli strati più superficiali della pavimentazione.

## 2.8 Additivi rigeneranti

Nella pratica del riciclo e quindi nell'utilizzo di elevate quantità di fresato l'ostacolo più critico che si riscontra è l'elevata rigidità osservata nelle miscele, il che si traduce in una bassa lavorabilità. L'inadeguatezza della lavorabilità delle miscele di asfalto grava poi sulla compattazione in sito e può quindi influire sulla durabilità della strada.

Molti studi sulle miscele RAP hanno dimostrato che l'aggiunta di fresato nei conglomerati modifica le proprietà meccaniche, sia in termini positivi che in termini negativi. Le tre principali proprietà meccaniche da tenere sotto osservazione nelle miscele contenenti materiali RAP sono:

- *Resistenza all'impaccamento*: il RAP tipicamente aumenta la rigidità della miscela e quindi può causare danni da fatica e fragilità a bassa temperatura.
- *Resistenza all'umidità*: poiché gli aggregati derivati da fresato sono già ricoperti di asfalto, vi è meno possibilità di penetrazione dell'acqua nelle particelle.
- *Resistenza aggiuntiva*: la rigidità della pavimentazione ad alto contenuto di fresato aumenta, e quindi la resistenza alle deformazioni plastiche è probabile che sia molto buona a causa del legante RAP invecchiato.

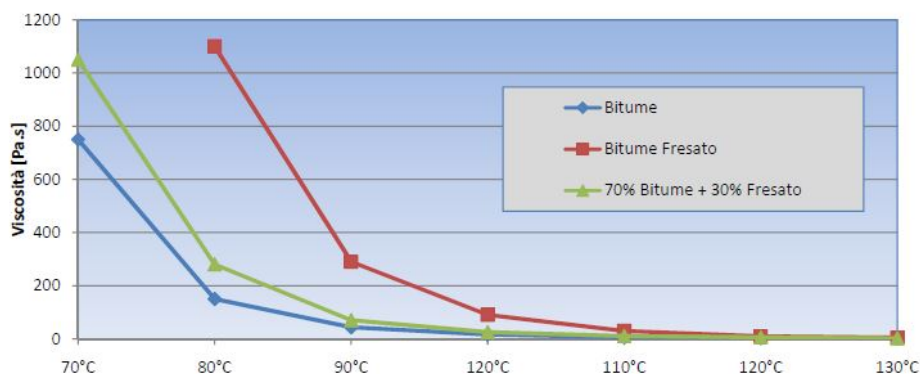


Figura 1.19: Confronto della viscosità al variare della temperatura.

Per sopperire a tali modifiche e conferire omogeneità nel conglomerato si ricorre quindi all'ausilio di additivi rigeneranti, i quali migliorano le proprietà meccaniche delle miscele di asfalto con contenuto di RAP. Alla luce dell'eventuale invecchiamento e della diversa composizione chimica del RAP rispetto al bitume vergine, la ricostituzione della composizione chimica del bitume RAP è essenziale per bilanciare l'effetto di irrigidimento e di aumento della fragilità.

Essi permettono di riutilizzare il fresato, mantenendo il controllo delle prestazioni dei conglomerati. Con l'impiego di questi additivi, la tecnica del riciclaggio a caldo del fresato permette di ottenere conglomerati bituminosi che hanno caratteristiche fisicomeccaniche paragonabili a quelle dei conglomerati bituminosi prodotti utilizzando inerti e bitume vergini.

Questi additivi hanno caratteristiche tali da modificare e migliorare le proprietà di adesione, suscettibilità termica, coesione, viscosità e resistenza all'invecchiamento del legante totale (vecchio e nuovo). Non richiedono l'uso di particolari procedure e non risulta necessario modificare l'impianto poiché è sufficiente aggiungerli al legante bituminoso e si può immediatamente riutilizzare il materiale fresato ottenendo i seguenti benefici: rigenerazione del vecchio bitume, migliore lavorabilità, adesione inerti/bitume ottimale e soprattutto la possibilità di stendere e compattare a temperature più basse di quelle utilizzate tradizionalmente usate.

### 3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

#### **3.1 Scopo della ricerca**

La sperimentazione è finalizzata nell'analizzare come la temperatura di miscelazione degli impasti e la tipologia di bitume influisca poi nelle caratteristiche prestazionali finali dei conglomerati bituminosi di recupero, e quindi ricercare la combinazione ottimale dei parametri sopra elencati per riuscire ad incrementare il riutilizzo del fresato e quindi implementare l'efficienza di questa tecnica.

I risultati raccolti quindi forniscono dati utili per descrivere i diversi impasti analizzati, ottenuti secondo precise ricette, al variare della temperatura e della tipologia del legante. Le informazioni ottenute comparano le prestazioni attribuite alle diverse ricette di conglomerati riciclati tra loro e tra il corrispondente conglomerato di primo utilizzo ottenuto mediante le stesse materie prime (ma senza l'utilizzo di fresato), così da evidenziare, oltre che un diretto confronto tra i diversi conglomerati riciclati, l'efficienza di questa tecnica e la sua applicabilità.

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
1	0	140	API	-	-
2	0	170	API	-	-
3	50	140	API	-	-
4	50	170	API	-	-
5	50	140	API	ACF1000	6% bitume RAP
6	50	170	API	ACF1000	6% bitume RAP
7	50	140	API	ACF1000	9% bitume RAP
8	50	170	API	ACF1000	9% bitume RAP
9	0	140	PRIMARIO	-	-
10	0	170	PRIMARIO	-	-
11	50	140	PRIMARIO	-	-
12	50	170	PRIMARIO	-	-
13	50	140	PRIMARIO	ACF1000	6% bitume RAP
14	50	170	PRIMARIO	ACF1000	6% bitume RAP
15	50	140	PRIMARIO	ACF1000	9% bitume RAP
16	50	170	PRIMARIO	ACF1000	9% bitume RAP

Tabella 2.1: Lista delle miscele da analizzare

## 3.2 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono stati: aggregati vergini, bitume (50/70 “primario” e “Vis Breaking”), fresato (RAP grosso e RAP fino) e additivo rigeneranti (ACF1000).

### 3.2.1 Aggregati

Gli aggregati rappresentano la fase solida dei conglomerati e sono costituiti da particelle granulari di origine minerale, le quali costituiscono l'80-85% del volume delle miscele e circa il 95% del peso.

Possono essere classificati in base alla loro origine:

- Naturali: materiali ricavati da rocce con particolari caratteristiche di resistenza mediante un processo di frantumazione artificiale ed una successiva vagliatura. Questo tipo di aggregati viene impiegato soprattutto negli strati più superficiali perché garantisce migliori caratteristiche meccaniche.
- Artificiali: questi aggregati sono prodotti mediante processi industriali e le proprietà di tali aggregati possono differire in base al prodotto di origine e al tipo di lavorazione. Esiste la possibilità di progettarli “su misura” con determinate proprietà pre-richieste.
- Riciclati

Indipendentemente dall'origine degli aggregati, le norme tecniche di Capitolato Anas fanno riferimento a specifiche caratteristiche per giudicarne l'idoneità. Tali caratteristiche variano in funzione dello strato per cui il materiale deve essere impiegato.

Limiti da Capitolato Anas per i principali parametri caratterizzanti gli aggregati

Indice	Usura chiusa	Usura drenante	Binder	Basebinder	Base
Perdita in peso Los Angeles	≤ 20%	≤ 20%	≤ 25%	≤ 25%	≤ 25%
Resistenza al gelo/disgelo	≤ 1%	≤ 1%	-	-	-
Aggregati "alluvionali" (da frantumazione di rocce tondeggianti - % in peso)	Se concesso dalla DL < 50%	Se concesso dalla DL < 40%	-	-	-
Aggregati frantumati (privi di facce tonde - % in peso degli aggregati alluvionati)	Se concesso dalla DL ≥ 80%	Se concesso dalla DL ≥ 80%	100%	≥ 70%	≥ 70%
PSV (Polished Stone Value) tessitura superficiale tramite Skid tester	≥ 44	≥ 44	-	-	-
Coefficiente di appiattimento	≤ 15%	≤ 15%	≤ 15%	≤ 15%	≤ 15%

Figura 2.1: Limiti di Capitolato Anas



Le proprietà che caratterizzano un aggregato sono di tipo geometrico (granulometria, forma, appiattimento, tessitura), fisico (meccaniche e di durabilità) e chimico (proprietà mineralogiche, idrofilia-idrofobia).

Le caratteristiche geometriche principali sono:

- *Granulometria*: distribuzione delle dimensioni delle particelle che influenza tutte le principali proprietà delle miscele. La granulometria viene studiata mediante analisi granulometrica tramite setacciatura (setacci con dimensioni standardizzate riportate nella norma UNI EN 13043). In generale si cerca di ottenere la massima densità impiegando la minor quantità possibile di aggregati, per cui la distribuzione granulometrica deve essere tale da garantire la presenza proporzionata di granuli con dimensioni assortite, così che i più “fini” possano occupare i vuoti lasciati dai più “grossi”.
- *Forma dei granuli*: influenza il livello di incastro intergranulare nelle miscele e, parzialmente, l’aderenza superficiale. Si determina un indice di forma, ove i granuli vengono classificati sulla base del rapporto tra il diametro massimo e quello medio. Per la valutazione del coefficiente di appiattimento invece si ricorre ad uno speciale vaglio a barre. Le norme tecniche di Capitolato Anas impongono limitazioni con particolare riferimento a quest’ultimo parametro.
- *Tessitura superficiale*: Influenza le caratteristiche superficiali di aderenza e viene misurata tramite prove di attrito radente. Inoltre, influisce parzialmente anche l’incastro intergranulare e la quantità di bitume necessaria per un corretto ricoprimento dei granuli.

Per quanto riguarda la caratterizzazione fisica degli aggregati si determina invece valutando le caratteristiche dell’aggregato grosso in termini di resistenza alla frammentazione, all’usura e ai cicli di gelo-disgelo (durabilità). Tali caratteristiche vengono determinate tramite la *prova “Los Angeles”* (UNI EN 1097- 2).

Infine, gli aggregati possono essere classificati anche dal punto di vista chimico analizzando alcune specifiche proprietà:

- *pulizia e qualità dei fini*: si verifica la presenza di minerali argillosi o organici che possono compromettere l’adesione con il bitume o causare suscettibilità all’acqua.
- *Composizione mineralogica*: natura compositiva degli aggregati che influenza in particolar modo le caratteristiche meccaniche e di durabilità.

La norma UNI EN 12620 definisce gli aggregati in base al diametro minimo ( $d$ ) e massimo ( $D$ ) di una frazione di aggregato, secondo la seguenti classi:

- aggregato grosso:  $d \geq 2$  mm;  $D \geq 4$  mm
- aggregato fine (sabbia):  $d = 0$ ;  $D \leq 4$  mm
- filler: passante al setaccio 0,063 mm

Nell'ambito della seguente indagine sono stati impiegati diversi tipi di aggregati, in termini di pezzatura e mineralogia. La granulometria di ogni aggregato è stata determinata in accordo alla norma UNI EN 933-1. Per ricavare la curva viene preso un campione di materiale ottenuto mediante quartatura, ovvero una selezione di un campione rappresentativo, e poi viene posto all'interno di un forno a 105°C allo scopo di eliminare l'acqua interstiziale presente, per un tempo necessario al raggiungimento di un peso costante.

Per procedere con un'analisi granulometrica per via secca prima si pesa il materiale e poi si dispongono i setacci uno sopra l'altro, con diametro dei fori decrescente, e si versa sulla sommità il campione di materiale da analizzare.



*Figura 2.2: Piatti di vagliatura riposti uno sopra l'altro*

I vagli vengono poi allestiti su una struttura vibrante che scuote vigorosamente gli aggregati attraverso un movimento "rotatorio-sussultorio" per 15 minuti per favorire il passaggio del materiale; ovviamente la pezzatura più grossolana si depositerà più in alto e contemporaneamente i più fini filtreranno invece più in profondità.



Figura 2.3: Procedura di vagliatura attraverso il maglio vibrante

Al termine di questa fase si pesa il materiale raccolto in ciascun setaccio, iniziando da quello con trama più fine e misurando così il “trattenuto parziale” che poi viene espresso in percentuale, utilizzando la seguente formula:

$$T_i = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_i}$$

dove:

- $T_i$  = trattenuto parziale in percentuale;
- $P_i$  = passante all’i-esimo setaccio.
- $N$  = numero dei setacci

In seguito, vengono poi calcolati anche i “trattenuti cumulativi” nei vari setacci in relazione a tutta la quantità di materiale trattenuta nel setaccio i-esimo ed in quelli sovrastanti ( $j=1, 2, \dots, i$ ), espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione.

$$TC_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{j=1}^i P_i}$$

Vengono infine calcolati i “passanti cumulativi” nei vari setacci calcolati come complemento a 100 dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione:

$$TC_i = 100 - TC_i$$

L'analisi granulometrica per via umida invece prevede un'ulteriore operazione iniziale in cui un quantitativo preciso di materiale viene posto in un setaccio con maglie di dimensioni pari a 0,063 mm, per poi essere lavato sotto l'acqua corrente per il tempo necessario in cui avviene il completo dilavamento del filler e la completa disgregazione dei grumi. Al termine di questa operazione, che corrisponde al ritorno alla limpidezza dell'acqua che passa attraverso il setaccio, il residuo viene posto in forno ad asciugare alla temperatura di 105 °C per poi effettuare una setacciatura "tradizionale" come è stata descritta qui sopra.

Il risultato dell'analisi granulometrica viene poi elaborato attraverso la creazione di grafici detti curve granulometriche in cui sull'asse delle ascisse viene riportato l'apertura del setaccio che ha trattenuto il materiale in scala logaritmica, mentre sulle ordinate la percentuale del materiale trattenuto dal rispettivo setaccio. La curva granulometrica ottenuta per ogni materiale è stata in seguito utilizzata per la realizzazione della curva di progetto e quindi per il calcolo delle quantità di ogni singola pezzatura da impiegare nelle miscele

Nell'ambito della presente indagine sono stati impiegati diversi tipi di aggregati, in termini di pezzatura e mineralogia. La granulometria di ogni aggregato è stata effettuata in accordo alle norme UNI EN 933-1. Nella sperimentazione sono stati utilizzati:

- aggregati lucidi di origine calcarea di diverse classi granulometriche: calcare 6/12mm e calcare 12/16mm
- sabbia;
- filler;

Il calcare è una roccia sedimentaria la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organica o clastica). Il componente principale è rappresentato dal minerale calcite nel quale sono presenti impurità argillose o quarzatiche più o meno evidenti. Le cave per l'estrazione del calcare si trovano prevalentemente lungo i corsi d'acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane.

Per quanta riguarda il calcare 6/12:



Figura 2.4: Calcare 6/12

### CURVA GRANULOMETRICA

d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100,0
12,5	2,8	99,7
10	245,8	77,1
8	415,7	38,8
6,3	360,5	5,7
4	38,1	2,1
2	4,4	1,7
1	0,8	1,7
0,5	0,3	1,6
0,25	0,15	1,6
0,125	0,25	1,6
0,063	0,5	1,6
fondo	16,90	0,0

Tabella 2.2: Curva granulometrica calcare 6/12

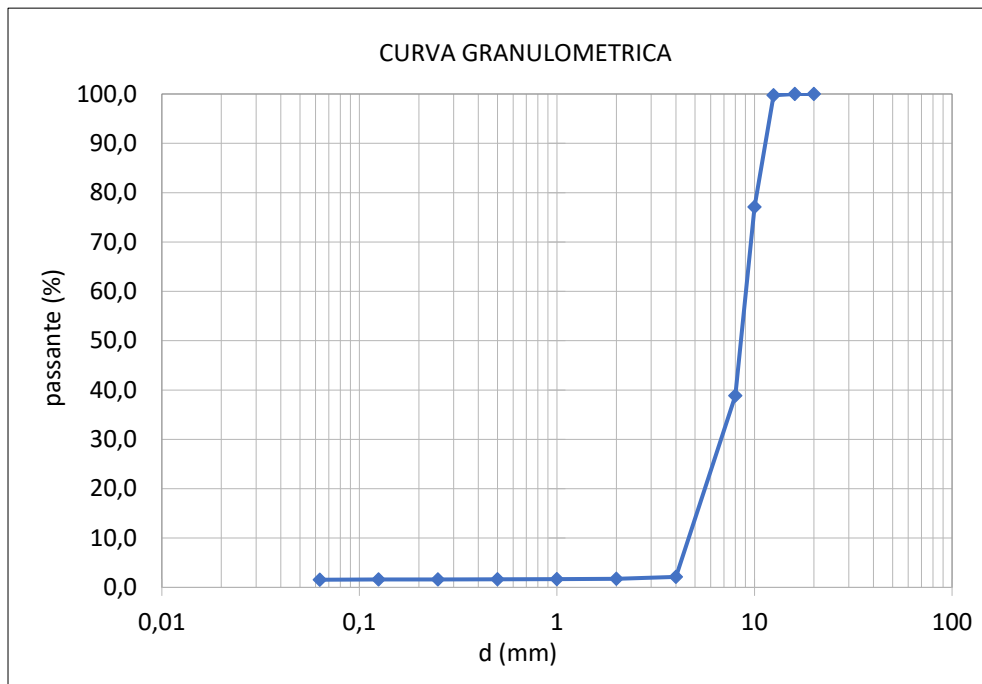


Grafico 2.1: Curva granulometrica calcare 6/12

In merito al calcare 12/16 invece:



Figura 2.5: Calcare 12/16

## CURVA GRANULOMETRICA

d (mm)	g	%P
31	0	100
16	563,2	43,1
12,5	519,2	8,5
10	128	0,0
8	0	0,0
4	0	0,0
2	0	0,0
0,5	0	0,0
0,25	0	0,0
0,125	0	0,0
0,063	0	0,0
fondo	0,00	0

Tabella 2.3: Curva granulometrica calcare 12/16

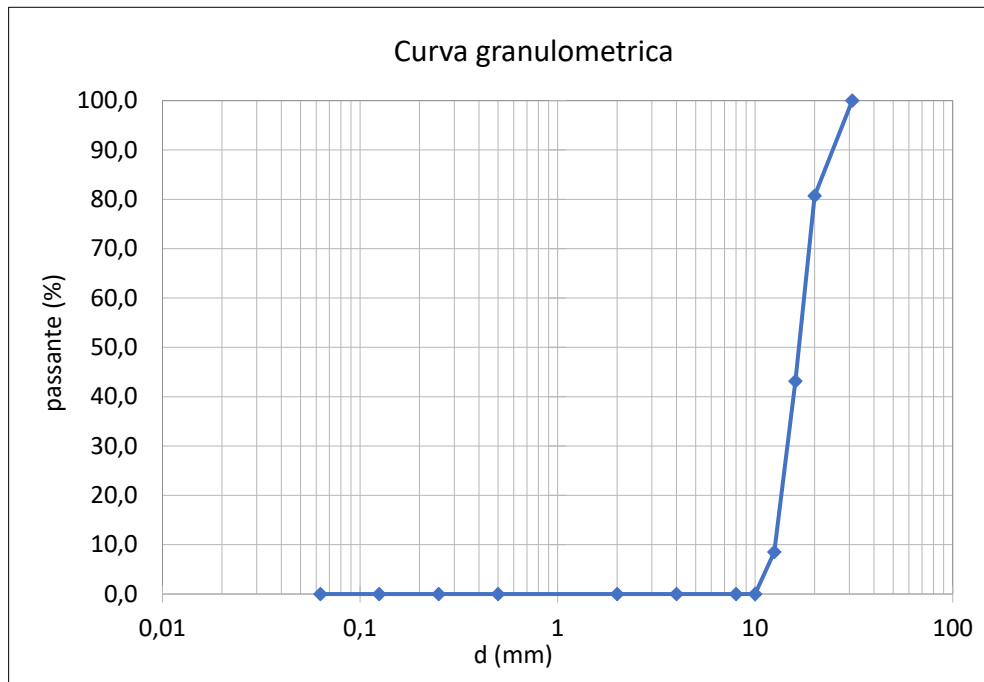


Grafico 2.2: Curva granulometrica calcare 12/16

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è di natura calcarea con pezzatura 0/6 e in seguito vengono riportate le sue caratteristiche:

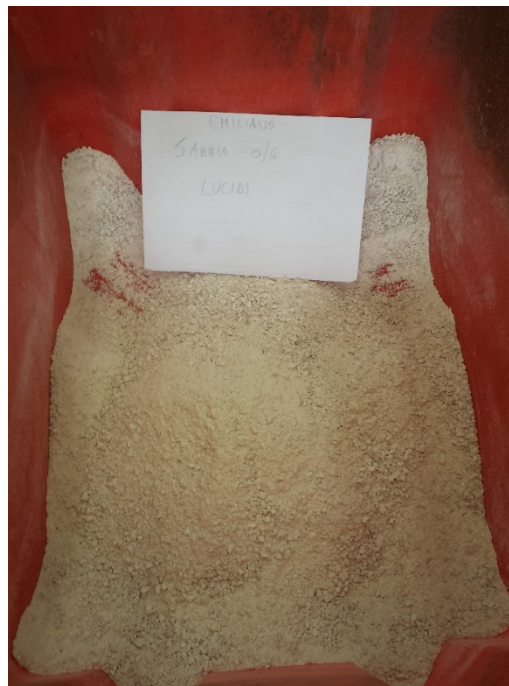


Figura 2.6: Sabbia 0/6

### CURVA GRANULOMETRICA

d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
4	74,7	92,5
2	321,1	60,4
0,5	378,8	22,5
0,25	65,5	16,0
0,125	41,7	11,8
0,063	25,9	9,2
fondo	92,3	0,0

Tabella 2.4: Curva granulometrica sabbia 0/6



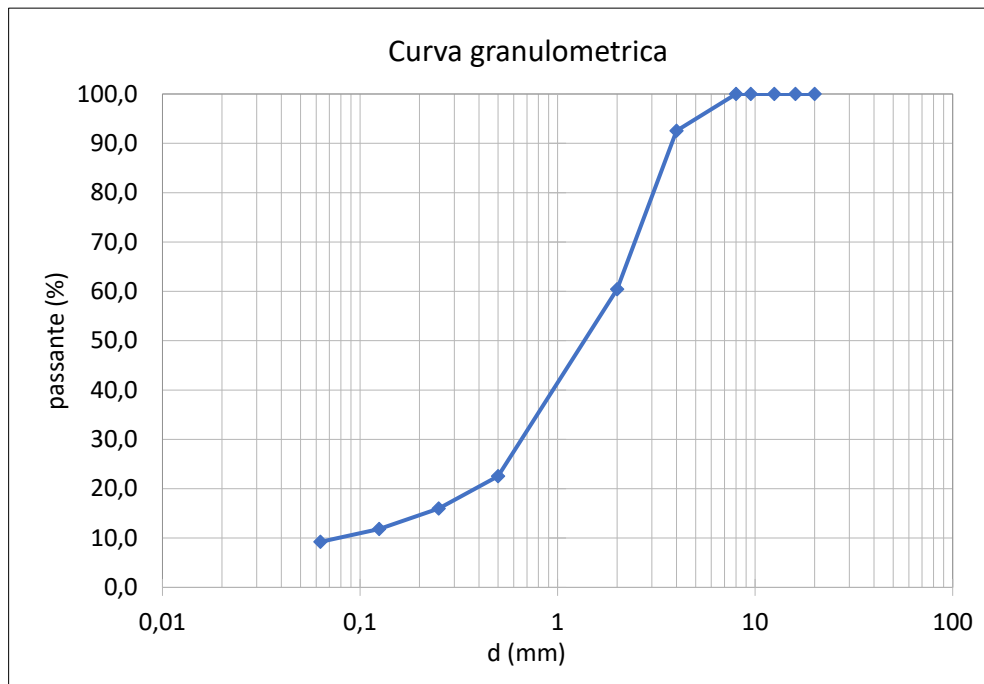


Grafico 2.3: Curva granulometrica sabbia 0/6

Il filler risulta essenziale poiché garantisce attraverso la sua presenza la formazione del mastice, cioè il prodotto ottenuto dalla unione di filler e bitume, il quale assicura molteplici proprietà delle miscele come la capacità di evitare fenomeni di trasudamento, di prevenire lo spogliamento e di migliorare la stabilità delle miscele. Le sue caratteristiche sono poi riportate:



Figura 2.7: Filler

## CURVA GRANULOMETRICA

d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
6,3	0	100
4	0	100
2	2	99
1	6	96
0,5	9,2	91,4
0,25	10,6	86,1
0,063	33,2	69,5
fondo	139	0

Tabella 2.5: Curva granulometrica filler

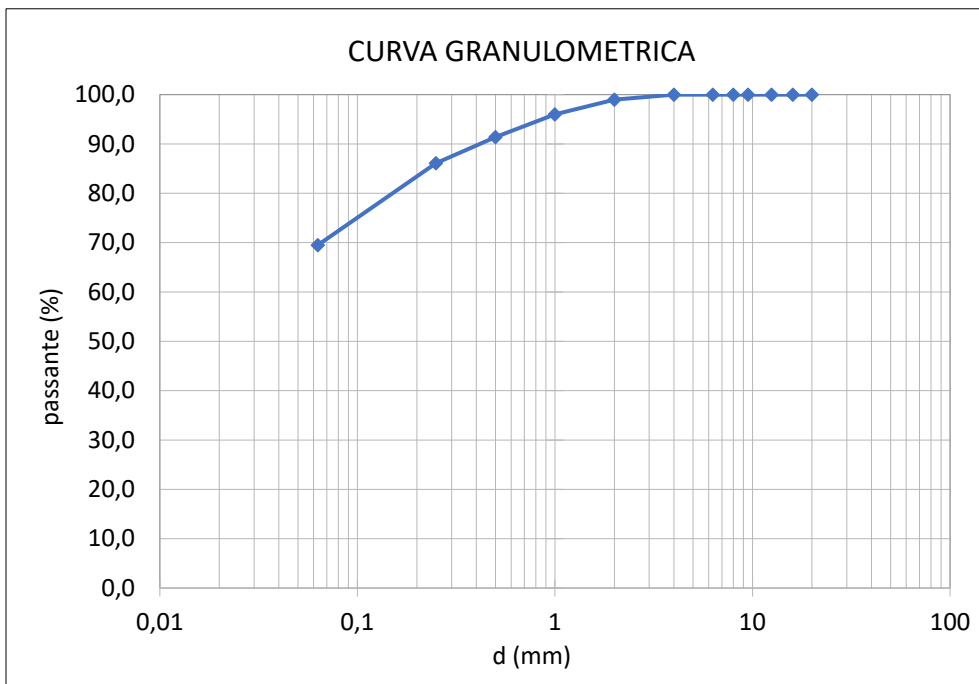


Grafico 2.4: Curva granulometrica filler

### 3.2.2 Fresato Stradale

È un materiale proveniente dalla fresatura degli strati legati di pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato. Il fresato è stato sottoposto ad una prova di estrazione del bitume invecchiato e successivamente la distribuzione granulometrica dell'aggregato contenuto nel fresato è stata determinata con gli stessi setacci usati con gli aggregati vergini, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1. Si sono ottenute così due pezzature: RAP grosso e RAP fino.

Nella fase di dosaggio delle componenti per la miscelazione, si sono eliminati con un setaccio gli elementi di dimensioni superiori ai 31,5 mm.

Nella presente sperimentazione sono stati utilizzati RAP grosso e RAP fino provenienti dalla fresatura di più strade. Si riportano di seguito le caratteristiche granulometriche di entrambi.

Nella sperimentazione è stato utilizzato RAP in due differenti pezzature: fino e grosso

Per quanto riguarda la pezzatura grossa:



Figura 2.8: Fresato pezzatura grossa

## CURVA GRANULOMETRICA ESTRATTO

d (mm)	g	%P
31	0	100,0
20	0	100,0
16	0	100,0
12,5	14,3	98,5
10	124	85,4
8	97,5	75,2
4	251,5	48,6
2	156,2	32,2
1	96,1	22,1
0,5	66,5	15,0
0,25	42,6	10,6
0,063	60,1	4,2
fondo	40,10	0

Tabella 2.6: Curva granulometrica fresato pezzatura grossa

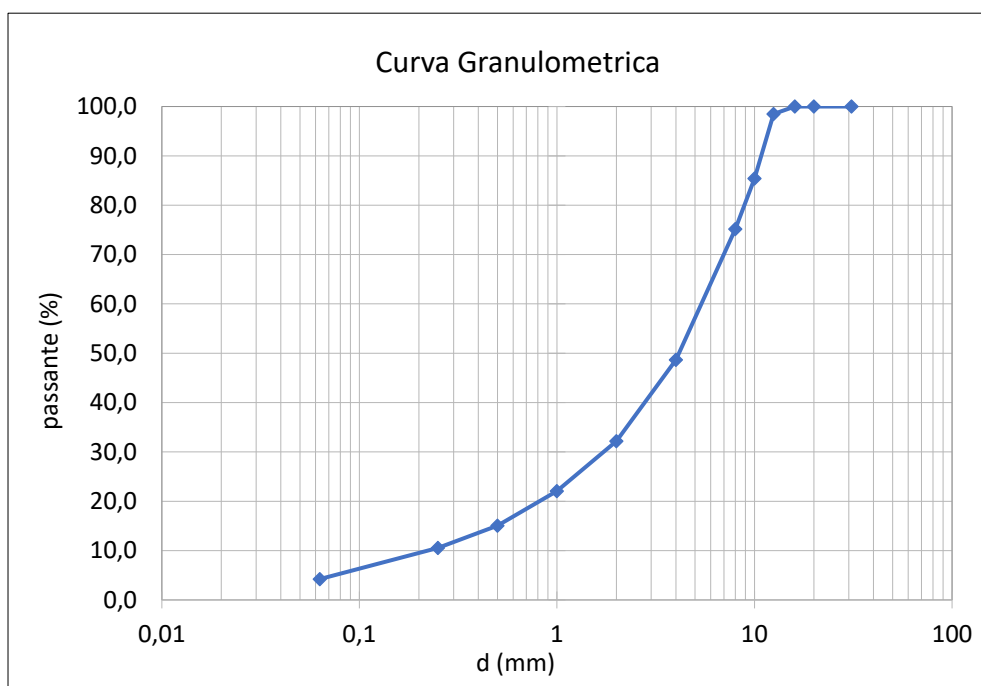


Grafico 2.5: Curva granulometrica fresato pezzatura grossa

Invece per quanto riguarda la pezzatura fine:

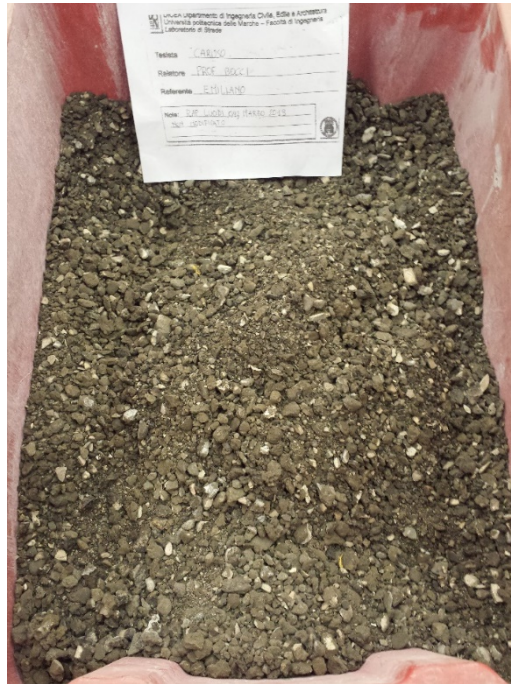


Figura 2.9: Fresato pezzatura fine

### CURVA GRANULOMETRICA

d (mm)	g	%P
31	0	100
20	0	100,0
16	0	100,0
12,5	0	100,0
10	13,3	98,6
8	32,9	95,1
4	270,7	66,7
2	220,1	43,6
1	133,4	29,6
0,5	84,5	20,7
0,25	59,1	14,5
0,063	73,9	6,7
fondo	64,00	0

Tabella 2.7: Curva granulometrica fresato pezzatura fine

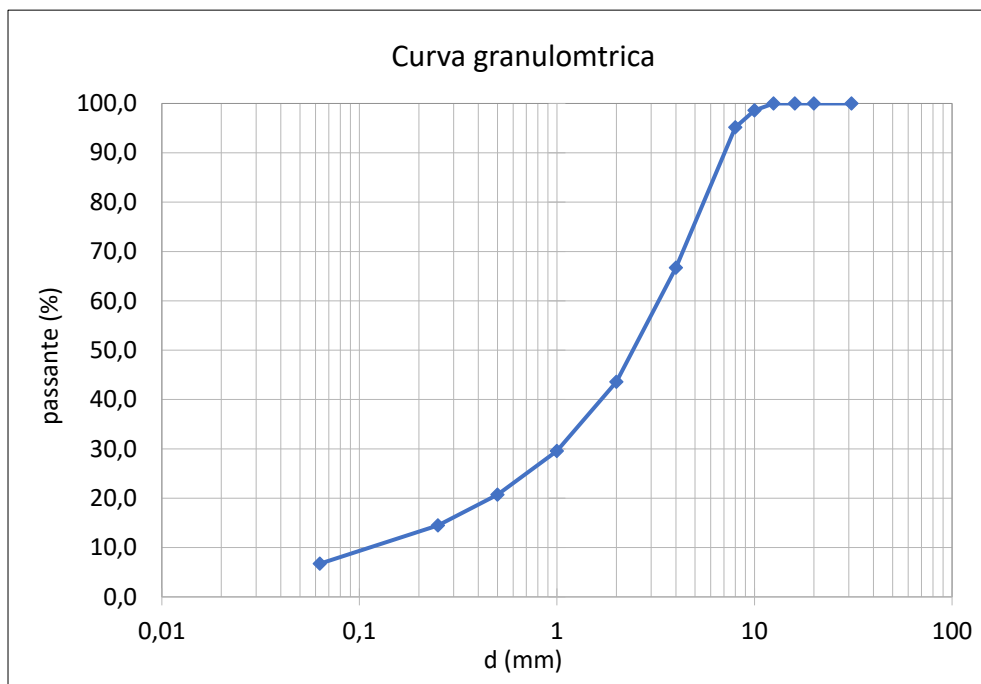


Grafico 2.6: Curva granulometrica fresato pezzatura fine

### 3.2.3 Bitumi vergini

I bitumi utilizzati sono entrambi di classe di penetrazione 50/70, riferita alla profondità di penetrazione di un ago standard dopo 5 secondi, sotto un carico fisso di 100 g in un campione a 25°C. I bitumi vergini utilizzati nella sperimentazione sono di due tipi ottenuti mediante metodologie di produzione diverse. Una delle due tipologie è prodotta mediante il processo “Visbreaking” nella raffineria “Api” di Falconara e in seguito è riportata la scheda tecnica:

Prodotto: BITUME 50/70 STRADALE		Sigla: BS-50/70		n° C.A.S. : 8052-42-4 e 92062-05-0	
CARATTERISTICHE	Metodo di analisi	Unità di misura	Limiti		
			min.	max.	
Penetrazione a 25°C	EN 1426	dmm	50	70	
Punto di rammollimento	EN 1427	°C	46	54	
Solubilità	EN 12592	% peso	99	-	
Infiammabilità CLEVELAND	EN ISO 2592	°C	230	-	
Densità relativa a 25/25 °C	EN ISO 3838	Kg/m <sup>3</sup>	1000	1100	
Indice di Penetrazione	EN 12591-Annex A		-1,5	0,7	
Resistenza all'invecchiamento RTFOT:	EN 12607-1				
• Variazione in massa (Valore assoluto)		% peso		0,5	
• Penetrazione residua a 25°	EN 1426	%	50		
• Incremento del punto di rammollimento	EN 1427	°C		11	

Figura 2.10: Scheda tecnica bitume “visbreaking”

Mentre l'altra tipologia di bitume è ottenuta mediante distillazione frazionata a doppia colonna ed origina il cosiddetto "bitume primario", nel dettaglio prodotto nella raffineria "Eni" di Livorno. In seguito, è riportata la scheda tecnica:

PROPRIETA'				
Proprietà	Unità	Valori		Metodo
		Min	Max	
Penetrazione a 25°C	1/10 mm	50	70	EN 1426
Punto di rammollimento, Palla & Anello	°C	46	54	EN 1427
Indice di penetrazione	-	-1,5	0,7	EN 12591 (ANNEX A)
Punto di rottura Fraass	°C		-8	EN 12593
Densità relativa 25/25°C	-	1,00	1,10	EN ISO 3838
Punto di infiammabilità COC	°C	250		EN ISO 2592
Viscosità dinamica a 60°C	Pa s	145		EN 12596
Duttilità	%	80		ASTM D 113
Solubilità in solventi organici	% (m/m)	99,0		EN 12592
Resistenza all'invecchiamento RTFOT:	-			EN 12607-1
- variazione in massa (valore assoluto)	%		0,5	
- penetrazione residua a 25°C	%	50		EN 1426
- incremento del punto di rammollimento (Severità 1)	°C		9	EN 1427

Figura 2.11: Scheda tecnica bitume "primario"

#### APPLICAZIONI

- Il **Bitume Stradale 50/70** di Eni, presenta elevate caratteristiche di resistenza all'invecchiamento, di elastoplasticità e di comportamento alle basse temperature che ne permettono l'utilizzo nella realizzazione di conglomerati costituenti le sovrastrutture flessibili per strade, autostrade, marciapiedi e piste aeroportuali.

#### ULTERIORI INFORMAZIONI

- Temperature indicative di:  
Stoccaggio 160-170°C;  
Miscelazione 160-180°C;  
Compattazione 150-170°C;
- Per lo stoccaggio e la manipolazione del prodotto si raccomanda di non superare la temperatura di 200°C.

Figura 2.12: Scheda tecnica bitume "primario" (2)

### 3.2.4 Additivo rigenerante

In questa sperimentazione come additivo rigenerante è stato utilizzato l'“ACF1000”. Gli additivi denominati “ACF” (ADDITIVI CHIMICI FUNZIONALI) permettono di riutilizzare il fresato, mantenendo il controllo delle prestazioni dei conglomerati. Con l'impiego di questi additivi, la tecnica del riciclaggio a caldo del fresato, eseguita in impianto fisso, permette di ottenere conglomerati bituminosi che hanno caratteristiche fisicomeccaniche simili a quelle dei conglomerati bituminosi prodotti utilizzando inerti e bitume vergini. Gli ACF sono composti chimici da utilizzare sempre nelle lavorazioni in cui si reimpiega il materiale fresato. L'impiego degli additivi ACF non richiede l'uso particolari procedure ma soprattutto non bisogna modificare l'impianto di asfalto. Basta aggiungerlo al legante bituminoso ed è possibile, immediatamente dopo, riutilizzare il materiale fresato: rigenera il vecchio bitume, migliora la lavorabilità, migliora l'adesione inerte/bitume in maniera ottimale e soprattutto permette di stendere e compattare a temperature più basse di quelle utilizzate tradizionalmente. Gli additivi ACF possono essere usati con qualsiasi tipo di impianto di asfalto e sono compatibili con tutti i tipi di bitumi: sia normali che modificati.

Vantaggi di utilizzare gli additivi ACF:

- *Rigenerano il fresato*: permettono il recupero del bitume ossidato ridandogli flessibilità. Ciò comporta la possibilità di usare fino al 50% di fresato, rendendo il conglomerato finale simile a quello prodotto usando solo inerti vergini.
- *Sono ottimi attivanti di adesione*: la particolare composizione chimica di questi additivi comporta una riduzione della tensione superficiale del bitume, portando ad una migliore interazione legante – inerte.
- *Migliorano la lavorabilità dei conglomerati*: l'azione rigenerante dell'additivo permette una minor viscosità del conglomerato, migliorando di conseguenza la lavorabilità.
- *Prolungano i tempi di trasporto, stesa e compattazione*: la presenza dell'attivante di adesione permette di migliorare la stesa e la compattazione del conglomerato, specialmente in condizioni climatiche avverse.

Inoltre:

- Migliorano la compattazione alle basse temperature.
- Aumentano la vita utile della pavimentazione stradale.
- Riducono le emissioni di gas serra.
- Riducono i costi di produzione dei conglomerati.
- Mantengono invariati i tempi di mescolazione e produzione



Gli ACF sono additivi rigeneranti polifunzionali con potere antiossidante, plastificante, bagnante, diluente e disperdente nei confronti del bitume invecchiato. Il quantitativo di ACF è dosato in funzione sia della percentuale di fresato utilizzata sia delle prestazioni da garantire per la miscela bituminosa.

<b>Densita'</b> <b>T=20°C [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>viscosita' cinematica</b> <b>T=20°C (mm<sup>2</sup>/s)</b>
0,80	45

*Figura 2.13: Caratteristiche ACF*

### **3.3 Analisi di laboratorio**

#### **3.3.1 Curva granulometrica di progetto**

Per determinare la ricetta granulometrica di progetto si seguono le specifiche trascritte nel Capitolato Anas. Queste indicazioni impongono che la curva granulometrica debba essere contenuta all'interno di un fuso granulometrico individuato da una curva superiore e una inferiore e ciò si ottiene variando le percentuali delle varie pezzature di aggregati. Il fuso permette di ottenere una curva che consenta l'addensamento ottimale del conglomerato bituminoso, variando manualmente le percentuali delle singole frazioni granulometriche, senza contare il filler. L'impiego di un'unica tipologia di aggregato permette di dover considerare una singola densità, così da poter raccogliere il tutto in una sola curva granulometrica. Per quanto riguarda la percentuale di bitume vergine da aggiungere all'impasto si è scelto un valore del 5,5% in peso sull'aggregato, pari al limite superiore imposto dal capitolato e corrispondente alla curva granulometrica costruita sul passante massimo.

Per lo strato di binder il Capitolato Anas prescrive il seguente fuso:

Capitolato ANAS Binder		
Apertura [mm]	Pmin	Pmax
20	100	100
16	90	100
12,5	66	86
8	52	72
4	34	54
2	25	40
0,5	10	22
0,25	6	16
0,063	4	8
% bit (sul mix)	4,1	5,5

*Tabella 3.1: Fuso capitolato ANAS*

Il fuso in questione è costituito da due curve granulometriche ideali che individuano, per ogni setaccio, il passante minimo ed il passante massimo.

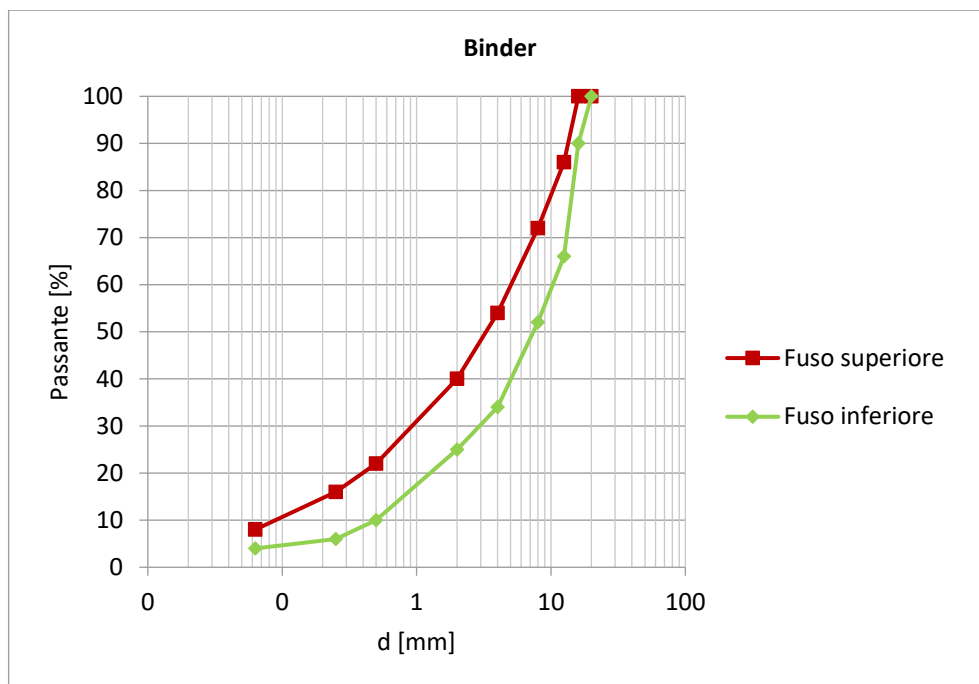


Grafico 3.1: Fuso capitolato ANAS

Conoscendo le curve granulometriche dei singoli inerti utilizzati e considerato i limiti del fuso granulometrico, si è potuta determinare la curva di progetto mediante il calcolo su un foglio Excel e ricavare le percentuali in peso di aggregato da inserire. Da qui si sono calcolate le quantità in grammi. Di seguito vengono riportate le miscele realizzate con diversi contenuti di RAP:

- Mix 00 RAP

La miscela è stata realizzata con lo 0% di RAP e di seguito si riporta la tabella delle percentuali in peso e la curva granulometrica di progetto.

Apertura setaccio [mm]	Filler	Sabbia	Calcare 4/8	Calcare 6/12
31,5	100	100	100,0	100,0
20	100	100	100,0	100,0
16	100	100	100,0	100,0
12,5	100	100	100,0	99,7
10	100	100	100,0	77,1
8	100	100	99,4	38,8
6,3	100	100	87,8	5,7
4	100	92,5	22,4	2,1
2	99	60,4	3,2	1,7
0,5	91,4	22,5	1,6	1,6
0,25	86,1	16,0	1,6	1,6
0,063	69,5	9,2	0,6	1,6

Tabella 3.2: Curva granulometrica Mix 00RAP (parte 1)

Massa volumica	2,68	2,68	2,68	2,68
% volume	3,0	46,9	0,0	25,1
% peso	3,0	46,9	0,0	25,1

Tabella 3.3: Percentuali in peso Mix OORAP (parte 1)

Apertura setaccio [mm]	Calcicare 12/16	Calcicare 16/20	ORAP
31,5	100,0	100,0	100,0
20	100,0	80,7	100,0
16	100,0	0,0	100,0
12,5	8,5	0,0	77,0
10	0,0	0,0	69,2
8	0,0	0,0	59,6
6,3	0	0	51,3
4	0,0	0,0	46,9
2	0,0	0,0	31,7
0,5	0,0	0,0	13,7
0,25	0,0	0,0	10,5
0,063	0,0	0,0	6,8

Tabella 3.4: Curva granulometrica Mix OORAP (parte 2)

Massa volumica	2,68	2,68	2,68
% volume	25,0	0,0	100,0
% peso	25,0	0,0	100,0

Tabella 3.5: Percentuali in peso Mix OORAP (parte 2)

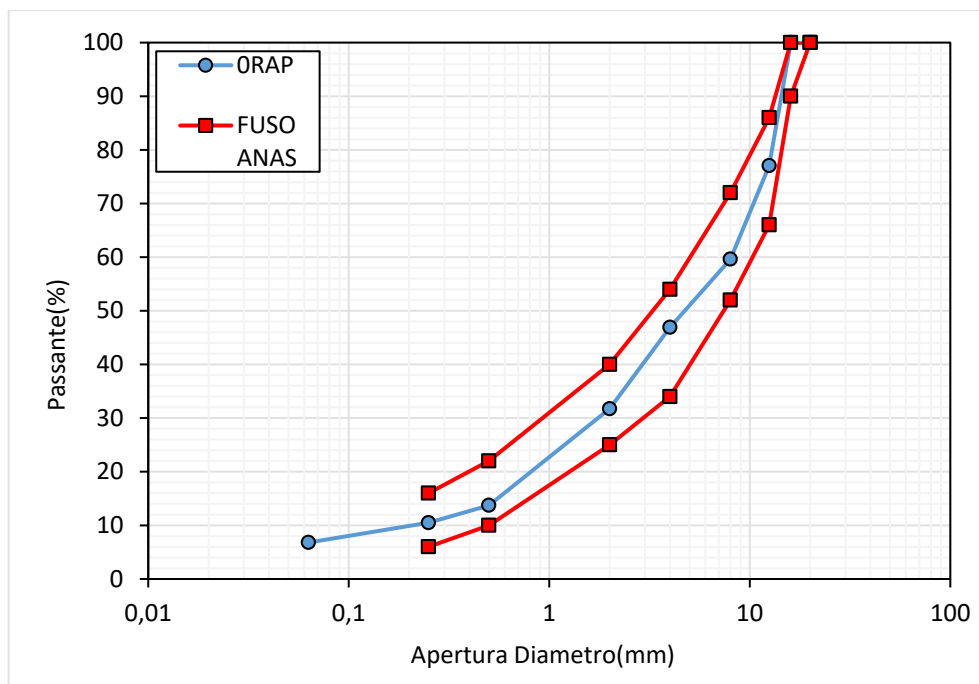


Grafico 3.2: Confronto tra curva granulometrica Mix 00RAP e fuso ANAS

- Mix 50 RAP

La miscela è stata realizzata con il 50% di RAP e di seguito si riporta la tabella delle percentuali in peso e la curva granulometrica di progetto.

Apertura setaccio [mm]	Filler	Sabbia	Calcere 4/8	Calcere 6/12	Calcere 12/16
31,5	100	100	100,0	100,0	100,0
20	100	100	100,0	100,0	100,0
16	100	100	100,0	100,0	100,0
12,5	100	100	100,0	99,7	8,5
10	100	100	100,0	77,1	0,0
8	100	100	99,4	38,8	0,0
4	100	92,53	22,4	2,1	0,0
2	99	60,42	3,2	1,7	0,0
0,5	91,4	22,54	1,6	1,6	0,0
0,25	86,1	15,99	1,6	1,6	0,0
0,063	69,5	9,23	0,6	1,6	0,0

Tabella 3.6: Curva granulometrica Mix 50RAP (parte 1)

Massa volumica	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
% volume	3,4	12,5	0,0	9,1	23,1
% peso	3,5	13,0	0,0	9,5	24,0

Tabella 3.7: Percentuali in peso Mix 50RAP (parte 1)

Apertura setaccio [mm]	Calcere 16/20	RAP Grosso	RAP Fino	50RAP
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
20	80,7	100,0	100,0	100,0
16	0,0	100,0	100,0	100,0
12,5	0,0	98,5	100,0	77,7
10	0,0	85,4	98,6	70,5
8	0,0	75,2	95,1	63,8
4	0,0	48,6	66,7	45,5
2	0,0	32,2	43,6	31,0
0,5	0,0	15,0	20,7	15,5
0,25	0,0	10,6	14,5	11,7
0,063	0,0	4,2	6,7	6,6

Tabella 3.8: Curva granulometrica Mix 50RAP (parte 2)

Massa volumica	2,68	2,47	2,49	2,58
% volume	0,0	19,2	28,8	96,1
% peso	0,0	20,0	30,0	100,0

Tabella 3.9: Percentuali in peso Mix 50RAP (parte 2)

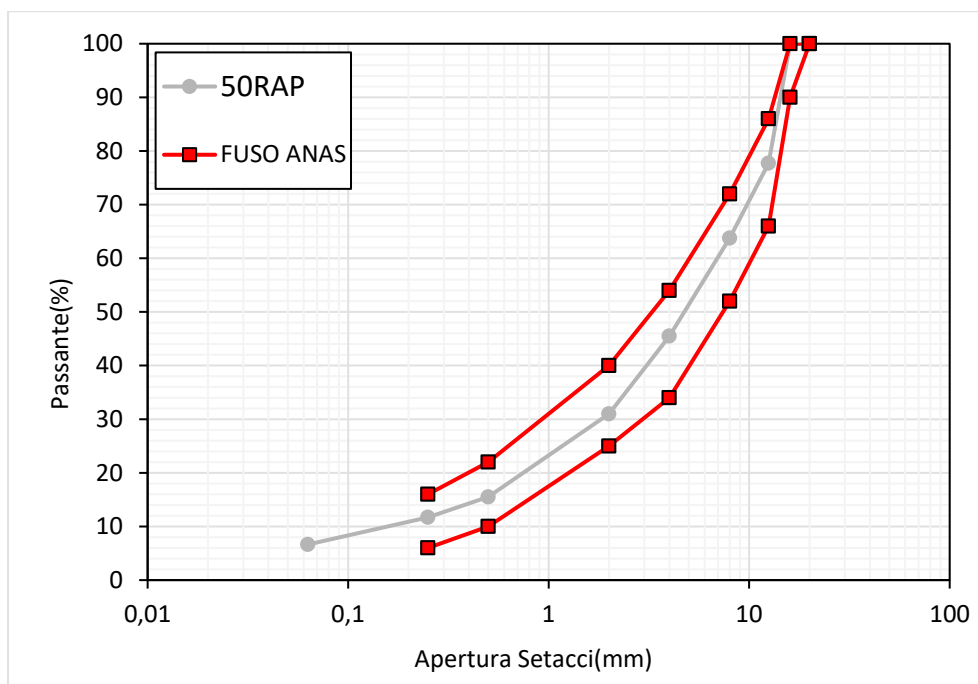
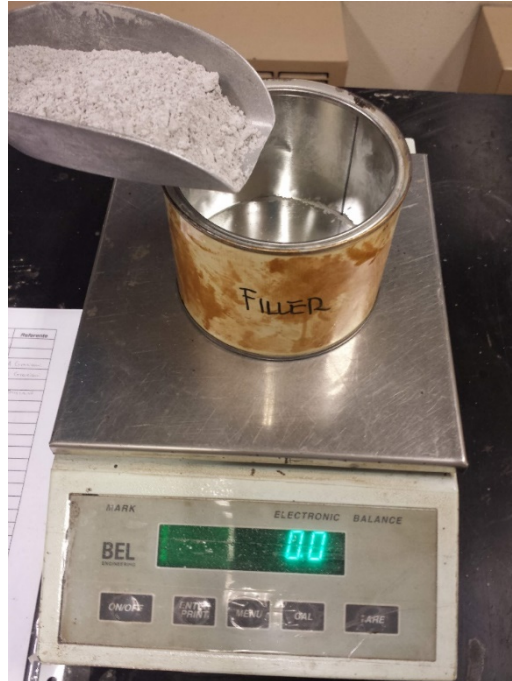


Grafico 3.3: Confronto tra curva granulometrica Mix 50RAP e fuso ANAS

### 3.3.2 Miscelazione e compattazione dei provini

Nella prima fase si procede a disporre il materiale, precedentemente dosato seguendo la ricetta mediante una bilancia di precisione:



*Figura 3.1: Dosaggio del filler*

In apposite teglie viene riposto il materiale pesato suddividendolo in aggregati vergini, filler e fresato, le quali verranno poi inserite in forno:



*Figura 3.2: Teglie suddivise con materiale diverso da inserire in forno*

Si procede poi a riscaldare il materiale per un lasso di tempo di 3 ore, in modo da eliminare l'umidità e raggiungere la temperatura di miscelazione. Le temperature previste dalla sperimentazione sono di 140° e di 170° (ogni impasto viene sottoposto ad entrambe le temperature). Verranno sperimentate entrambe le temperature per confrontare i diversi effetti indotti dal gradiente di temperatura sulle stesse tipologie di impasti.



Figura 3.3: Forno utilizzato per riscaldare il materiale

Insieme agli inerti vengono poste in forno le fustelle, utilizzate poi nella giratoria, allo scopo di fargli raggiungere la temperatura degli inerti ed evitare indesiderate escursioni termiche le quali possono danneggiare la qualità del provino finito. Le fustelle vengono solitamente poste in forno dal principio del ciclo di cottura previsto, anche se non sono previste indicazioni specifiche sulla durata del riscaldamento previsto per esse. In linea generica si cerca di predisporle il prima possibile in maniera che esse raggiungano senza alcun dubbio la temperatura prevista per i materiali, senza alcun rischio che essi possano superare la temperatura desiderata. Oltre alla fustella vengono riposte anche le piastre, inferiore e superiore previste per confinare il materiale all'interno della fustella durante la compattazione, poiché anche esse risultano a contatto con il materiale e quindi capaci di indurre un eventuale shock termico.





*Figura 3.4 Fustella, piastra superiore e piastra inferiore poste preventivamente nel forno*

Il bitume prescelto viene inserito nel forno dopo circa 2 ore dall'inizio della cottura, in modo che si riscaldi per circa 60 minuti e si renda così liquido.



*Figura 3.5: Disposizione del materiale e delle fustelle all'interno del forno*

Negli impasti in cui viene aggiunto l'additivo, in aggiunta alla procedura standard si prevede un'ulteriore fase in cui l'additivo viene miscelato al bitume, dopo circa 50 minuti dall'inizio del processo di riscaldamento in forno.



*Figura 3.7: Dosatore utilizzato per introdurre l'additivo*

Il barattolo contenente il bitume viene estratto dal forno e messo al di sopra di una piastra riscaldante, in maniera da non causare variazioni eccessive di temperatura, e si aggiunge l'additivo, il quale viene quantificato in base a delle percentuali riferite alla volumetria del bitume e predosato mediante una bilancia di precisione, con sensibilità elevata. Di seguito, per migliorare l'omogeneità della soluzione, essa si sottopone ad un ciclo di 5 minuti di miscelazione attraverso un mixer, durante il quale la velocità viene fatta variare in maniera crescente durante l'arco dell'operazione. Finita questa procedura il barattolo viene poi rimesso in forno per circa 20 minuti prima di passare alla fase successiva, comune ad ogni tipologia di impasto.



*Figura 3.8: Mixer utilizzato per miscelare la soluzione con l'ausilio della piastra riscaldante*

Al termine delle 3 ore (o 3 ore e 5 minuti nel caso di impasto con additivo) si procede alla successiva fase di miscelazione degli inerti con il bitume e quindi alla produzione vera e propria dell'impasto. Il tutto viene effettuato all'interno di un mixer industriale dotato di cesta preriscaldata a liquido e di pala centrale che ruota su sé stessa, mentre quella perimetrale percorre la circonferenza del recipiente.



*Figura 3.9: Mixer con vasca di miscelazione pre-riscaldabile*

Il processo si suddivide nelle seguenti operazioni:

1. Vengono riversati all'interno della cesta gli inerti (aggregati vergini e se previsto fresato) e poi fatti miscelare per circa 30s.



*Figura 3.10: Inserimento del materiale all'interno del mixer*

2. Dopo la precedente miscelazione viene versato il bitume in quantità esatte, procedendo in più step, ognuno seguito da una pesata mediante bilancia scientifica, in modo da dosare precisamente la quantità necessaria. Al termine dell'aggiunta si procede ad un'ulteriore fase di miscelazione di 2' e 30".
3. Come ultima fase si aggiunge il filler predosato e si miscela per l'ultima volta per circa 3 minuti.

Una volta ottenuto l'impasto viene riversato in una teglia e successivamente sporzionato in 4 parti, ognuna da 1100g, in delle teglie che vengono poi di nuovo poste in forno per un'ultima fase di riscaldamento di circa 30 minuti.



Figura 3.11: Materiale miscelato riversato in una teglia

Al termine dell'ultima fase di riscaldamento si procede al confezionamento dei provini mediante la pressa a taglio giratoria. Il macchinario, introdotto negli anni 50', è composto da un telaio, dove viene inserita la fustella, un pistone di carico, che provvede all'applicazione del carico verticale e una base rotante. Inoltre, è equipaggiata con un sistema di sensori attraverso i quali è possibile l'acquisizione e il controllo dei dati, poi rielaborati e visualizzati attraverso un display.

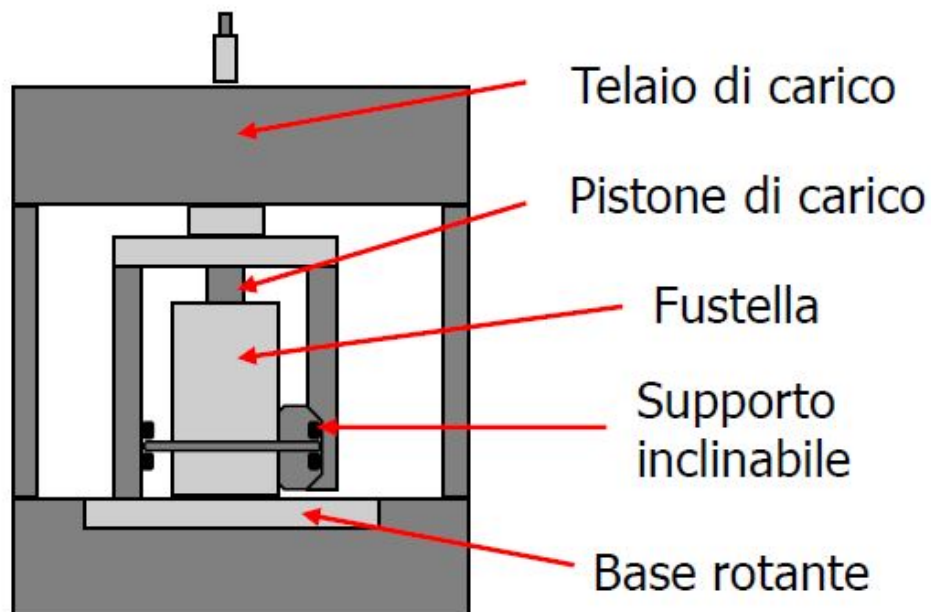


Figura 3.12: Schema pressa giratoria

Durante la compattazione viene applicata una pressione verticale costante e la fustella ruota attorno al proprio asse inclinato di  $1.25^\circ$  rispetto alla verticale (secondo i capitolati italiani). Questo tipo di compattazione permette di ottenere la ridistribuzione interna dei granuli attraverso l'applicazione di un'azione combinata di sollecitazioni normali e tangenziali che hanno direzione variabile a causa della rotazione eccentrica della fustella, così da simulare più fedelmente le azioni dei rulli utilizzati nel caso reale. L'angolo giratorio è un parametro fondamentale poiché pur essendo un valore molto piccolo ( $1.25^\circ$ ) genera sollecitazioni tangenziali che influiscono sull'addensamento del provino.

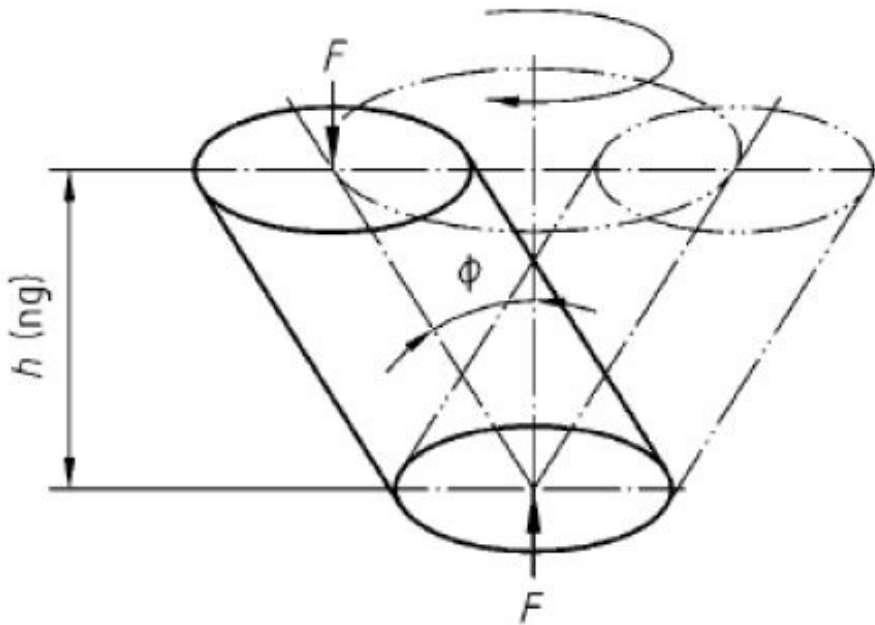


Figura 3.13: Simulazione dell'oscillazione del provino sottoposto alla compattazione

La prova è caratterizzata da diversi parametri attraverso i quali è possibile impostarne la metodologia; nel dettaglio: compattazione a numero di giri imposto o ad altezza imposta, la pressione e il diametro della fustella. Durante la prova è possibile visualizzare l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro, attraverso il display, e allo stesso modo è possibile ottenere anche l'altezza finale al termine della compattazione.



*Figura 3.14: Pressa giratoria*

In questa fase quindi si estrae la fustella riscaldata dal forno e la si riempie, nel minor tempo possibile, con una delle quattro porzioni d'impasto presente in una delle teglie mediante un imbuto.



*Figura 3.15: Materiale versato all'interno della fustella mediante imbuto*

La fase di preparazione di ogni singola fustella prevede che si inserisca in essa una piastra di base ed un dischetto di carta/filtro per evitare l'adesione del provino alla piastra stessa. Successivamente si versa il materiale, si cerca di appiattirne la superficie superiore, si inserisce un altro dischetto di carta in cui si contrassegna il numero e le caratteristiche del provino e poi si pone una piastra al di sopra della fustella. Una volta che la fustella è pronta, viene velocemente trasportata all'interno del telaio di carico, si gira la fustella fino a farla aderire ad una tacca metallica e si avvia la prova tramite il pannello di controllo, premendo il tasto "START". In questa ricerca è stato impostato il metodo di compattazione a numero di giri imposti e settati i seguenti parametri:

- Pressione: 600 KPa (prevista da norma);
- Diametro della piastra: 100 mm;
- Numero di giri: 100.

Una volta iniziata la prova, per primo il pistone inizia a scendere fino ad imprimere la pressione preimpostata; una volta sceso il pistone, i sostegni laterali si alzano facendo inclinare la fustella, per poi iniziare a ruotare. Raggiunto il numero di giri preimpostato, il macchinario va in modalità "self-parking": il pistone risale dando perciò la possibilità di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.

Si conclude la preparazione con l'estrazione del provino mediante un martinetto idraulico, che lo solleva dal basso verso l'alto, provocandone la fuoriuscita.



*Figura 3.16: Operazione di rimozione del provino mediante martinetto idraulico*



Si ripete l'operazione per altre 3 volte in modo da ottenere 4 provini per ogni differente impasto.



Figura 3.17: Provini ultimati

### 3.3.3 Contenuto dei vuoti

La maggior parte delle caratteristiche prestazionali dei conglomerati bituminosi sono direttamente dipendenti dalla loro distribuzione interna, che può essere rappresentata attraverso i rapporti volumetrici tra le diverse fasi che compongono il provino: fase solida, ovvero aggregati, legante e gassosa, ovvero aria.

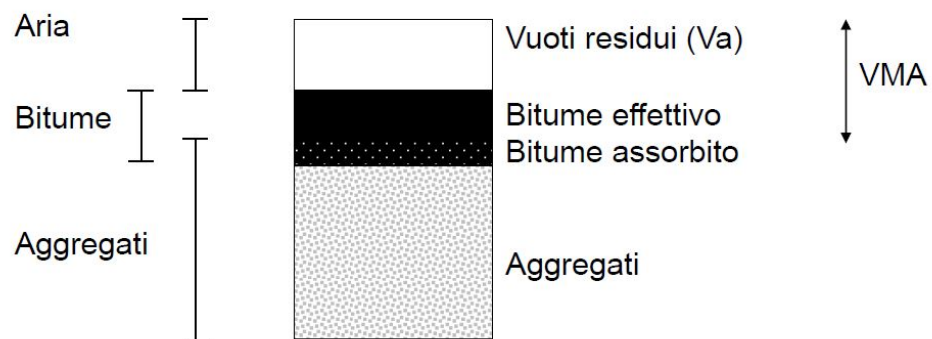


Figura 3.18: schema di distribuzione delle diverse fasi all'interno del conglomerato

Elenchiamo quindi nel paragrafo sottostante le definizioni dei protocolli di prova, impiegati in questa sperimentazione, per il calcolo delle proprietà volumetriche delle tre miscele prodotte. I risultati di tali elaborazioni verranno poi riportate nel capitolo 3 dove verranno analizzati i risultati delle varie prove effettuate.

- ***Massa volumica massima (UNI EN 12697-5)***

Per massa volumica massima di un conglomerato bituminoso si intende la massa per unità di volume senza vuoti d'aria ad una temperatura nota. In riferimento alla norma UNI EN 12697-5, la massa volumica massima  $\rho_m$  è stata valutata mediante il procedimento C (procedimento matematico):

$$\rho_m = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)}$$

dove:

- $\rho_m$  = massa volumica massima [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]
- $p_a$  = percentuale di aggregati nella miscela [m/m]
- $\rho_a$  = massa volumica apparente degli aggregati [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]
- $p_b$  = percentuale di legante nella miscela [m/m]
- $\rho_b$  = massa volumica del legante a 25°C [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]

- ***Massa volumica apparente metodo geometrico (UNI EN 12697-6)***

Per massa volumica apparente si intende la massa per unità di volume inclusi i vuoti d'aria di un provino a temperatura nota. Per valutare la massa volumica apparente geometrica è stata applicata la procedura D della normativa UNI EN 12697-6: tale procedura prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco. La massa volumica geometrica dei provini cilindrici si calcola:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^3$$

dove:

- $\rho_{b, geom}$  = massa volumica apparente del provino [ $Mg/m^3$  oppure  $g/cm^3$ ]
- $m_1$  = massa del provino [g]
- $h$  = altezza media del provino [mm]
- $d$  = diametro del provino [mm]

- ***Massa volumica apparente metodo sigillato (UNI EN 12697-6)***

Questa modalit  di prova prevede l'utilizzo di paraffina e consiste in una serie di pesate e calcoli del volume tramite pesate in aria e in acqua, sfruttando il principio di Archimede. Nella pesata idrostatica si utilizza una bilancia con l'ausilio di un cestello a filo, attraverso la quale si determina la massa e lo spostamento d'acqua mediante taratura, con una precisione di almeno 0,1 g. Secondo la norma il bagno d'acqua deve essere mantenuto ad una temperatura uniforme con una tolleranza di 1° C e deve possedere una capacit  di almeno tre volte superiore al volume del campione.



Figura 3.19: Pesata idrostatica

La procedura di determinazione della massa volumica apparente viene elencata direttamente dalla norma:

- o determinare la massa del provino secco tramite pesata in aria;
- o misurare la temperatura del bagno d'acqua



Figura 3.20: Misurazione dell'acqua della pesata idrostatica

- o determinare la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (attraverso l'ausilio della tabella sotto riportata):

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Figura 3.21: Tabella delle caratteristiche dell'acqua in base alla temperatura

- o sigillare il campione in modo che i vuoti interni facciano parte della volumetria. Dopo la sigillatura, il campione deve essere inaccessibile all'acqua quando sommerso. Quando si utilizza la paraffina, si può ottenere la sigillatura con il seguente procedimento:

- Portare paraffina alla sua temperatura di fusione + 10° C e mantenere questa temperatura a 5° C.



*Figura 3.22: Paraffina sciolta con l'ausilio di un fornello*

- Immergere parzialmente il campione nella cera di paraffina per meno di 5 s, agitando il campione



*Figura 3.23: Immersione del provino all'interno della paraffina sciolta per sigillare i fori*

- o Determinare la massa del campione asciutto e sigillato (fuori dall'acqua)
- o immergere il provino nel bagno d'acqua, cercando di fermare le oscillazioni della bilancia delicatamente con una mano e leggere il valore della massa del provino subito dopo che l'acqua risulta in quiete.

La formula utile al calcolo matematico è:

$$\rho_{b,sea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}}$$

dove:

- o  $\rho_{b,sea}$  è la massa volumica sigillata, espressa in megagrammi per metro cubo [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>];
- o  $m_1$  è la massa del campione secco, espressa in grammi [g];
- o  $m_2$  è la massa del campione sigillato a secco, in grammi [g];
- o  $m_3$  è la massa del campione sigillato in acqua, espressa in grammi [g];
- o  $\rho_w$  è la densità dell'acqua alla temperatura di prova [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>];
- o  $\rho_{sm}$  è la densità del materiale di tenuta alla temperatura di prova [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>].

- ***Volume dei vuoti (attraverso massa volumica apparente metodo geometrico) (UNI EN 12697-8)***

La determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele studiate è stata basata sul contenuto dei vuoti residui dei provini compattati in relazione a quanto prescritto nella norma UNI EN 12697-8 e adattata considerando la massa volumica apparente metodo geometrico:

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_m - \rho_{b,geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- o  $\rho_m$  = massa volumica massima [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]
- o  $\rho_{b, geom}$  = massa volumica apparente metodo geometrico [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]

- *Volume dei vuoti (attraverso massa volumica apparente metodo sigillato) (UNI EN 12697-8)*

La determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele studiate è stata basata sul contenuto dei vuoti residui dei provini compattati in relazione a quanto prescritto nella norma UNI EN 12697-8 e adattata considerando la massa volumica apparente metodo sigillato:

$$V_{m,sea} = \frac{\rho_m - \rho_{b,sea}}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- $\rho_m$  = massa volumica massima [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]
- $\rho_{b, sea}$  = massa volumica del legante a 25°C [kg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>]

- *Specifiche dei capitolati d'appalto riferite ai vuoti*

Dai capitolati d'appalto si possono estrapolare i limiti previsti per le percentuali dei vuoti presenti all'interno di un provino, riferiti ad entrambi i metodi; nel dettaglio il range accettabile è compreso tra il 3 e il 6%.

### 3.3.4 Prova di modulo a trazione indiretta

Per la misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT, cioè acronimo di "Nottingham Asphalt Tester". Questo dispositivo applica un carico di compressione lungo una direzione e ne misura la deformazione tramite dei trasduttori, con verso ruotato di  $90^\circ$  rispetto a quello di applicazione del carico. Per determinare il modulo, la prova dovrà essere ripetuta.

Le modalità di sperimentazione, effettuata mediante questa apparecchiatura, vengono stabilite dalla normativa UNI EN 12697-26 che impone una deformazione preimpostata. Per ogni provino è previsto che la prova venga effettuata su almeno due diametri, l'uno girato di  $90^\circ$  rispetto l'altro.

I parametri della prova sono regolati mediante un software, attraverso il quale si possono settare: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso  $2\ \mu\text{m}$ ) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson e la temperatura della prova.

La prova sarà composta essenzialmente da due fasi: la prima in cui un sistema di gestione effettua una taratura attraverso degli impulsi di condizionamento, che servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione; la seconda invece prevede la prova vera e propria.

Il modulo di rigidezza del campione viene determinato attraverso l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, resa lecita dalle specifiche condizioni di prova e assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Inoltre, esso è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

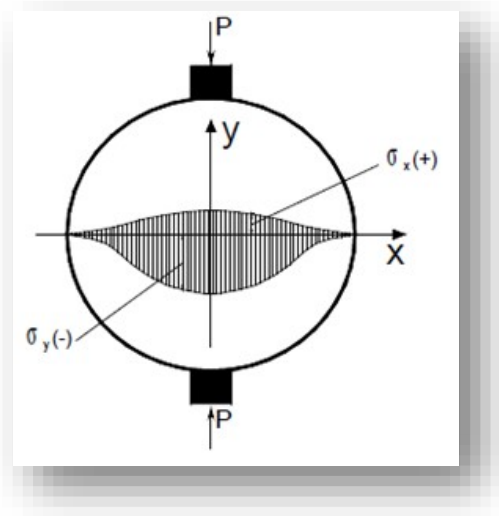


Figura 3.24: Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta



In corrispondenza del diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) e y (compressione) sono calcolate dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_{x,max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad \sigma_{x,media} = \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad \sigma_{y,media} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

dove:

- P = carico applicato;
- D = diametro del campione;
- T = spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastica in funzione delle sollecitazioni teoriche può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale  $\epsilon_x$  dell'elemento è:

$$\epsilon_{x,media} = \frac{\sigma_{x,media}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,media}}{E}$$

dove:

- $\nu$  = il coefficiente di Poisson;
- E = il modulo elastico del materiale.

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni  $\Delta$  si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

$$\Delta = \frac{0,273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale E, definito come ITSM, come indicato nella seguente equazione:

$$ITSM = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + \nu)$$

Inoltre, il software fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore denominato come "AF", acronimo di Adjustment Factor, sulla base della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a  $0,60 \pm 0,10$ , viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$ITSM' = ITSM \cdot [1 - 0,322 \cdot (\log(E) - 1,82) \cdot (0,60 - k)]$$

dove:

- $E'$  = il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- $k$  = il rapporto tra le aree;
- $E$  = il modulo di rigidezza in MPa.

Per garantire la correttezza della prova si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile; in particolare i tempi di picco devono essere compresi in un range con tolleranza di  $\pm 4$  ms ed una deformazione di  $5,0 \pm 0,2$   $\mu\text{m}$ . Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *temperatura*: la formula per il calcolo del modulo E risulta valida se quest'ultimo risulta uniforme sia a compressione che a trazione, e ciò può essere considerato vero solo per temperature sotto i 25°C.
- *rise-time (tempo di picco)*: la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico, a causa della natura viscoelastica del legante. In particolare, il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo.

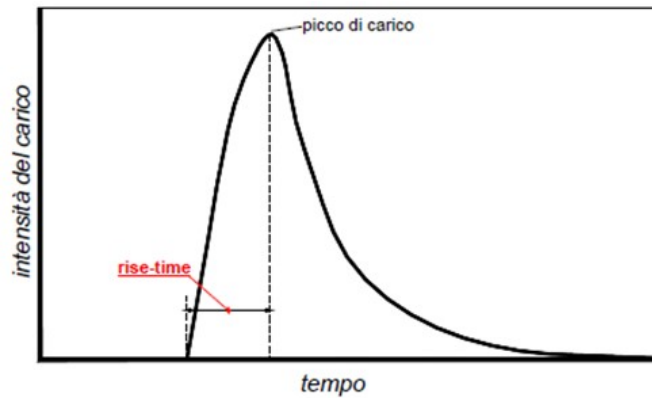


Figura 3.24: grafico intensità del carico-tempo (rise time)

La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot \tau_i}$$

- *deformazione orizzontale imposta*: le proprietà meccaniche del conglomerato, a causa del comportamento non lineare, dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova.
- *numero di colpi di condizionamento iniziale*: per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere un numero di colpi sufficiente per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si registrano tempi di prova più brevi, ma allo stesso tempo diminuisce l'affidabilità delle misurazioni. Secondo il BSI (British Standard Institute) è applicabile un numero di colpi di condizionamento pari a 5, anche se da indagini sperimentali si è visto che questo valore non sia da ritenere sufficiente.

Nella sperimentazione effettuata i parametri sopra elencati sono stati fissati con i seguenti valori:

- *temperatura*: 20°C
- *rise-time*: 124 ms.
- *deformazione imposta*: 2 μm
- *numero di colpi di condizionamento iniziale*: 10 colpi.

L'apparecchiatura NAT è situata all'interno di una camera climatica, dotata di un termometro collegato ad un display, in modo da garantire la corretta temperatura della prova attraverso un pannello di settaggio.

Il NAT è equipaggiato da una cella di carico, con capacità massima di sollecitazione supportata pari a 20 kN, messa in contatto con un pistone che provvede all'applicazione del carico sulla testa posta a contatto con il provino. La cella di carico è poi collegata ad un computer con cui è possibile registrare i dati e regolare i parametri.



*Figura 3.25: Provino posto all'interno dell'apparecchiatura NAT*

Il telaio di supporto del provino viene definito "Castello" ed è composto da più componenti: il provino viene poggiato e centrato in una base inferiore di sostegno (1), sulla quale una volta adagiato si integra con un ulteriore componente del telaio (2) dotato di 4 morsetti di fissaggio (3) che hanno la funzione di stabilizzare e centrare il provino. Questo componente è inoltre dotato di fori laterali supportati con viti stabilizzanti (4) che permettono di aumentare o alleggerire il fissaggio. Al di sopra del provino, si posiziona una barra, infilata attraverso due fori, sulla quale si poggia poi una semisfera metallica, dove poi si applicherà il pistoncino superiore della cella. Inoltre, sulla base inferiore sono presenti due leve (5) che permettono di abbassare il supporto del telaio che sostiene i trasduttori.

La deformazione lungo la direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico si misura tramite dei trasduttori (6), i quali sono dispositivi estremamente sensibili che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento. I trasduttori vengono inseriti in appositi fori, previsti nel telaio di supporto del provino, e poi fissati mediante delle viti che permettono di regolare la pressione da essi indotta nel provino.

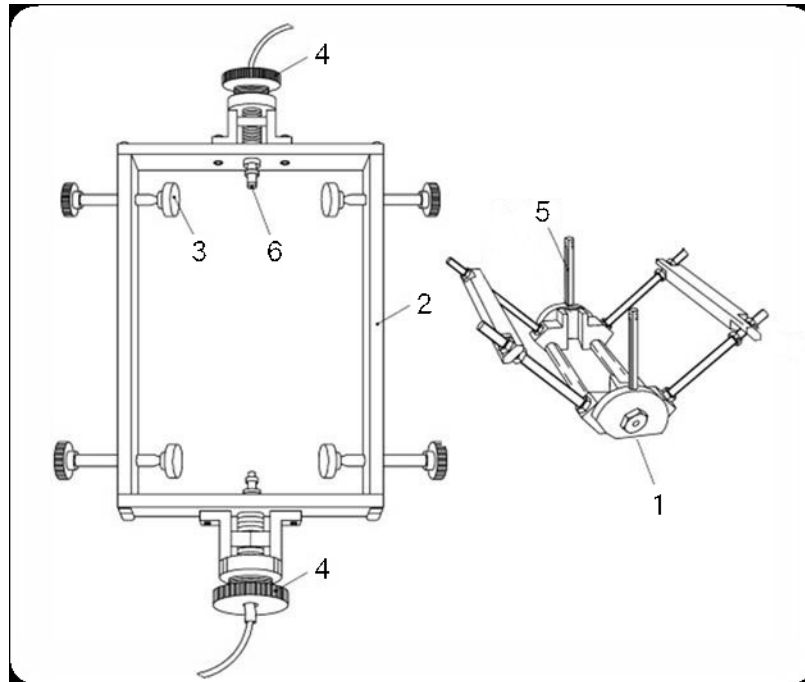


Figura 3.25: "Castelletto" su cui disporre il provino

Un'azione preliminare da effettuare prima dell'esecuzione del test consiste nel misurare le altezze dei provini mediante un calibro, dotato di una precisione non inferiore a 0,1 mm. Il valore dell'altezza è ottenuto come la media di quattro misure, prese agli estremi di due diametri perpendicolari tra loro.



Figura 3.26: Misura di un provino mediante l'ausilio di un calibro

In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare sono stati condizionati termicamente alla temperatura di prova desiderata, ponendoli preventivamente in una cella termoregolatrice, per un tempo sufficiente a raggiungerla anche all'interno del provino, con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C. Nel dettaglio i provini sono stati mantenuti all'interno della cella per un tempo non inferiore alle 2h prima dell'esecuzione della prova, ad una temperatura impostata di 20° C.

Si illustra ora nel dettaglio le fasi previste durante l'esecuzione della prova di misurazione del modulo a trazione indiretta:

In primo luogo, si impostano mediante un software (Calcheck Asphalt) i parametri della prova, determinati in base alle caratteristiche dei trasduttori.

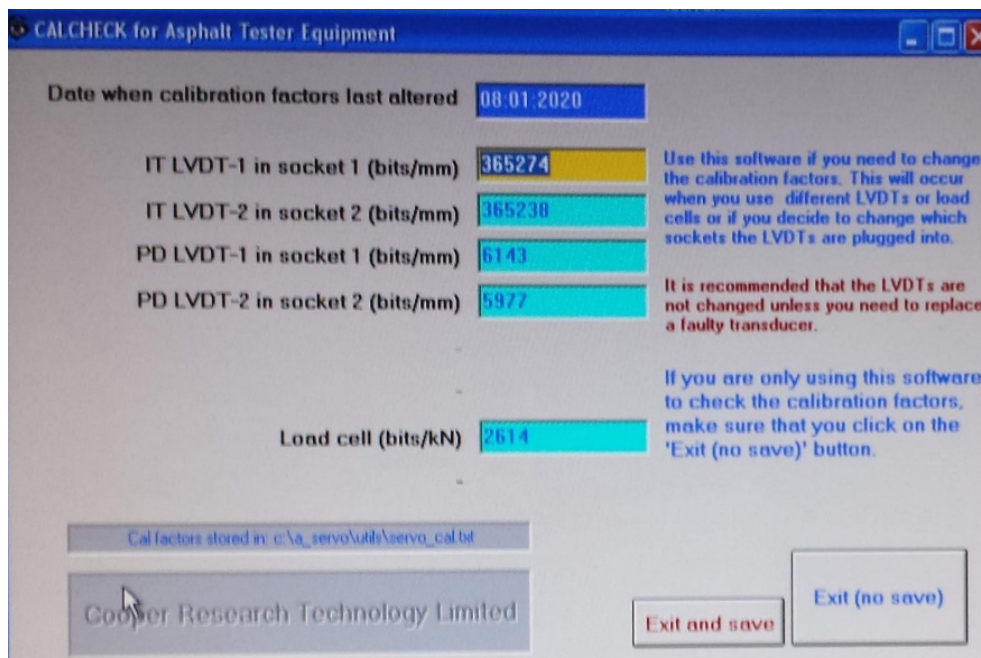


Figura 3.27: Schermata di settaggio iniziale

Una volta settati i parametri iniziali, si avvia il software di prova (ITSM EN), per cui una volta creati i file, si procede nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software mediante i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;

- Target horizontal Deformation [ $\mu\text{m}$ ]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;
- Number of Conditioning Pulses : numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2  $\mu\text{m}$ .

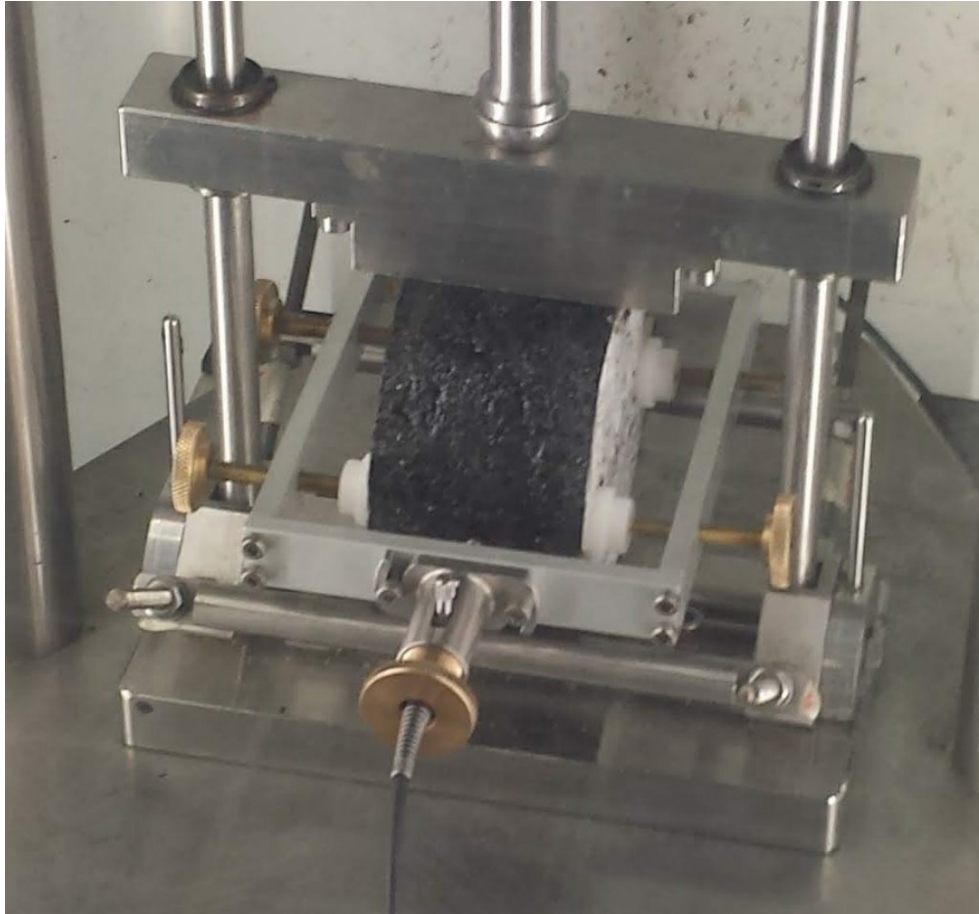
The screenshot shows a software window titled 'itsm3' with a light beige background. It contains seven parameter settings, each with a cyan input field and a small up/down arrow icon to its right:

- Test temperature (°C) = 20.0
- Specimen diameter (mm) = 100.0
- Specimen thickness (mm) = 58.7
- Poisson's ratio = 0.35
- Target rise-time (ms) = 124
- Target horizontal deformation (microns) = 3
- Number of conditioning pulses = 10

At the bottom left, the text 'Cooper Research Technology Limited' is visible. At the bottom right, there are two buttons: 'Exit' and 'Continue'.

Figura 3.28: Schermata di settaggio dei parametri della prova

Nel frattempo, si provvede anche all'allestimento del castelletto, inserendo il provino come precedentemente spiegato e ponendo il tutto all'interno della camera di prova. Per inserire il "castelletto" nella posizione corretta basterà appoggiarlo a ridosso di una "guida" estrusa sull'appoggio inferiore della camera e poi fare scorrere il tutto fino a che il castelletto non si blocchi. La "guida" ci permetterà quindi di centrare il provino in modo che il pistone combaci con la semisfera posta al di sopra del "castelletto" e di porlo con il giusto orientamento. (l'operazione dovrà essere effettuata nel più breve tempo possibile poiché potrebbe comportare una variazione della temperatura interna della camera)



*Figura 3.29: "Castelletto" in posizione corretta all'interno della camera*

Una volta riposto il "castelletto" con il provino dentro la camera e inseriti i trasduttori nei fori, senza però essere fissati, si passa alla schermata successiva del software, utile al controllo del pistone pneumatico; una volta che il "castelletto" si trova al di sotto del pistone che permette l'applicazione del carico, attraverso il comando "make contact" si può far aderire quest'ultimo con la barra soprastante al provino. L'operazione richiede alcuni secondi e risulta fondamentale controllare che la tramoggia superiore sia collocata ad un'altezza congrua allo spessore del provino. In caso contrario il pistone non riuscirà ad entrare in contatto con il "castelletto", rendendo impossibile l'applicazione del carico; in questa situazione si dovrà quindi procedere ad un'operazione di rettifica che si svolgerà ruotando due viti contemporaneamente, facendo riferimento ad una livella a "bolla" posta sulla sommità della tramoggia, la quale ci permette di porre la sovrastruttura in maniera più orizzontale possibile. Assicurata la giusta collocazione della tramoggia e avviato il comando, il pistone scenderà fino a portarsi a contatto con il provino applicando poi una forza di precarico pari a circa 30 N.



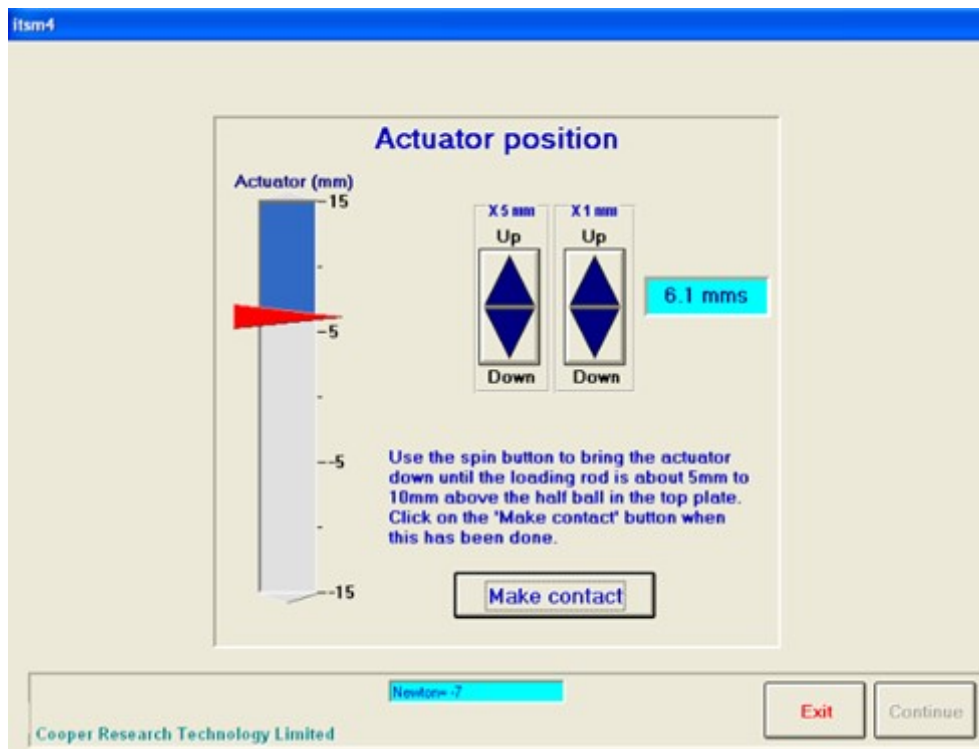


Figura 3.30: Schermata di contatto del pistone

Lo step successivo si apre con una schermata destinata al controllo dei trasduttori e in particolare alla regolazione della loro pressione di contatto da applicare sul provino; questa operazione viene effettuata mediante l'ausilio di due viti autobloccanti che vengono registrate finché le due "freccette", presenti nel display, non divengono di colore rosso, garantendo così in di essere in grado di misurare correttamente la deformazione.

La regolazione avviene in due step: nel primo i trasduttori si disporranno totalmente a pressione contro il provino in modo che dalla schermata del software si verifichi che le "freccette" risultino a contatto con esso; nel secondo step invece, si procederà a ruotare le due viti allentandole finché, come già accennato in precedenza, le freccette non divengano rosse. Se i trasduttori non fossero sistemati correttamente, il dispositivo misurerebbe una deformazione errata del provino, che indurrebbe ad una errata applicazione del carico e quindi il risultato del test risulterebbe falsato.

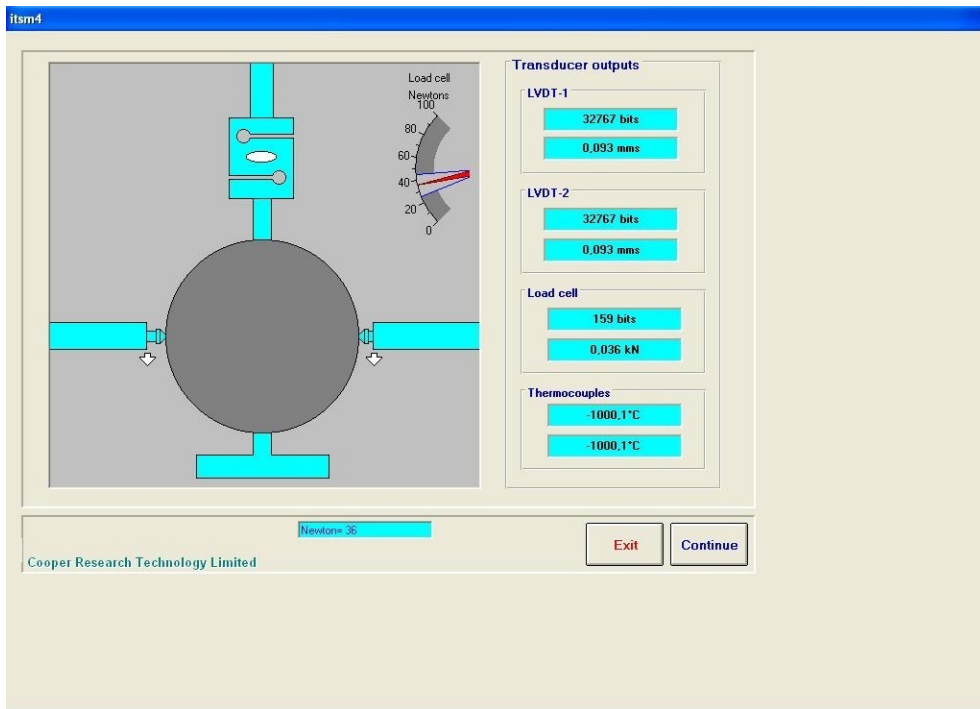


Figura 3.31: Schermata di regolazione dei trasduttori (parte 1)

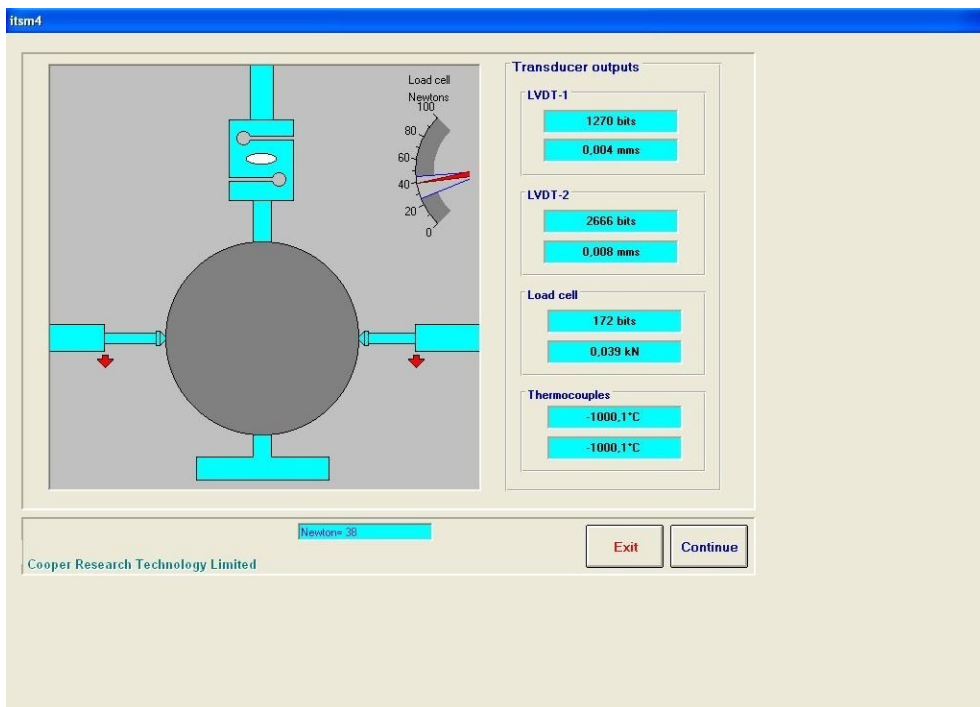


Figura 3.32: Schermata di regolazione dei trasduttori (parte 2)

Una volta terminata la precedente operazione, si passa alla schermata successiva nella quale si procede ad avviare una fase di pre-prova di regolazione, in cui l'apparecchiatura applica 10 impulsi di pre-carico al provino in modo da calibrare correttamente lo strumento per la misura finale della prova. Questa schermata inoltre registra le misure ottenute e fornisce la possibilità di visualizzare i dati preliminari raccolti. Prima di avviare questa procedura di prova ci si deve assicurare che le leve, localizzate nel "castelletto" risultino abbassate e poi si avvia l'operazione premendo sul tasto "start"

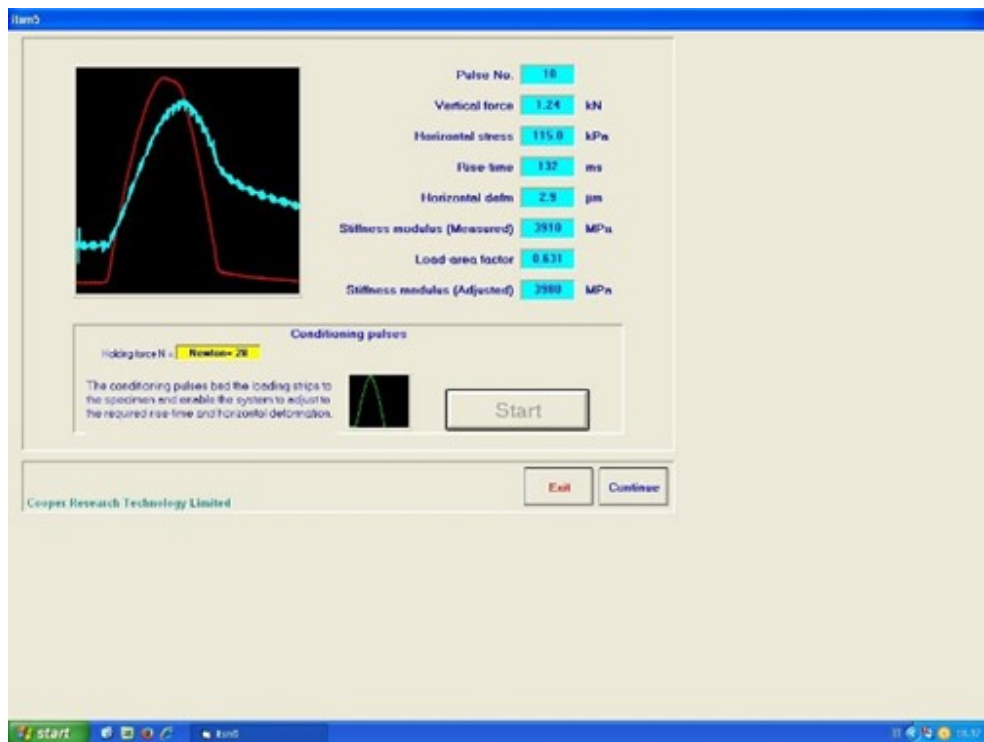


Figura 3.33: Schermata di avvio della misurazione preliminare di prova

Terminata l'operazione di prova, verrà visualizzata nuovamente la schermata di regolazione dei trasduttori, come quella vista in precedenza, con lo scopo di verificare che il test non abbia compromesso il posizionamento di quest'ultimi; per cui una volta controllato ciò si procede alla prossima schermata del software dove si avvia la misurazione vera e propria prevista dalla prova, da cui ricaveremo i dati utili alla nostra sperimentazione.

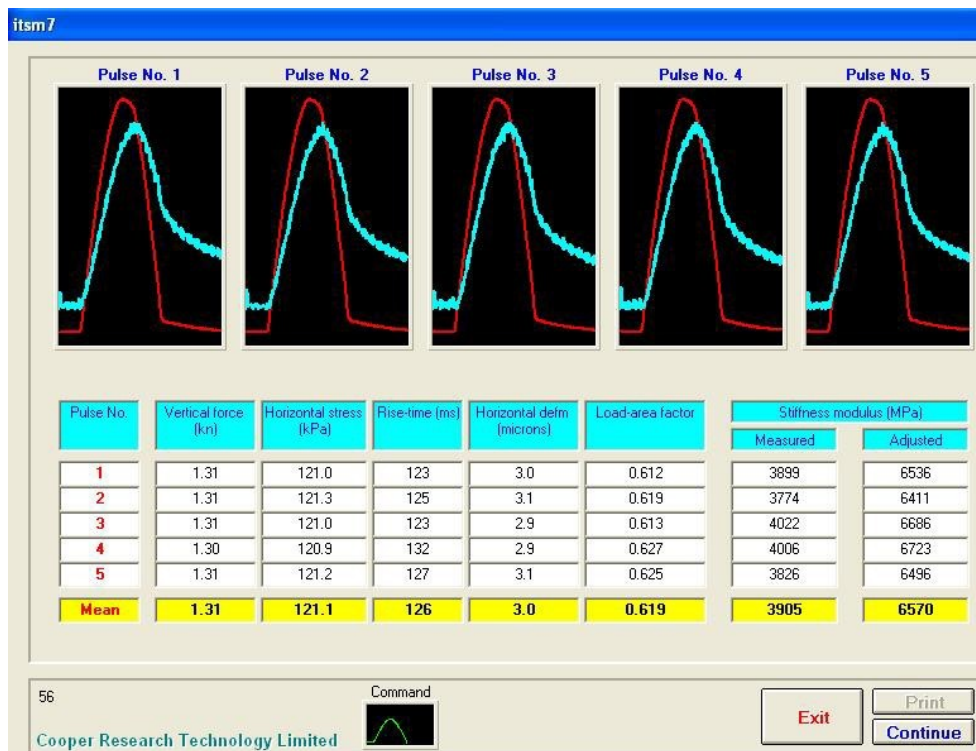


Figura 3.34: Schermata finale di misura

Effettuata la misurazione, nella schermata risulterà possibile visualizzare i grafici dei 5 impulsi (esprimono un confronto tra l'andamento teorico ed effettivo di ognuno di essi) e le loro relativi parametri di prova che dovranno essere controllati per ottenere dei dati finali che risultino accettabili. In particolare, per far sì che i risultati possano essere assunti come attendibili, bisogna controllare che il "rising time" di ogni impulso sia compreso in un range di  $\pm 5$  ms rispetto al valore prestabilito (124ms). Nella parte inferiore del display a destra, verranno restituite le misurazione del modulo elastico espresso in due differenti forme: una risulterà quella misurata direttamente mentre l'altra corrisponderà al valore "aggiustato" attraverso un fattore di correzione.

Completata l'intera procedura il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a  $90^\circ$  e quindi si ripete la procedura sopra elencata con i passaggi appena descritti. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%. Le due misure raccolte, se giudicate idonee, verranno poi mediate tra di esse per ottenere la misura finale.

### 3.3.5 Prova resistenza a trazione indiretta

La prova di trazione indiretta, anche detta prova “Brasiliiana”, prevede l’applicazione di un carico di compressione fino alla rottura del provino, lungo un piano verticale della circonferenza. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C, e nel nostro caso la prova è svolta a 25°C. Per rendere tale ciò, prima dello svolgimento della prova, i provini vengono riposti per non meno di 3 ore in una camera climatica settata a 25°C.



*Figura 3.35: Camera climatica*

L’apparecchiatura impiegata per l’esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico che comprende due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base in cui sono presenti due guide verticali lungo le quali scorre, mediante due manicotti, la testa di carico superiore.

Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

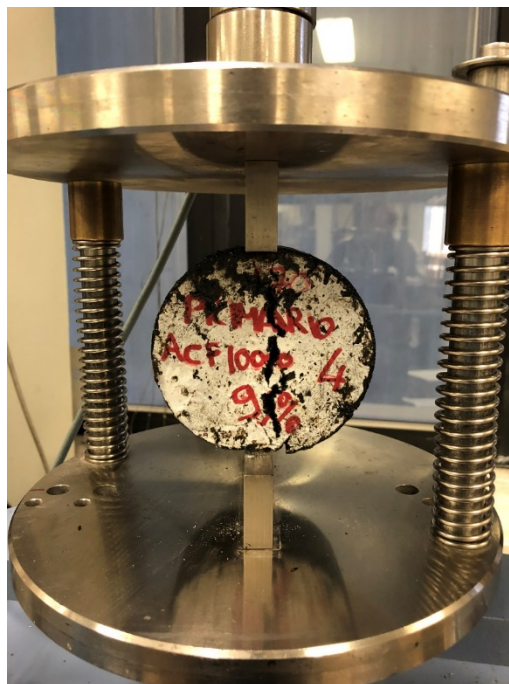
- larghezza:  $15 \pm 2$  mm;
- spessore:  $4 \pm 1$  mm;
- lunghezza  $\geq$  della lunghezza della linea di contatto del provino.

Il provino si deve inserire tra i piatti della pressa centrandolo, così che il suo asse risulti orizzontale e che l'asse della porzione di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore, mantenendo entrambi nel piano verticale passante per l'asse del provino.



*Figura 3.36: Provino posto all'interno dell'apparecchiatura*

Durante la prova, la testa di carico inferiore viene spinta con una velocità costante di circa  $50 \pm 2$  mm/min.



*Figura 3.37: Provino post-prova*

Le misurazioni delle deformazioni, verticali e orizzontali, subite durante l'applicazione del carico dal provino e l'entità stessa del carico vengono effettuate mediante due comparatori. La prova è regolata dalla normativa UNI EN 12697-23 che impone che la prova venga svolta con la deformazione fissata.

Il controllo del dispositivo può avvenire mediante un pannello di comando posto direttamente sul dispositivo oppure, come nel nostro caso di sperimentazione, in remoto, mediante l'ausilio di un computer con cui avviare il software UTMII. Attraverso il software si avvia la prova impostando dei parametri, come ad esempio le caratteristiche geometriche del provino, la velocità di avanzamento e il carico di fine prova. Una volta impostate queste caratteristiche si arriva al pannello di esecuzione della prova.

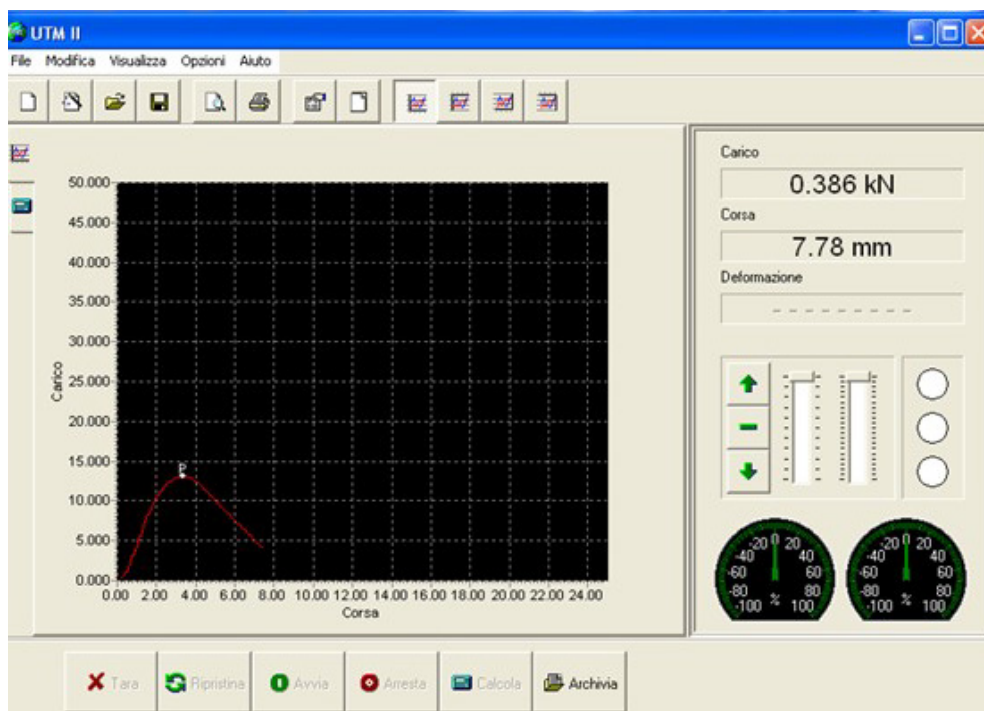


Figura 3.38: Schermata di tracciamento dell'andamento della prova

Da questa schermata è quindi possibile avviare la prova, che in tempo reale traccia anche il grafico della curva carico-deformazione. Terminata l'esecuzione fisica della prova si procede ad avviare il calcolo e l'archiviazione dei dati, mediante i medesimi pulsanti, e si ottengono in output tutti i punti che formano la curva oltre che i valori del carico di rottura a compressione, la deformazione a compressione, la resistenza a trazione indiretta ITS e il coefficiente di trazione indiretta CTI.

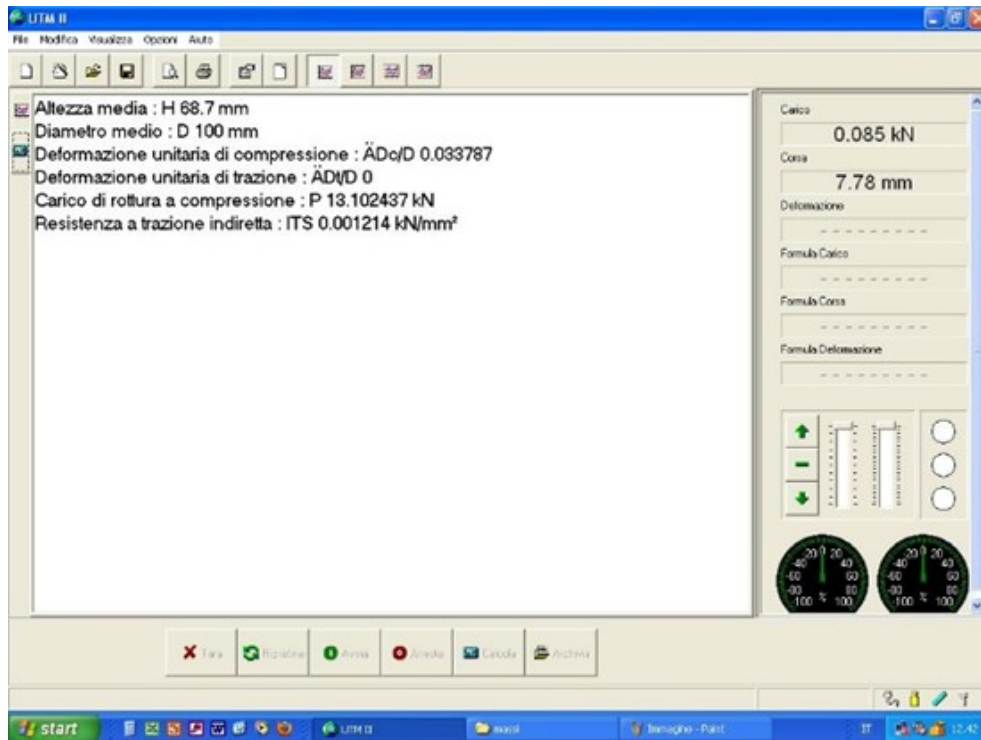


Figura 3.39: Schermata di raccolta dati

La Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, viene calcolata in base al carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot t \cdot D}$$

dove:

- $P_{max}$  è il carico massimo espresso in N;
- $t$  è l'altezza del provino espressa in mm;
- $D$  è il diametro del provino in mm.

Attraverso la determinazione del valore ITS inoltre si può procedere al calcolo del parametro CTI, coefficiente di trazione indiretta, che viene espresso mediante la seguente formula:

$$CTI = \frac{\pi}{d/d_c}$$

dove:

- $d/d_c$  = deformazione unitaria a compressione



Dal capitolato speciale d'appalto ANAS si possono estrapolare i requisiti prestazionali riferiti al parametro ITS e a quello CTI, i quali risulteranno dover essere compresi in un range tra 0,72 e 1,40 nel primo caso mentre > 65 Mpa nel secondo.

Un ulteriore parametro determinato in seguito a questa prova è l'indice di tolleranza al cracking, conosciuto con l'abbreviazione di "CT index", che appare per la prima volta citato nella norma ASTM D8225-19, 2019. Per procedere al calcolo dell'indice sopraindicato si fa riferimento al grafico carico-spostamento, ottenuto dalla prova ITS, focalizzandosi in dettaglio nella fase post-picco e in particolare sulla pendenza della curva post-picco, in cui il carico risulta ridotto al 75% del suo valore di picco. L'indice CT-index può essere calcolato con la seguente espressione:

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{\frac{P}{l}} \cdot \frac{l}{D}$$

dove:

- t e D sono rispettivamente lo spessore e il diametro medio del campione;
- $G_f$  è il lavoro di frattura, cioè l'area sottesa della curva di spostamento verticale-carico divisa per l'area della faccia di fessurazione;
- l e  $P/l$  sono lo spostamento e la pendenza del carico-spostamento quando il carico è ridotto al 75% del picco.

$$\frac{P}{l} = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right|$$

La figura seguente illustra come la pendenza è determinata dalla curva carico-spostamento:

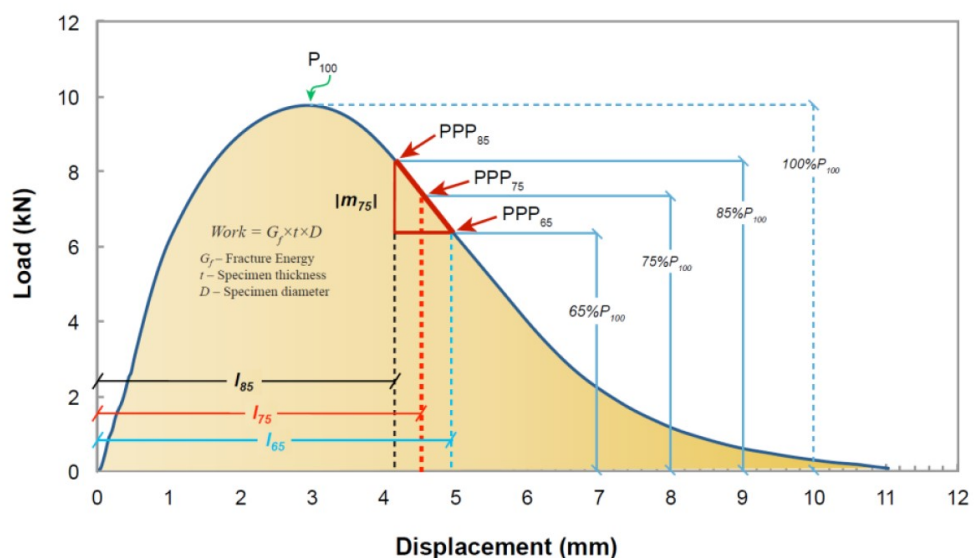


Figura 3.40: Grafico di spiegazione della determinazione della pendenza

## 4. RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguente capitolo verranno illustrati i risultati sperimentali ottenuti, sia per quanto riguarda le caratteristiche volumetriche che il comportamento meccanico dei provini testati. Inoltre, verrà effettuato un confronto tra i provini confezionati a tempi differenti e tra miscele ottenute con due diversi tipi di fresato e differenti tipologie di additivo. Tali risultati saranno esplicitati nei paragrafi successivi tramite apposite tabelle e grafici in modo da renderne più semplice la comprensione.

### 4.1. 00RAP API

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
1	0	140	API	-	-
2	0	170	API	-	-

Tabella 4.1: tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
5,2	5,5

Tabella 4.2: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	133,7
Sabbia	2094,1
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	1113,9
Calcare 12/16	1113,9
Calcare 16/20	0,0
RAP	0,0
Bitume vergine	244,4

Tabella 4.3: Ricetta della miscela

#### 4.1.1. Caratteristiche Volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
OORAP 140° API	1	1085	-	-	100	58,4
	2	1069	-	-	100	58,6
	3	1078	-	-	100	58,4
	4	1080	1101	623,3	100	59,7

Tabella 4.4: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
OORAP 140° API	1	2,364	2,434	2,471	4,3	1,5
	2	2,323	2,392	2,471	6,0	3,2
	3	2,349	2,419	2,471	4,9	2,1
	4	2,304	2,372	2,471	6,8	4,0

Tabella 4.5: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
OORAP 170° API	1	1090	1105	631,1	100	59,3
	2	1108	-	-	100	59,5
	3	1087	-	-	100	58,4
	4	1093	-	-	100	58,2

Tabella 4.6: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
OORAP 170° API	1	2,340	2,381	2,471	5,3	3,6
	2	2,370	2,412	2,471	4,1	2,4
	3	2,369	2,411	2,471	4,1	2,4
	4	2,390	2,432	2,471	3,3	1,6

Tabella 4.7: Masse volumiche

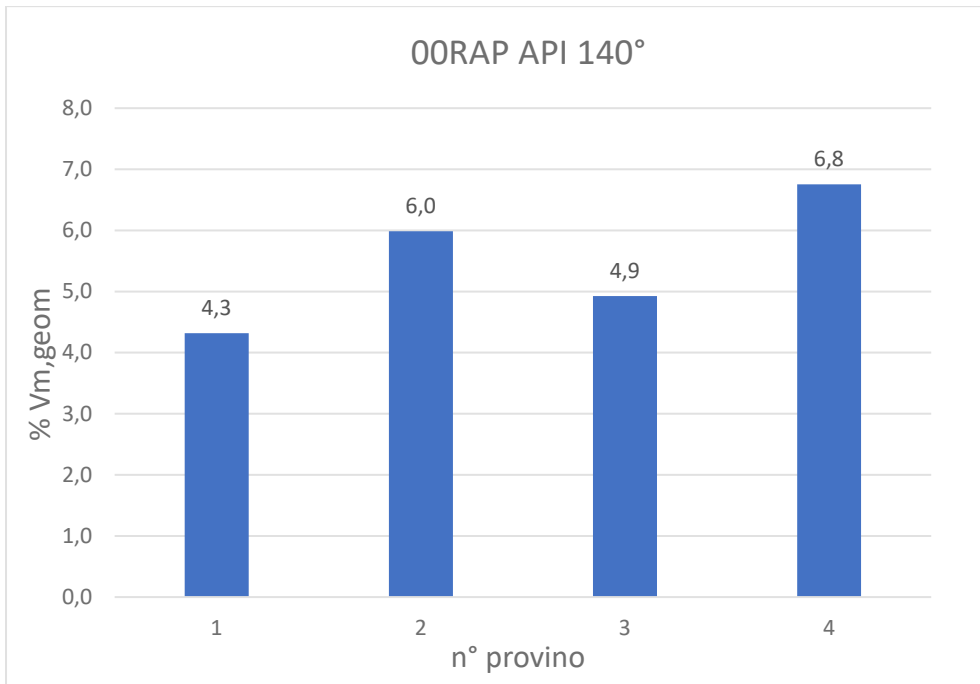


Grafico 4.1: Volume dei vuoti metodo geometrico

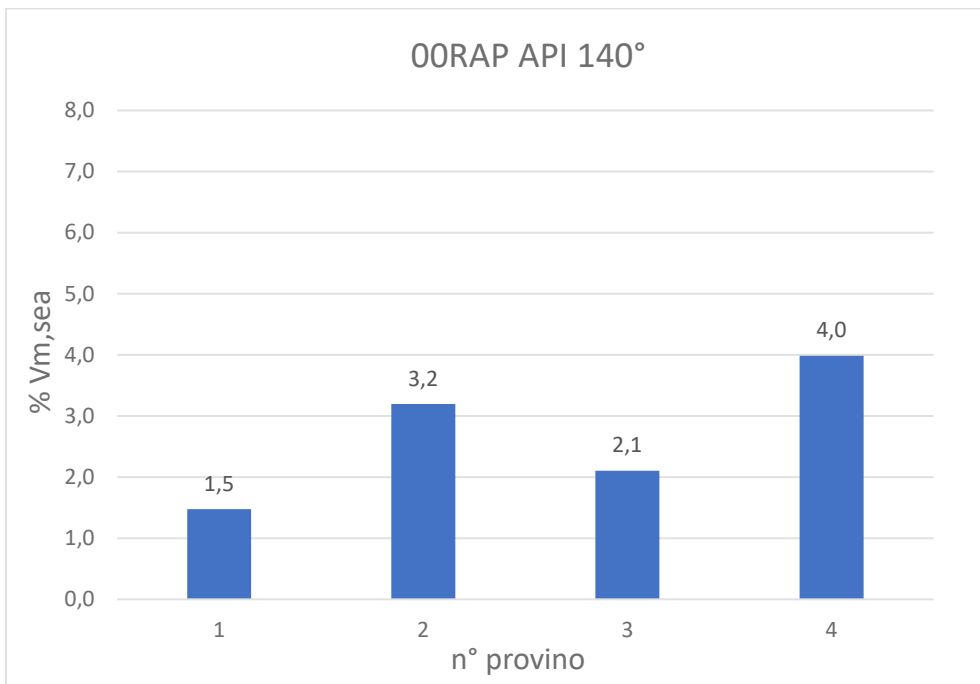


Grafico 4.2: Volume dei vuoti metodo sigillato

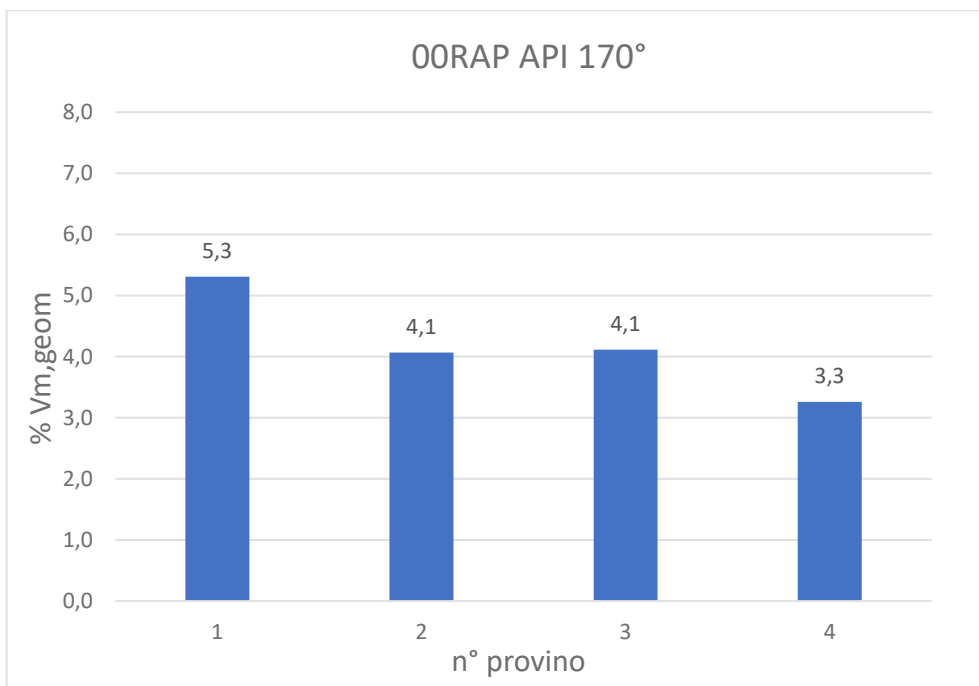


Grafico 4.3: Volume dei vuoti metodo geometrico

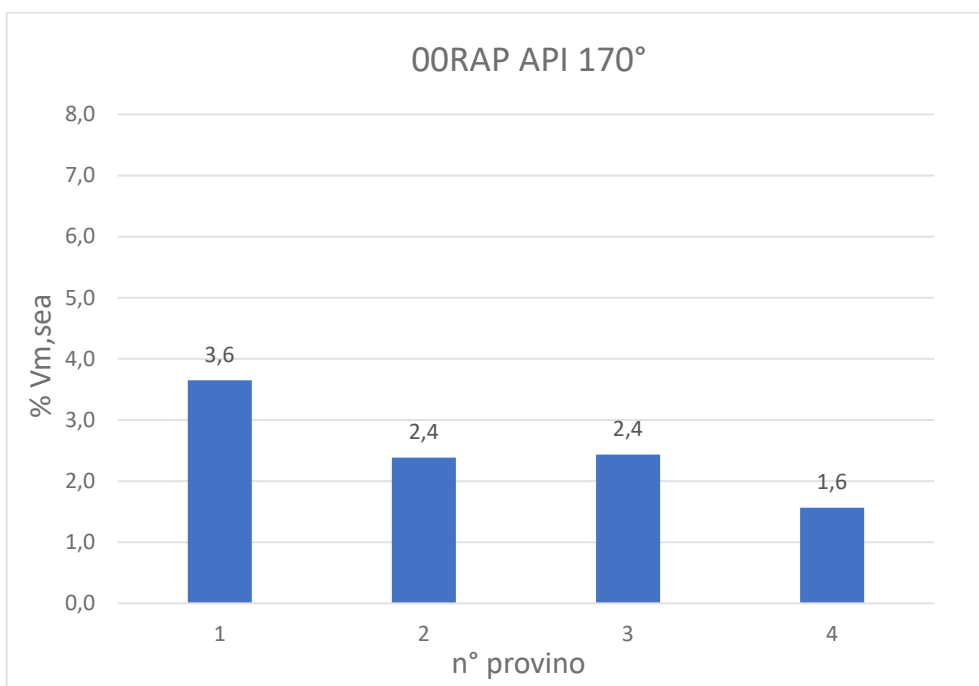


Grafico 4.4: Volume dei vuoti metodo sigillato

#### 4.1.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
00RAP 140° API	1	5662	5228	5445
	2	5011	4715	4863
	3	6192	5772	5982
	4	5612	5085	5348,5

Tabella 4.8: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
00RAP 170° API	1	6714	5901	6307,5
	2	7842	6900	7371
	3	7600	7214	7407
	4	7907	7142	7524,5

Tabella 4.9: Caratteristiche di elasticità del provino

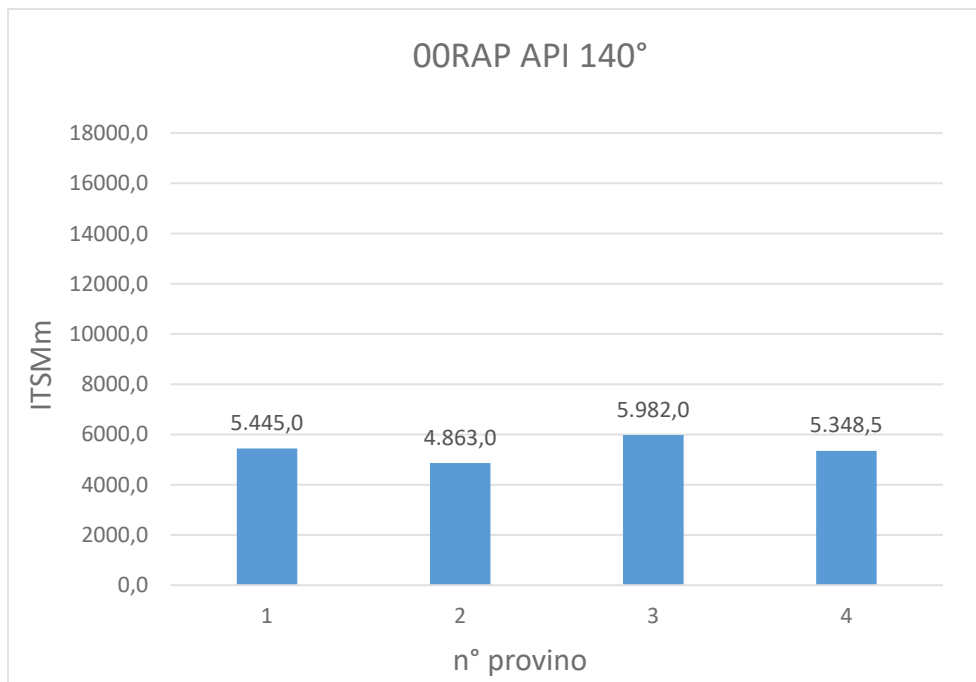


Grafico 4.5: Modulo di elasticità

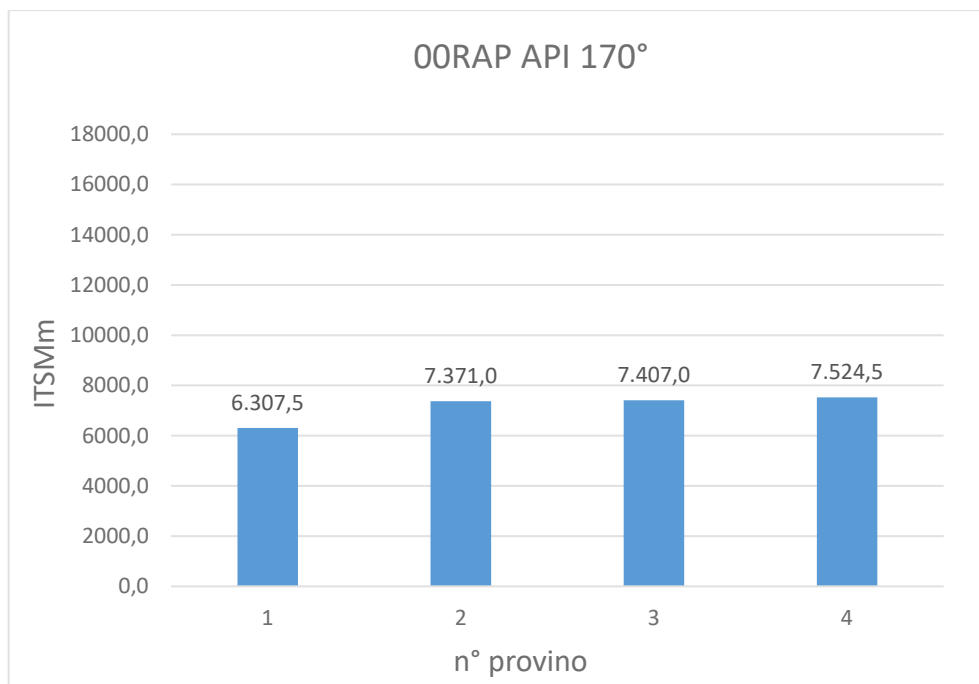


Grafico 4.6: Modulo di elasticità

#### 4.1.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
OORAP 140° API	1	11,12	0,030554	1,21	62,21
	2	10,66	0,025726	1,16	70,83
	3	11,42	0,028438	1,25	69,04
	4	10,07	0,058133	1,07	28,91

Tabella 4.10

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
OORAP 140° API	1	15,90	24,75	40,65	94,0
	2	13,67	28,44	42,11	117,0
	3	14,06	20,85	34,92	58,3
	4	19,17	22,18	41,34	-

Tabella 4.11

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
00RAP 170° API	1	11,14	0,041212	1,2	45,74
	2	13,68	0,035975	1,46	63,75
	3	13,03	0,029299	1,42	76,13
	4	13,43	0,02597	1,47	88,91

Tabella 4.12

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
00RAP 170° API	1	17,31	21,89	39,20	-
	2	17,45	23,27	40,72	70,5
	3	17,27	24,66	41,93	70,4
	4	16,17	31,19	47,35	90,5

Tabella 4.13

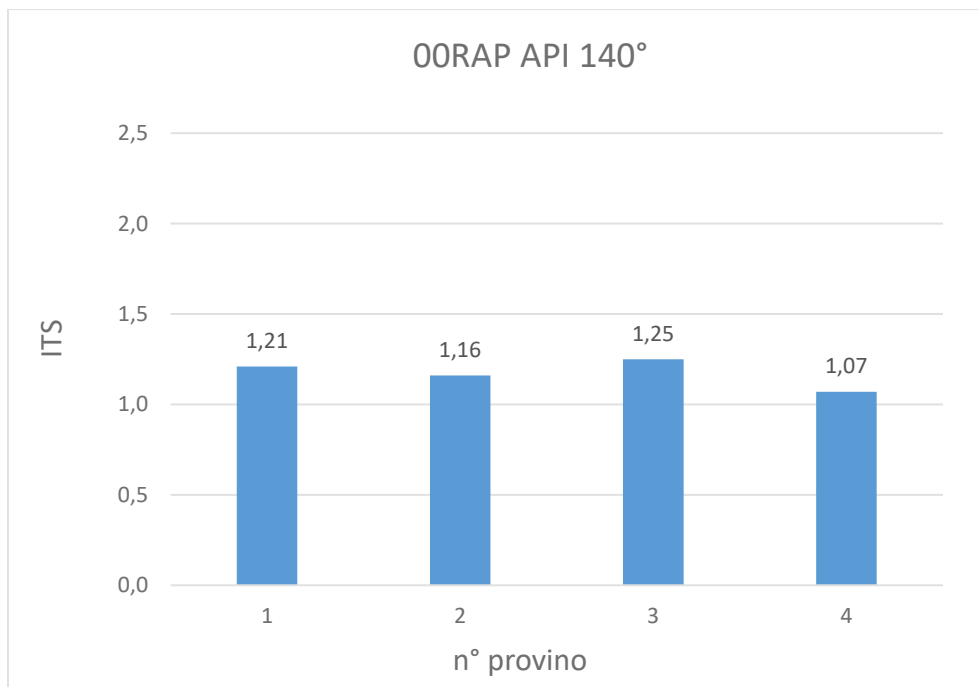


Grafico 4.7: Resistenza a trazione indiretta



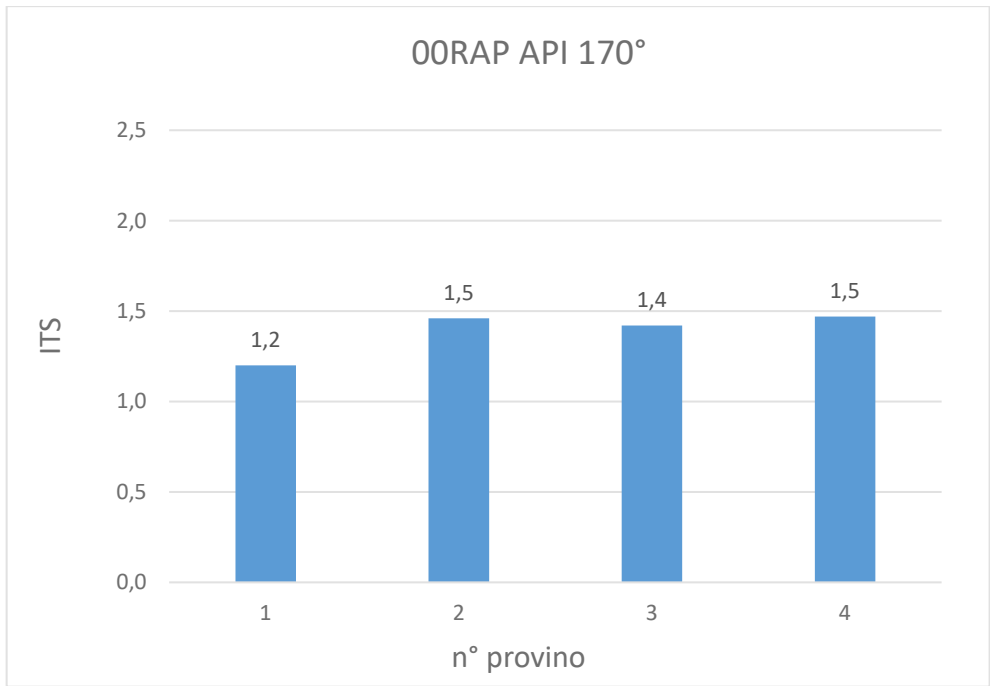


Grafico 4.8: Resistenza a trazione indiretta

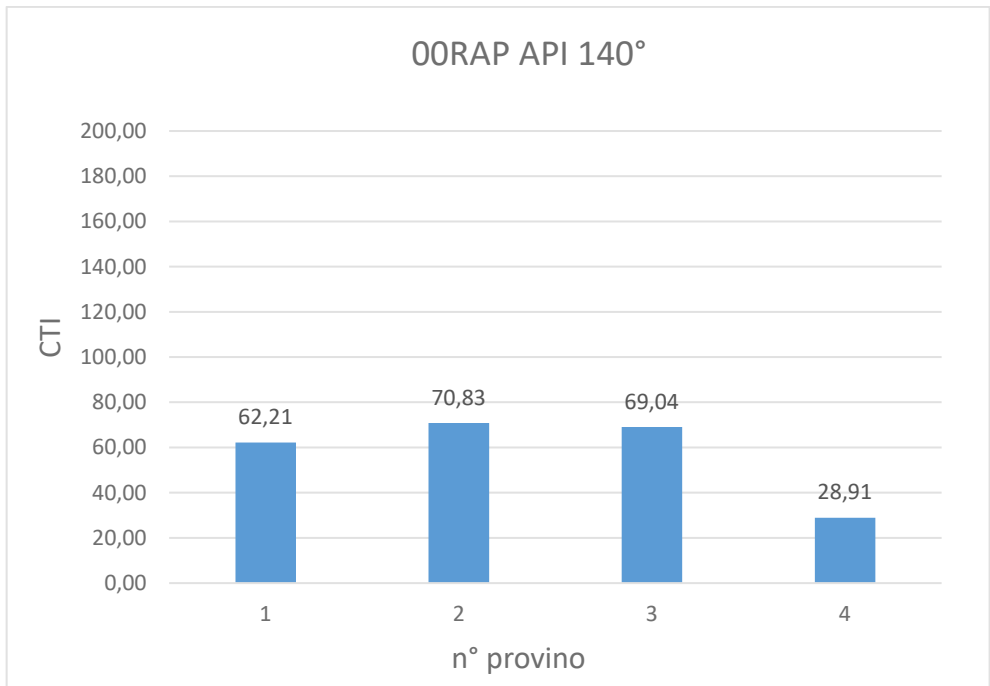


Grafico 4.9: Coefficiente di trazione indiretta

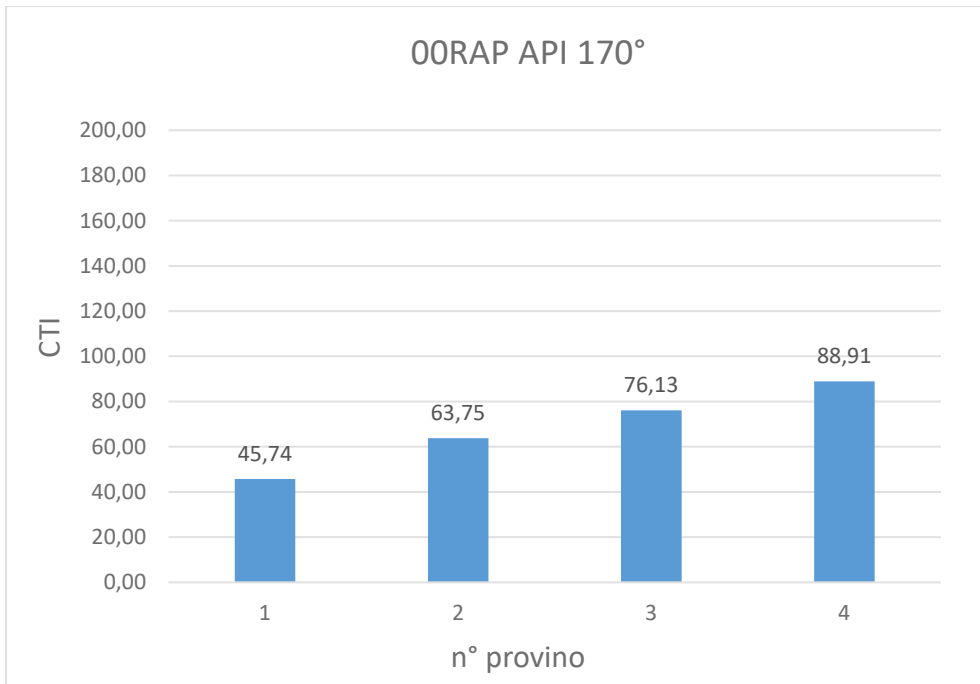


Grafico 4.10: Coefficiente di trazione indiretta

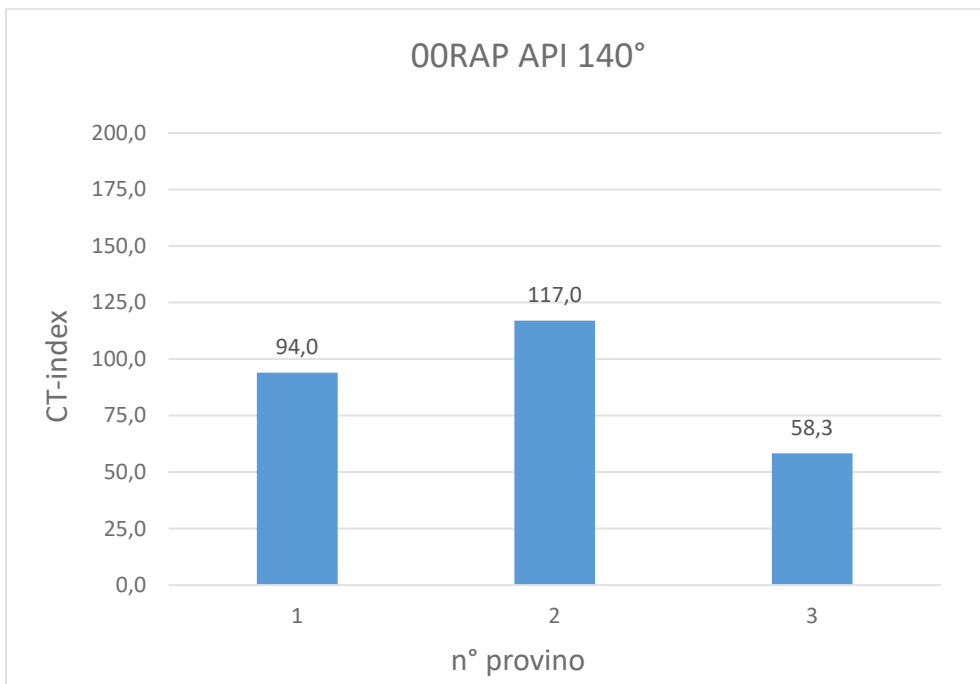


Grafico 4.11: Indice di tolleranza al cracking

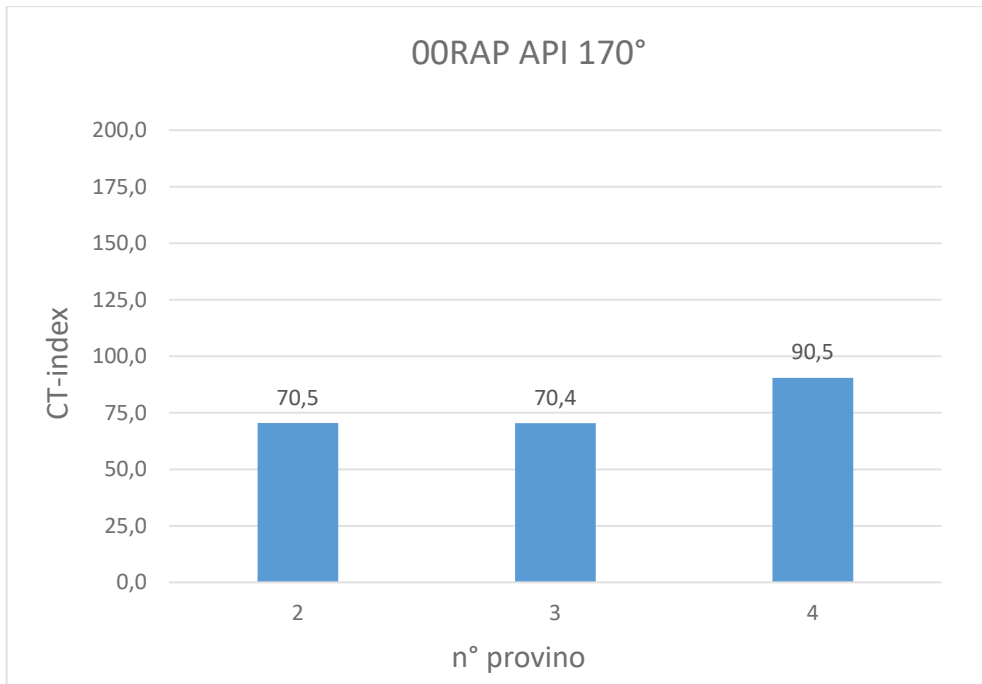


Grafico 4.12: Indice di tolleranza al cracking

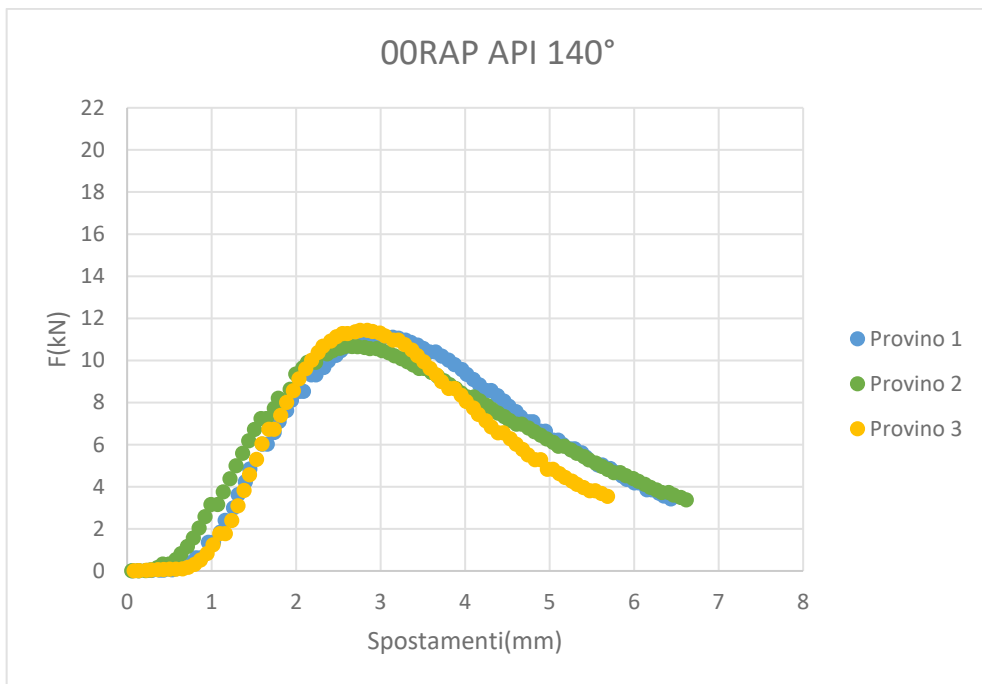


Grafico 4.13: Curva sforzo-deformazione

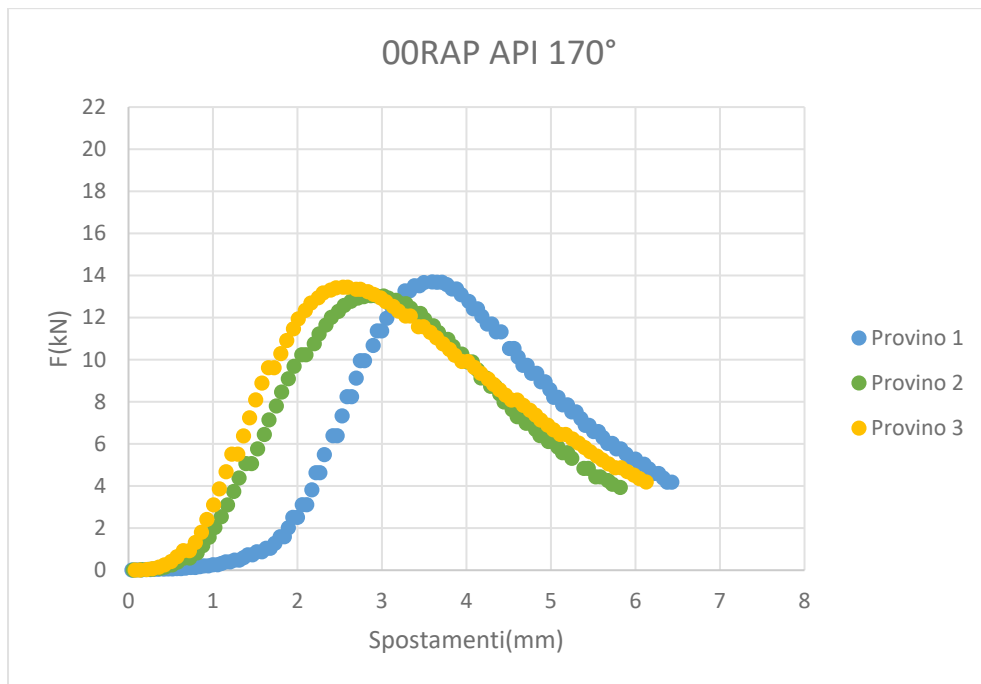


Grafico 4.14: Curva sforzo-deformazione

## 4.2. OORAP PRIMARIO

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
9	0	140	PRIMARIO	-	-
10	0	170	PRIMARIO	-	-

Tabella 4.14: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
5,2	5,5

Tabella 4.15: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	133,7
Sabbia	2094,1
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	1113,9
Calcare 12/16	1113,9
Calcare 16/20	0,0
RAP	0,0
Bitume vergine	244,4

Tabella 4.16: Ricetta della miscela

#### 4.2.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
OORAP 140° PRIMARIO	1	1090	-	-	100	59,2
	2	1097	-	-	100	59,2
	3	1115	1129	649,2	100	60,6
	4	1091	-	-	100	58,9

Tabella 4.17: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
OORAP 140° PRIMARIO	1	2,343	2,395	2,471	5,2	3,1
	2	2,357	2,410	2,471	4,6	2,5
	3	2,344	2,396	2,471	5,1	3,0
	4	2,357	2,409	2,471	4,6	2,5

Tabella 4.18: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
OORAP 170° PRIMARIO	1	1096	1110	638,5	100	59,2
	2	1096	-	-	100	59,0
	3	1103	-	-	100	59,3
	4	1093	-	-	100	58,8

Tabella 4.19: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
OORAP 170° PRIMARIO	1	2,356	2,400	2,471	4,7	2,9
	2	2,363	2,407	2,471	4,4	2,6
	3	2,370	2,414	2,471	4,1	2,3
	4	2,366	2,411	2,471	4,2	2,4

Tabella 4.20: Masse volumiche

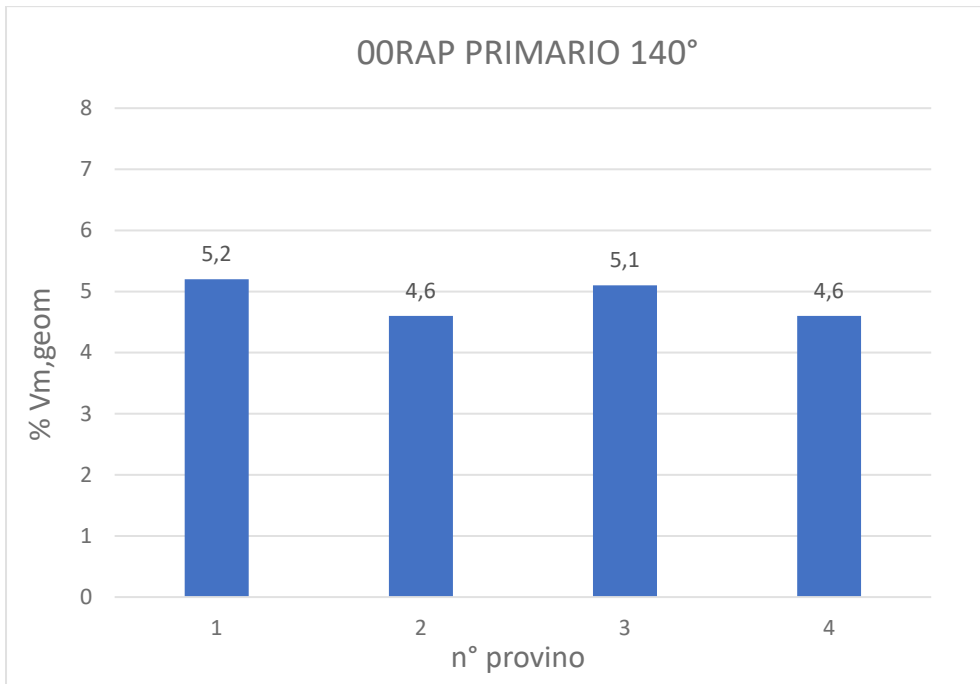


Grafico 4.15: Volume dei vuoti metodo geometrico

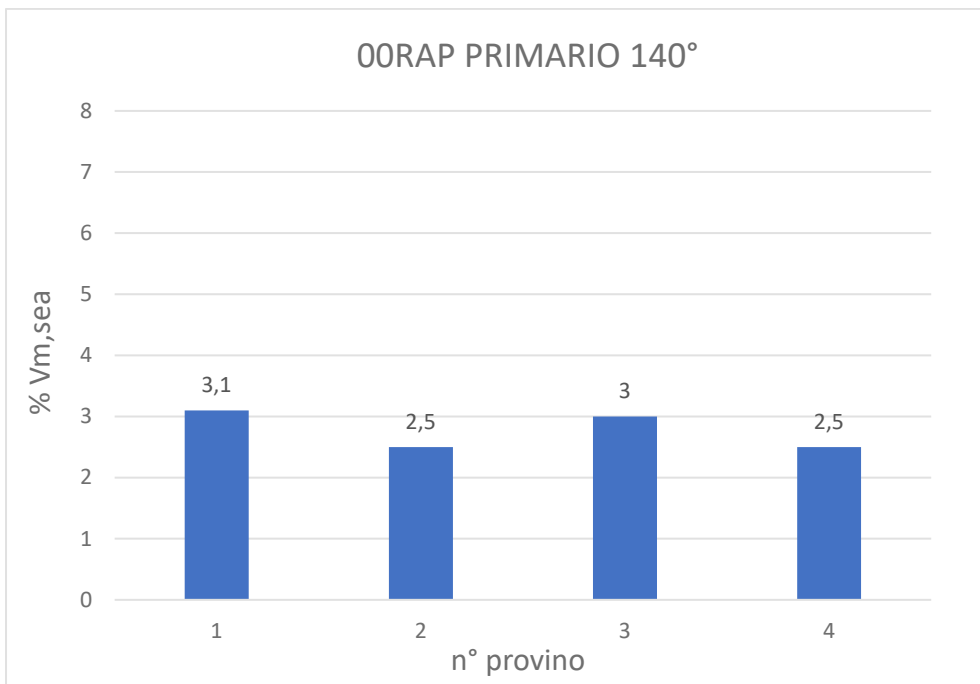


Grafico 4.16: Volume dei vuoti metodo sigillato

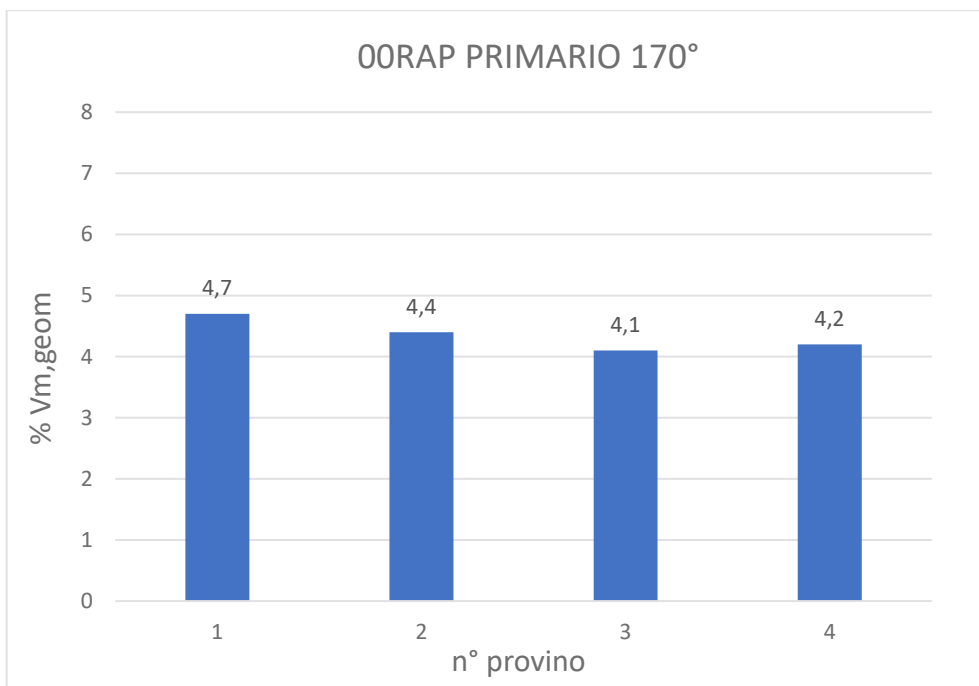


Grafico 4.17: Volume dei vuoti metodo geometrico

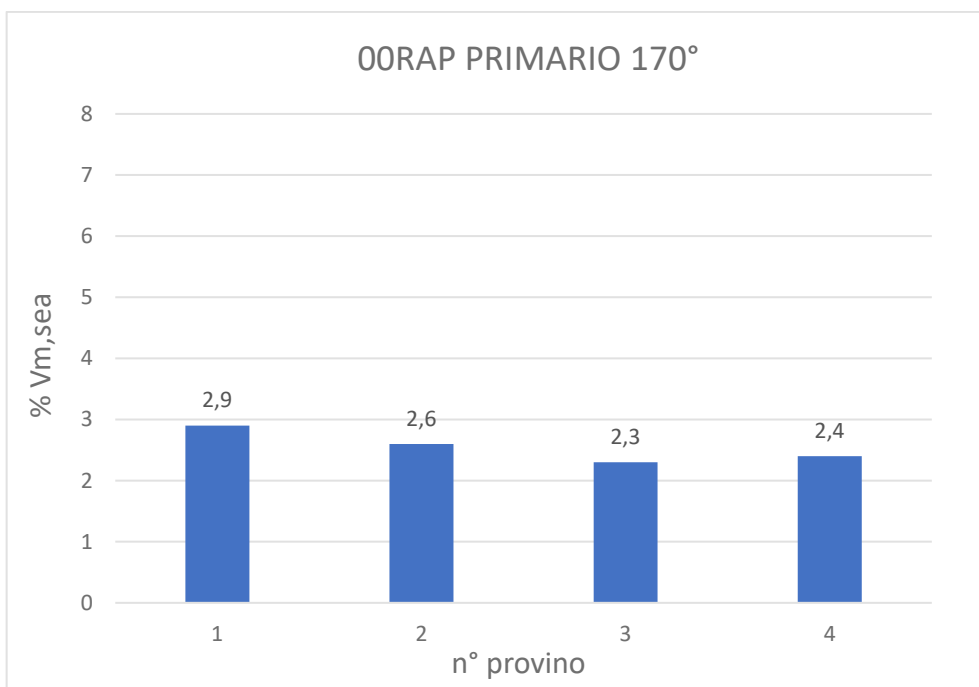


Grafico 4.18: Volume dei vuoti metodo sigillato

#### 4.2.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
OORAP 140° PRIMARIO	1	3673	3622	3647,5
	2	4134	3797	3965,5
	3	3647	3611	3629
	4	4023	3639	3831

Tabella 4.21: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
OORAP 170° PRIMARIO	1	3505	3093	3299
	2	3997	3565	3781
	3	4348	4177	4262,5
	4	3849	3519	3684

Tabella 4.22: Caratteristiche di elasticità del provino

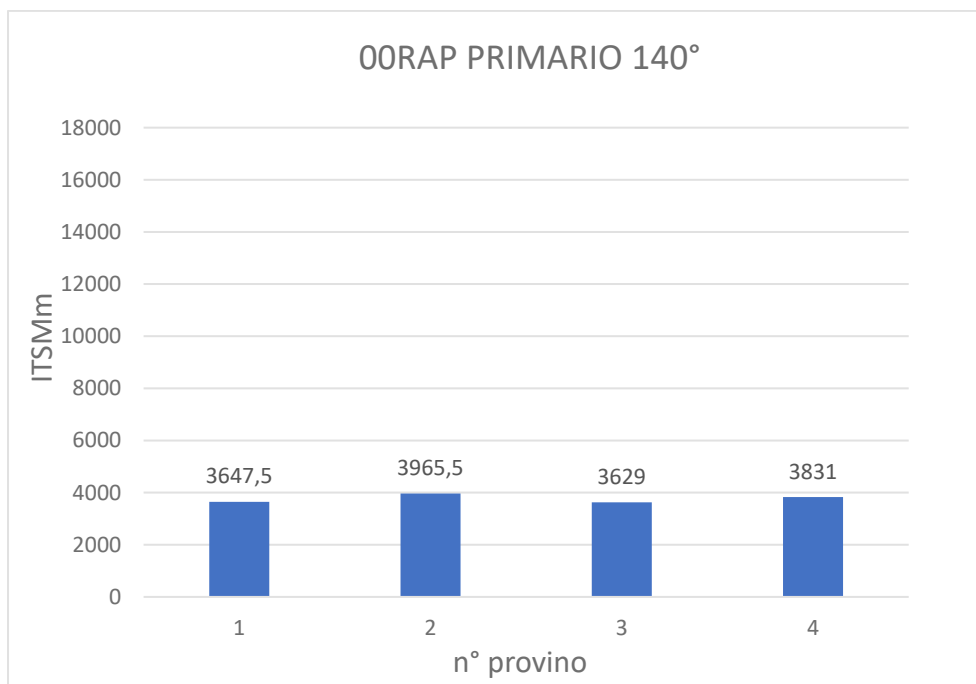


Grafico 4.19: Modulo di elasticità



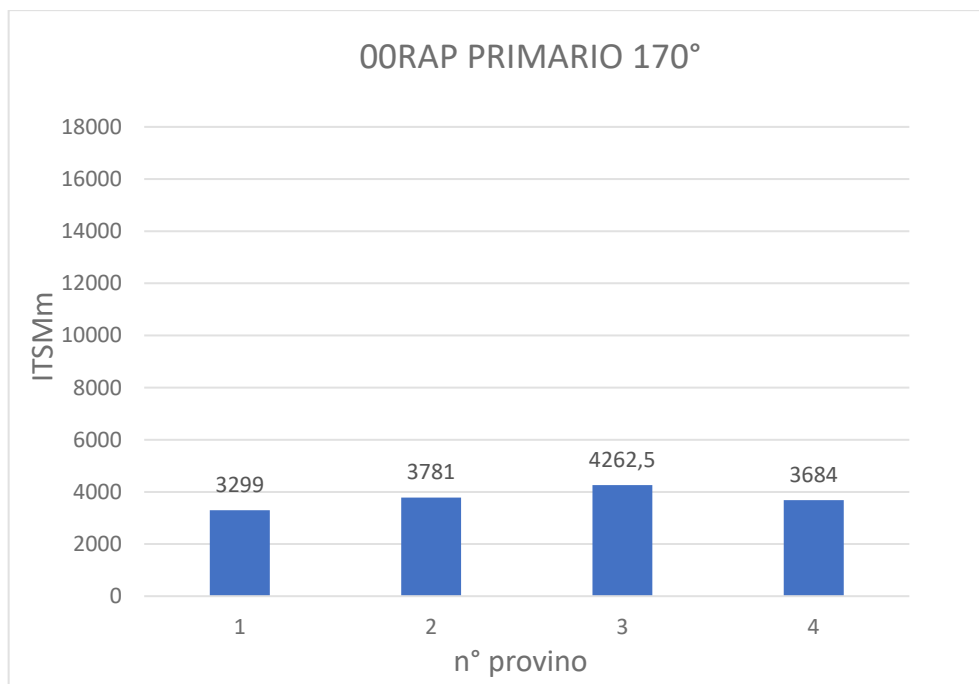


Grafico 4.20: Modulo di elasticità del provino

#### 4.2.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
OORAP 140° PRIMARIO	1	7,52	0,031469	0,81	40,43
	2	8,44	0,025949	0,91	55,09
	3	7,79	0,047758	0,82	26,97
	4	9,06	0,027374	0,98	56,24

Tabella 4.23

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
OORAP 140° PRIMARIO	1	12,34	22,62	34,96	196,20
	2	12,02	26,39	38,41	155,60
	3	15,11	19,66	34,77	-
	4	13,03	24,84	37,87	137,10

Tabella 4.24

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
OORAP 170° PRIMARIO	1	8,69	0,04771	0,93	30,62
	2	8,5	0,027534	0,92	52,49
	3	9,35	0,032871	1	47,79
	4	8,91	0,038308	0,97	39,77

Tabella 4.25

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
OORAP 170° PRIMARIO	1	17,77	23,21	40,97	-
	2	11,82	22,38	34,20	122,50
	3	14,46	23,85	38,31	145,30
	4	13,18	23,26	36,44	142,30

Tabella 4.26

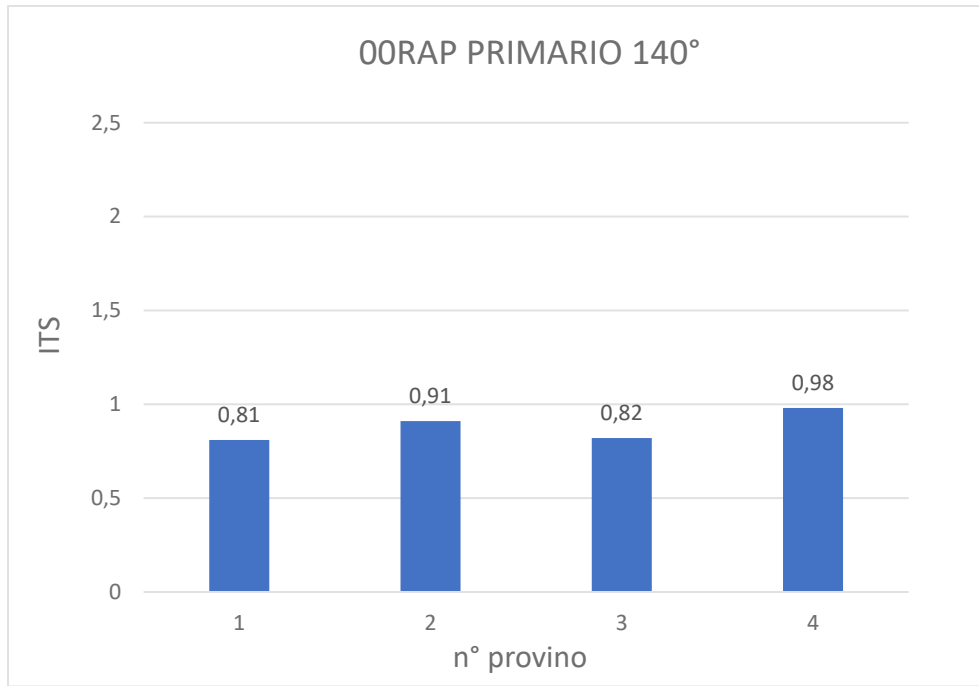


Grafico 4.21: Resistenza a trazione indiretta

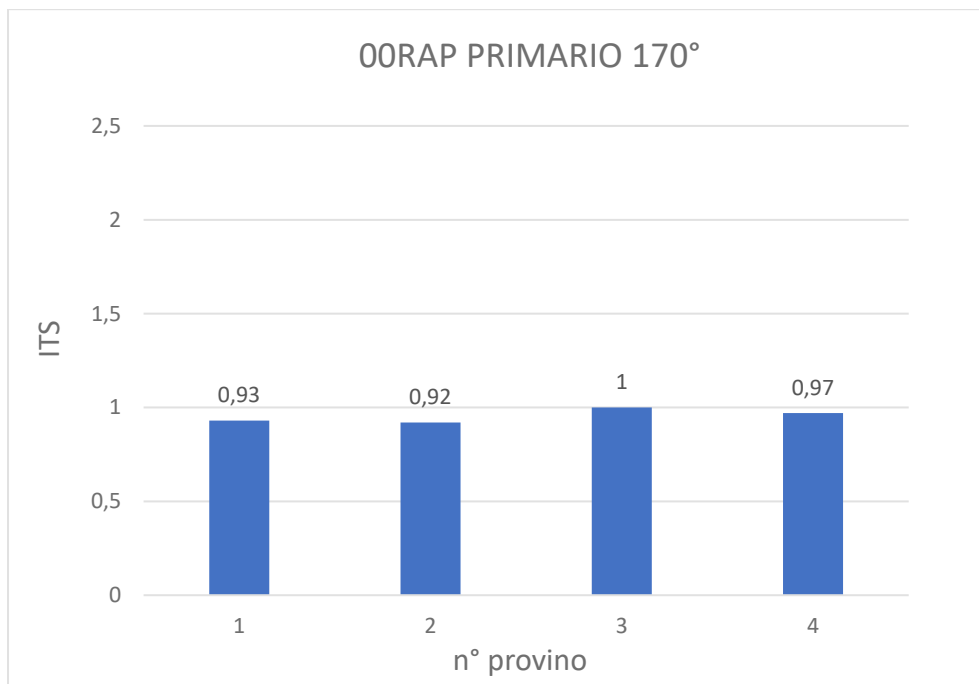


Grafico 4.22: Resistenza a trazione indiretta

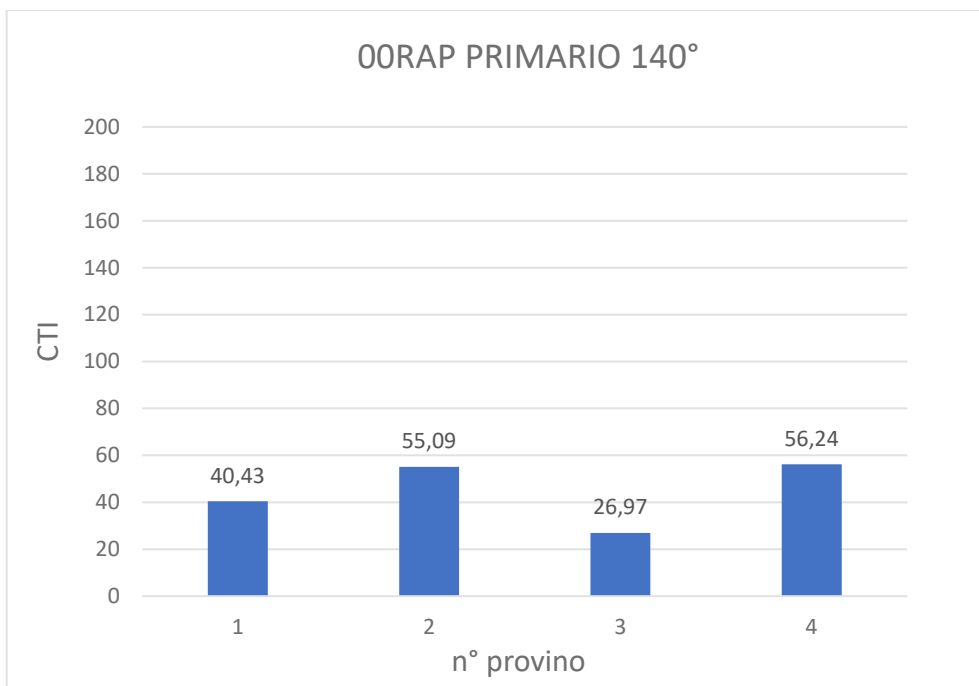


Grafico 4.23: Coefficiente di trazione indiretta

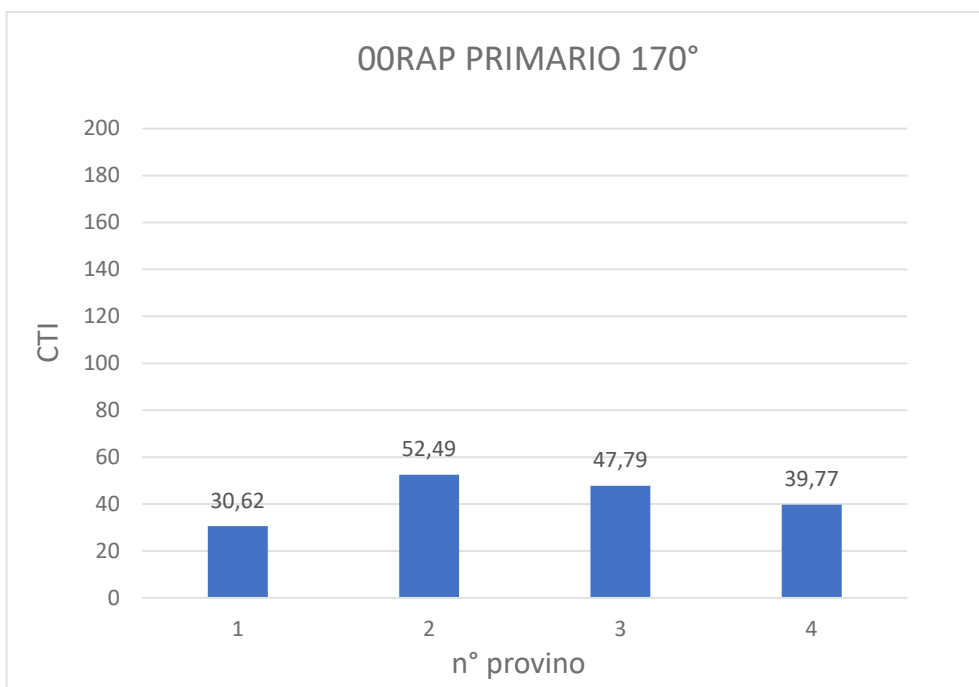


Grafico 4.24: Coefficiente di trazione indiretta

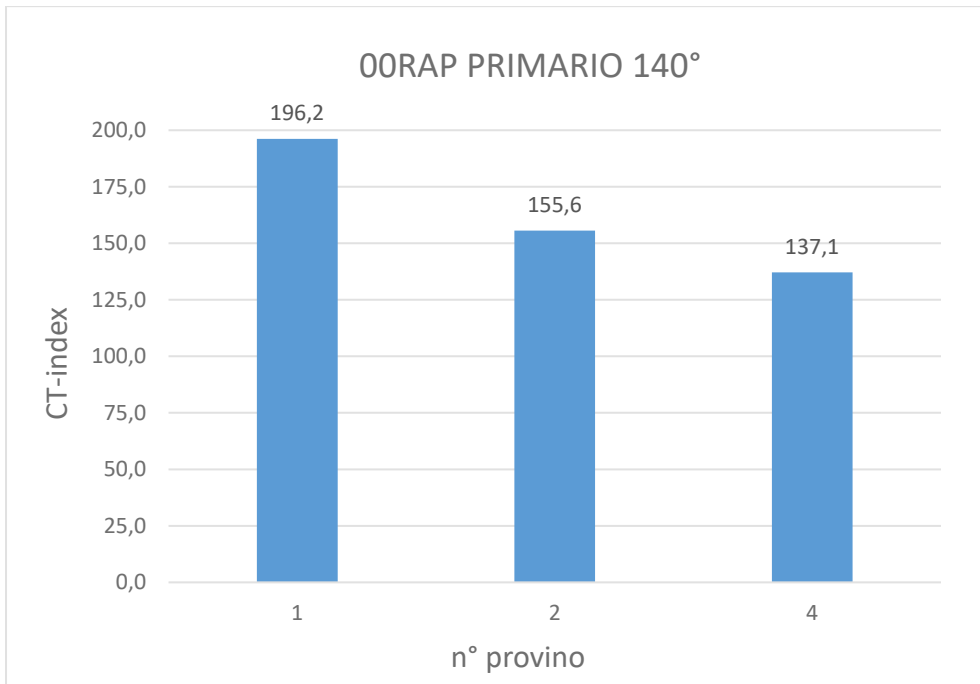


Grafico 4.25: Indice di tolleranza al cracking

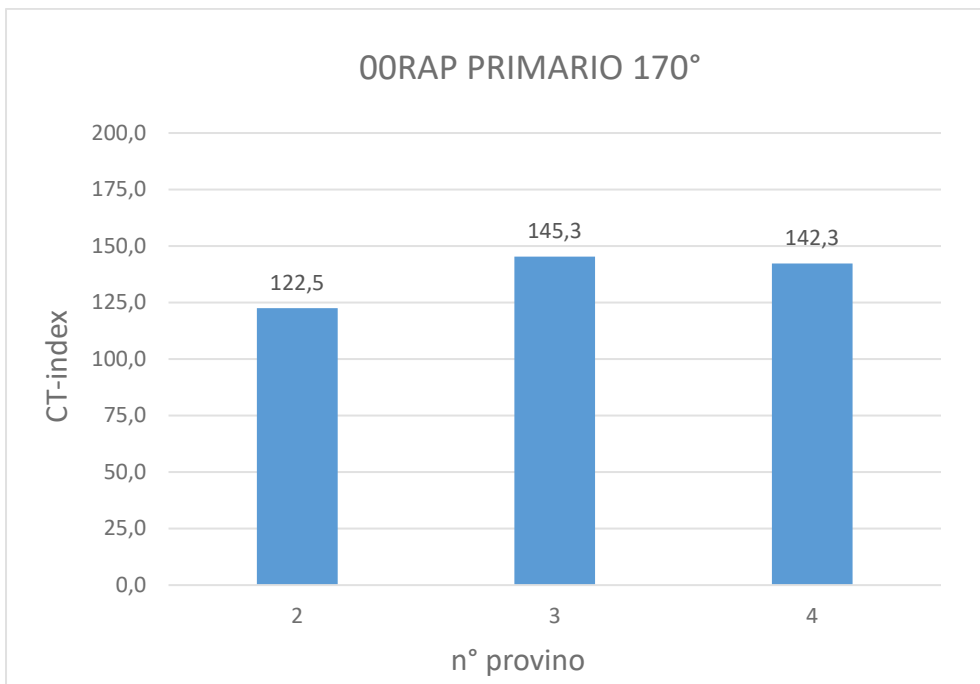


Grafico 4.26: Indice di tolleranza al cracking

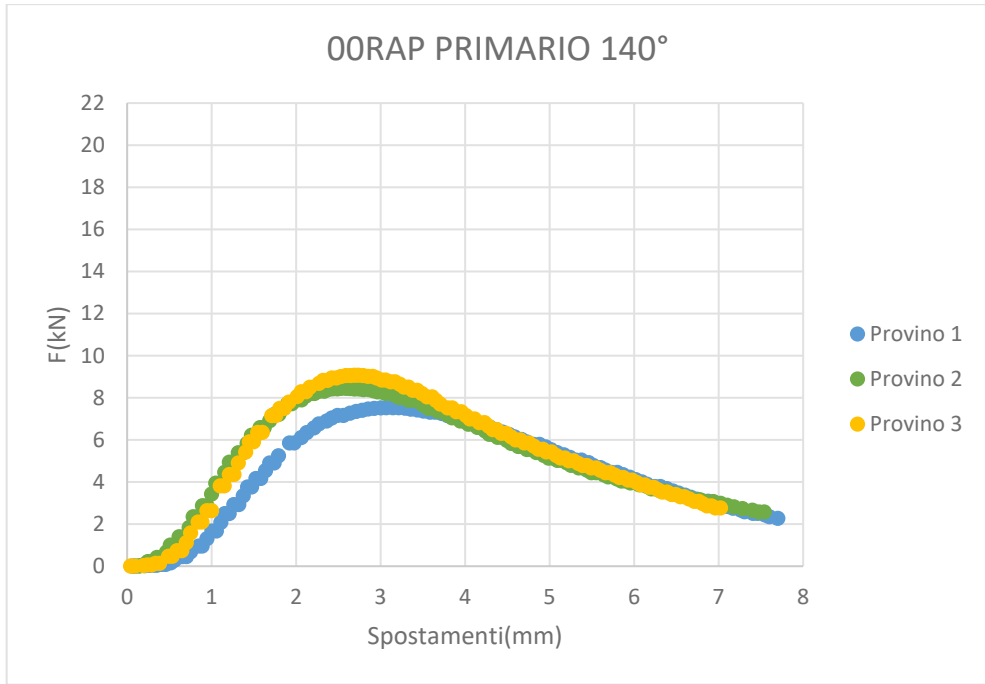


Grafico 4.27: Curva sforzo-deformazione

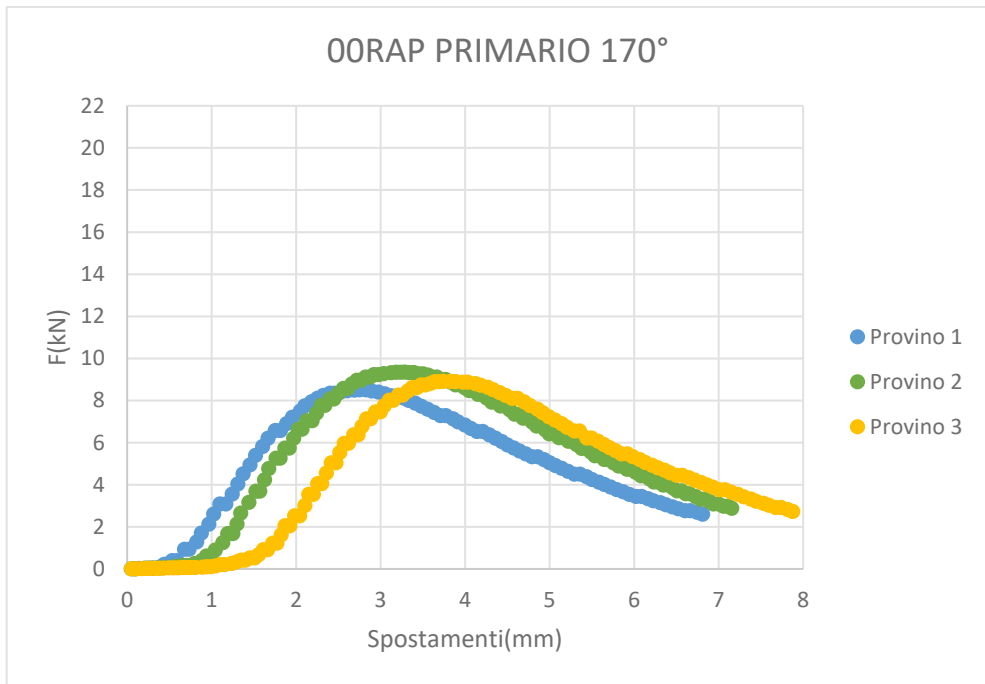


Grafico 4.28: Curva sforzo-deformazione

### 4.3. 50RAP API

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
3	50	140	API	-	-
4	50	170	API	-	-

Tabella 4.27: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.28: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.29: Ricetta della miscela

### 4.3.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° API	1	1114	1135	646	100	61,1
	2	1094	-	-	100	59,1
	3	1092	-	-	100	59,3
	4	1086	-	-	100	58,9

Tabella 4.30: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° API	1	2,323	2,388	2,471	6,0	3,4
	2	2,356	2,422	2,471	4,6	2,0
	3	2,345	2,410	2,471	5,1	2,5
	4	2,349	2,415	2,471	4,9	2,3

Tabella 4.31: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° API	1	1102	-	-	100	59,7
	2	1099	-	-	100	59,7
	3	1105	-	-	100	59,4
	4	1105	1122	639,8	100	60,5

Tabella 4.32: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° API	1	2,350	2,409	2,471	4,9	2,5
	2	2,343	2,402	2,471	5,2	2,8
	3	2,368	2,427	2,471	4,2	1,8
	4	2,324	2,382	2,471	5,9	3,6

Tabella 4.33: Masse volumiche

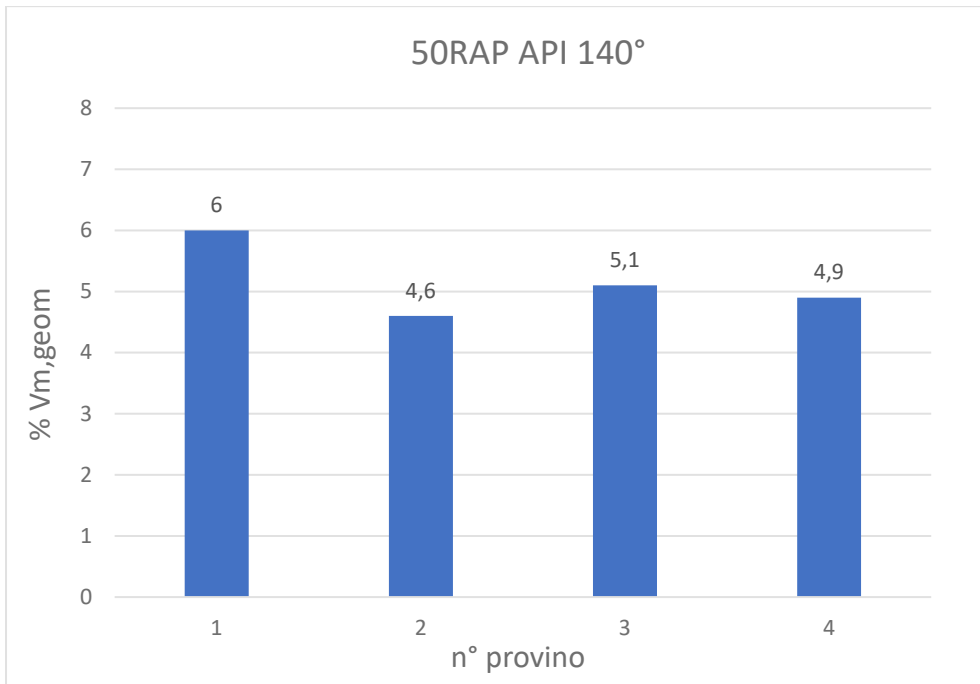


Grafico 4.29: Volume dei vuoti metodo geometrico

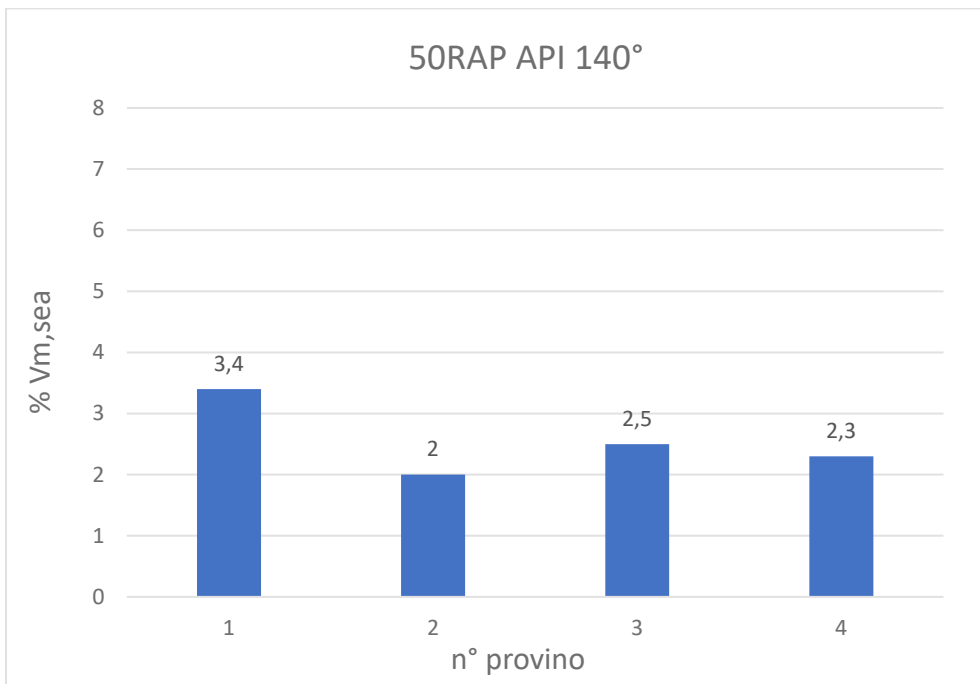


Grafico 4.30: Volume dei vuoti metodo sigillato



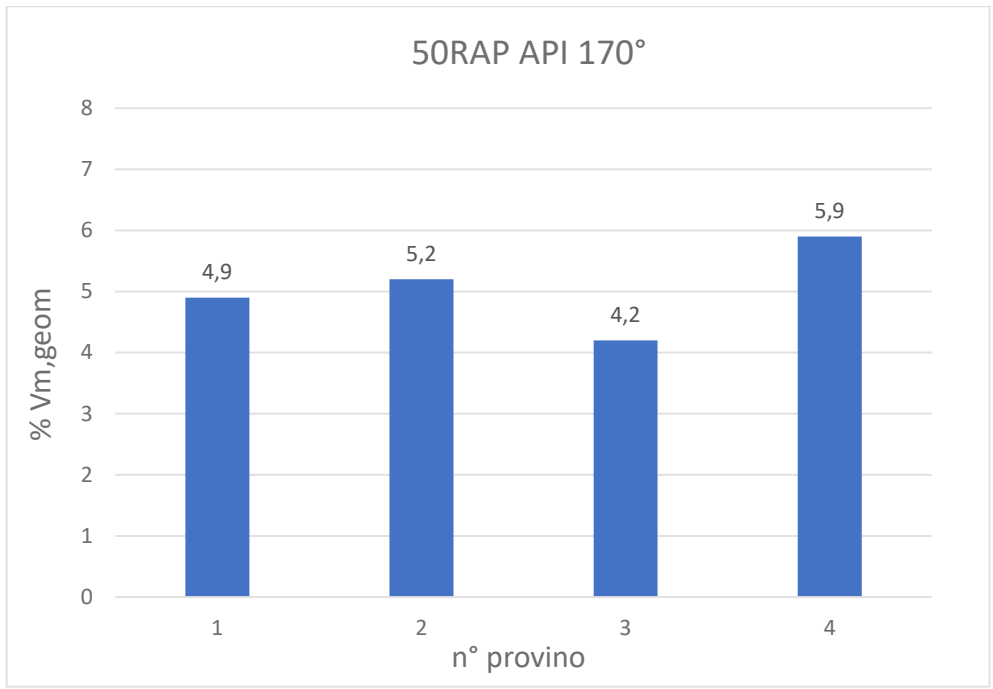


Grafico 4.31: Volume dei vuoti metodo geometrico

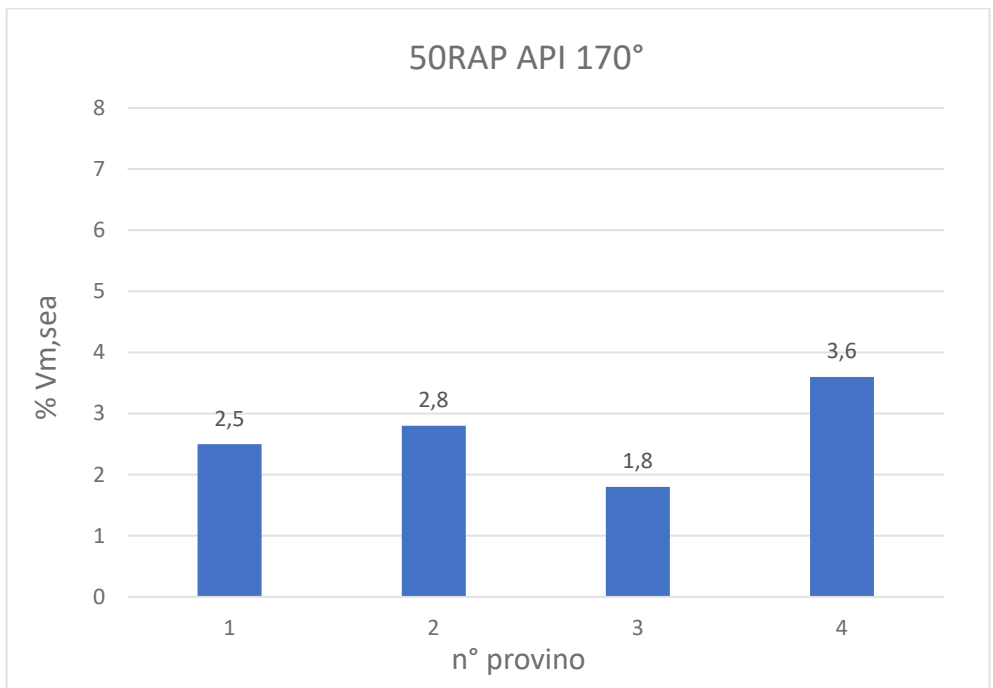


Grafico 4.32: Volume dei vuoti metodo sigillato

### 4.3.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° API	1	11019	10592	10805,5
	2	12880	11809	12344,5
	3	12395	12054	12224,5
	4	12392	12482	12437

Tabella 4.34: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° API	1	17295	16879	17087
	2	15664	15352	15508
	3	17065	16375	16720
	4	15723	16494	16108,5

Tabella 4.35: Caratteristiche di elasticità del provino

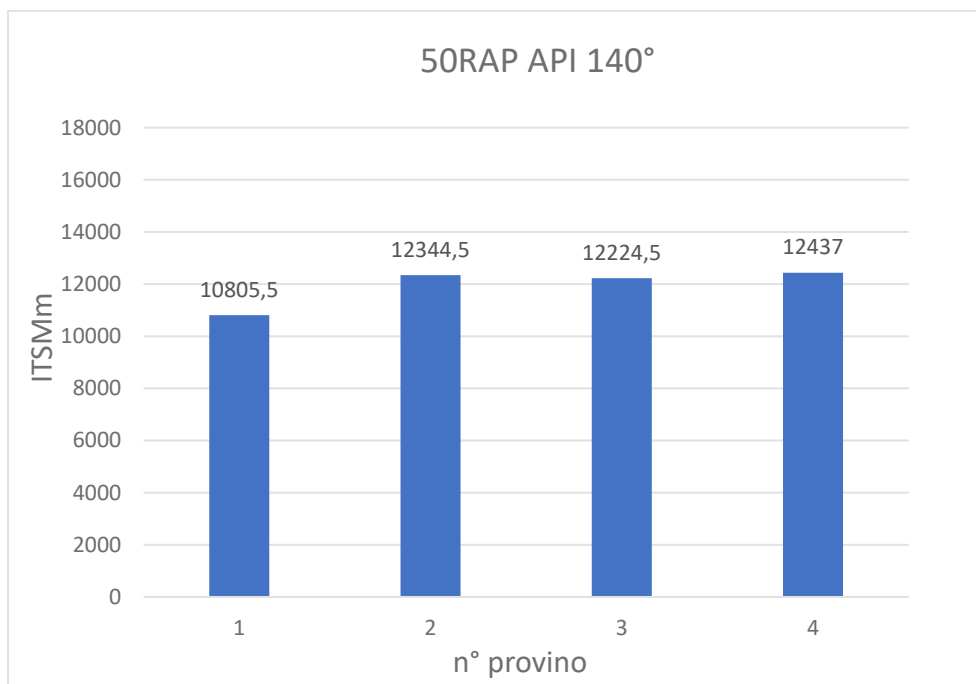


Grafico 4.33: Modulo di elasticità

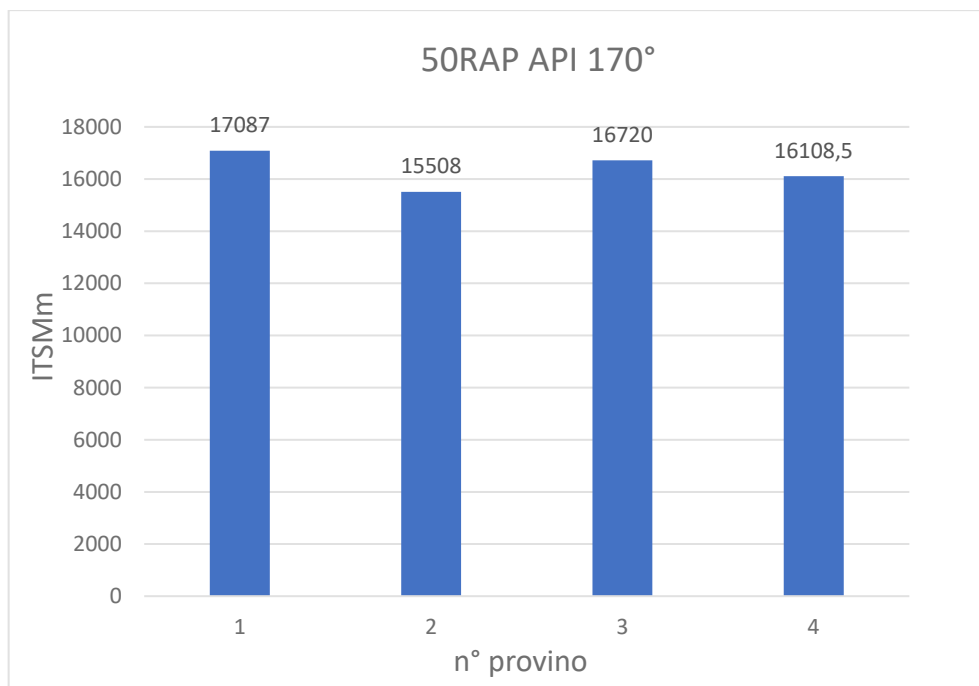


Grafico 4.34: Modulo di elasticità

### 4.3.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° API	1	17,05	0,046738	1,78	59,82
	2	19,96	0,023651	2,15	142,79
	3	19,37	0,020357	2,08	160,50
	4	19,55	0,019721	2,11	168,06

Tabella 4.36

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° API	1	23,66	21,55	45,21	-
	2	16,84	21,00	37,84	18,6
	3	17,34	21,84	39,19	19,9
	4	16,80	23,04	39,84	17,7

Tabella 4.37

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° API	1	19,78	0,021371	2,11	155,09
	2	18,68	0,018696	1,99	167,20
	3	20,21	0,018742	2,17	181,87
	4	20,15	0,03643	2,12	91,41

Tabella 4.38

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170° API	1	11,59	15,79	27,38	6,8
	2	12,03	19,39	31,42	13,1
	3	11,55	12,68	24,23	4,5
	4	19,45	21,24	40,69	-

Tabella 4.39

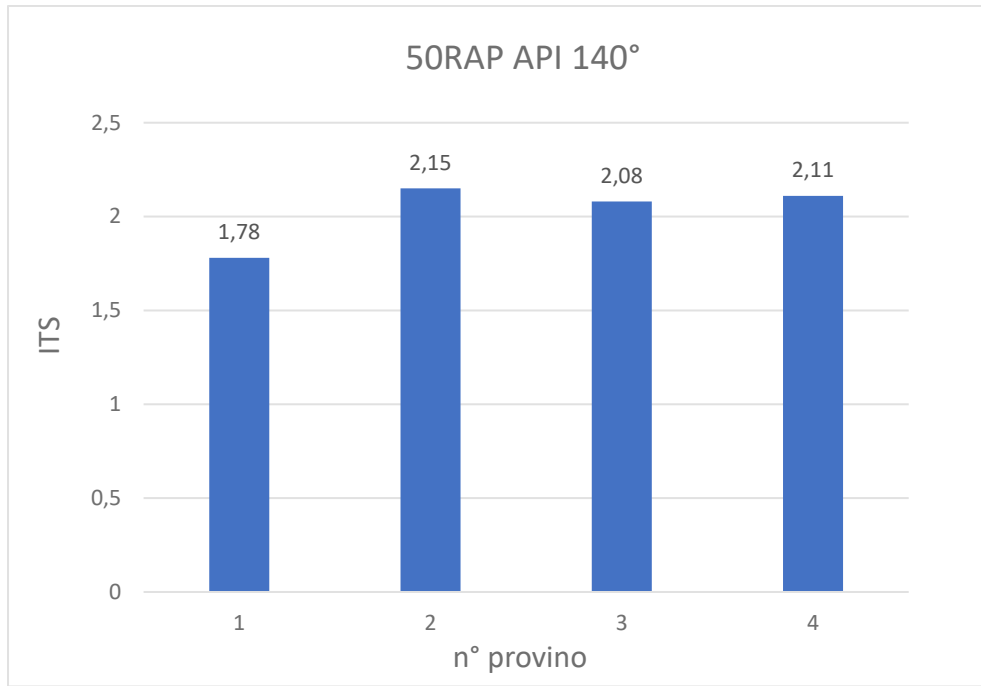


Grafico 4.35: Resistenza a trazione indiretta

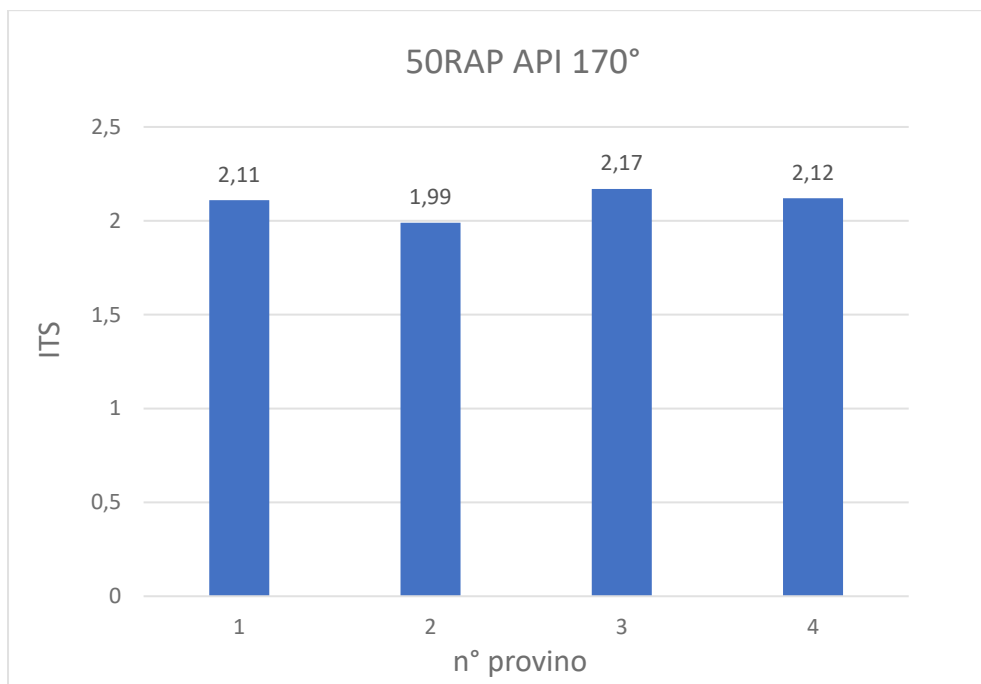


Grafico 4.36: Resistenza a trazione indiretta

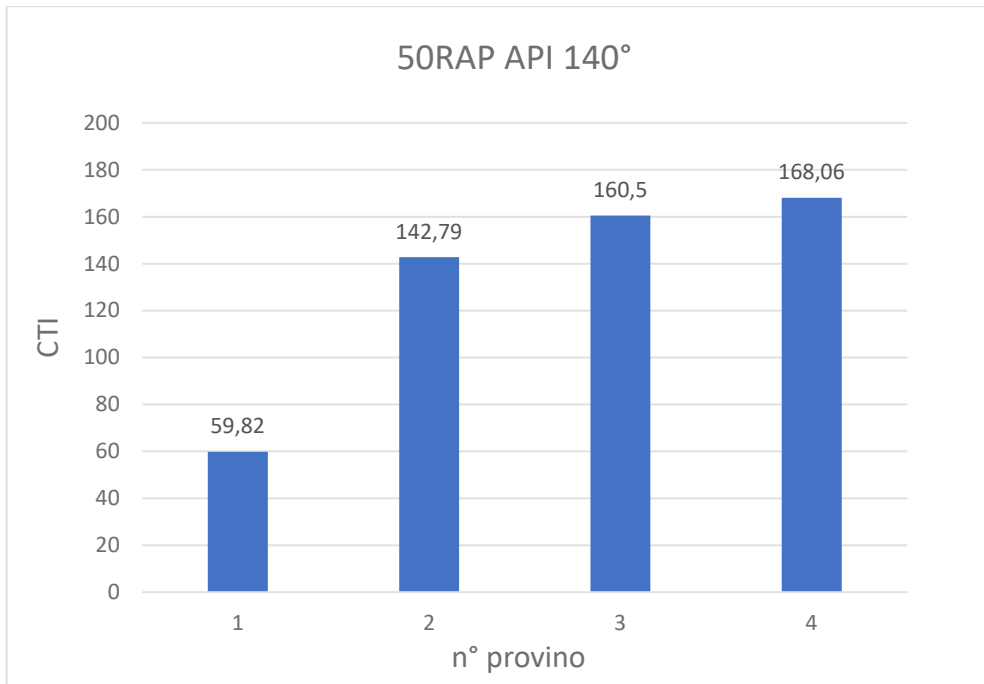


Grafico 4.37: Coefficiente a trazione indiretta

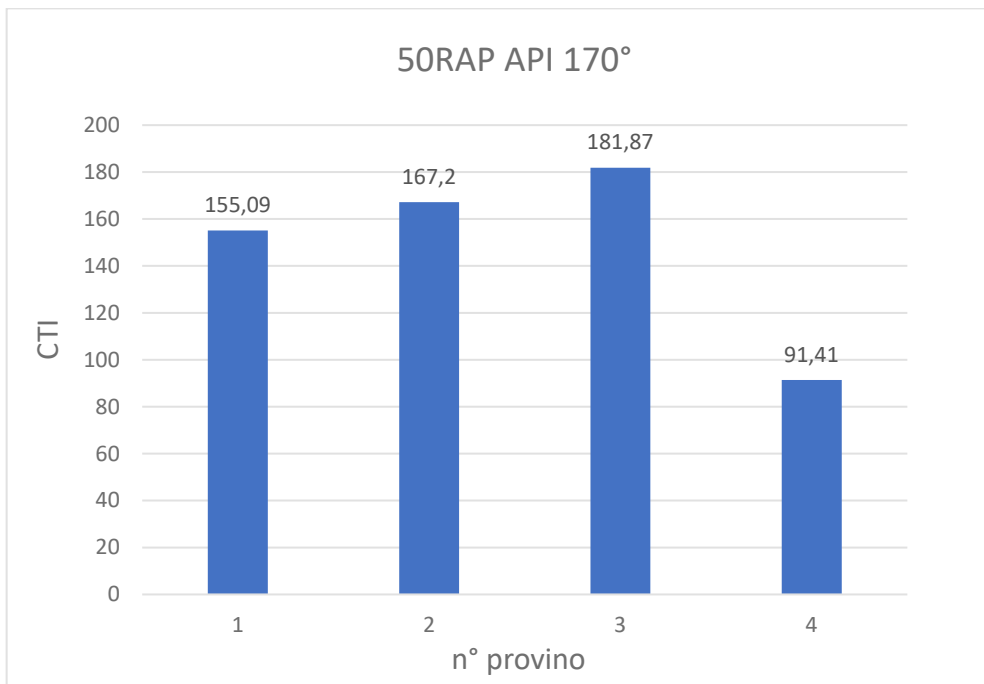


Grafico 4.38: Coefficiente a trazione indiretta

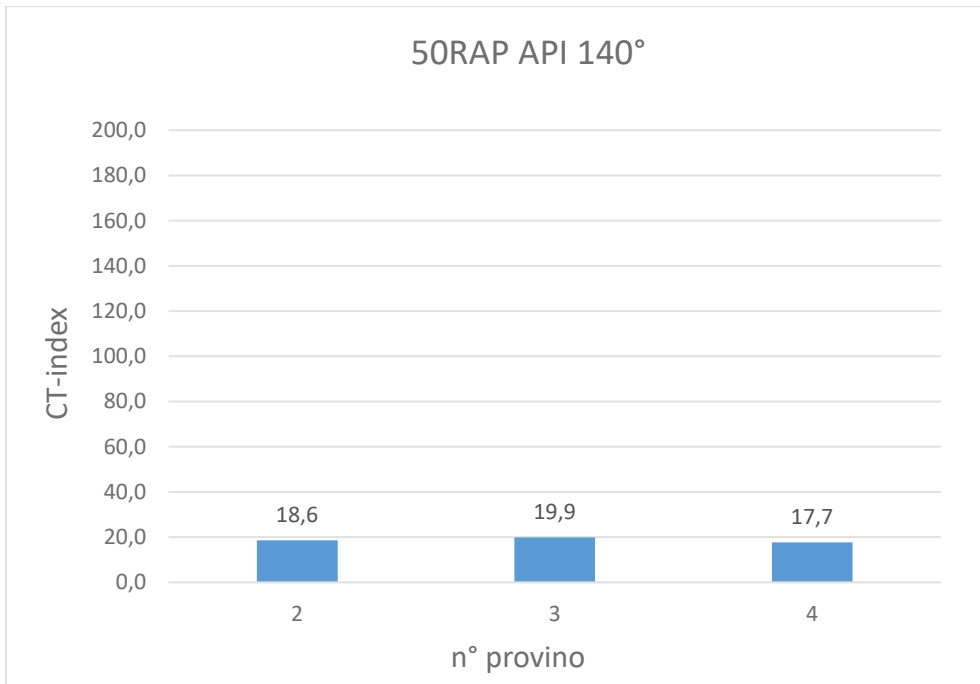


Grafico 4.39: Indice di tolleranza al cracking

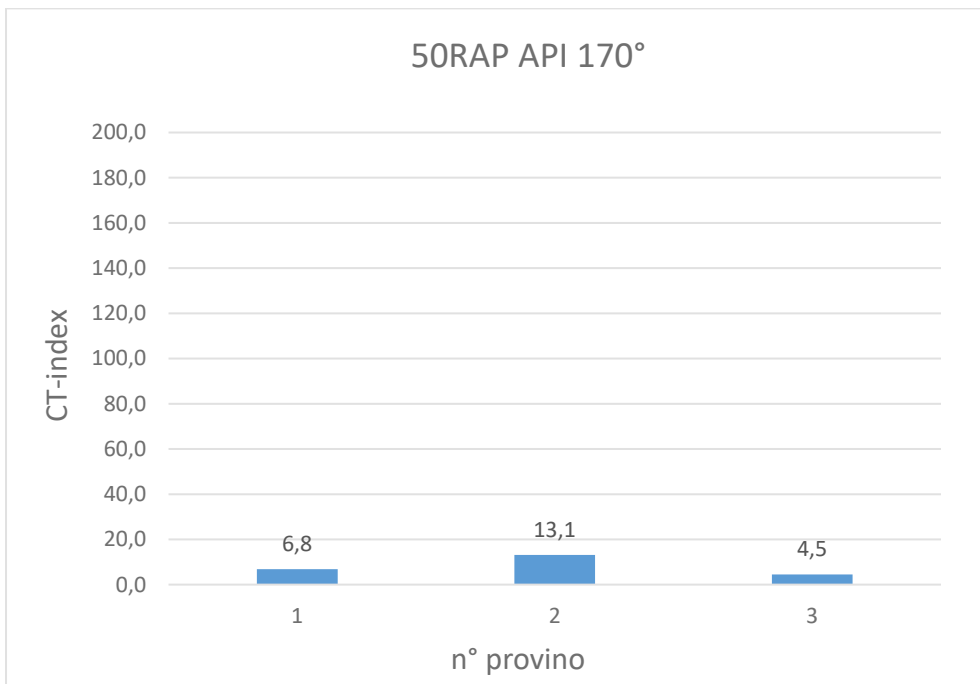


Grafico 4.40: Indice di tolleranza al cracking

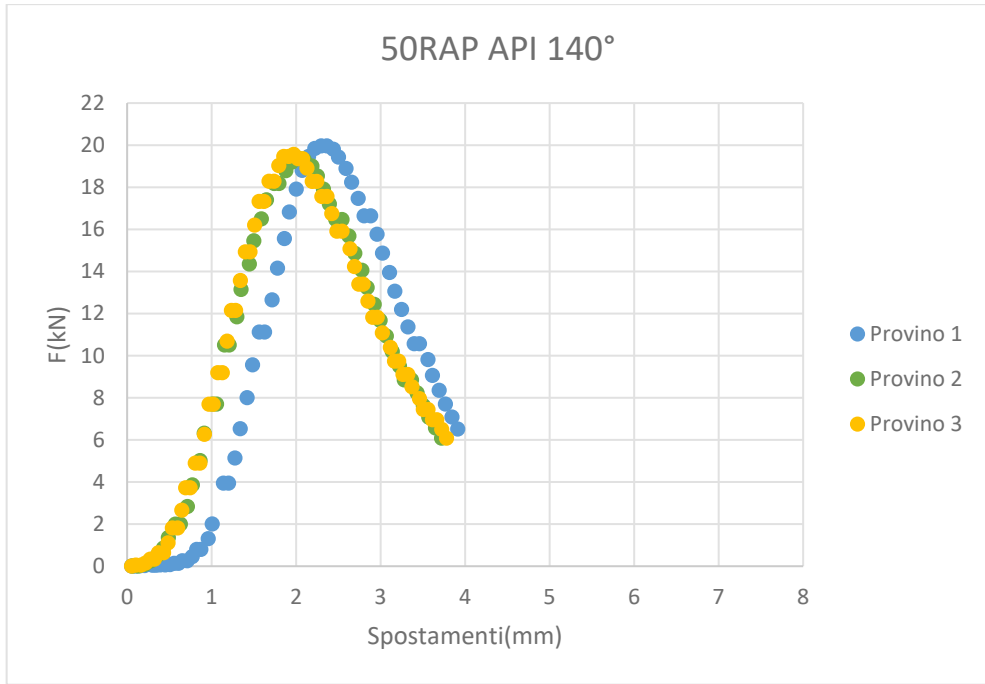


Grafico 4.41: Curva sforzo-deformazione

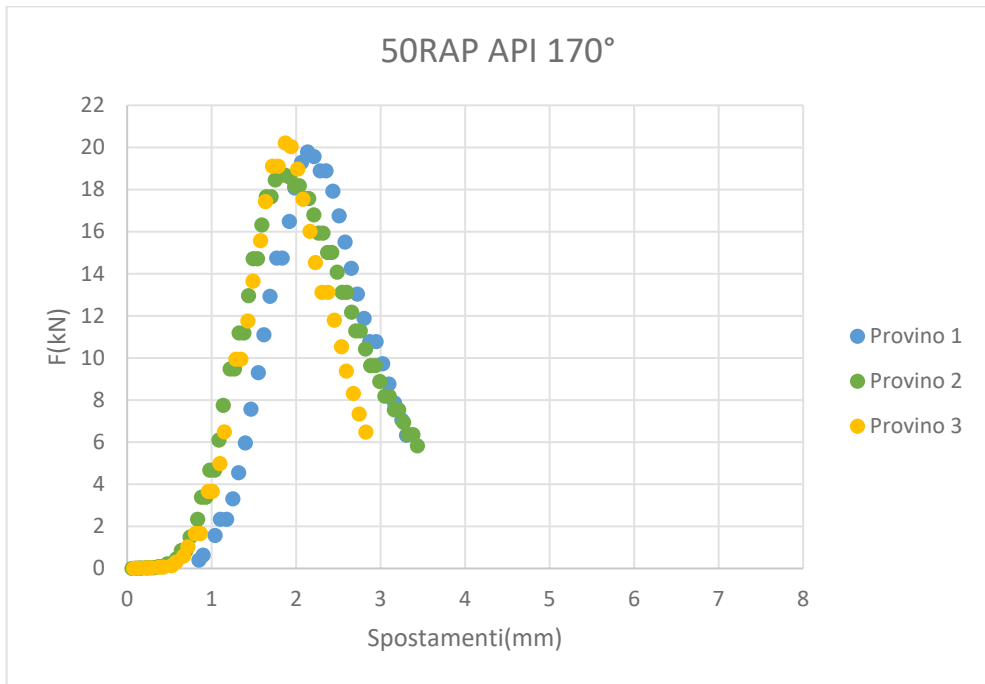


Grafico 4.42: Curva sforzo-deformazione

#### 4.4. 50RAP PRIMARIO

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
11	50	140	PRIMARIO	-	-
12	50	170	PRIMARIO	-	-

Tabella 4.40: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.41: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.42: Ricetta della miscela



#### 4.4.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° PRIMARIO	1	1125	-	-	100	61,2
	2	1144	-	-	100	62,0
	3	1142	-	-	100	62,3
	4	1104	1121	642,1	100	59,8

Tabella 4.43: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° PRIMARIO	1	2,341	2,385	2,471	5,2	3,5
	2	2,349	2,393	2,471	4,9	3,1
	3	2,335	2,378	2,471	5,5	3,8
	4	2,351	2,395	2,471	4,9	3,1

Tabella 4.44: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° PRIMARIO	1	1105	-	-	100	59,6
	2	1103	-	-	100	59,6
	3	1104	-	-	100	59,6
	4	1105	1124	638,4	100	60,2

Tabella 4.45: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° PRIMARIO	1	2,362	2,397	2,471	4,4	3,0
	2	2,357	2,392	2,471	4,6	3,2
	3	2,359	2,395	2,471	4,5	3,1
	4	2,338	2,373	2,471	5,4	3,9

Tabella 4.46: Masse volumiche

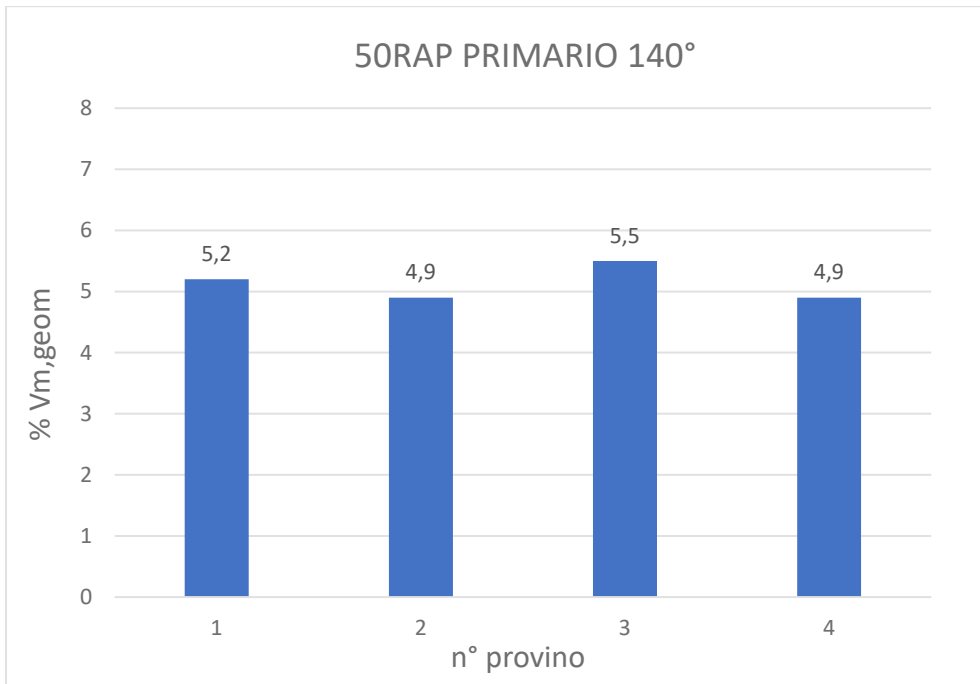


Grafico 4.43: Volume dei vuoti metodo geometrico

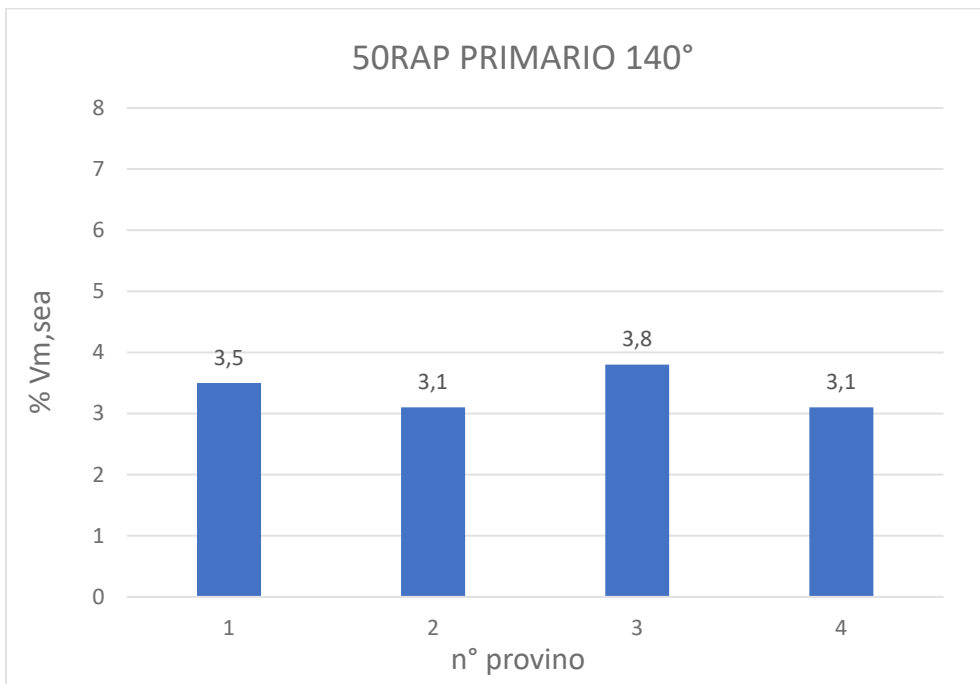


Grafico 4.44: Volume dei vuoti metodo sigillato

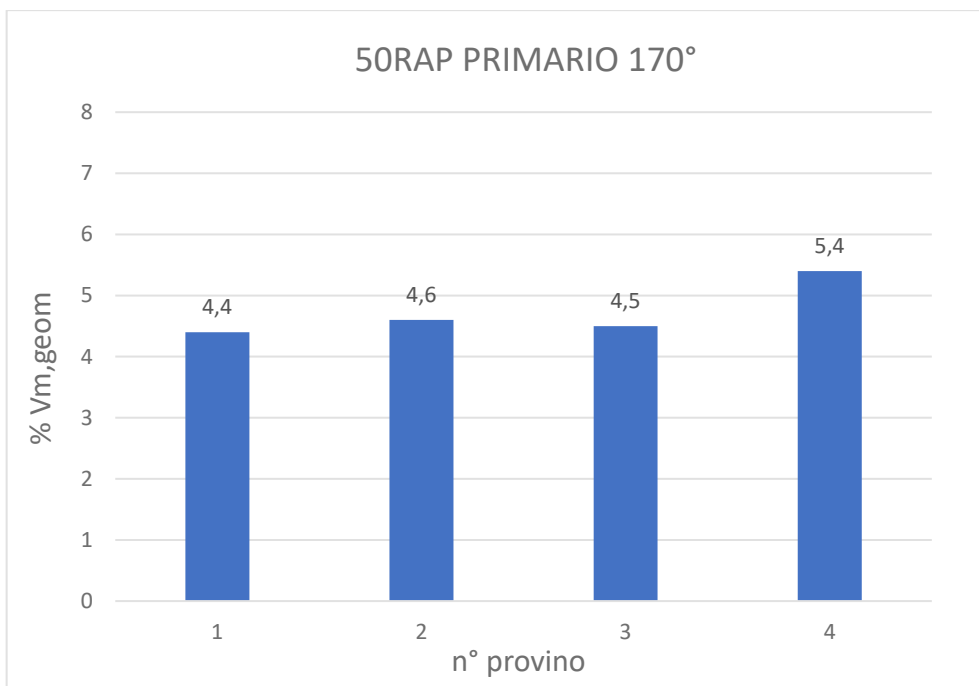


Grafico 4.45: Volume dei vuoti metodo geometrico

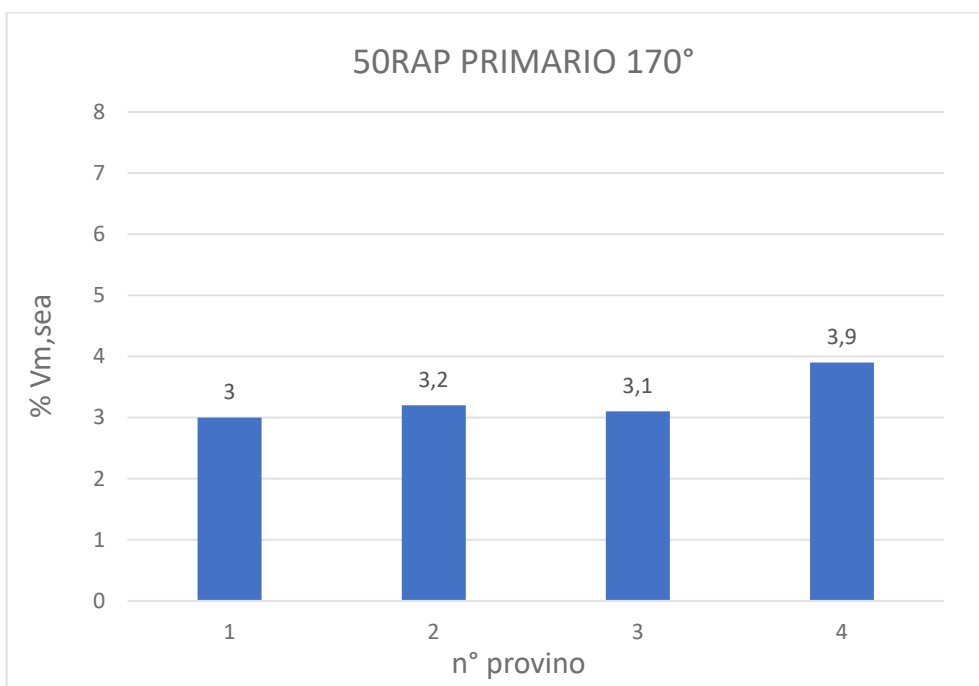


Grafico 4.46: Volume dei vuoti metodo sigillato

#### 4.4.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO	1	8242	8127	8184,5
	2	8985	8778	8881,5
	3	9330	9283	9306,5
	4	9551	8852	9201,5

Tabella 4.47: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO	1	13773	13419	13596
	2	12375	12097	12236
	3	12867	12635	12751
	4	13105	13207	13156

Tabella 4.48: Caratteristiche di elasticità del provino

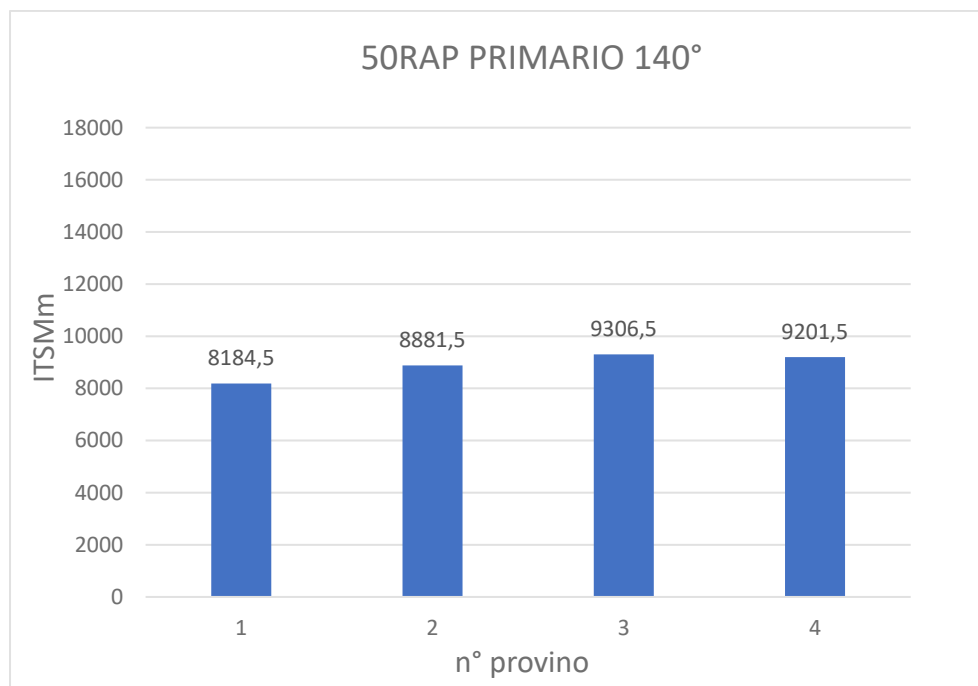


Grafico 4.47: Modulo di elasticità

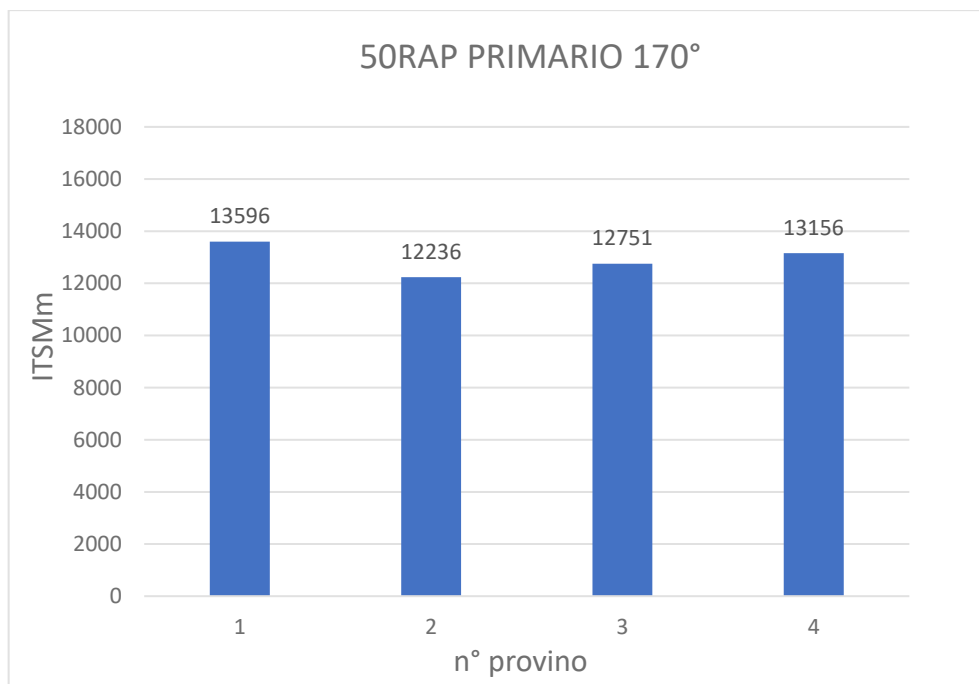


Grafico 4.48: Modulo di elasticità

#### 4.4.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO	1	15,88	0,023037	1,65	112,51
	2	17,74	0,025742	1,82	111,06
	3	18,42	0,022499	1,88	131,25
	4	16,03	0,050099	1,71	53,62

Tabella 4.49

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° PRIMARIO	1	15,84989753	21,74037053	37,59026806	29,8
	2	16,39798729	24,71665416	41,11464145	25,5
	3	18,17211123	27,90560195	46,07771318	33,2
	4	25,05096147	24,66827541	49,71923688	-

Tabella 4.50

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO	1	18,58	0,023006	1,99	135,87
	2	19,97	0,027754	2,13	120,55
	3	18,1	0,02069	1,93	146,53
	4	18,11	0,041402	1,92	72,85

Tabella 4.51

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170° PRIMARIO	1	16,75884765	26,13759446	42,89644211	26,3
	2	18,56221787	21,2612118	39,82342967	20,0
	3	14,59770022	20,12790418	34,7256044	16,3
	4	23,80471162	19,57650014	43,38121176	-

Tabella 4.52

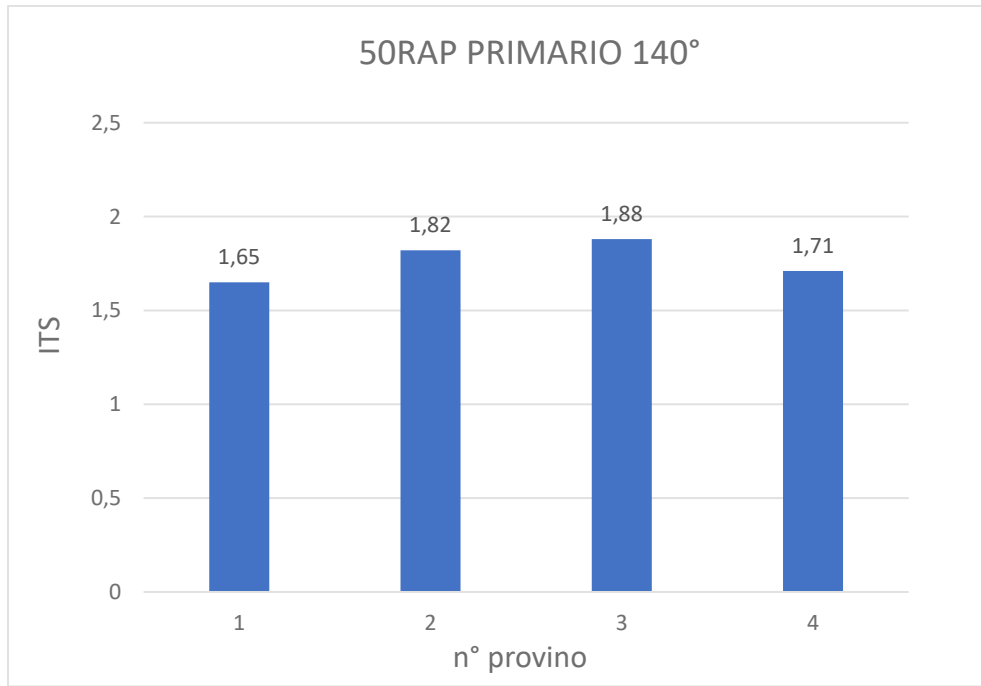


Grafico 4.49: Resistenza a trazione indiretta

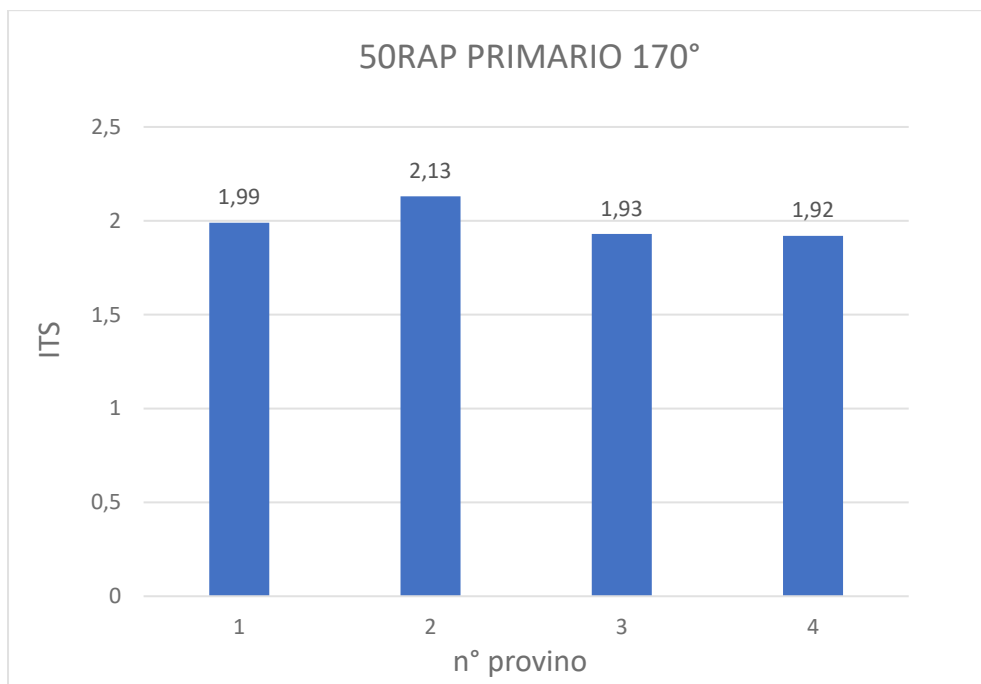


Grafico 4.50: Resistenza a trazione indiretta

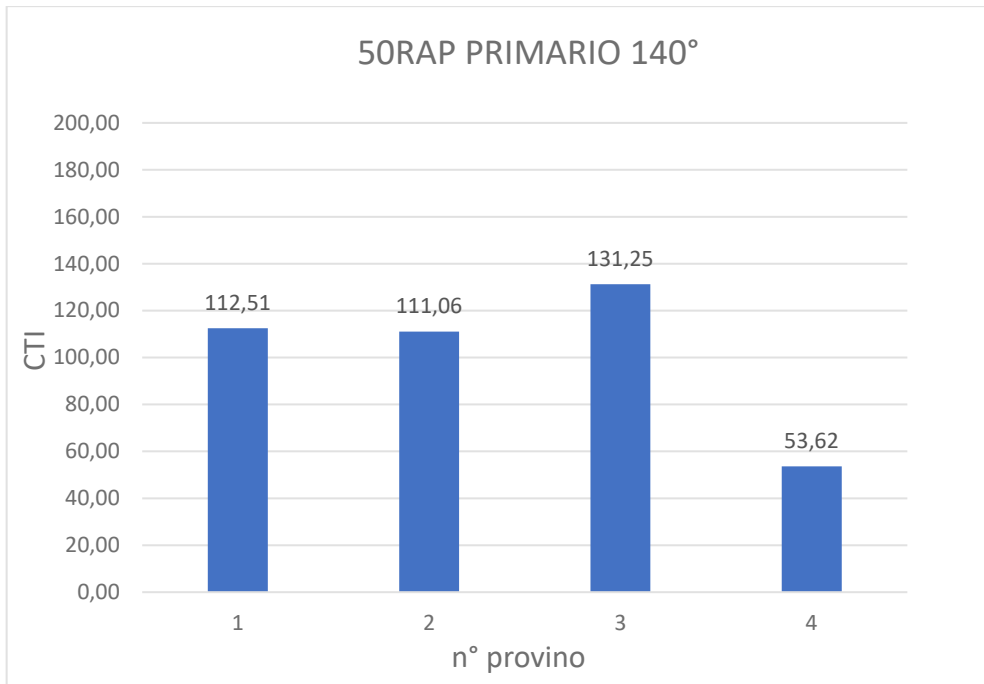


Grafico 4.51: Coefficiente di trazione indiretta

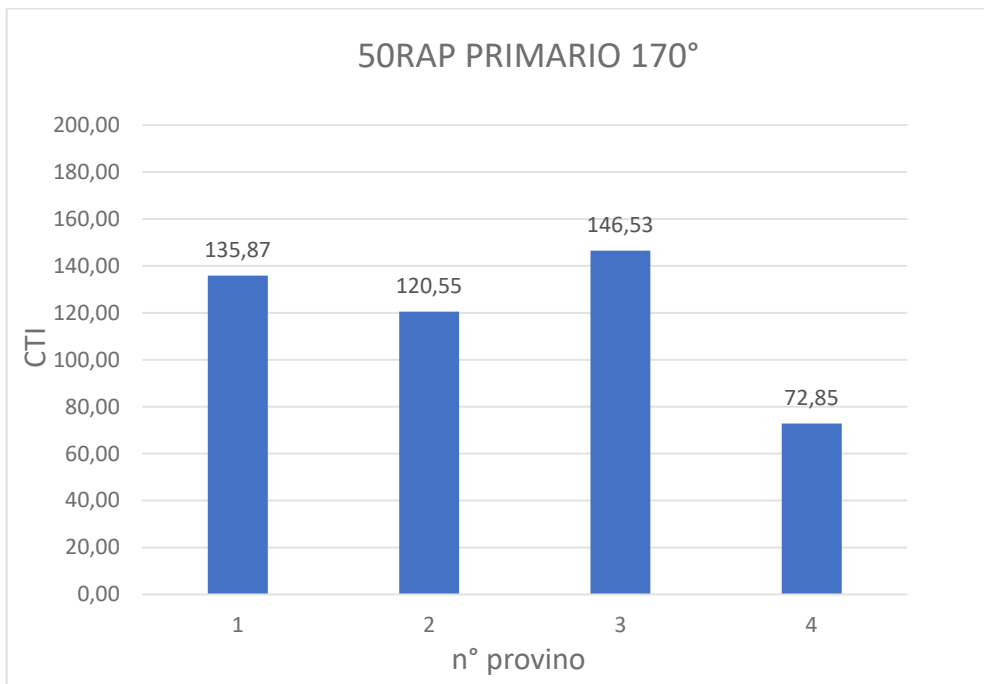


Grafico 4.52: Coefficiente di trazione indiretta

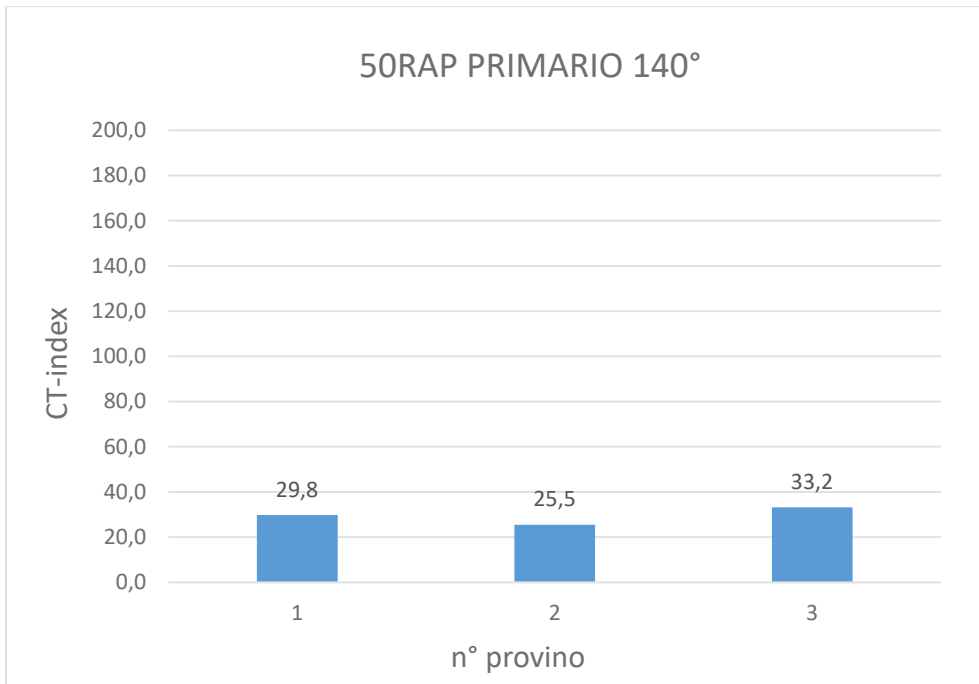


Grafico 4.53: Indice di tolleranza al cracking

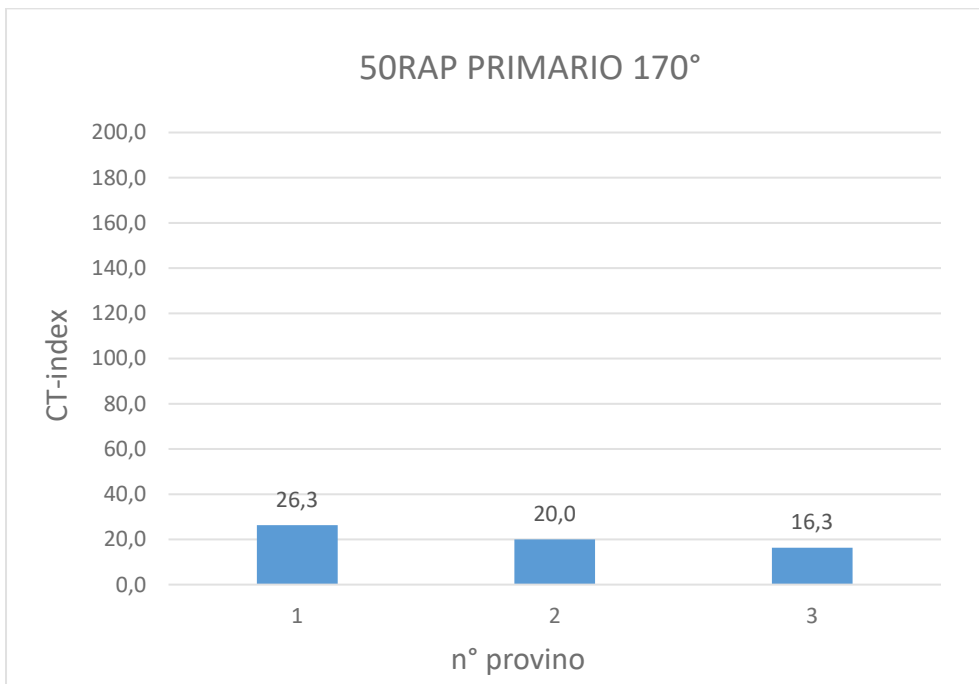


Grafico 4.54: Indice di tolleranza al cracking



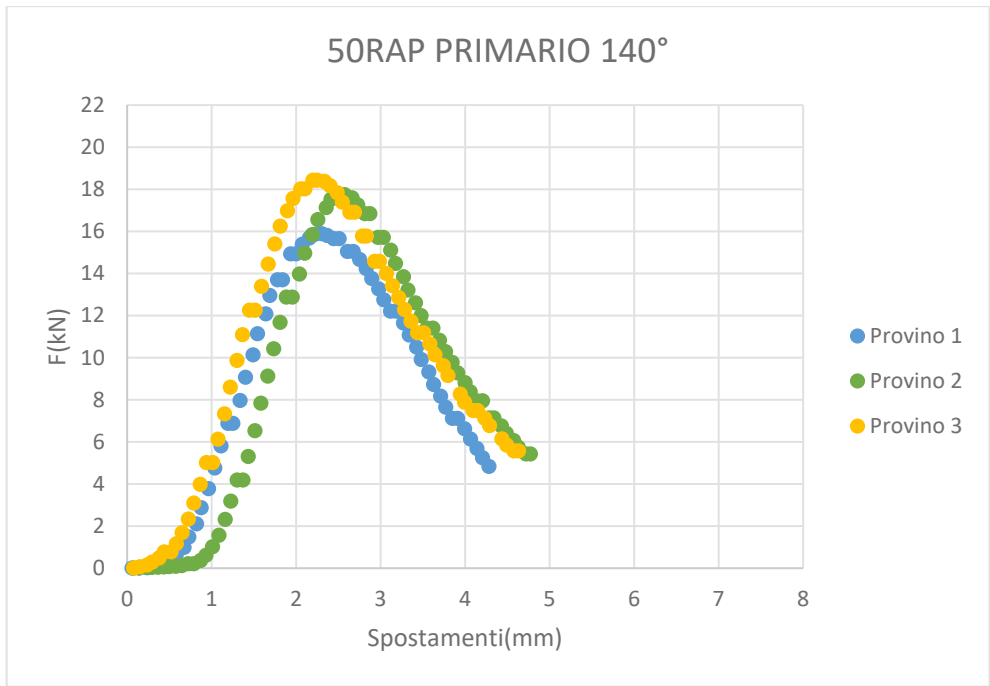


Grafico 4.55: Curva sforzo-deformazione

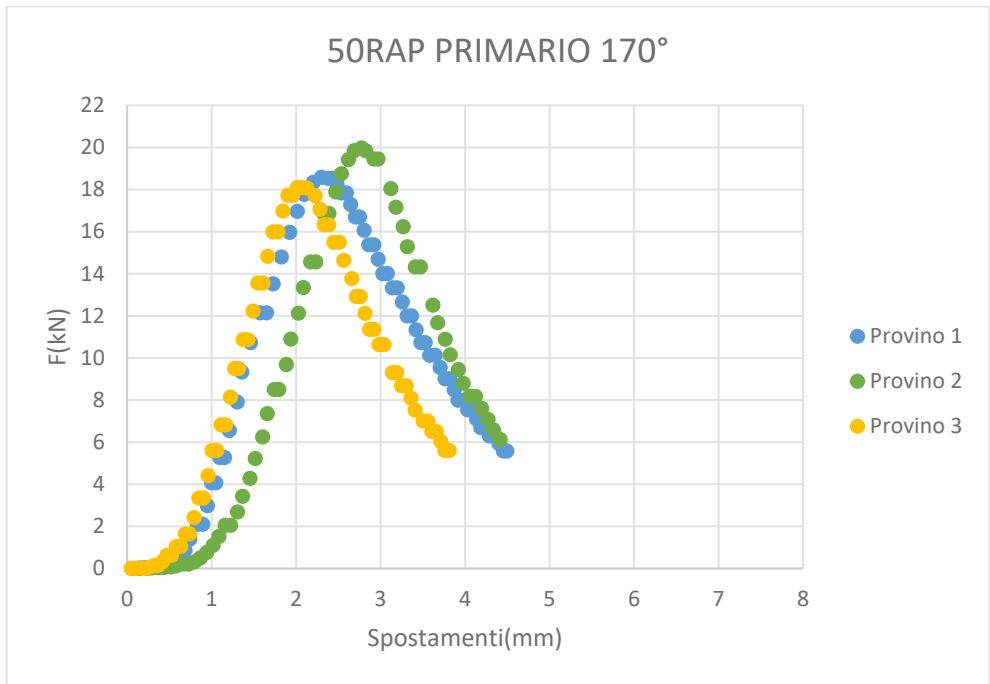


Grafico 4.56: Curva sforzo-deformazione

#### 4.5. 50RAP API CON ACF1000(6%)

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
5	50	140	API	ACF1000	6% bitume RAP
6	50	170	API	ACF1000	6% bitume RAP

Tabella 4.53: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.54: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.55: Ricetta della miscela

#### 4.5.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° API	1	1097	-	-	100	59,2
	2	1095	-	-	100	59,3
ACF1000 6% RAP	3	1102	-	-	100	59,5
	4	974,7	987,9	568,6	100	52,3

Tabella 4.56: Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° API	1	2,359	2,390	2,471	4,5	3,3
	2	2,353	2,384	2,471	4,8	3,5
ACF1000 6% RAP	3	2,359	2,390	2,471	4,5	3,3
	4	2,373	2,405	2,471	3,9	2,7

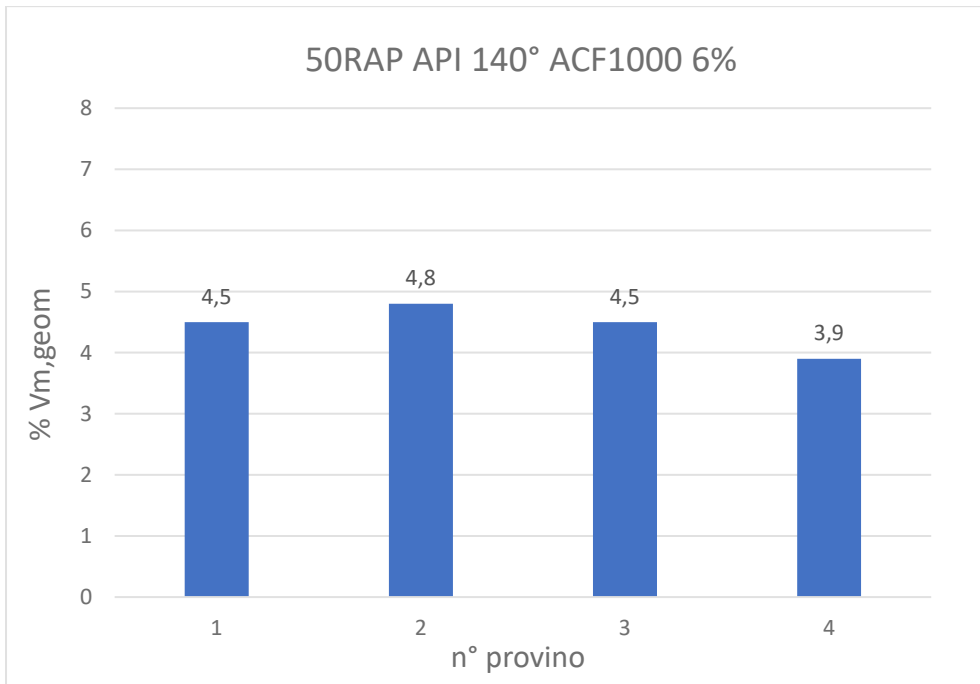
Tabella 4.57: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° API	1	1104	1120	644,7	100	59,5
	2	1098	-	-	100	58,9
ACF1000 6% RAP	3	1102	-	-	100	58,7
	4	1108	-	-	100	58,9

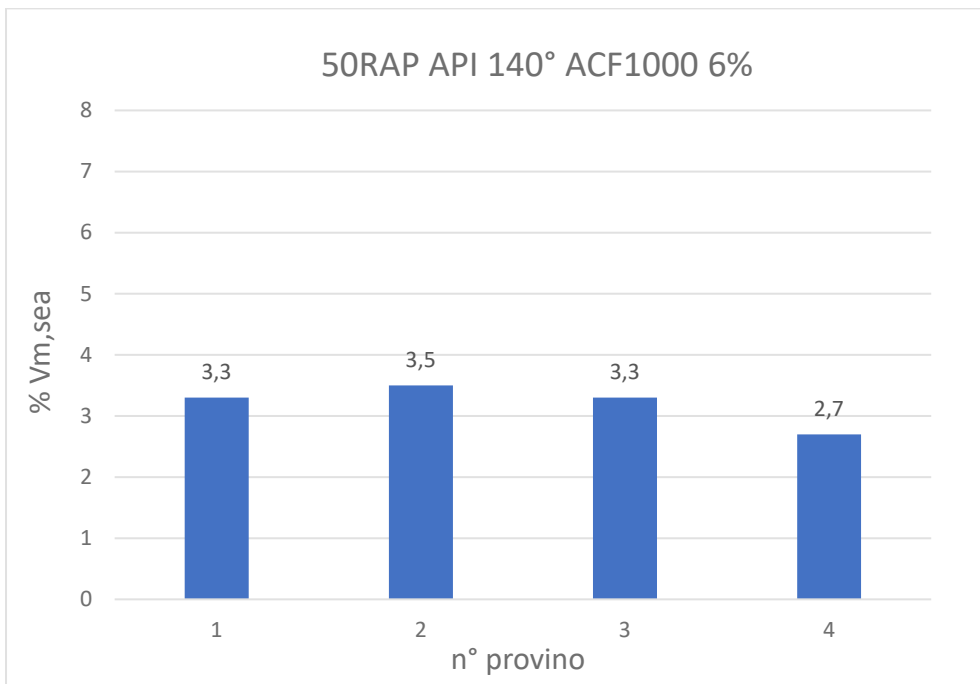
Tabella 4.58: Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° API	1	2,364	2,408	2,471	4,3	2,6
	2	2,374	2,417	2,471	3,9	2,2
ACF1000 6% RAP	3	2,389	2,433	2,471	3,3	1,5
	4	2,393	2,437	2,471	3,2	1,4

Tabella 4.59: Masse volumiche



*Grafico 4.57: Volume dei vuoti metodo geometrico*



*Grafico 4.58: Volume dei vuoti metodo sigillato*

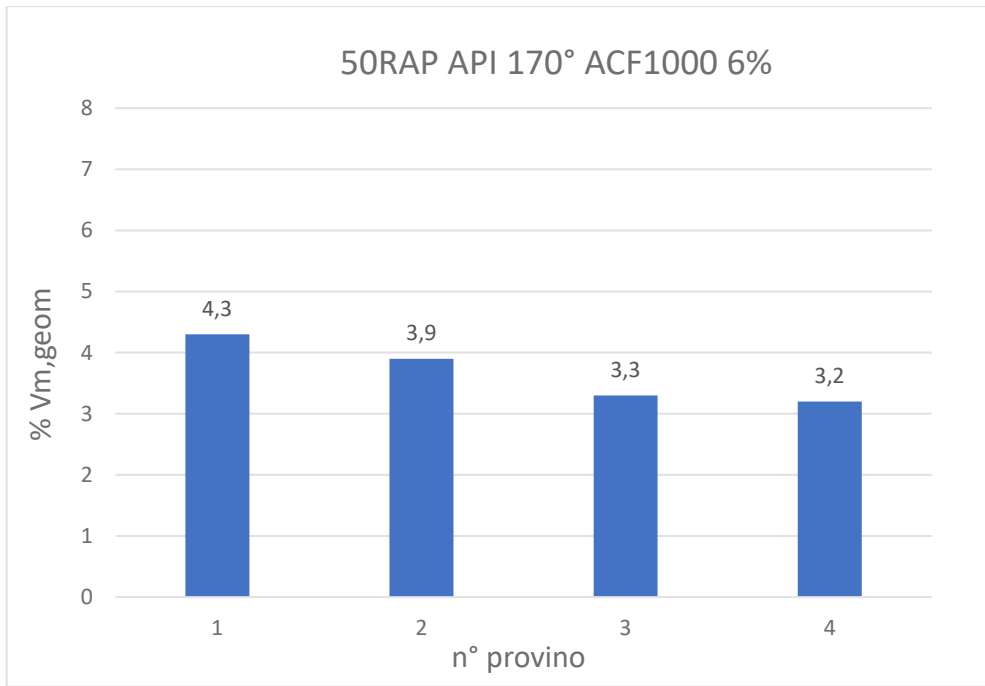


Grafico 4.59: Volume dei vuoti metodo geometrico

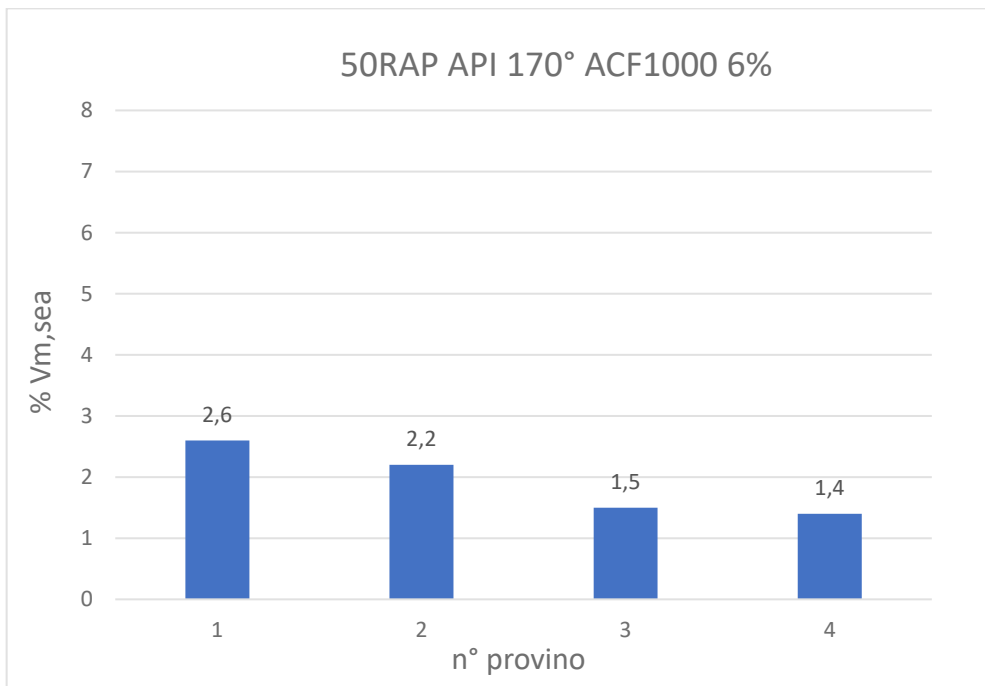


Grafico 4.60: Volume dei vuoti metodo sigillato

#### 4.5.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° API ACF1000 6% RAP	1	8960	8873	8916,5
	2	8988	8479	8733,5
	3	8523	8185	8354
	4	9720	9274	9497

Tabella 4.60: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° API ACF1000 6% RAP	1	14537	14352	14444,5
	2	15227	15281	15254
	3	12243	12237	12240
	4	12443	12412	12427,5

Tabella 4.61: Caratteristiche di elasticità del provino

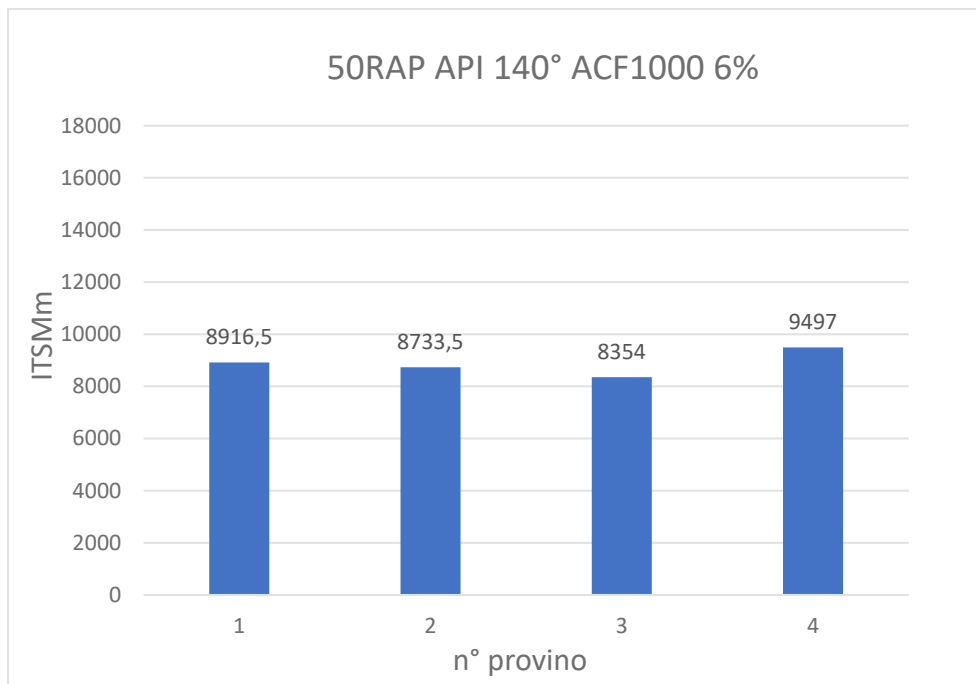


Grafico 4.61: Modulo di elasticità

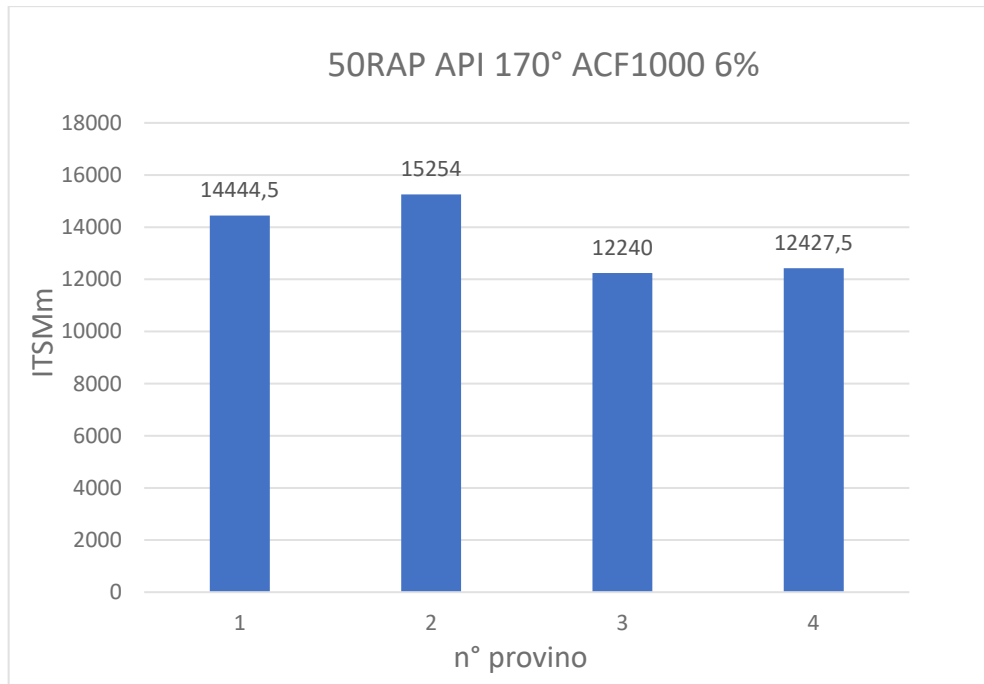


Grafico 4.62: Modulo di elasticità

#### 4.5.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° API ACF1000 6% RAP	1	15,42	0,024019	1,66	108,56
	2	15,61	0,021138	1,68	124,84
	3	15,57	0,020972	1,67	125,08
	4	13,14	0,038099	1,6	65,97

Tabella 4.62

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° API ACF1000 6% RAP	1	15,71	22,39	38,10	34,6
	2	16,56	22,14	38,70	29,1
	3	15,21	20,15	35,36	25,6
	4	17,15	20,76	37,91	-

Tabella 4.63

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° API ACF1000 6% RAP	1	17,56	0,033438	1,88	88,32
	2	18,00	0,020428	1,95	149,94
	3	17,14	0,020499	1,86	142,53
	4	17,28	0,020232	1,87	145,19

Tabella 4.64

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170° API ACF1000 6% RAP	1	17,68	21,07	38,76	-
	2	13,15	18,65	31,81	14,6
	3	14,04	16,44	30,48	14,1
	4	13,70	18,51	32,21	17,0

Tabella 4.65

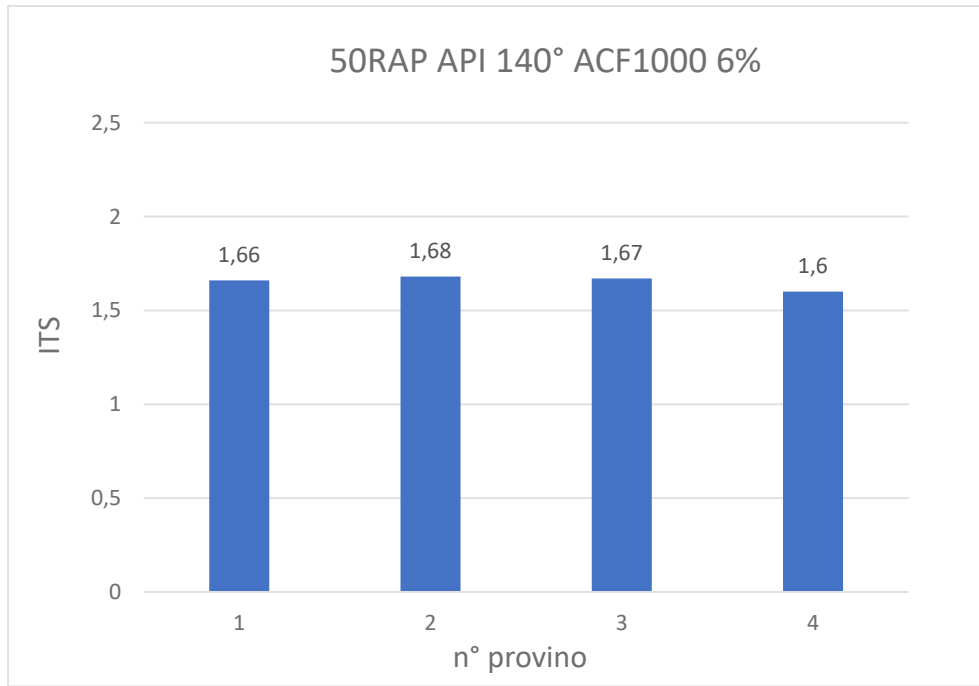


Grafico 4.63: Resistenza a trazione indiretta

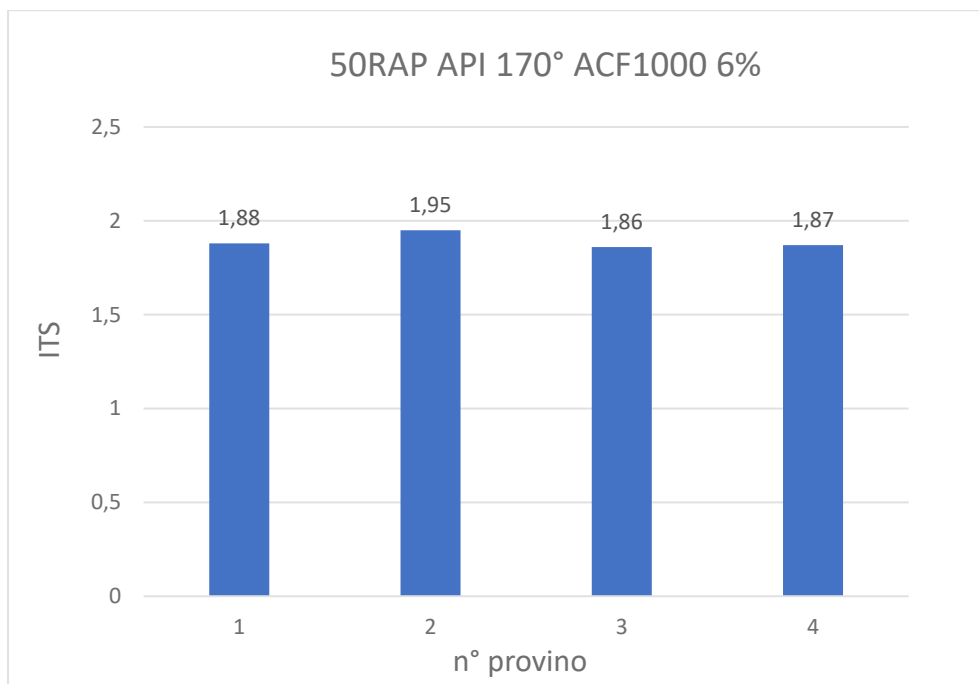
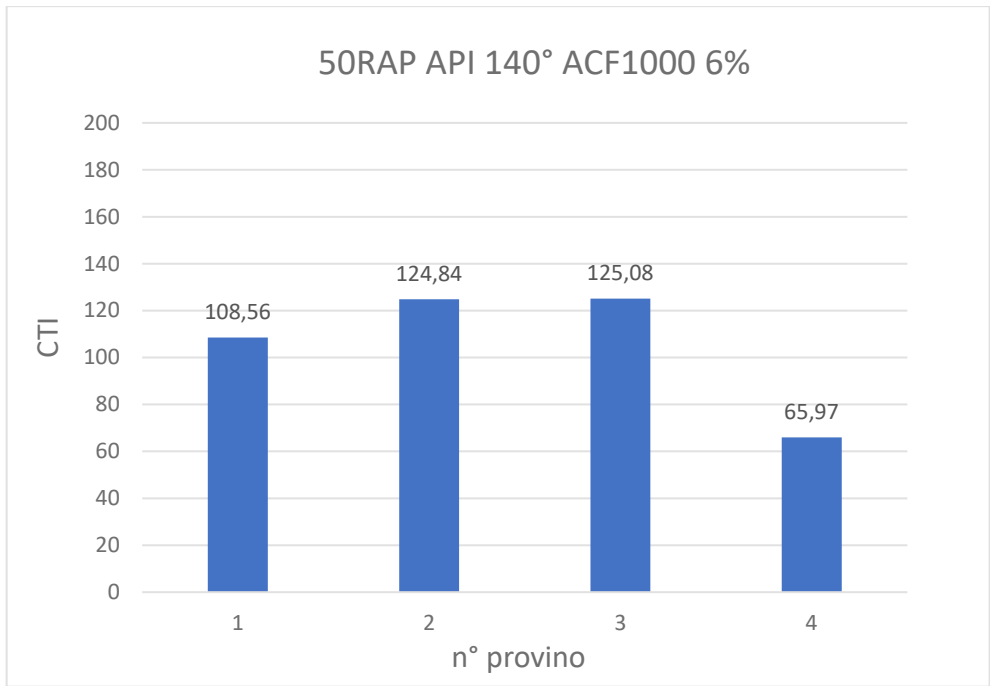
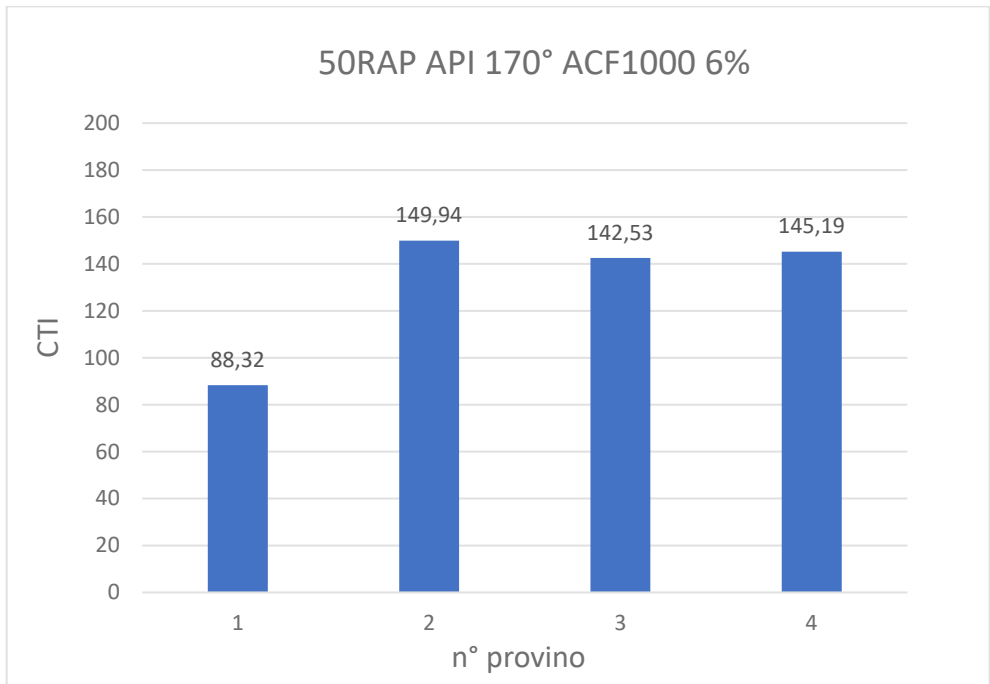


Grafico 4.64: Resistenza a trazione indiretta

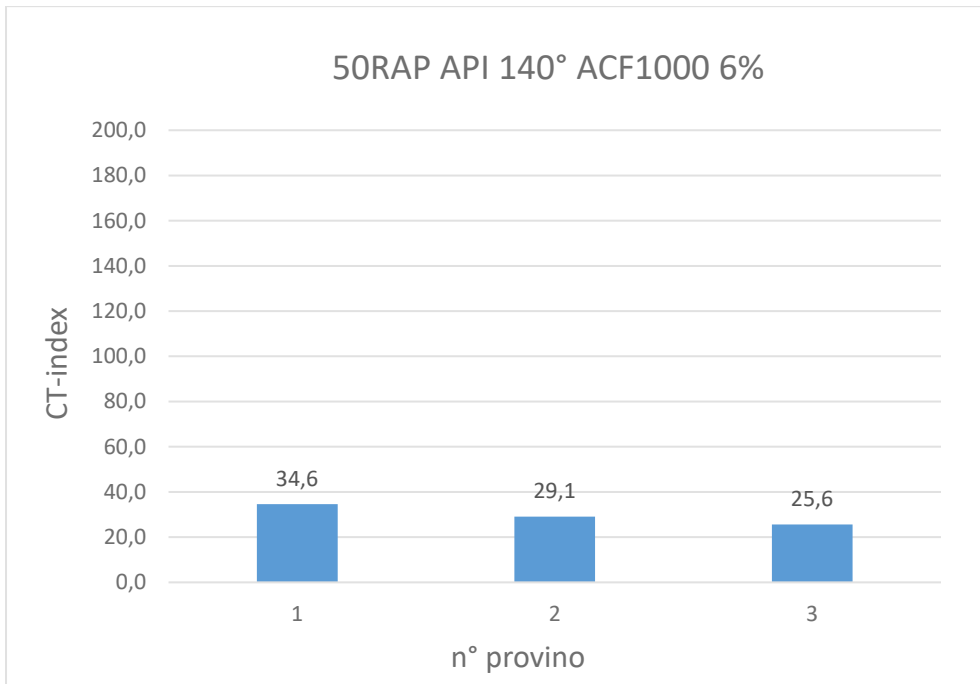




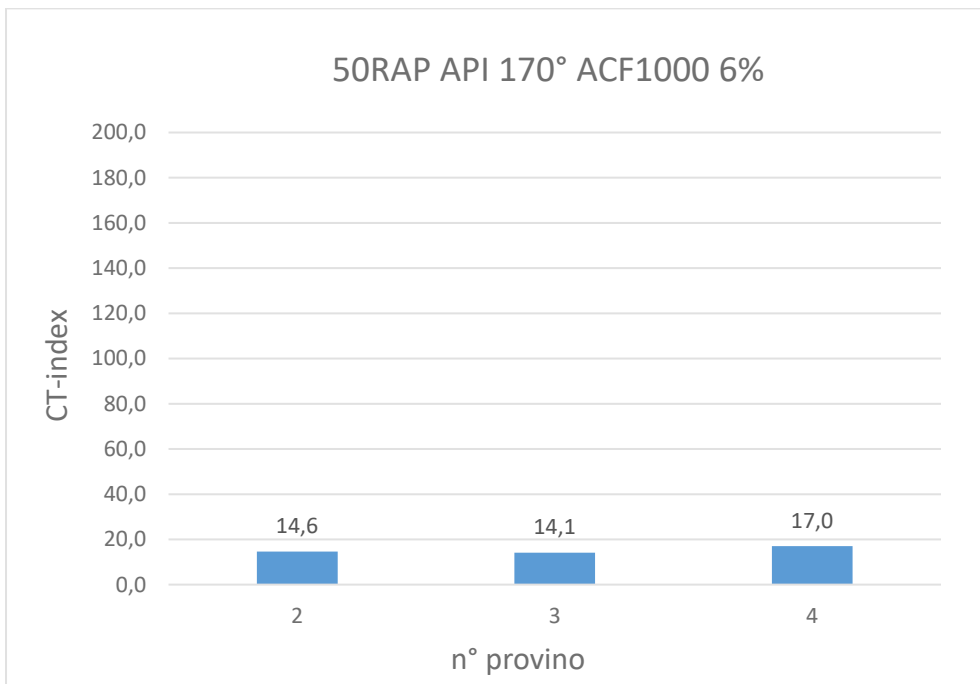
*Grafico 4.65: Coefficiente di trazione indiretta*



*Grafico 4.66: Coefficiente di trazione indiretta*



*Grafico 4.67: Indice di tolleranza al cracking*



*Grafico 4.68: Indice di tolleranza al cracking*

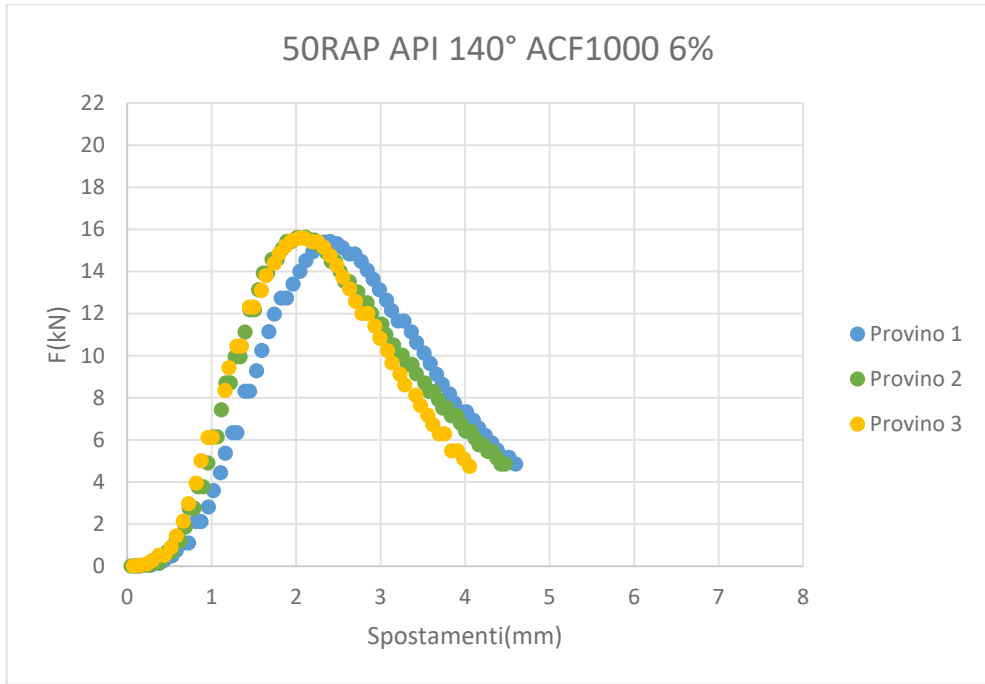


Grafico 4.69: Curva sforzo-deformazione

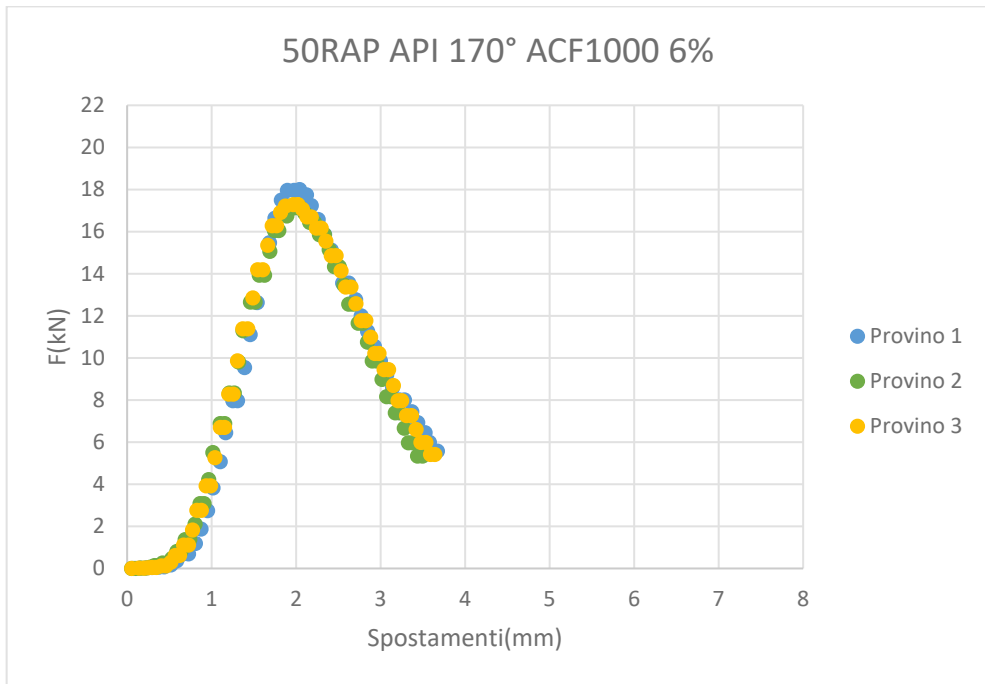


Grafico 4.70: Curva sforzo-deformazione

#### 4.6. 50RAP PRIMARIO CON ACF1000(6%)

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
13	50	140	PRIMARIO	ACF1000	6% bitume RAP
14	50	170	PRIMARIO	ACF1000	6% bitume RAP

Tabella 4.66: Tipologia di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.67: % di bitume utilizzata

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.68: Ricetta della miscela

#### 4.6.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	1097	1116	631,9	100	60,5
	2	1104	-	-	100	59,2
	3	1103	-	-	100	60,0
	4	1098	-	-	100	59,4

Tabella 4.69: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	2,308	2,366	2,471	6,6	4,2
	2	2,375	2,435	2,471	3,9	1,4
	3	2,342	2,402	2,471	5,2	2,8
	4	2,356	2,415	2,471	4,7	2,2

Tabella 4.70: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	1097	1116	635,3	100	60,0
	2	1095	-	-	100	58,7
	3	1094	-	-	100	59,3
	4	1098	-	-	100	58,6

Tabella 4.71: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	2,329	2,382	2,471	5,7	3,6
	2	2,375	2,429	2,471	3,9	1,7
	3	2,348	2,402	2,471	5,0	2,8
	4	2,384	2,438	2,471	3,5	1,3

Tabella 4.72: Masse volumiche

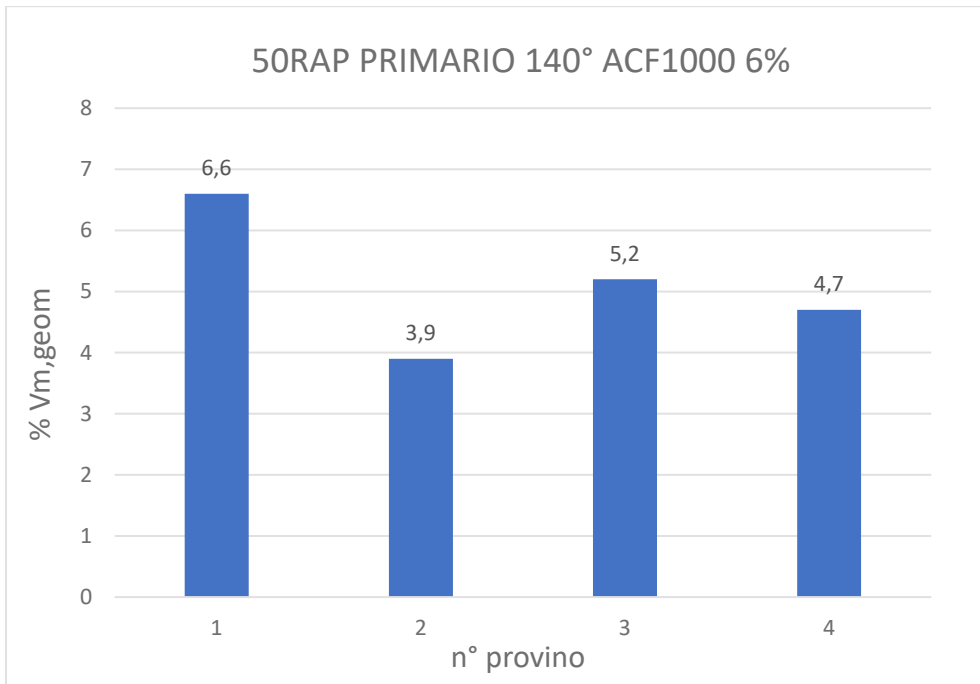


Grafico 4.71: Volume dei vuoti metodo geometrico

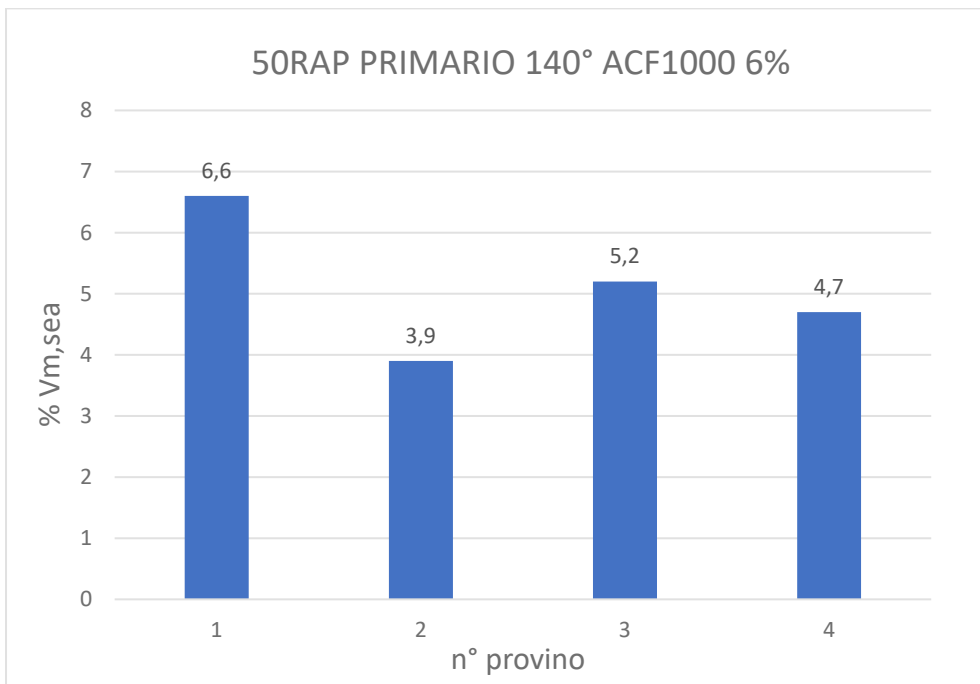
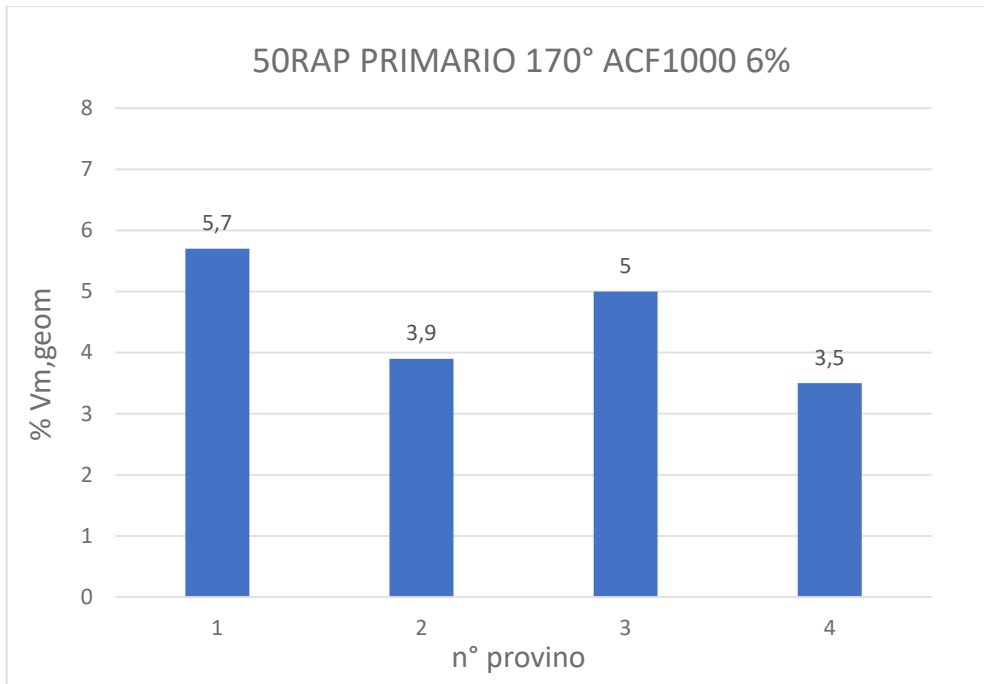
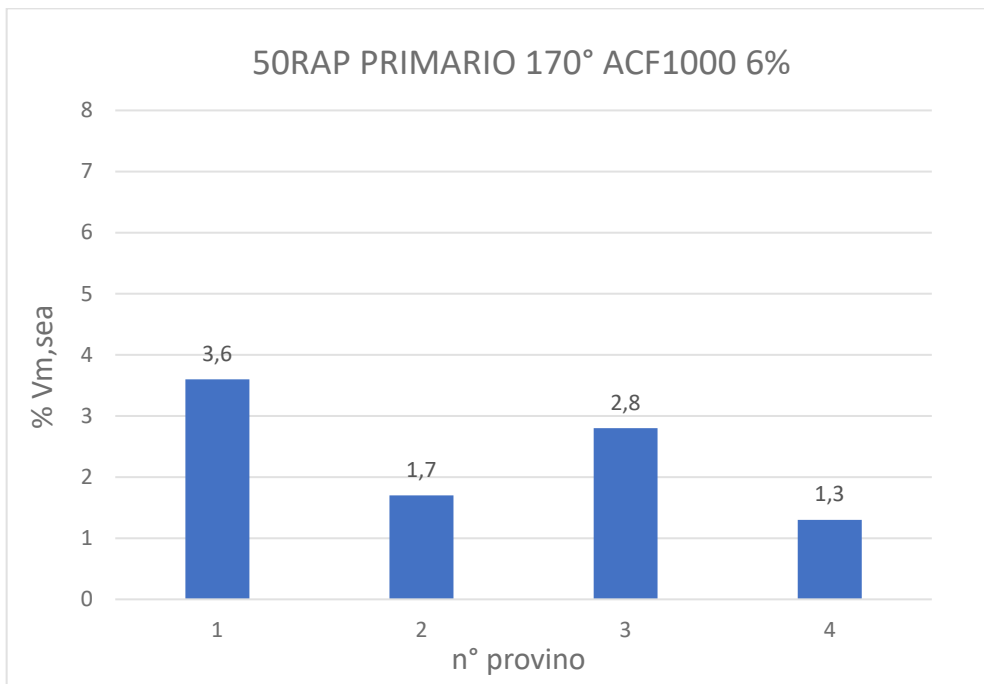


Grafico 4.72: Volume dei vuoti metodo sigillato



*Grafico 4.73: Volume dei vuoti metodo geometrico*



*Grafico 4.74: Volume dei vuoti metodo sigillato*

#### 4.6.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	7318	6789	7053,5
	2	9083	8344	8713,5
	3	8428	8087	8257,5
	4	7423	6892	7157,5

Tabella 4.73: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	10495	10429	10462
	2	11727	11124	11425,5
	3	10919	10652	10785,5
	4	10899	10634	10766,5

Tabella 4.74: Caratteristiche di elasticità del provino

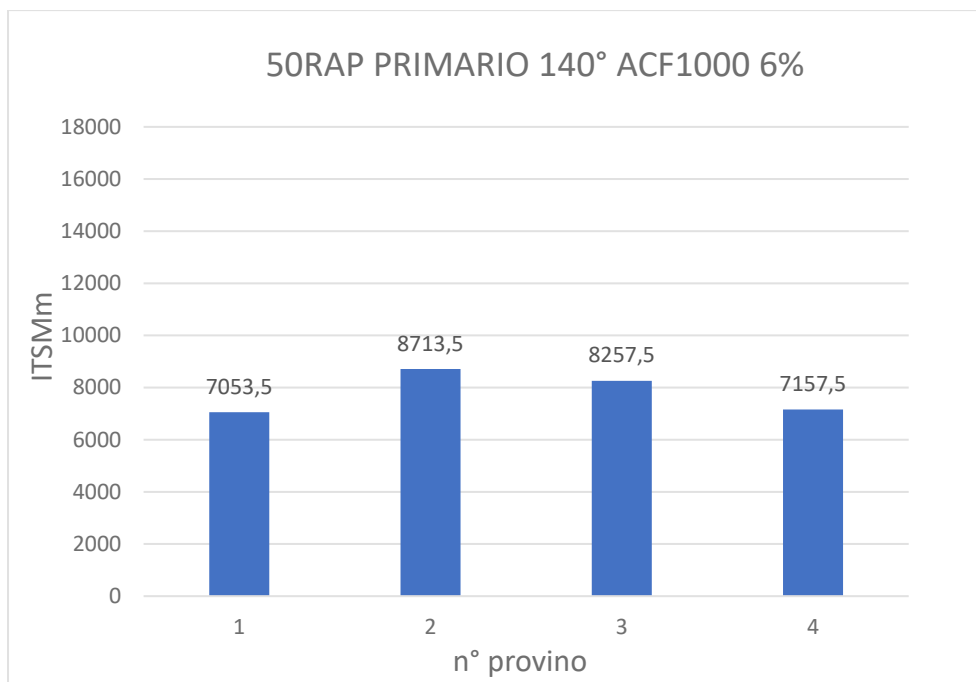


Grafico 4.75: Modulo di elasticità



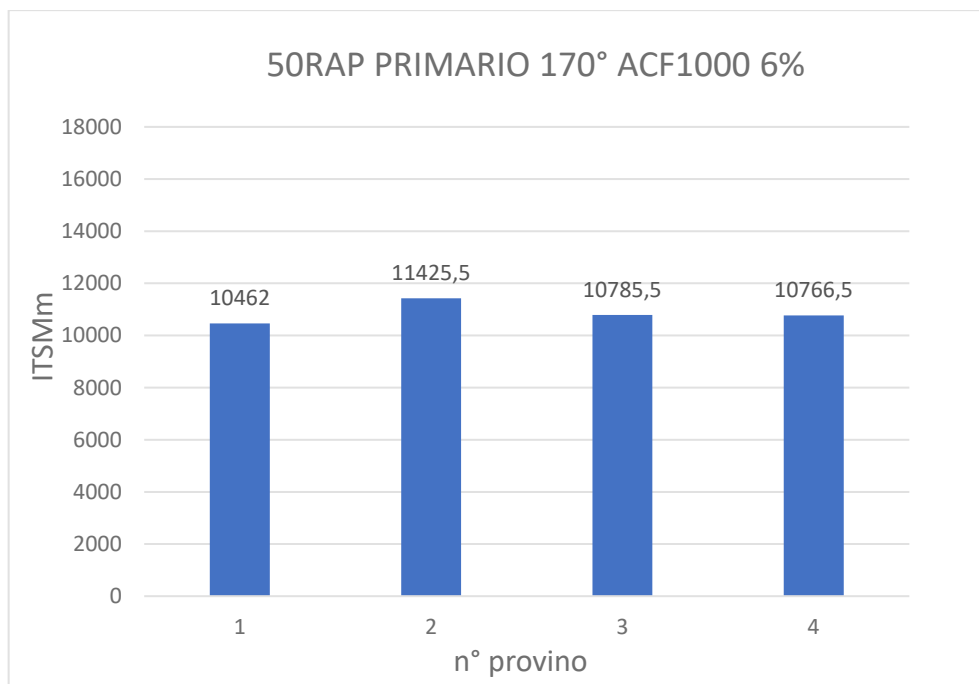


Grafico 4.76: Modulo di elasticità

#### 4.6.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	12,66	0,039217	1,33	53,27
	2	14,78	0,022415	1,59	111,42
	3	14,09	0,029437	1,5	80,04
	4	14,66	0,034938	1,57	70,59

Tabella 4.75

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	18,37039184	24,80932259	43,17971443	-
	2	14,93507831	24,67850991	39,61358822	37,3
	3	18,29699307	24,08573081	42,38272388	57,1
	4	17,65287954	29,99555159	47,64843113	83,6

Tabella 4.76

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	15,98	0,045568	1,7	58,60
	2	17,51	0,0219	1,9	136,28
	3	15,15	0,021969	1,63	116,55
	4	16,78	0,021576	1,82	132,50

Tabella 4.77

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1	22,25937518	21,92441585	44,18379103	-
	2	14,49012434	21,42468334	35,91480768	17,0
	3	15,07969541	21,82552576	36,90522117	31,7
	4	15,18294746	21,38531581	36,56826327	25,7

Tabella 4.78

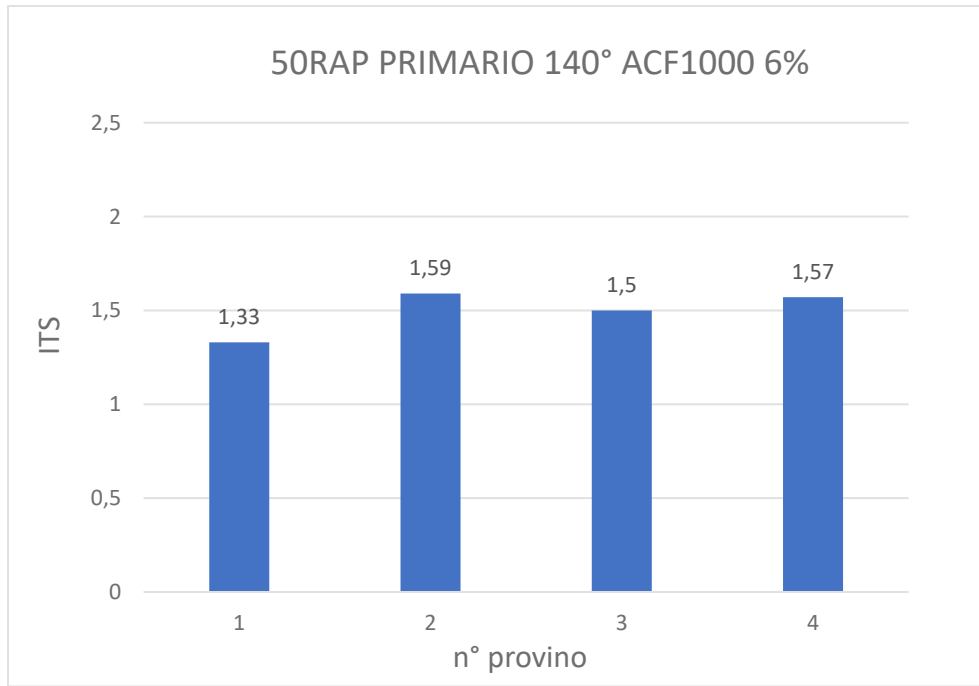


Grafico 4.77: Resistenza a trazione indiretta

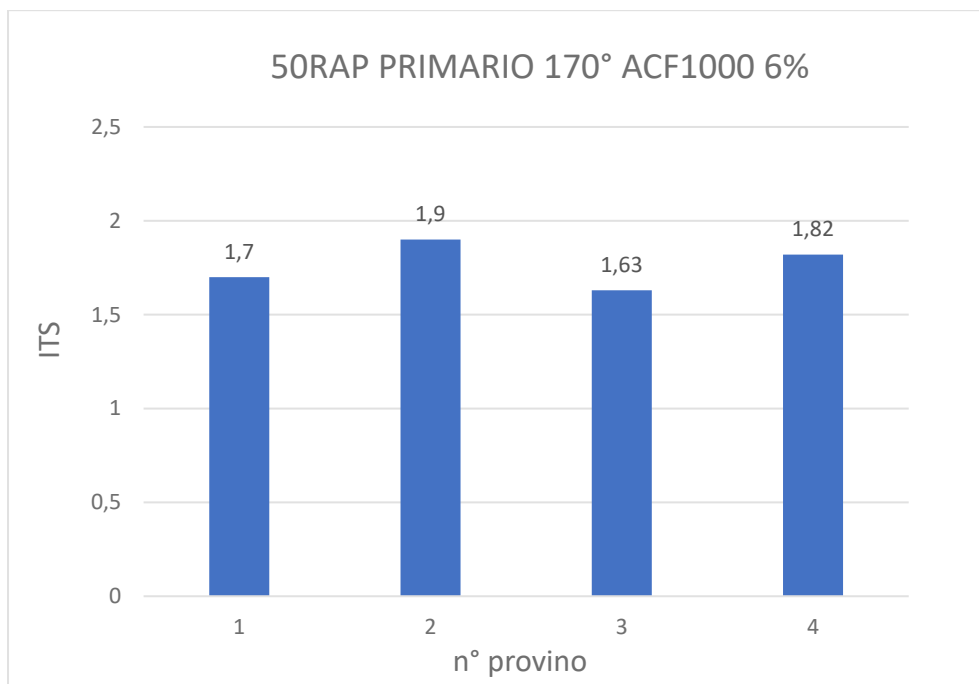


Grafico 4.78: Resistenza a trazione indiretta

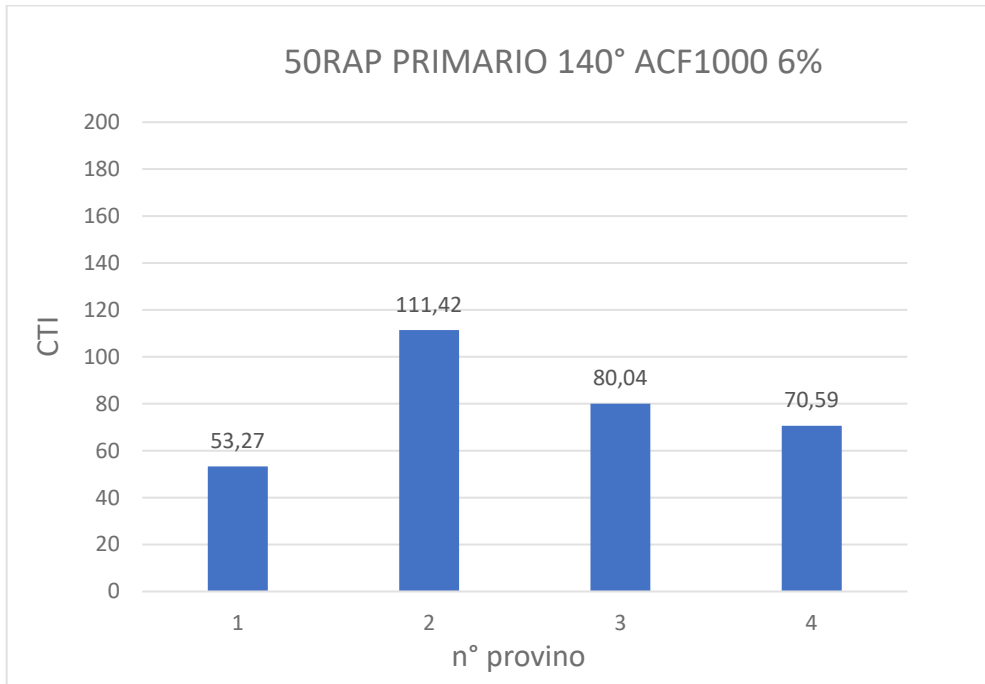


Grafico 4.79: Coefficiente di trazione indiretta

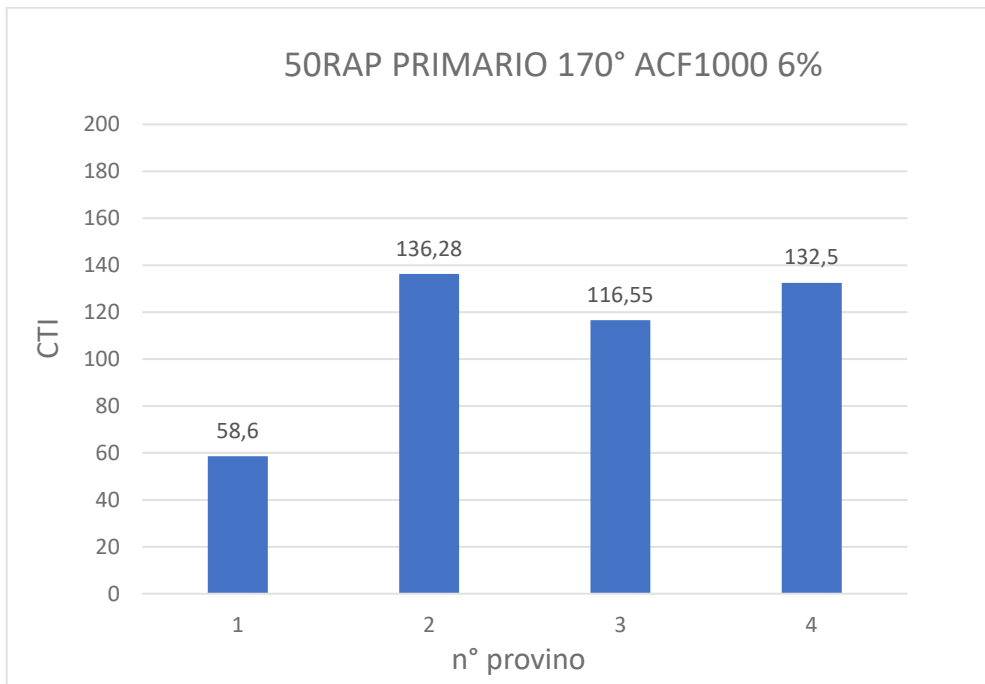
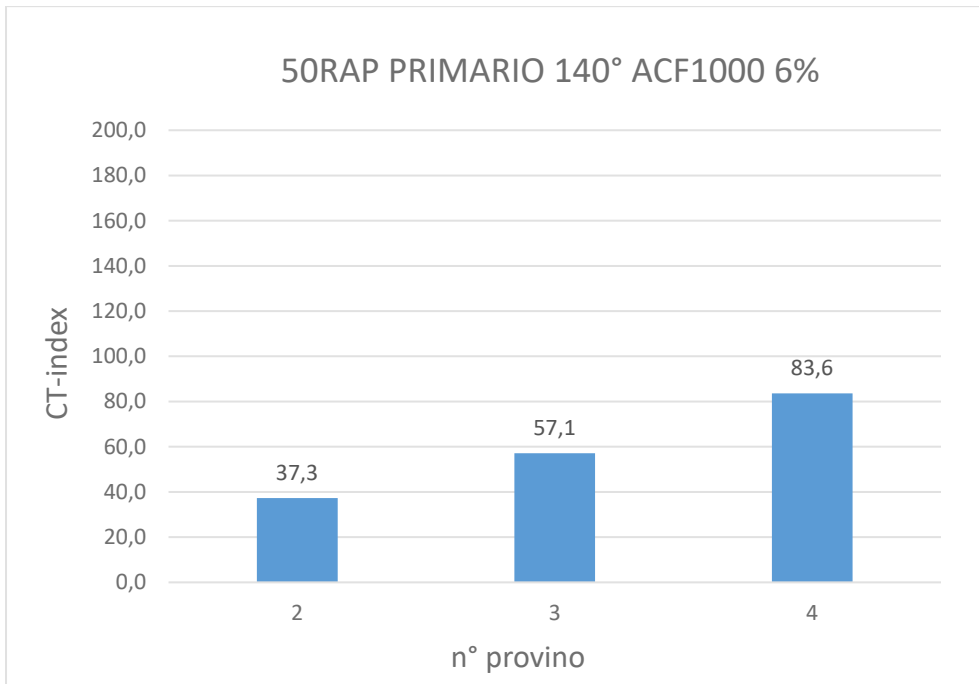
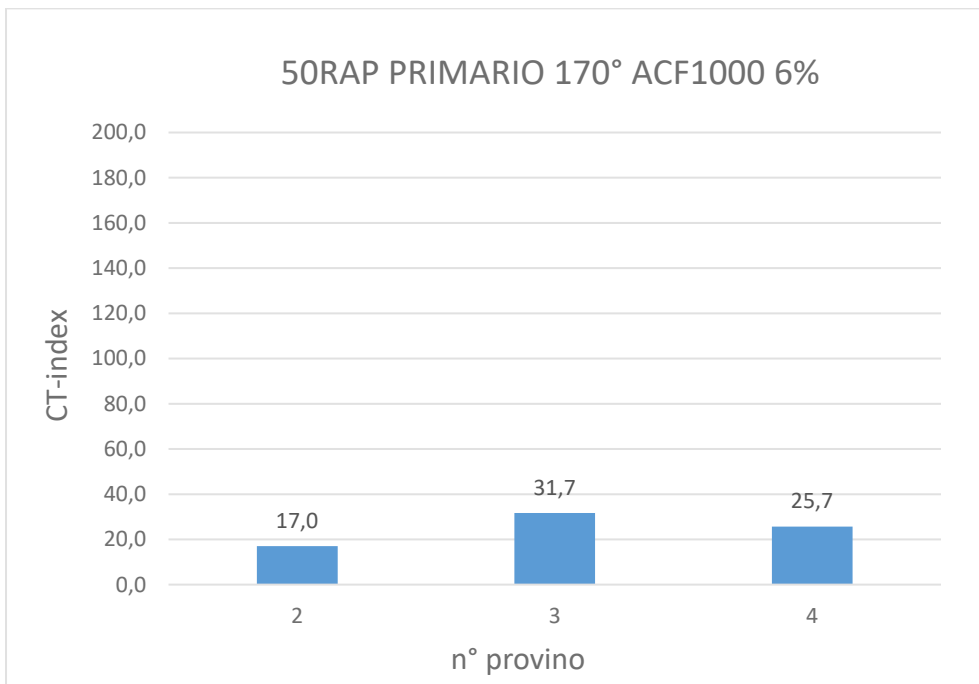


Grafico 4.80: Coefficiente di trazione indiretta



*Grafico 4.81: Indice di tolleranza al cracking*



*Grafico 4.82: Indice di tolleranza al cracking*

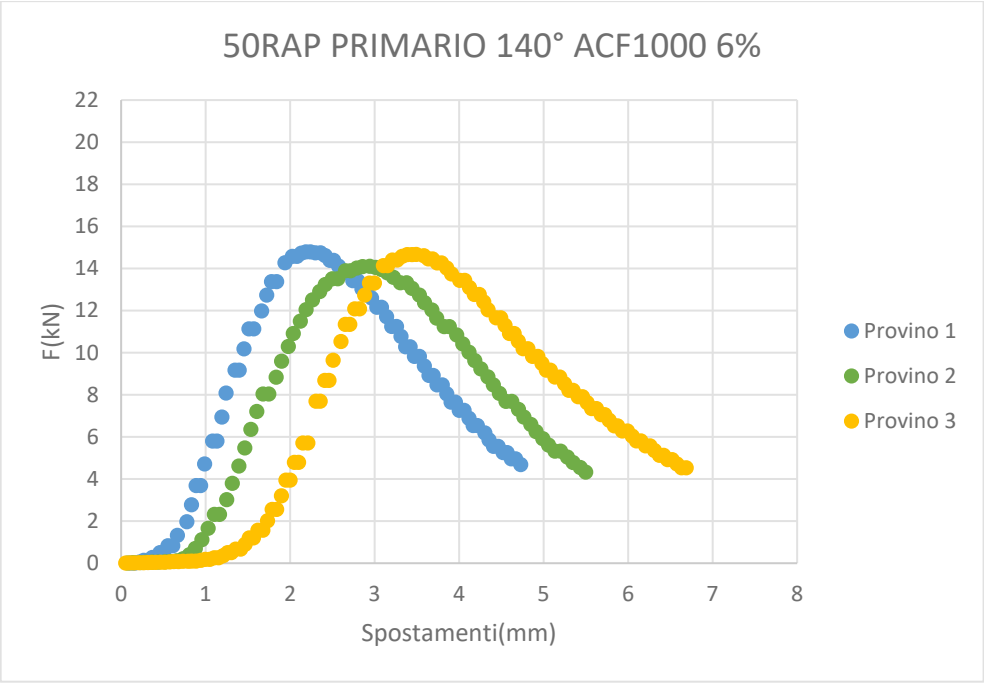


Grafico 4.83: Curva sforzo-deformazione

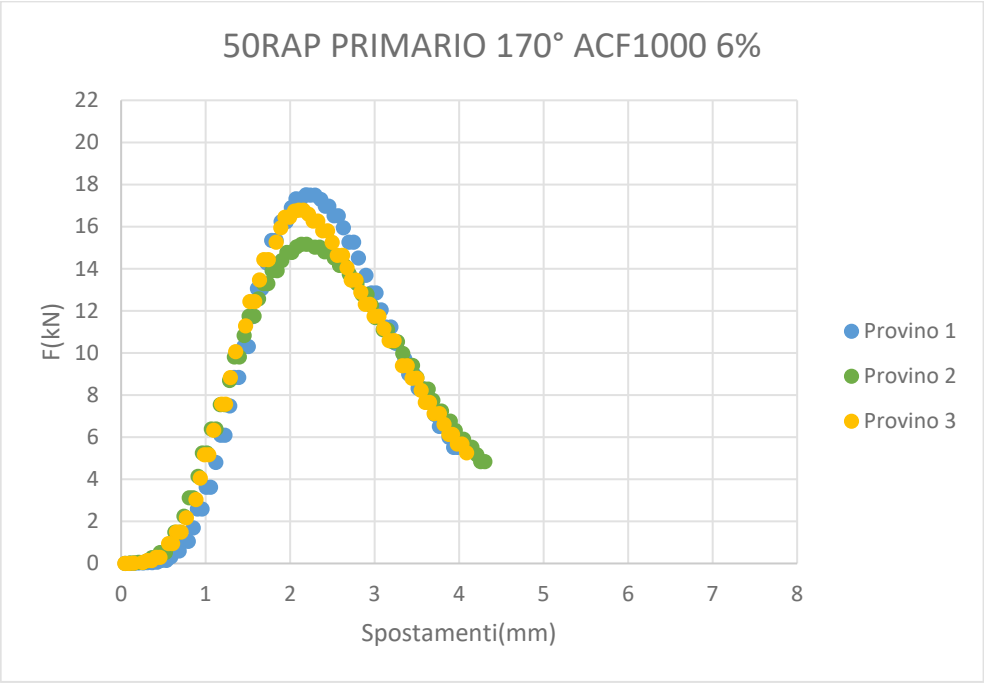


Grafico 4.84: Curva sforzo-deformazione

#### 4.7. 50RAP API CON ACF1000(9%)

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
7	50	140	API	ACF1000	9% bitume RAP
8	50	170	API	ACF1000	9% bitume RAP

Tabella 4.79: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.80: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.81: Ricetta della miscela

#### 4.7.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° API	1	1101	-	-	100	59,9
	2	1102	-	-	100	59,9
ACF1000 9% RAP	3	1103	1118	638,7	100	60,3
	4	1103	-	-	100	60,0

Tabella 4.82: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° API	1	2,341	2,391	2,471	5,2	3,2
	2	2,344	2,394	2,471	5,1	3,1
ACF1000 9% RAP	3	2,331	2,380	2,471	5,7	3,7
	4	2,341	2,392	2,471	5,2	3,2

Tabella 4.83: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° API	1	1098	1120	639	100	59,5
	2	1099	-	-	100	59,3
ACF1000 9% RAP	3	1099	-	-	100	58,9
	4	1106	-	-	100	59,1

Tabella 4.84: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° API	1	2,351	2,399	2,471	4,9	2,9
	2	2,359	2,407	2,471	4,5	2,6
ACF1000 9% RAP	3	2,376	2,425	2,471	3,8	1,9
	4	2,382	2,431	2,471	3,6	1,6

Tabella 4.85: Masse volumiche

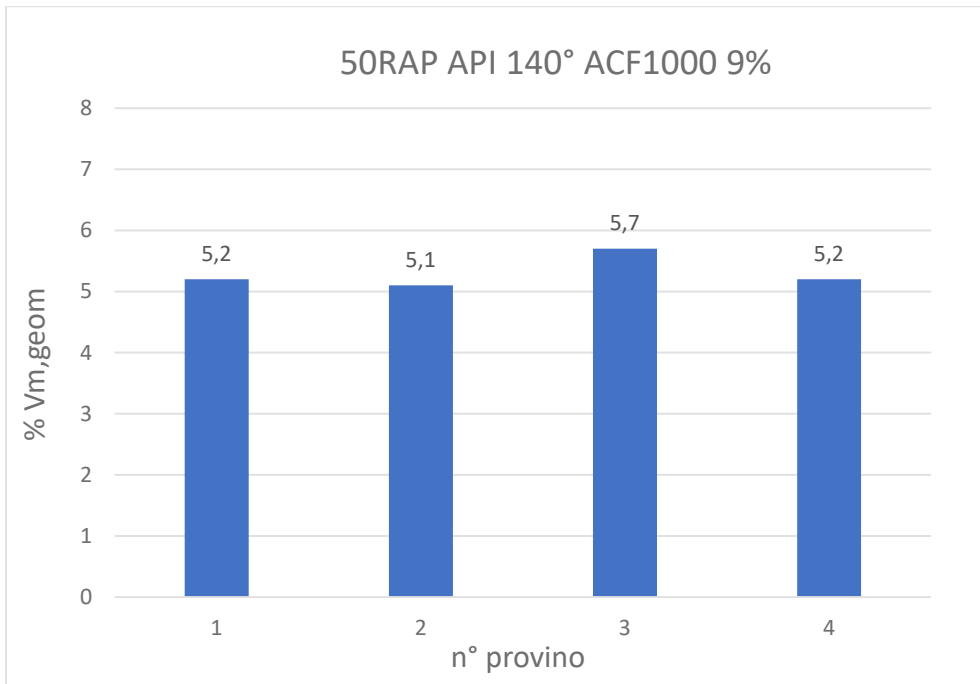


Grafico 4.85: Volume dei vuoti metodo geometrico

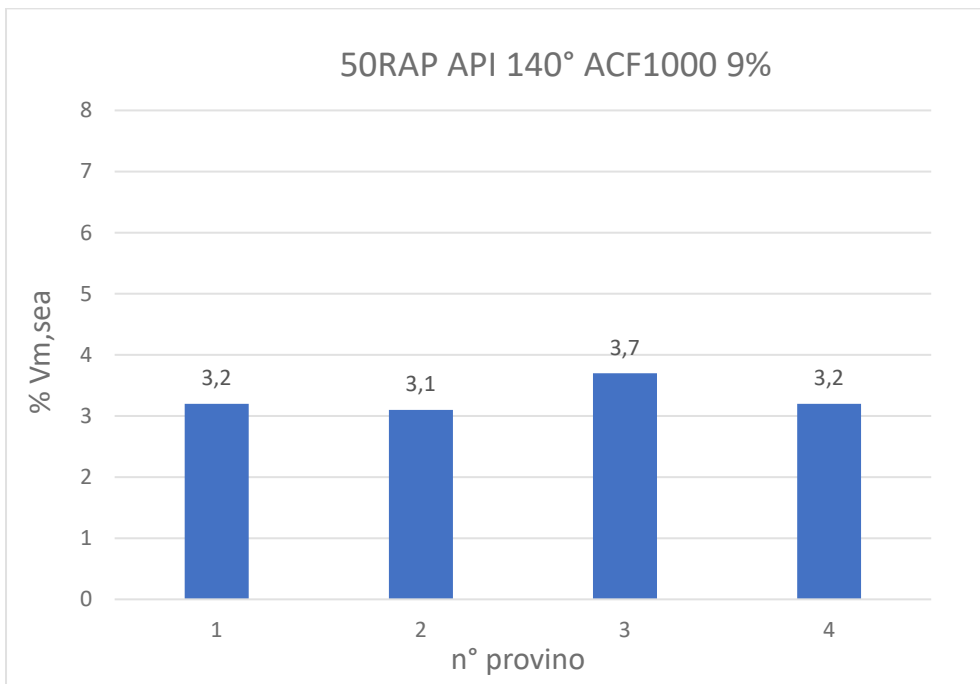


Grafico 4.86: Volume dei vuoti metodo sigillato



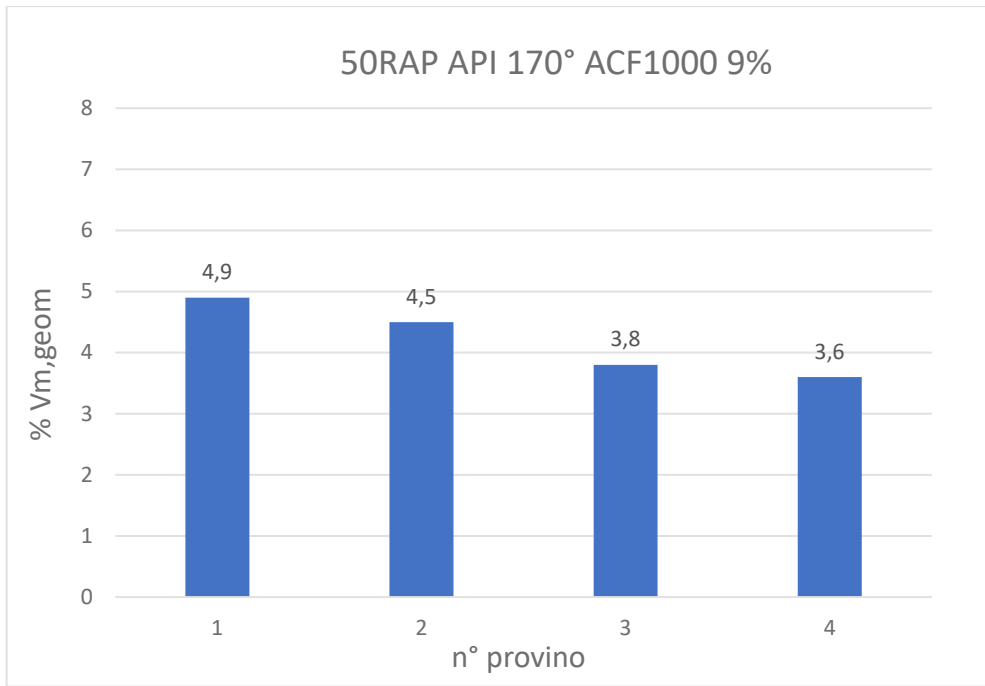


Grafico 4.87: Volume dei vuoti metodo geometrico

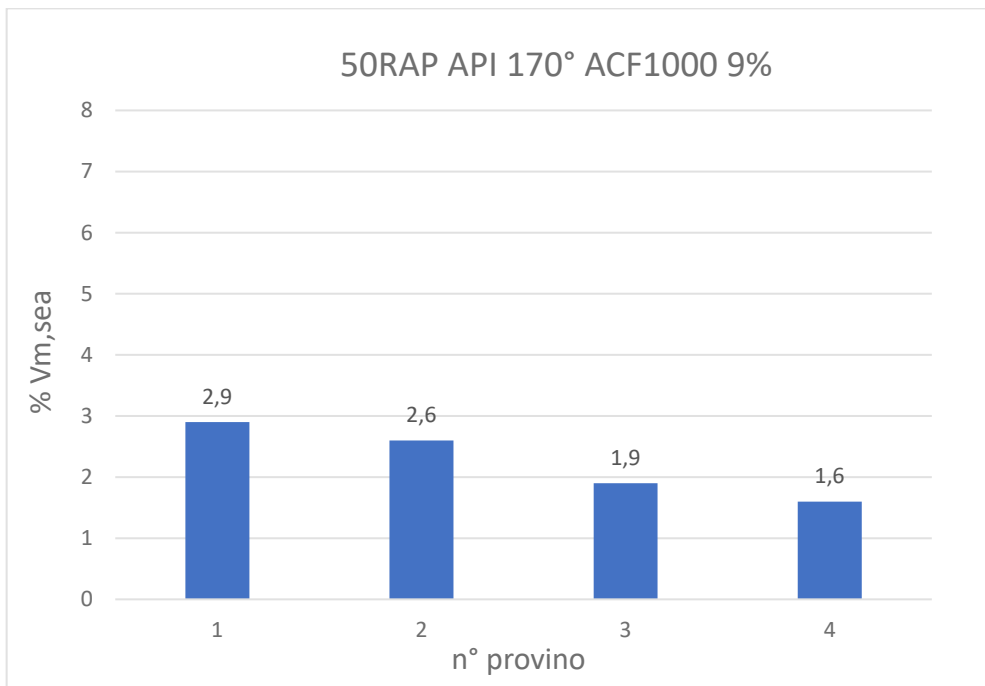


Grafico 4.88: Volume dei vuoti metodo sigillato

#### 4.7.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° API ACF1000 9% RAP	1	8872	8730	8801
	2	8534	8441	8487,5
	3	8374	8032	8203
	4	8683	8773	8728

Tabella 4.86: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° API ACF1000 9% RAP	1	11135	10465	10800
	2	9724	9258	9491
	3	10889	10641	10765
	4	9800	9604	9702

Tabella 4.87: Caratteristiche di elasticità del provino

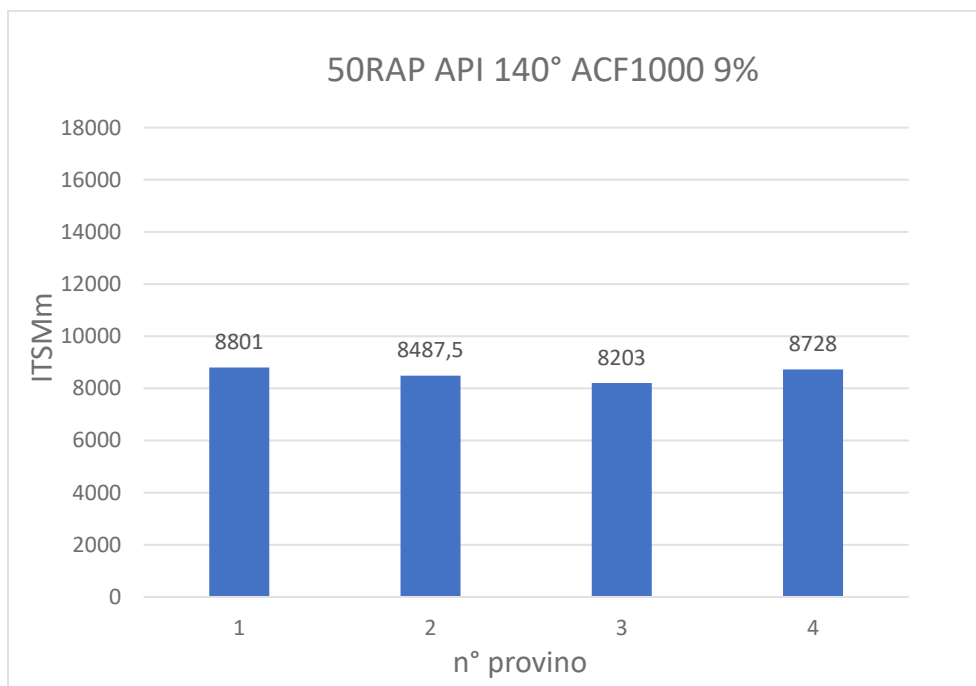


Grafico 4.89: Modulo di elasticità

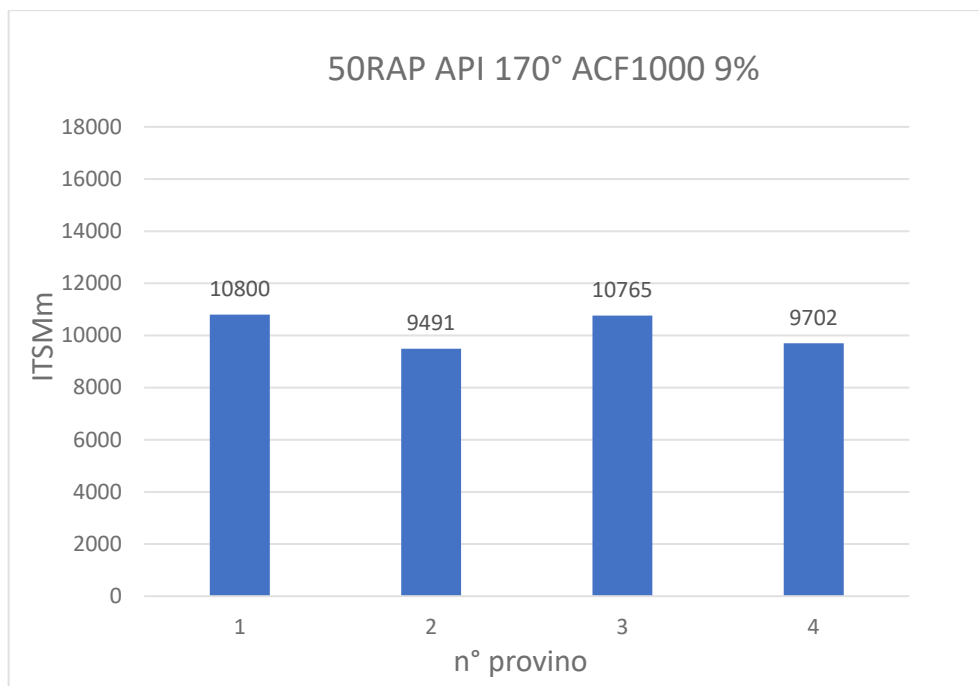


Grafico 4.90: Modulo di elasticità

#### 4.7.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° API ACF1000 9% RAP	1	14,3	0,017655	1,52	135,24
	2	12,75	0,018383	1,36	116,21
	3	-	-	-	-
	4	15,49	0,018269	1,64	141,01

Tabella 4.88

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° API ACF1000 9% RAP	1	12,6083	21,95834	34,56664	24,6
	2	11,9096	19,69442	31,60402	27,8
	3	-	-	-	-
	4	13,47243	24,13929	37,61172	28,4

Tabella 4.89

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° API ACF1000 9% RAP	1	-	-	-	-
	2	15,22	0,023807	1,63	107,55
	3	17,14	0,019057	1,85	152,49
	4	17,05	0,02063	1,83	139,34

Tabella 4.90

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170° API ACF1000 9% RAP	1	-	-	-	-
	2	15,56	19,52	35,08	14,3
	3	17,46	22,03	39,49	23,4
	4	16,73	25,21	41,94	33,5

Tabella 4.91

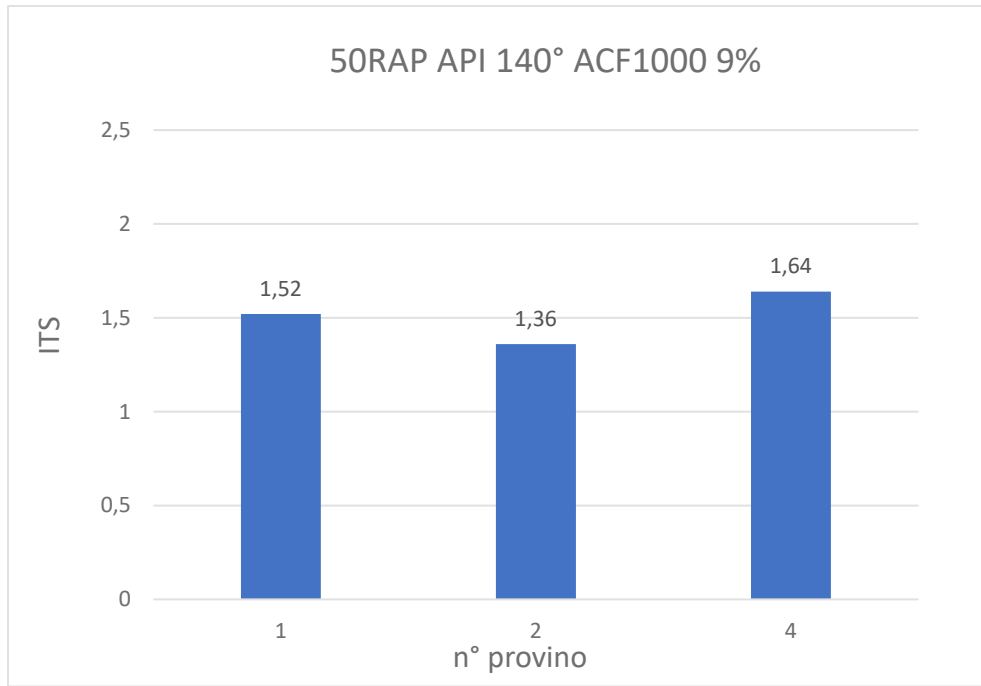


Grafico 4.91: Resistenza a trazione indiretta

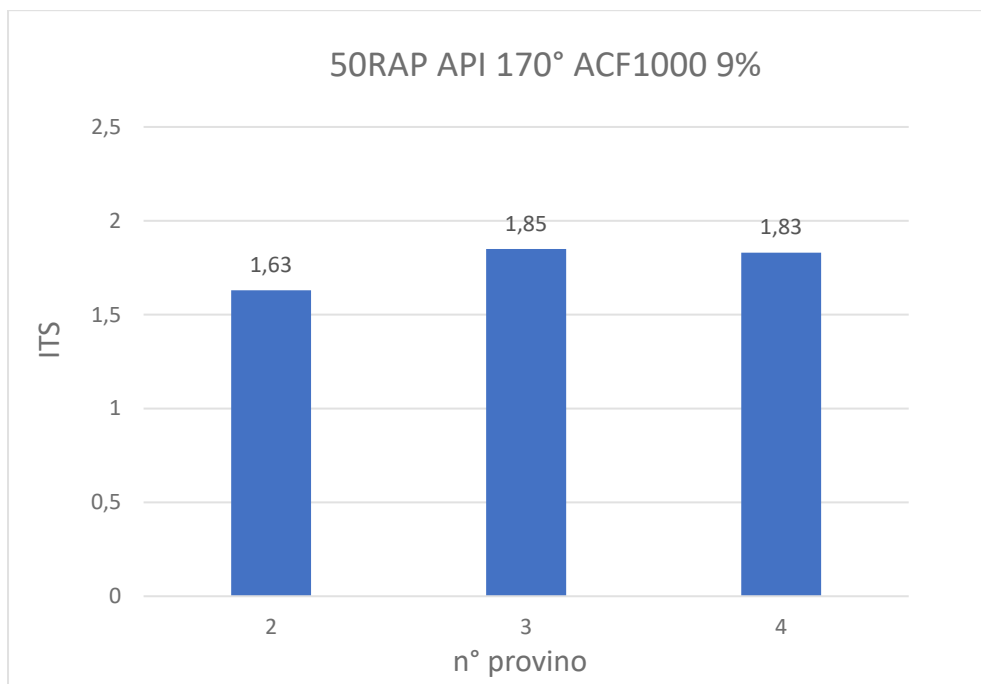


Grafico 4.92: Resistenza a trazione indiretta

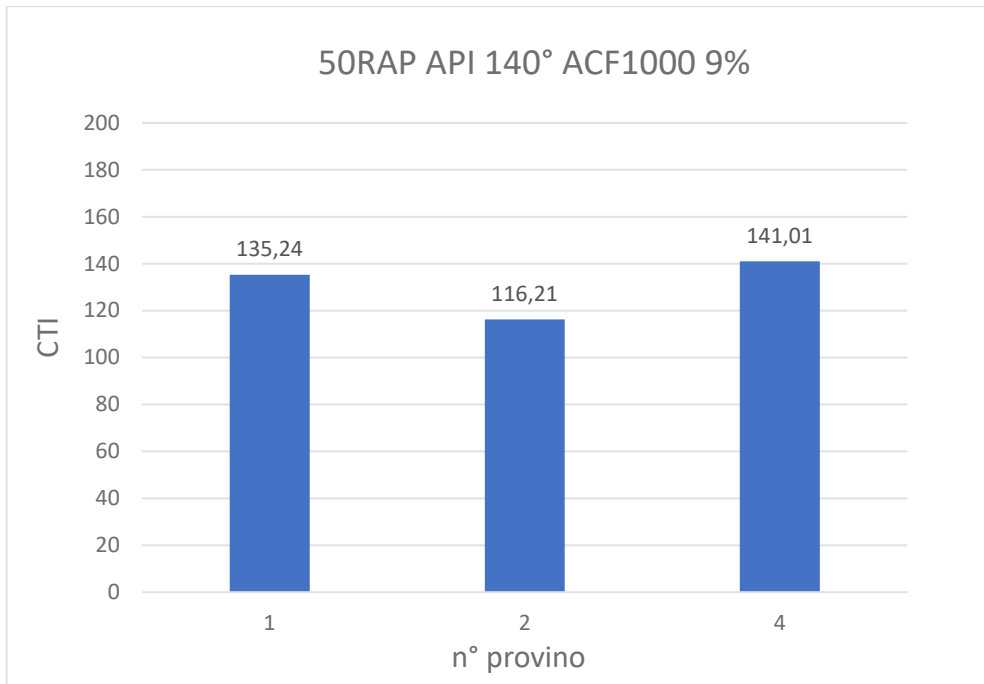


Grafico 4.93: Coefficiente di trazione indiretta

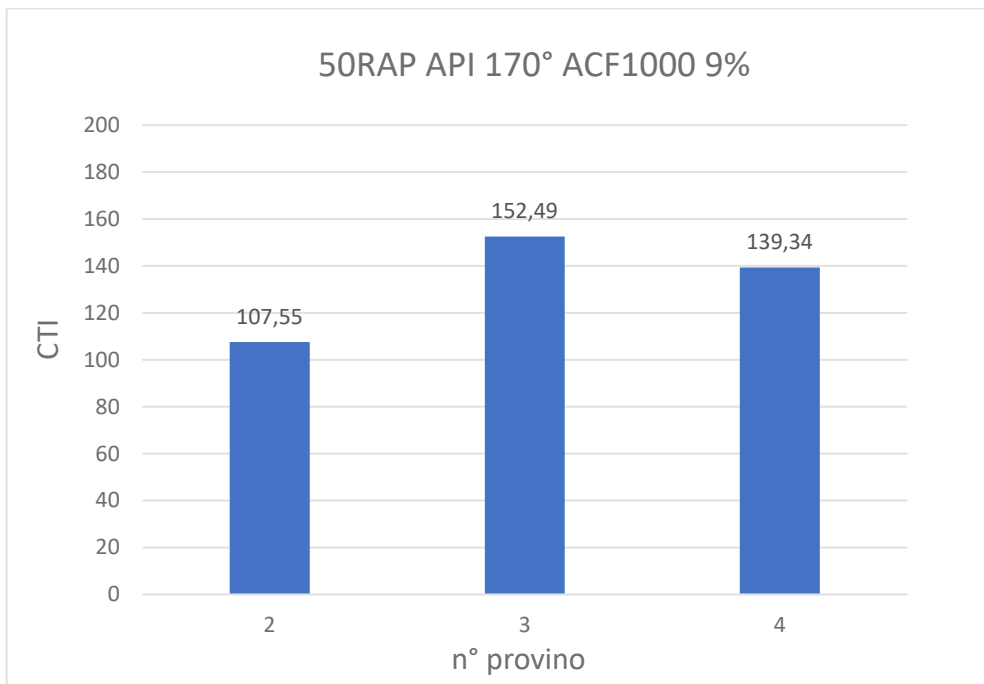
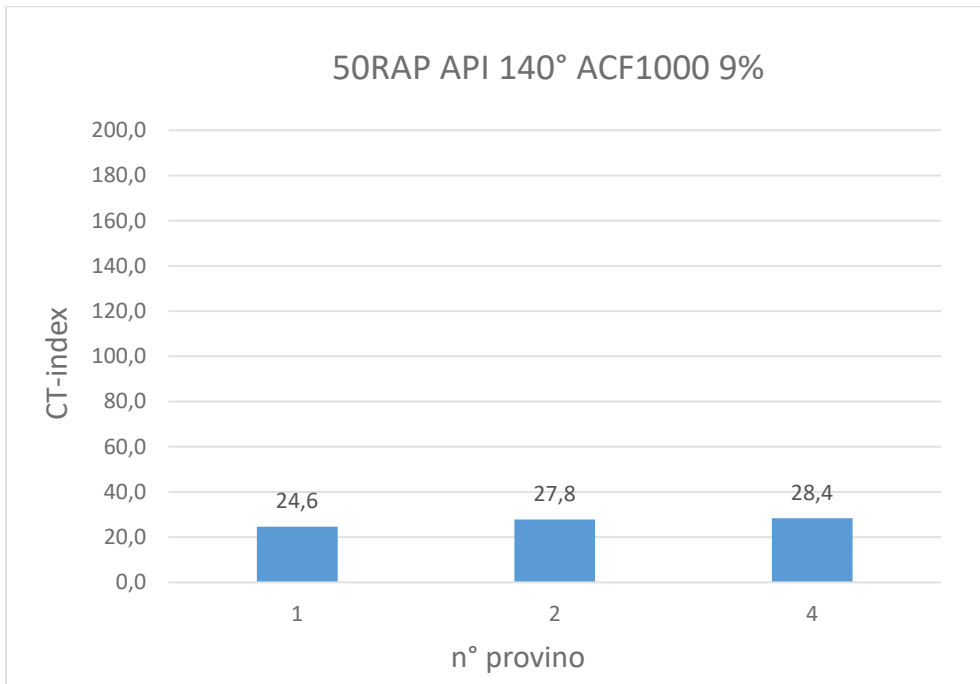
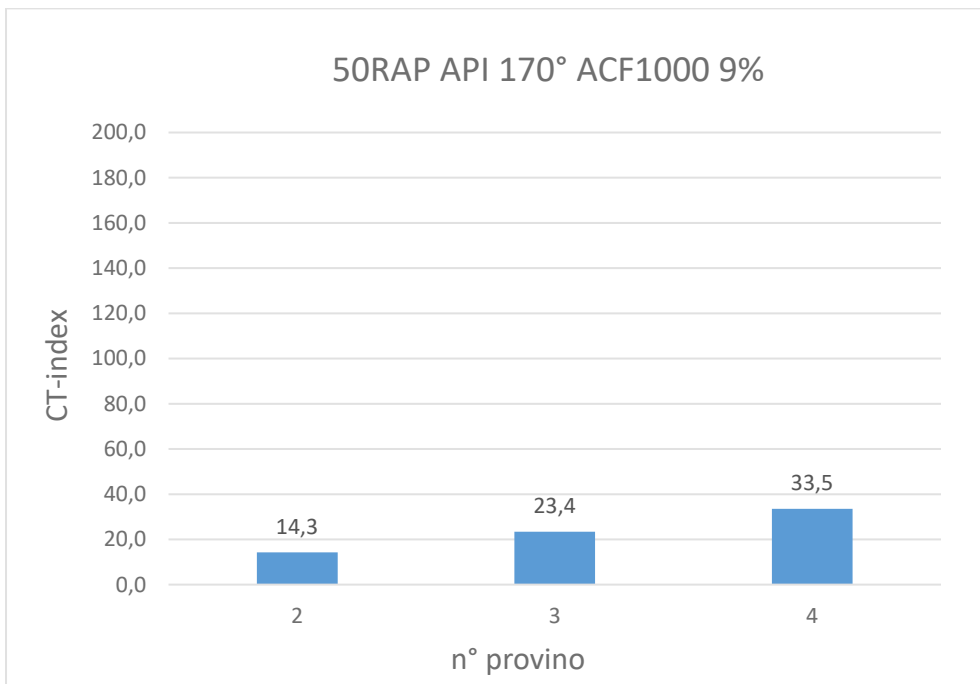


Grafico 4.94: Coefficiente di trazione indiretta



*Grafico 4.95: Indice di tolleranza al cracking*



*Grafico 4.96: Indice di tolleranza al cracking*

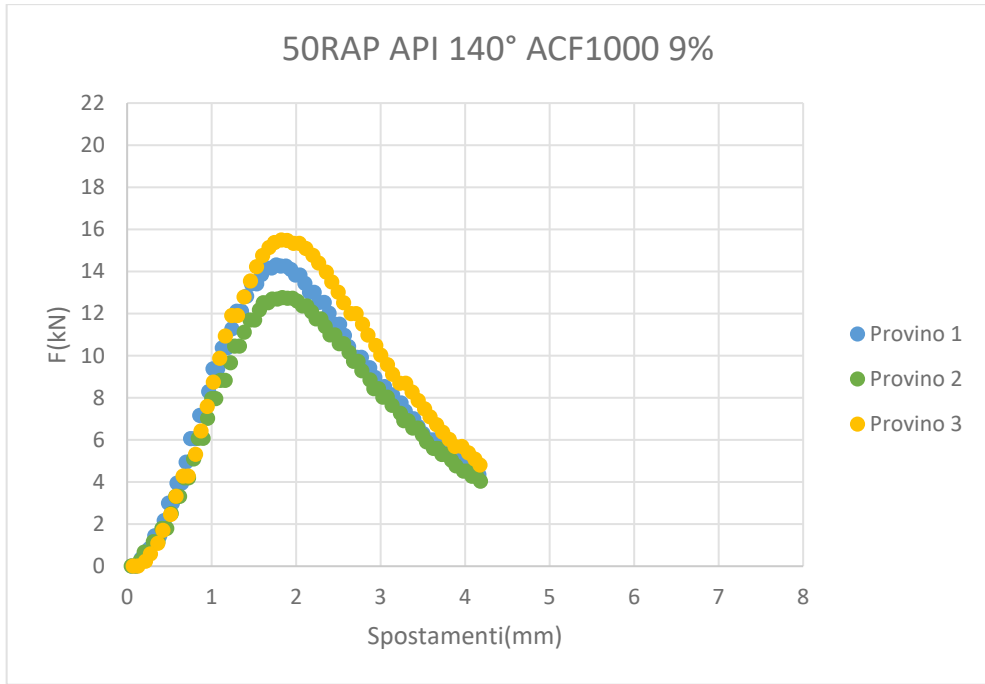


Grafico 4.97: Curva sforzo-deformazione

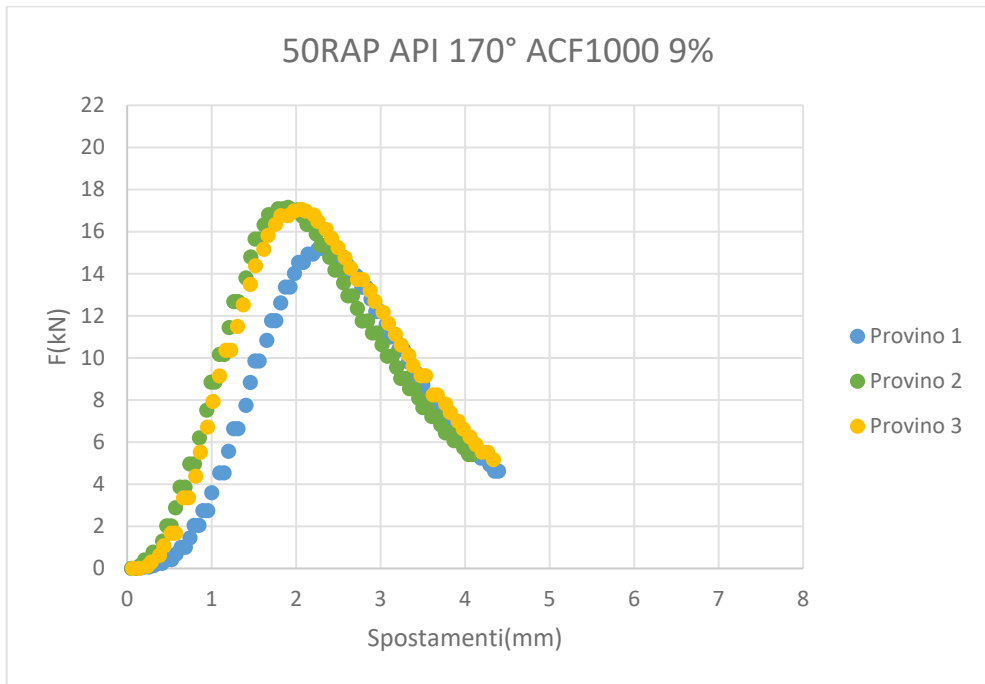


Grafico 4.98: Curva sforzo-deformazione

#### 4.8. 50RAP PRIMARIO CON ACF1000(9%)

Con questa percentuale di rap e con la seguente tipologia di bitume sono stati realizzati i seguenti impasti:

Impasto	% RAP	T [°C]	Bitume	Additivo	% Additivo
15	50	140	PRIMARIO	ACF1000	9% bitume RAP
16	50	170	PRIMARIO	ACF1000	9% bitume RAP

Tabella 4.92: Tipologie di impasti

In base alla curva granulometrica scelta, presente nel precedente capitolo, è stata utilizzata la seguente ricetta:

	% bitume sulla miscela	% bitume sugli aggregati
bitume totale	5,2	5,5
bitume vergine	3	3

Tabella 4.93: % di bitume utilizzato

FRAZIONE	PESO (g)
Filler	159,6
Sabbia	592,7
Calcare 4/8	0,0
Calcare 8/16	433,1
Calcare 12/16	1094,2
Calcare 16/20	0,0
RAP grosso	911,8
RAP fino	1367,7
Bitume TOTALE	244,4
Bitume Vergine	141,0

Tabella 4.94: Ricetta della miscela



#### 4.8.1. Caratteristiche volumetriche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	1102	-	-	100	60,1
	2	1099	-	-	100	59,9
	3	1098	1112	636,9	100	60,0
	4	1100	-	-	100	60,0

Tabella 4.95: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	2,335	2,388	2,471	5,5	3,4
	2	2,336	2,389	2,471	5,5	3,3
	3	2,331	2,383	2,471	5,7	3,5
	4	2,334	2,387	2,471	5,5	3,4

Tabella 4.96: Masse volumiche

Impasto	Provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	D [mm]	hm [mm]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	1098	-	-	100	58,8
	2	1095	1119	638	100	59,1
	3	1095	-	-	100	58,2
	4	1103	-	-	100	58,9

Tabella 4.97: Caratteristiche geometriche

Impasto	Provino	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$ [%]	$V_{m,sea}$ [%]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	2,379	2,424	2,471	3,7	1,9
	2	2,360	2,405	2,471	4,5	2,7
	3	2,396	2,442	2,471	3,0	1,2
	4	2,387	2,432	2,471	3,4	1,6

Tabella 4.98: Masse volumiche

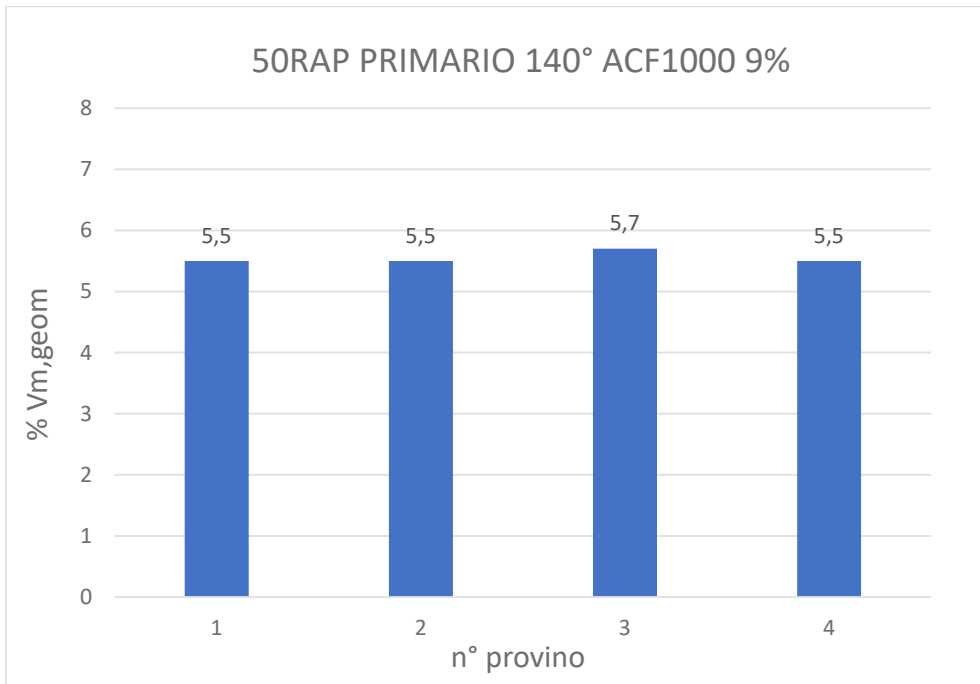


Grafico 4.99: Volume dei vuoti metodo geometrico

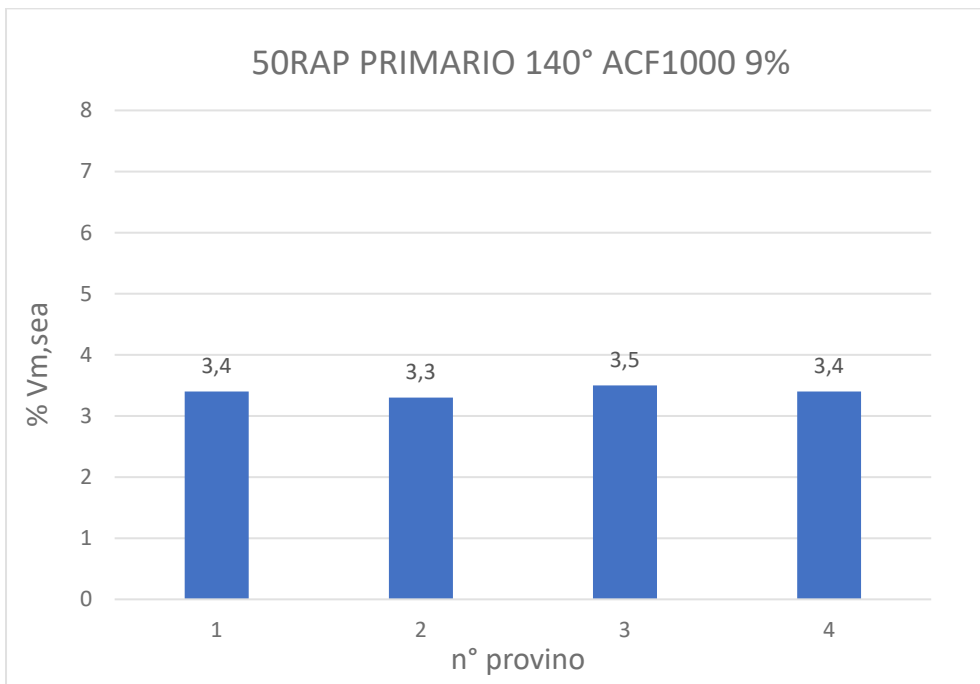
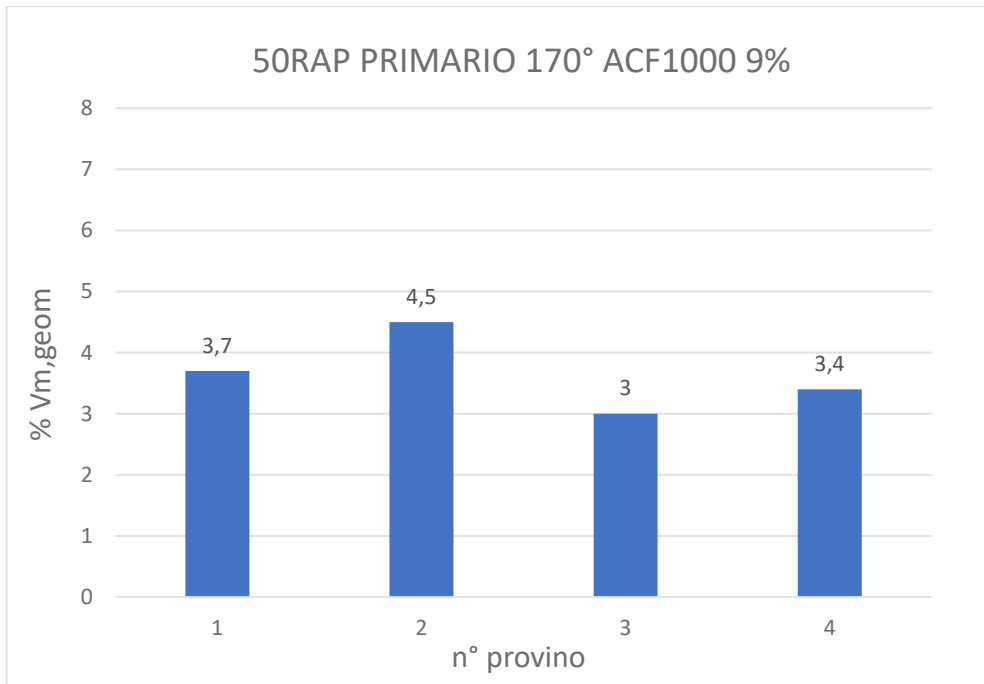
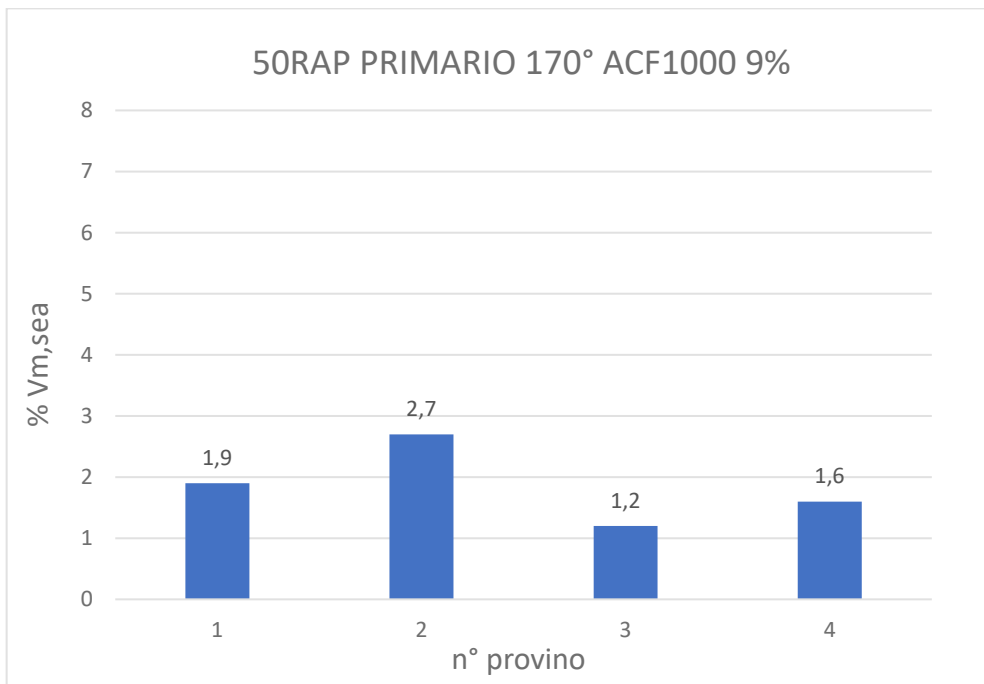


Grafico 4.100: Volume dei vuoti metodo sigillato



*Grafico 4.101: Volume dei vuoti metodo geometrico*



*Grafico 4.102: Volume dei vuoti metodo sigillato*

#### 4.8.2. Modulo a trazione indiretta

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	7020	6708	6864
	2	6914	6780	6847
	3	6848	6202	6525
	4	7579	7406	7492,5

Tabella 4.99: Caratteristiche di elasticità del provino

Impasto	Provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	8829	8493	8661
	2	7678	7269	7473,5
	3	8495	8444	8469,5
	4	8259	8370	8314,5

Tabella 4.100: Caratteristiche di elasticità del provino

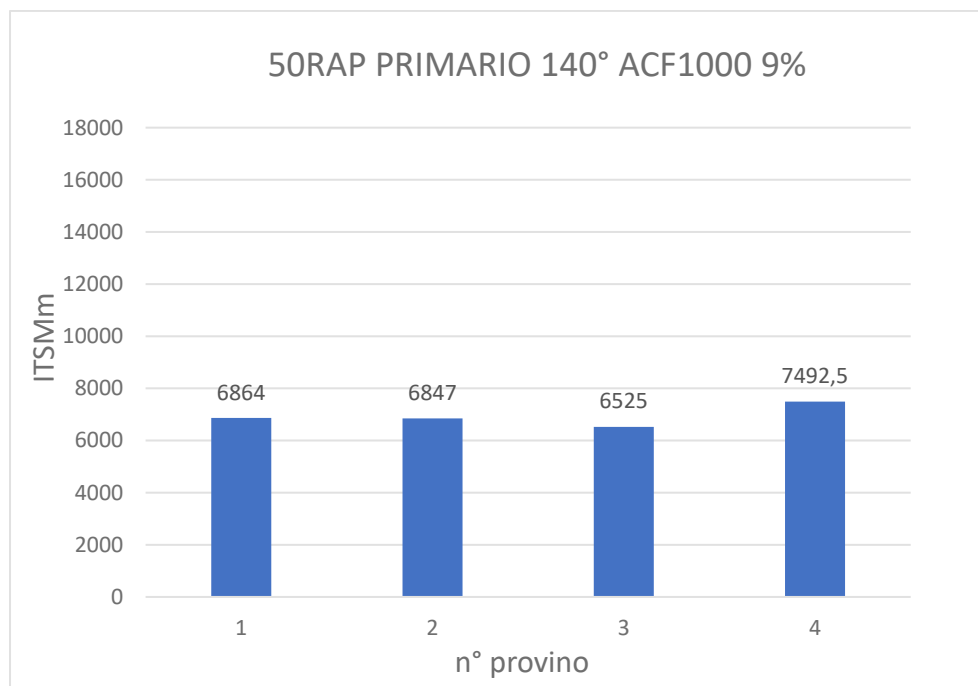


Grafico 4.103: Modulo di elasticità

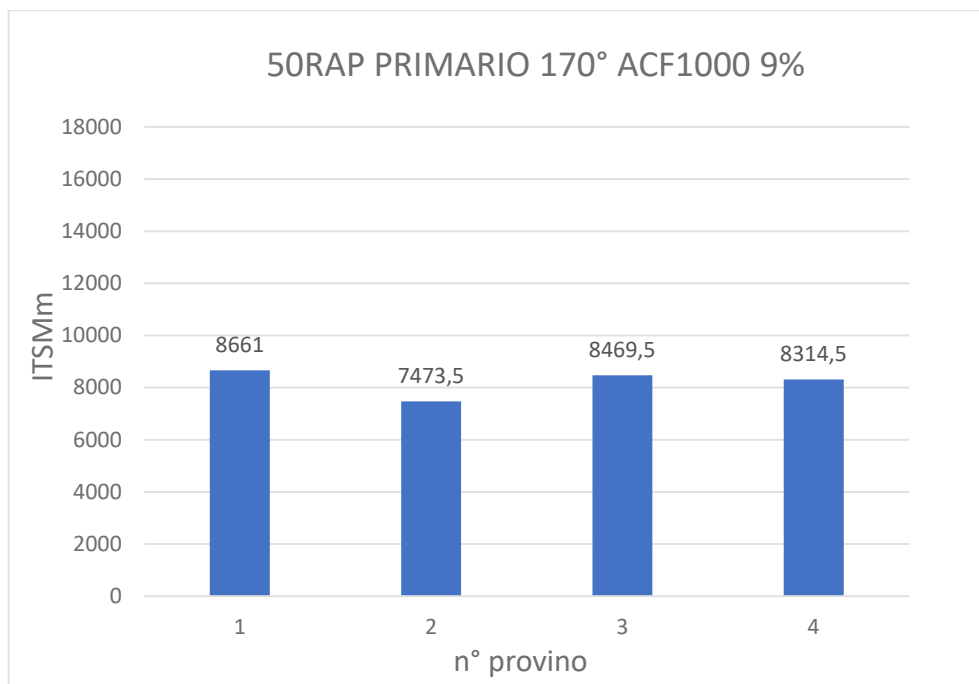


Grafico 4.104: Modulo di elasticità

#### 4.8.3. Resistenza a trazione indiretta

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	14,1	0,019642	1,49	119,16
	2	13,78	0,020332	1,46	112,80
	3	-	-	-	-
	4	13,96	0,023151	1,48	100,42

Tabella 4.101

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 140° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	14,56749	21,79257	36,36006	34,2
	2	14,78263	27,22532	42,00795	52,9
	3	-	-	-	-
	4	18,23024	22,34159	40,57183	43,8

Tabella 4.102

Impasto	Provino	P [kN]	d/dc	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]
50RAP 170° PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1	15,6	0,022954	1,69	115,65
	2	-	-	-	-
	3	15,3	0,024485	1,67	107,14
	4	16,53	0,026373	1,79	106,61

Tabella 4.103

Impasto	Provino	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]	CT-index
50RAP 170°	1	17,34	23,98	41,32	36,8
PRIMARIO	2	-	-	-	-
ACF1000	3	17,87	22,41	40,28	32,6
9% RAP	4	19,87	28,12	47,99	52,0

Tabella 4.104

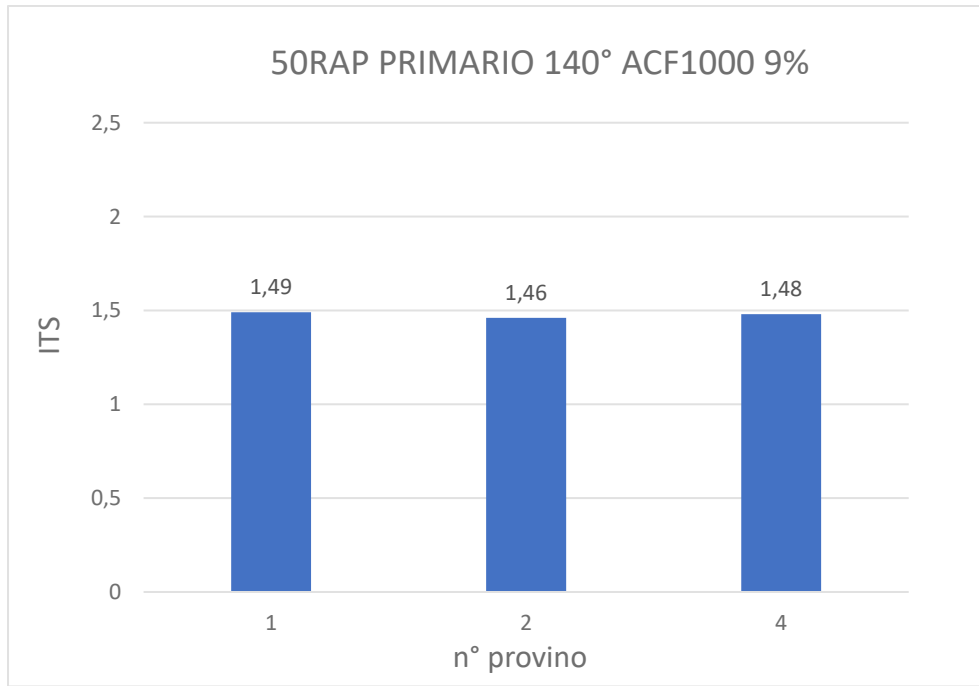


Grafico 4.105: Resistenza a trazione indiretta

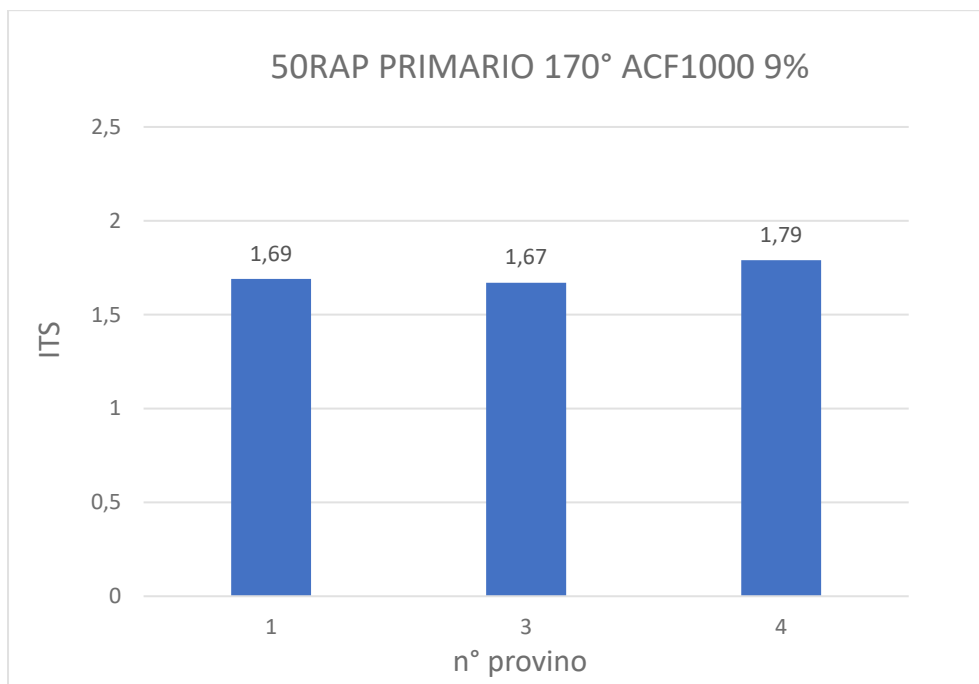


Grafico 4.106: Resistenza a trazione indiretta

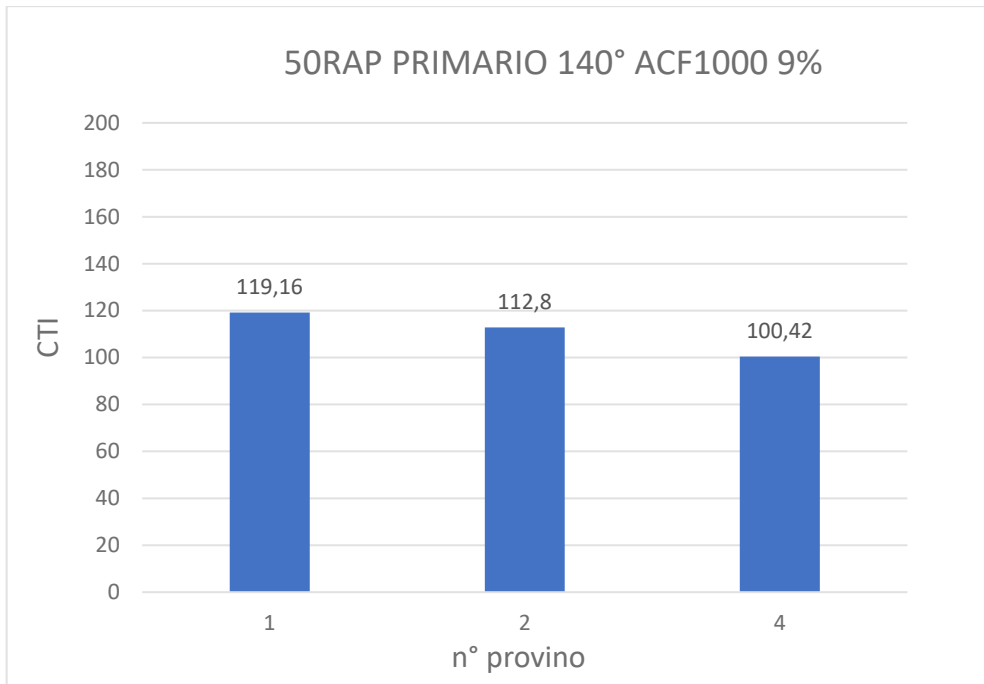


Grafico 4.107: Coefficiente di trazione indiretta

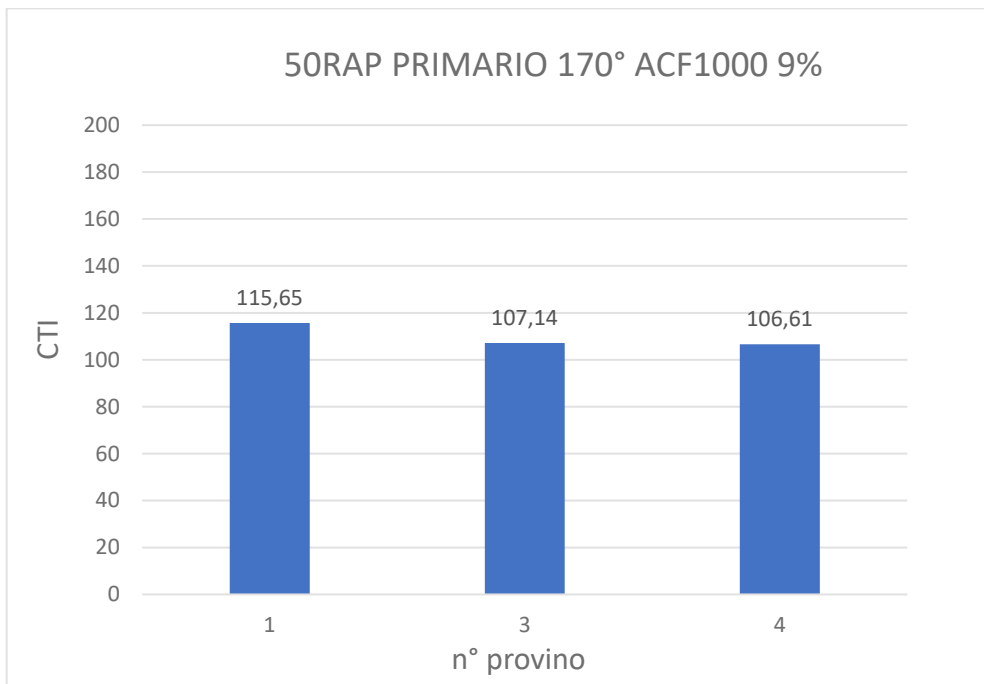
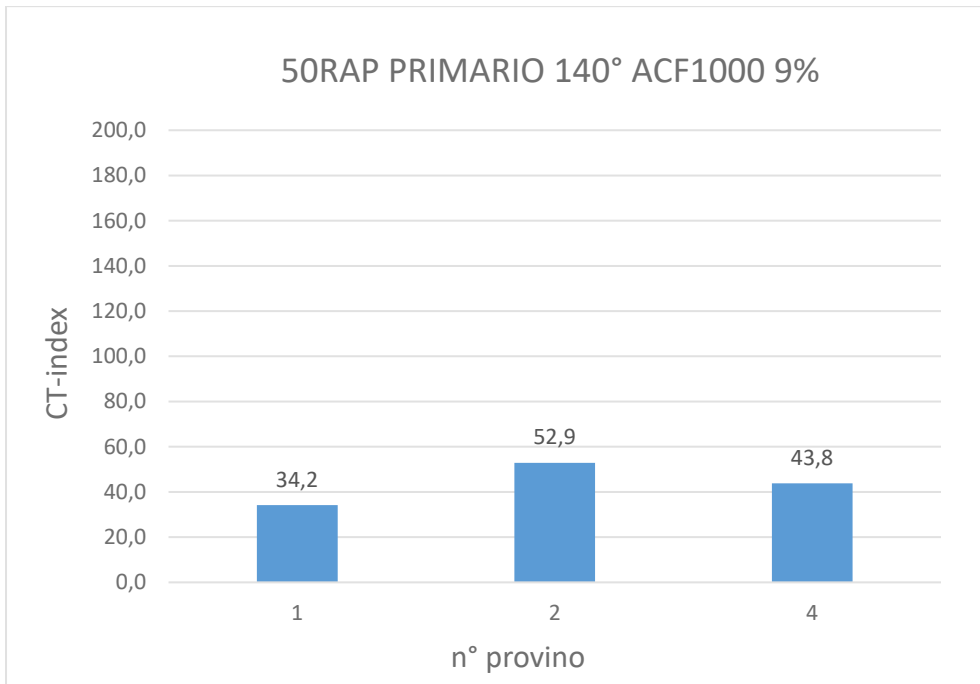
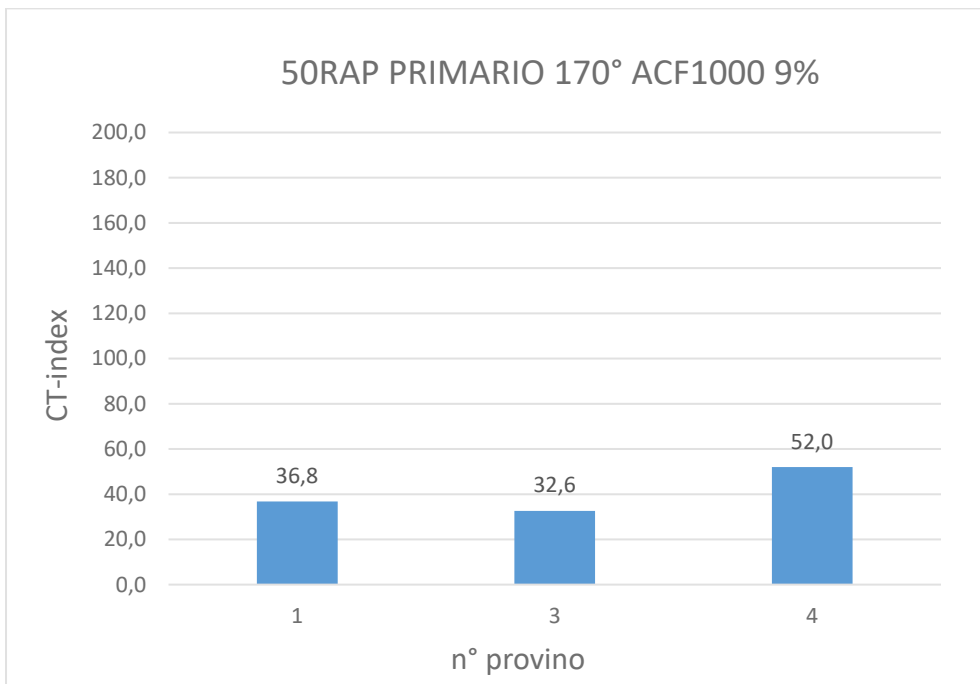


Grafico 4.108: Coefficiente di trazione indiretta



*Grafico 4.109: Indice di tolleranza al cracking*



*Grafico 4.110: Indice di tolleranza al cracking*



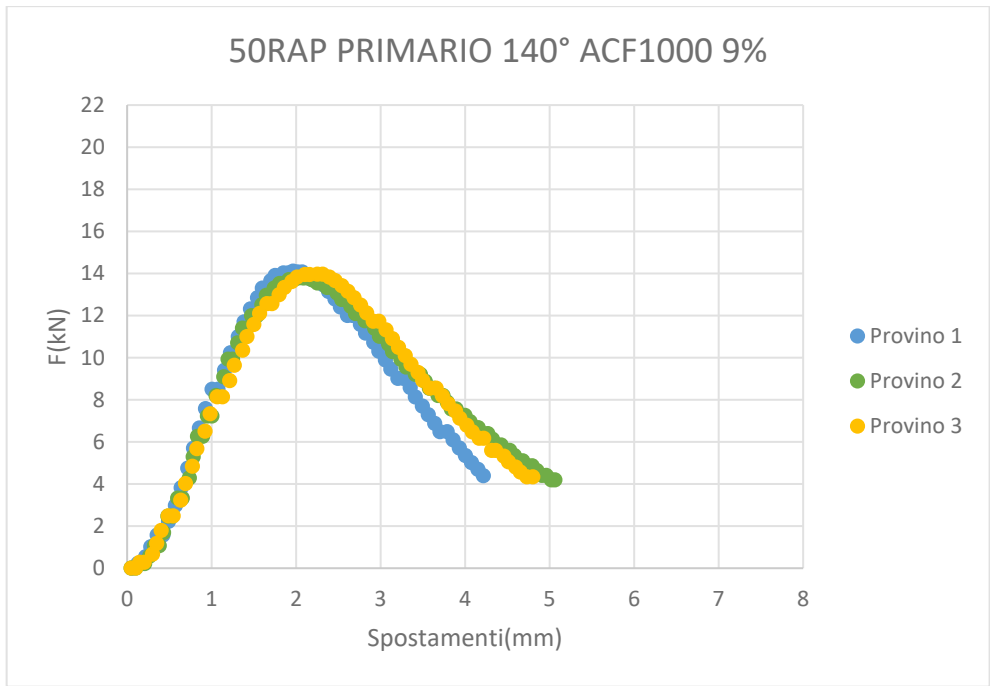


Grafico 4.111: Curva sforzo-deformazione

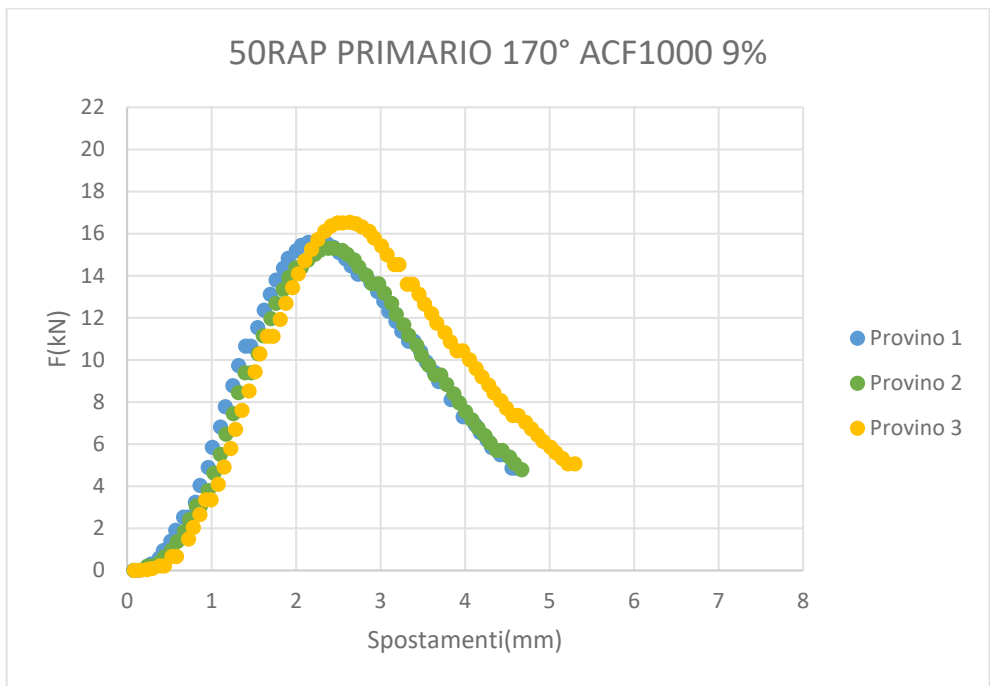


Grafico 4.112: Curva sforzo-deformazione

#### 4.9. Valutazione dell'impatto della variazione di contenuto di additivo e della temperatura

In questo capitolo procederemo ad analizzare i diversi parametri delle miscele, mettendo a confronto i diversi impasti in funzione della loro temperatura. In questo confronto escluderemo il parametro del "Volume dei vuoti" ottenuto mediante metodo sigillato poiché risulta essere poco veritiero ponendolo in relazione ai limiti di capitolato. Nel dettaglio esso risulterà poco rappresentativo poiché sigillando esclusivamente la parte esterna si procederà ad ignorare la quantità dei vuoti interni.

Iniziamo osservando gli impasti preparati mediante l'utilizzo del bitume "API" ottenuto mediante il "Visbreaking"

API – Vm,geom	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	5,5	4,2	3	6
	50RAP	5,2	5,0	3	6
	50RAP ACF1000 6%	4,4	3,7	3	6
	50RAP ACF1000 9%	5,3	4,2	3	6

Tabella 4.105: Confronto dei volumi dei vuoti

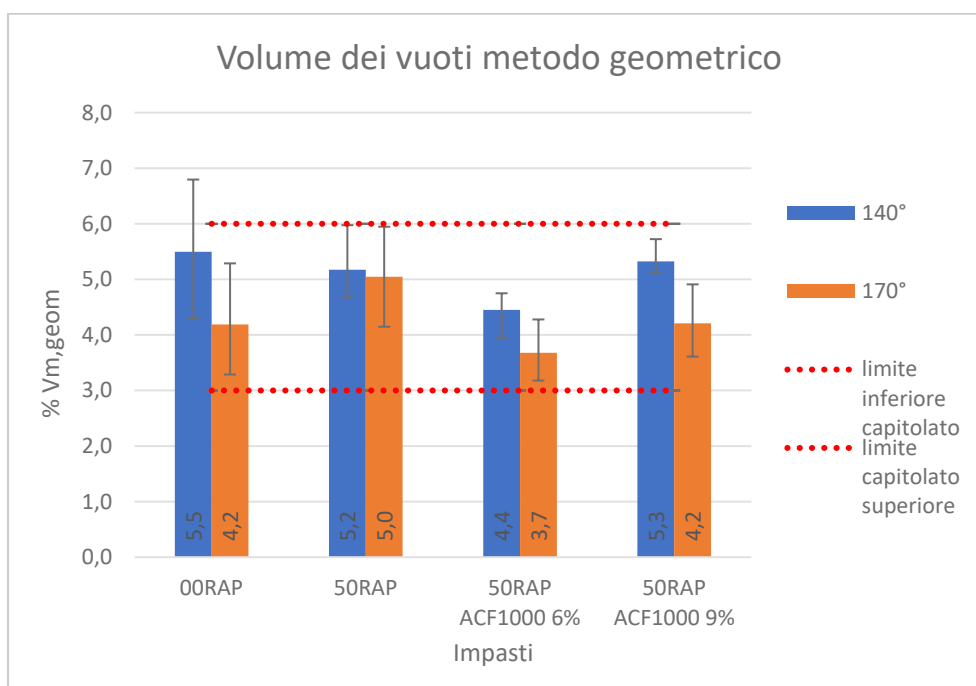


Grafico 4.113: Confronto dei volumi dei vuoti

In questo caso osserviamo come tutti i valori dei volumi dei vuoti, calcolati con il metodo geometrico”, degli impasti rientrano all’interno del fuso ottenuto dai limiti di capitolato. Analizzando inoltre l’andamento generico si può notare come la maggior temperatura di cottura influisca abbassando la percentuale dei vuoti e che un maggiore quantitativo di additivo comporti in questo caso invece un aumento della percentuale.

API - ITSMm	Impasti	140°	170°
	00RAP	5410	7434
	50RAP	12335	16356
	50RAP ACF1000 6%	8875	13592
	50RAP ACF1000 9%	8555	10190

Tabella 4.106: Confronto dei moduli di elasticità

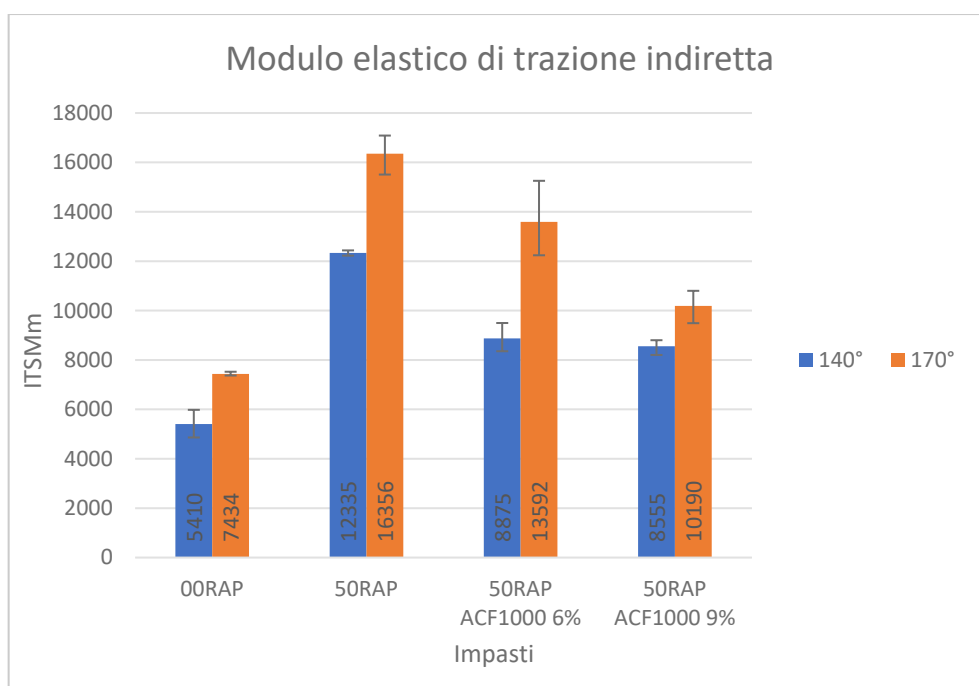


Grafico 4.1144: Confronto dei moduli di elasticità

In merito al modulo elastico di trazione indiretta invece è facilmente osservabile come l’utilizzo del RAP comporti un aumento della rigidità notevole del provino, con un aumento di circa il 56% del valore del modulo. In seguito, l’utilizzo dell’additivo, soprattutto in quantità maggiori, comporta un parziale recupero dell’elasticità e l’aumento delle temperature invece tende ad irrigidire il provino invecchiando il bitume.

API - ITS	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	1,17	1,39	0,72	1,40
	50RAP	2,03	2,10		
	50RAP ACF1000 6%	1,65	1,89		
	50RAP ACF1000 9%	1,51	1,77		

Tabella 4.107: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

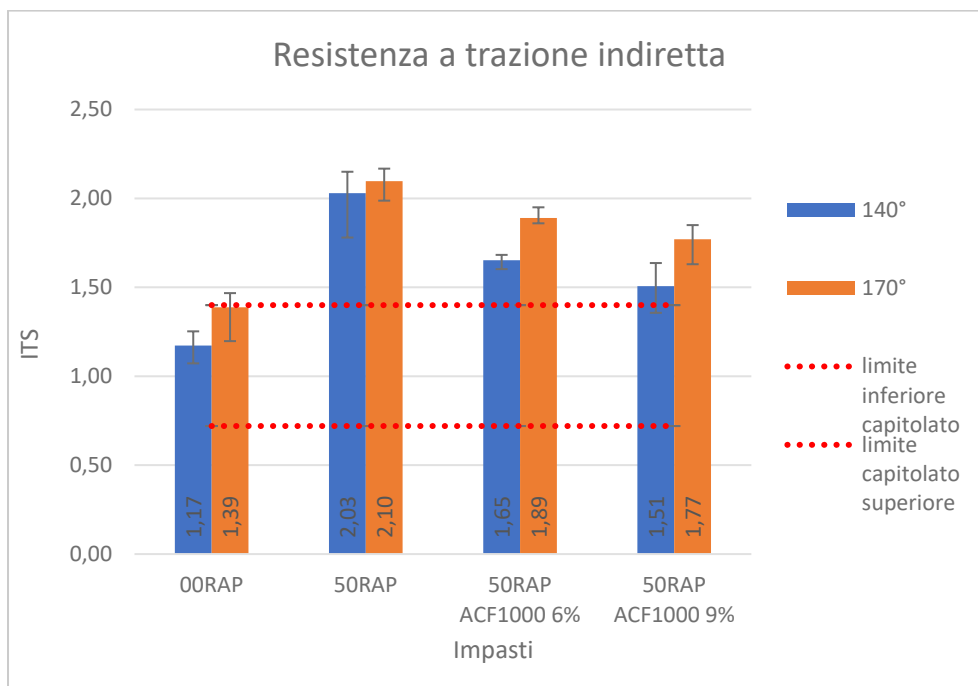


Grafico 4.1155: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

Per quanto riguarda la resistenza a trazione indiretta i valori ottenuti rientrano nel fuso di capitolato solamente nel caso della miscela vergine, anche se un maggior quantitativo di additivo permette di avvicinarsi al fuso abbassando il valore rispetto al 50RAP. Come tendenza generale si può inoltre notare come una maggiore temperatura significhi un maggior valore di resistenza a trazione. Questa differenza tra le temperature viene accentuata leggermente dall'impiego di una maggiore quantità di additivo.

API-CTI	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.
	00RAP	67,4	76,3	65,00
	50RAP	157,1	148,9	
	50RAP ACF1000 6%	119,5	145,9	
	50RAP ACF1000 9%	130,8	133,1	

Tabella 4.108: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

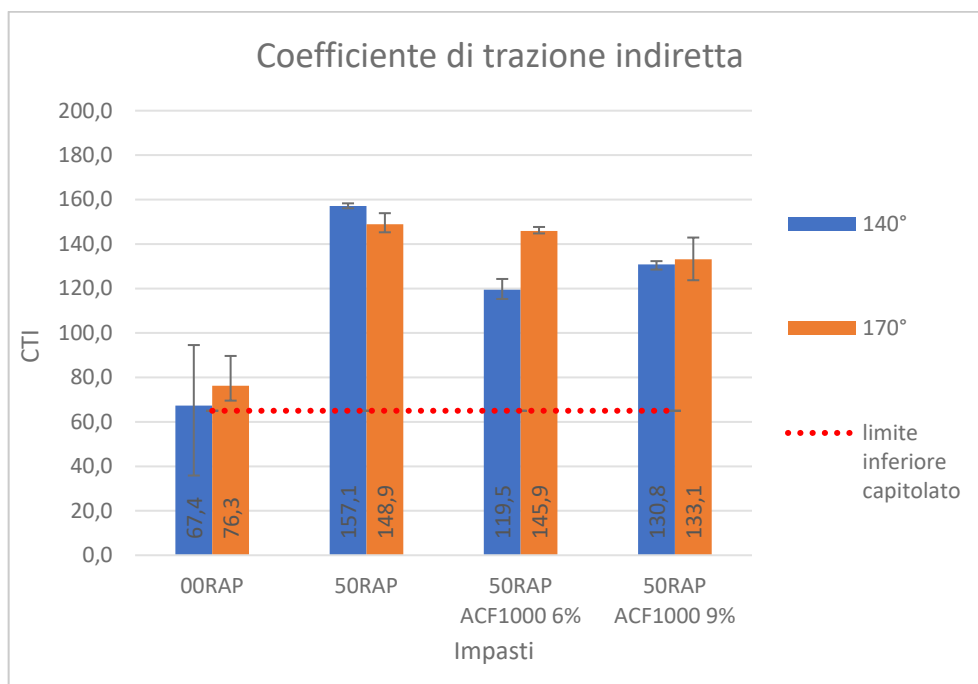


Grafico 4.1166: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

Nel caso del coefficiente di trazione indiretta tutti gli impasti risultano essere superiori al limite inferiore posto dal capitolato. In questo caso osserviamo come l'impiego di RAP corrisponda ad un aumento dei valori, che poi diminuiscono parzialmente in merito all'impiego dell'additivo. La temperatura invece influisce sull'azione dell'additivo in maniera indiretta, cioè minore è la temperatura è maggiore risulta la diminuzione del parametro e quindi un maggior recupero della proprietà originali.

API - CT-index	Impasti	140°	170°
	00RAP	89,8	77,1
	50RAP	18,7	8,1
	50RAP ACF1000 6%	29,8	15,2
	50RAP ACF1000 9%	26,9	23,8

Tabella 4.109: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

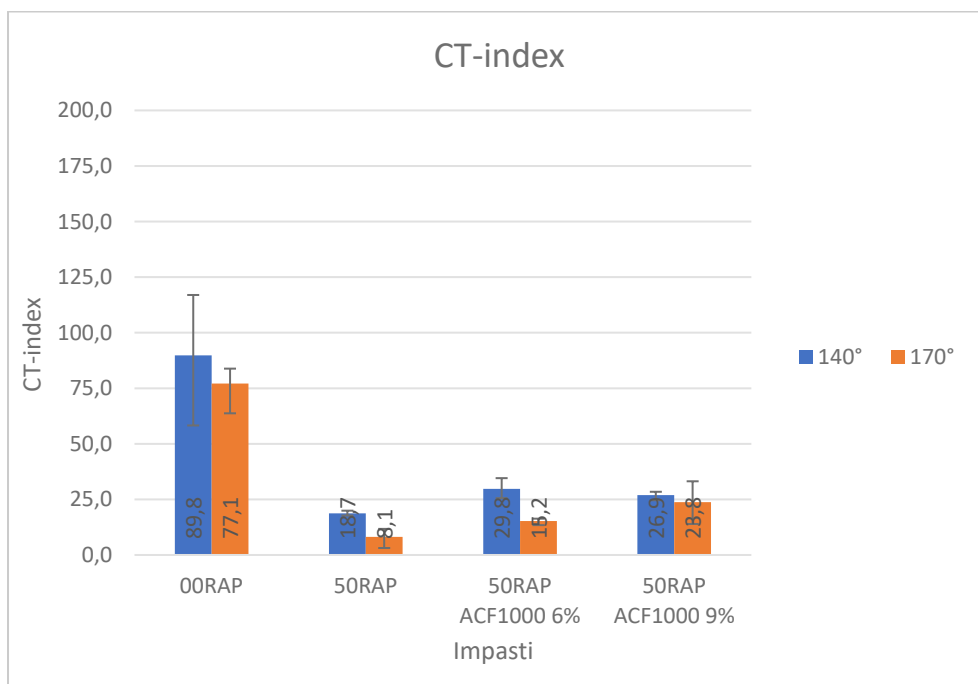


Grafico 4.1177: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

Nella valutazione invece dell'indice di tolleranza al cracking, risulta facilmente leggibile come questo parametro diminuisca drasticamente a causa dell'impiego di materiale di riciclo. Questo diminuzione viene parzialmente arrestata mediante l'utilizzo dell'additivo, anche se in questo caso il recupero risulta molto limitato. La variazione della temperatura corrisponde genericamente ad un maggior valore del parametro al diminuire della temperatura, anche se osserviamo che con la maggiore temperatura si assiste anche ad un maggior recupero delle proprietà nel caso della maggiore quantità di additivo.

Procediamo ora ad analizzare gli impasti ottenuti con bitume di tipo “Primario”

PRIM. - Vm,geom	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	4,9	4,3	3	6
	50RAP	5,1	4,7		
	50RAP ACF1000 6%	5,1	4,5		
	50RAP ACF1000 9%	5,5	3,7		

Tabella 4.110: Confronto dei volumi dei vuoti

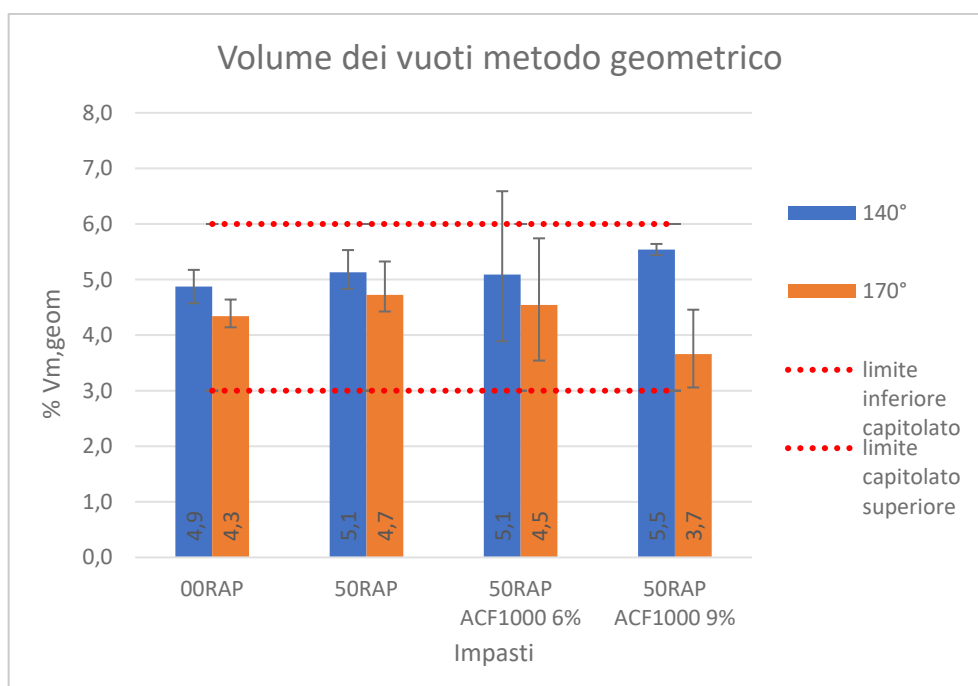


Grafico 4.1188: Confronto dei volumi dei vuoti

Le percentuali dei volumi dei vuoti determinate attraverso il metodo geometrico risultano rientrare all'interno del fuso di capitolato. L'ausilio dell'additivo anche in questo caso comporta una diminuzione dei vuoti, diminuzione che in questo caso risulta inversamente proporzionale all'aumento della temperatura di cottura. L'unica eccezione è rappresentata dal valore dei volumi dei vuoti dell'impasto "50RAP ACF1000 9%" che risulta essere il valore più alto di quelli misurati.

PRIM. - ITSMm	Impasti	140°	170°
	00RAP	3768	3757
	50RAP	8894	12935
	50RAP ACF1000 6%	7796	10860
	50RAP ACF1000 9%	6932	8230

Tabella 4.111: Confronto dei moduli di elasticità

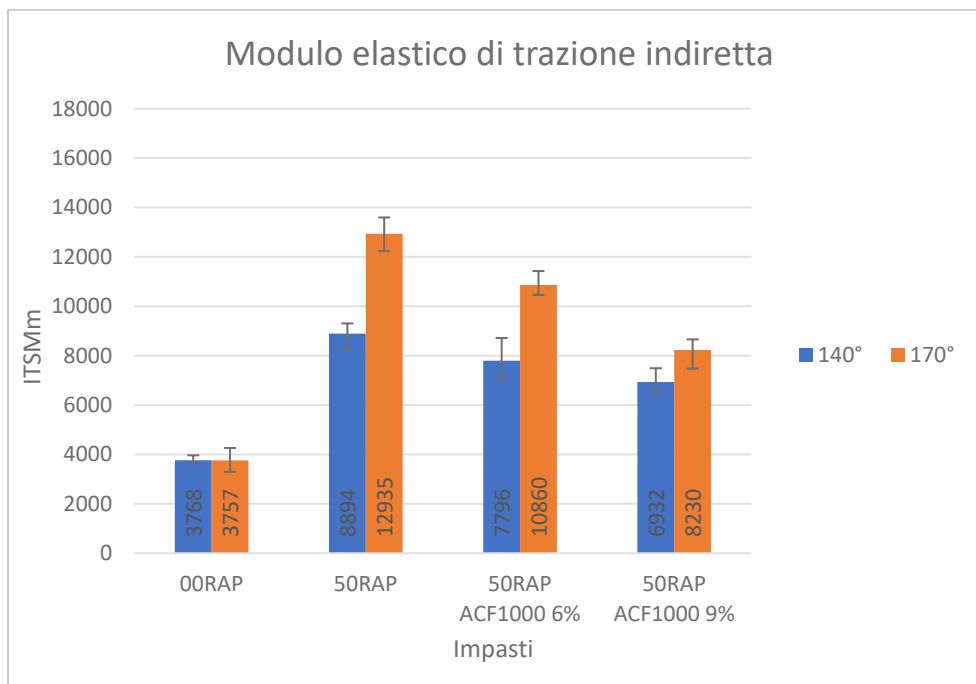


Grafico 4.11919: Confronto dei moduli di elasticità

Per quanto riguarda il modulo di elasticità si riscontra che l'impiego del materiale di riciclo comporta un aumento drastico del valore del parametro che corrisponde ad un aumento della rigidità dei provini. L'additivo in questo caso permette di recuperare parzialmente l'elasticità della miscela vergine e si osserva comportarsi meglio con una maggiore quantità di additivo. Al crescere della temperatura anche in questo caso si riscontra la sua influenza attraverso una diminuzione dell'elasticità del materiale, seguendo le dinamiche tipiche dell'"invecchiamento" del legante. In particolare, si evidenzia anche che una maggiore quantità di bitume corrisponde ad un minor divario causato dal gradiente di temperatura.



PRIM. - ITS	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	0,88	0,96	0,72	1,40
	50RAP	1,77	1,99		
	50RAP ACF1000 6%	1,50	1,76		
	50RAP ACF1000 9%	1,48	1,72		

Tabella 4.112: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

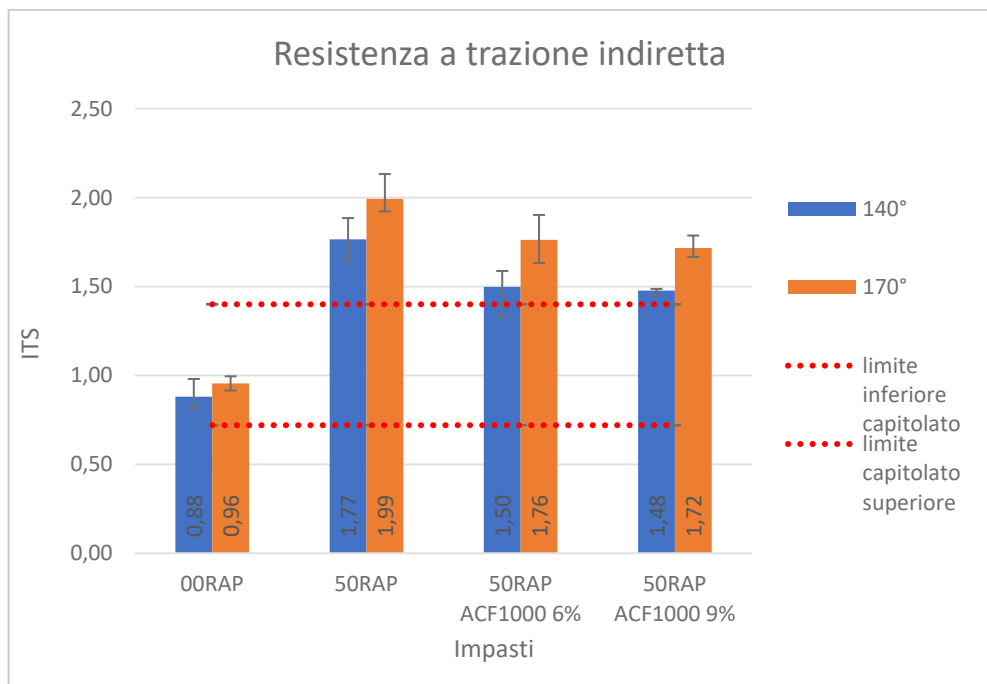


Grafico 4.1200: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

I valori della resistenza a trazione indiretta risultano compresi all'interno del fuso solamente nel caso della miscela vergine. L'impiego di RAP nella miscela comporta un aumento dei valori al di fuori del fuso, aumento che viene parzialmente contenuto mediante l'ausilio dell'additivo. La maggior quantità di additivo in questo caso corrisponde ad un miglioramento delle prestazioni che però non risultano rientrare ancora all'interno del range accettabile. La temperatura in questo caso implica un aumento del valore in seguito ad una temperatura di cottura superiore.

PRIM. – CTI	Impasti	140°	170°	Lim. Inf.
	00RAP	50,6	46,7	65,00
	50RAP	118,3	134,3	
	50RAP ACF1000 6%	87,4	128,4	
	50RAP ACF1000 9%	110,8	109,8	

Tabella 4.113: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

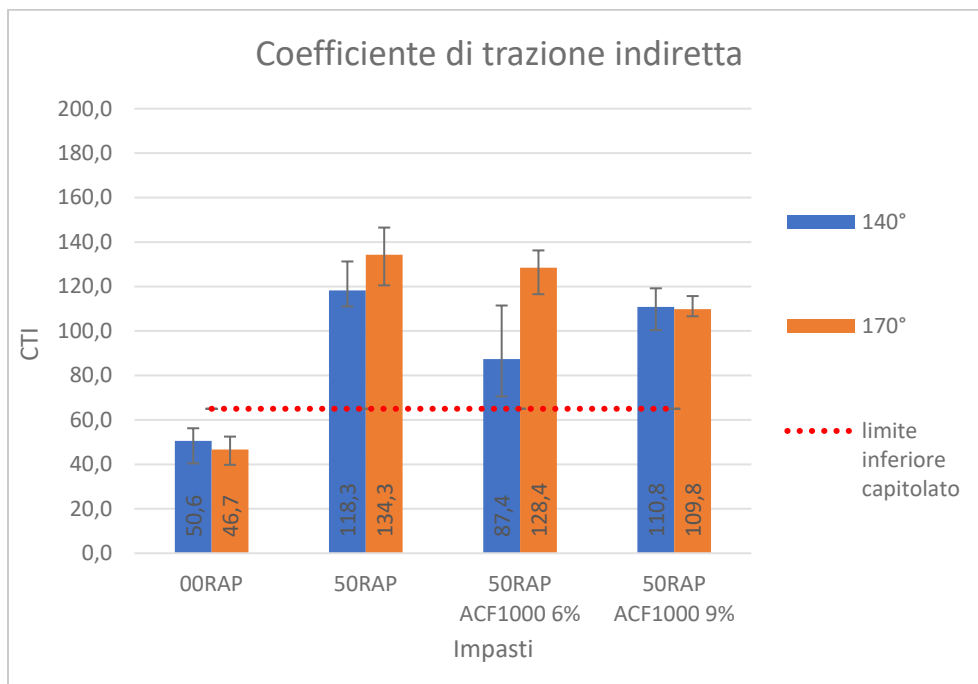


Grafico 4.121: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

In merito alla valutazione del coefficiente di trazione indiretta osserviamo una situazione particolare, in cui esclusivamente la miscela vergine non risulta rispettare il limite inferiore imposto dal capitolato. In generale l'andamento dei valori cresce all'aumentare dell'impiego del materiale di riciclo, andamento che viene parzialmente arrestato mediante l'ausilio dell'additivo. In questo caso però risulta difficilmente esplicabile una correlazione esatta tra temperatura e quantità di additivo.

PRIM. – CT-index	Impasti	140°	170°
	00RAP	163,0	136,7
	50RAP	29,5	20,9
	50RAP ACF1000 6%	59,3	24,8
	50RAP ACF1000 9%	43,6	40,5

Tabella 4.114: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

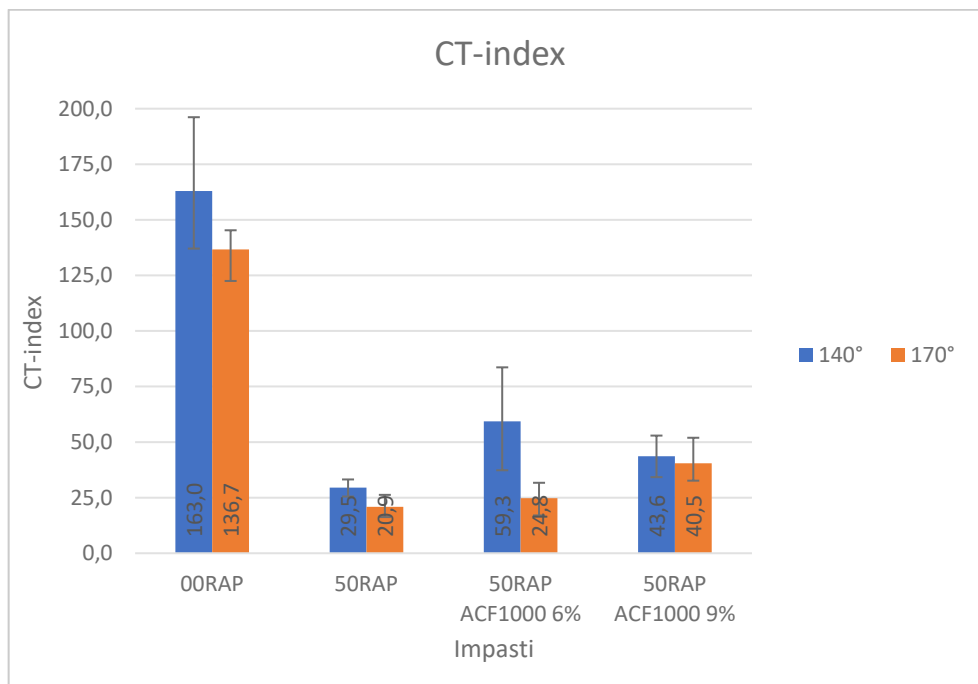


Grafico 4.122: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

In questo caso osservando il valore dell'indice di tolleranza al cracking, è facilmente osservabile come l'impiego di conglomerato di riciclo corrisponda ad un calo drastico del valore, calo che viene parzialmente bilanciato attraverso l'ausilio dell'additivo: nel dettaglio un minore contenuto di additivo corrisponde ad un maggiore valore del parametro nel caso della temperatura minore, mentre con un maggior contenuto di additivo risulta migliore la situazione ottenuta in seguito alla cottura con una temperatura maggiore.

#### 4.10. Impatto del tipo di bitume nelle caratteristiche del conglomerato bituminoso

In questo capitolo procederemo ad analizzare i diversi parametri delle miscele, mettendo a confronto i diversi impasti in funzione della diversa tipologia di bitume. In questo confronto escluderemo il parametro del “Volume dei vuoti” ottenuto mediante metodo sigillato poiché risulta essere poco veritiero ponendolo in relazione ai limiti di capitolato. Nel dettaglio esso risulterà poco rappresentativo poiché sigillando esclusivamente la parte esterna risulta ignorare la quantità dei vuoti interni.

Iniziamo mettendo a confronto gli impasti ottenuti con una temperatura di cottura pari a 140°:

140° - Vm,geom	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	5,5	4,9	3	6
	50RAP	5,2	5,1		
	50RAP ACF1000 6%	4,4	5,1		
	50RAP ACF1000 9%	5,3	5,5		

Tabella 4.115: Confronto dei volumi di vuoti

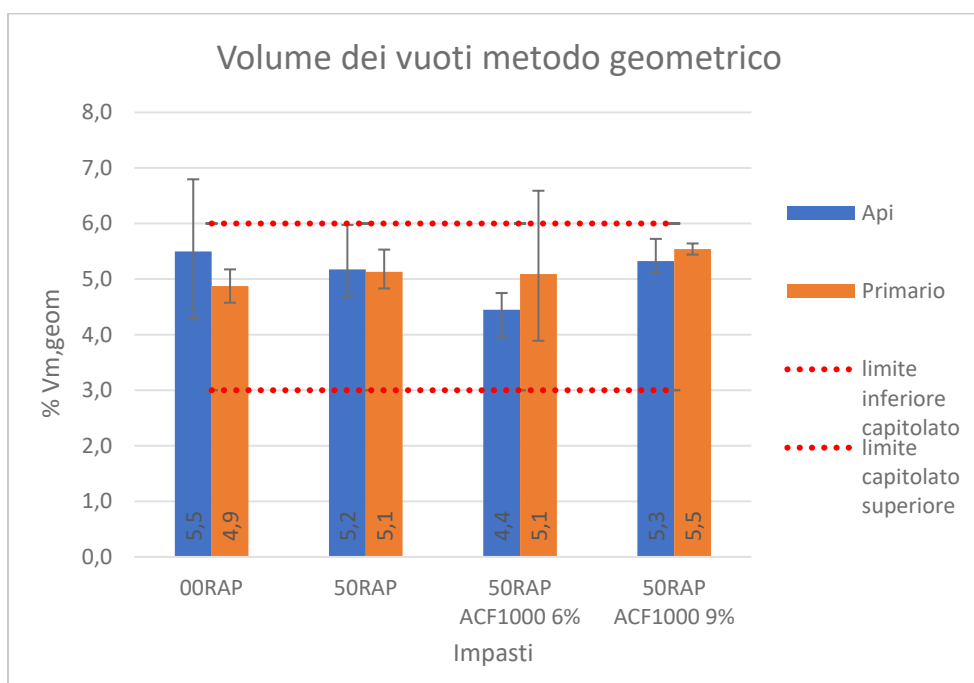


Grafico 4.1213: Confronto dei volumi di vuoti

In questo caso osserviamo come tutti i valori dei volumi dei vuoti, calcolati con il metodo geometrico”, degli impasti rientrano all’interno del fuso ottenuto dai limiti di capitolato. Osservando i valori relativi ai diversi bitumi come comportamento generale si può evidenziare come gli impasti con il bitume “API” abbiano una percentuale di vuoti maggiori di partenza ma allo stesso tempo diminuiscano maggiormente questa percentuale mediante l’ausilio dell’additivo. Questo permette di osservare come in questo caso l’additivo sembri avere un maggiore effetto con la prima tipologia di bitume, tanto che si ottengono una minore quantità di vuoti nonostante di partenza risultava maggiore. Inoltre una minore quantità di additivo permette di ottenere una valore minore di vuoti.

140° - ITSMM	Impasti	Api	Primario
	00RAP	5409,6	3768,3
	50RAP	12335,3	8893,5
	50RAP ACF1000 6%	8875,3	7795,5
	50RAP ACF1000 9%	8554,9	6932,1

Tabella 4.116: Confronto dei moduli di elasticità

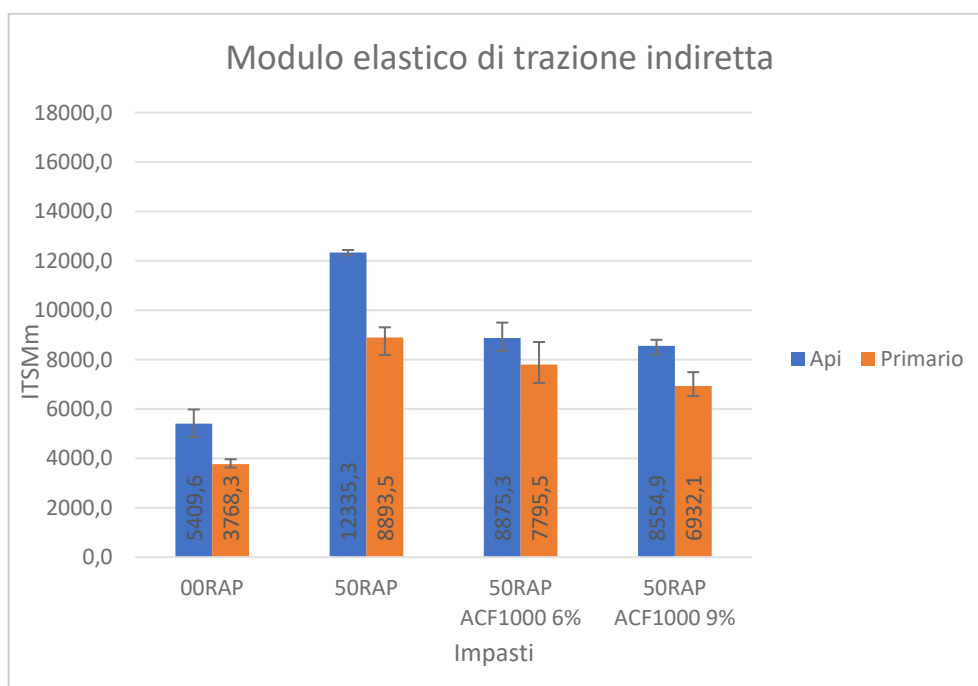


Grafico 4.1224: Confronto dei moduli di elasticità

In merito al modulo elastico di trazione indiretta invece è facilmente osservabile come l’utilizzo del RAP comporti un aumento della rigidità notevole del provino che corrisponde ad un aumento del valore. In seguito, l’utilizzo dell’additivo, soprattutto in quantità maggiori, comporta un parziale recupero dell’elasticità, specialmente nel caso di bitume “Primario” anche se anche in questo caso il maggiore effetto si è ottenuto nel caso del bitume “Api”.

140° - ITS	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	1,17	0,88	0,72	1,40
	50RAP	2,03	1,77		
	50RAP ACF1000 6%	1,65	1,50		
	50RAP ACF1000 9%	1,51	1,48		

Tabella 4.117: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

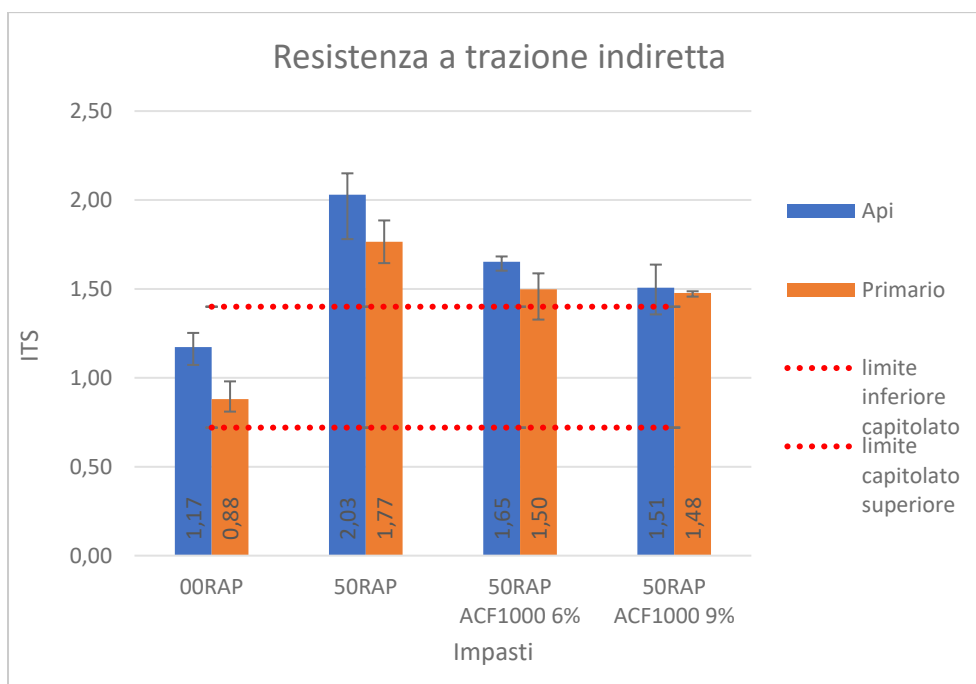


Grafico 4.1235: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

Per quanto riguarda la resistenza a trazione indiretta i valori ottenuti rientrano nel fuso di capitolato solamente nel caso della miscela vergine, anche se un maggior quantitativo di additivo permette di avvicinarsi al fuso abbassando il valore rispetto al 50RAP. Come tendenza generale si può inoltre notare come l'impiego di bitume "Primario" significhi un minore valore di resistenza a trazione più vicino ai limiti di capitolato. Questa differenza dovuta all'impiego di bitumi diversi viene accentuata leggermente dall'impiego di una minore quantità di additivo.

140° - CTI	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.
	00RAP	67,36	50,58	65
	50RAP	157,12	118,27	65
	50RAP ACF1000 6%	119,50	87,35	65
	50RAP ACF1000 9%	130,82	110,79	65

Tabella 4.118: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

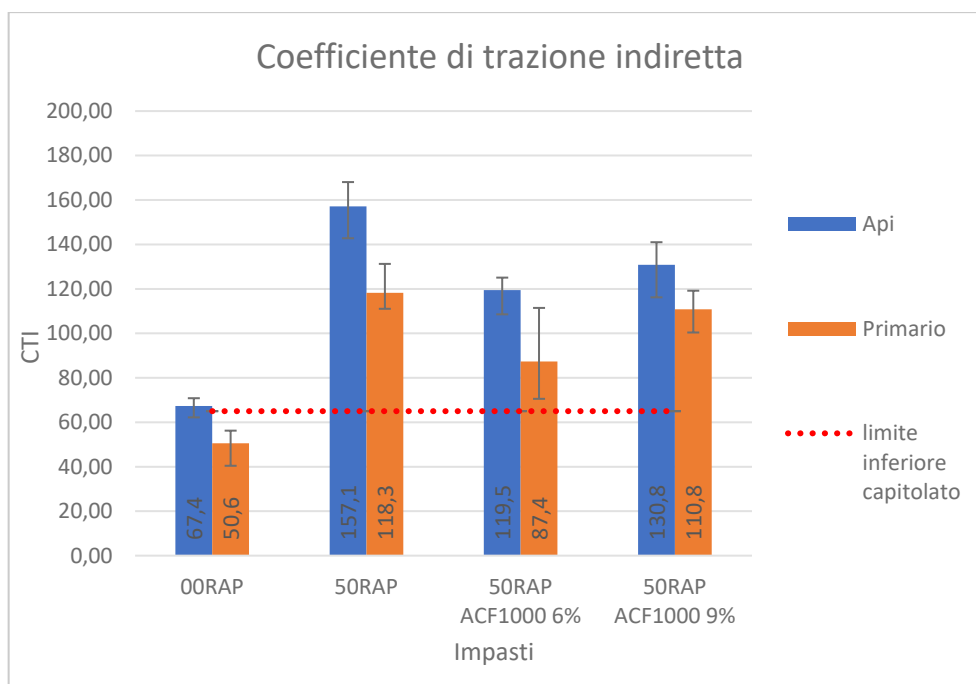


Grafico 4.1246: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

Nel caso del coefficiente di trazione indiretta tutti gli impasti ottenuti mediante bitume “Api” risultano essere superiori al limite inferiore posto dal capitolato, mentre nel caso degli impasti ottenuti con bitume “Primario” non risulta accettabile solo nel caso della miscela vergine. In questo caso osserviamo come l’impiego di RAP corrisponda ad un aumento dei valori, che poi diminuiscono parzialmente in merito all’impiego dell’additivo, nel dettaglio una minore quantità di additivo corrisponde ad un effetto migliore nel contenimento del valore. La tipologia di bitume invece influisce comportando generalmente ad un valore superiore nel caso del bitume “Api”

140° - CT-index	Impasti	Api	Primario
	00RAP	89,8	163,0
	50RAP	18,7	29,5
	50RAP ACF1000 6%	29,8	59,3
	50RAP ACF1000 9%	26,9	43,6

Tabella 4.119: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

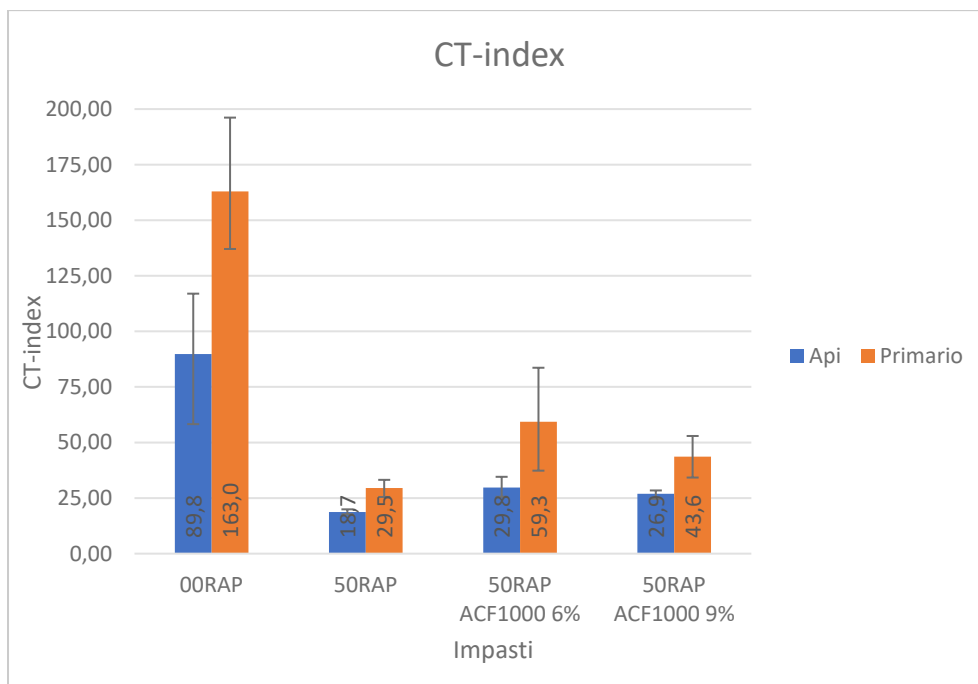


Grafico 4.1257: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

Nella valutazione dell'indice di tolleranza al cracking, risulta facilmente leggibile come questo parametro diminuisca drasticamente a causa dell'impiego di materiale di riciclo. Questo diminuzione viene parzialmente arrestata mediante l'utilizzo dell'additivo, anche se in questo il recupero risulta molto limitato. La variazione dell'impiego della tipologia di bitume corrisponde genericamente ad un maggior valore del parametro nel caso del bitume "Primario" in tutti gli impasti esaminati. Il recupero parziale delle caratteristiche originali risulta maggiore per entrambi i bitumi nel caso dell'impiego di una minore quantità di additivo, anche se la differenza risulta minimo nel caso del bitume "Api".



Iniziamo mettendo a confronto gli impasti ottenuti con una temperatura di cottura pari a 170°:

170° - Vm,geom	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	4,2	4,3	3	6
	50RAP	5,0	4,7		
	50RAP ACF1000 6%	3,7	4,5		
	50RAP ACF1000 9%	4,2	3,7		

Tabella 4.120: Confronto dei volumi dei vuoti

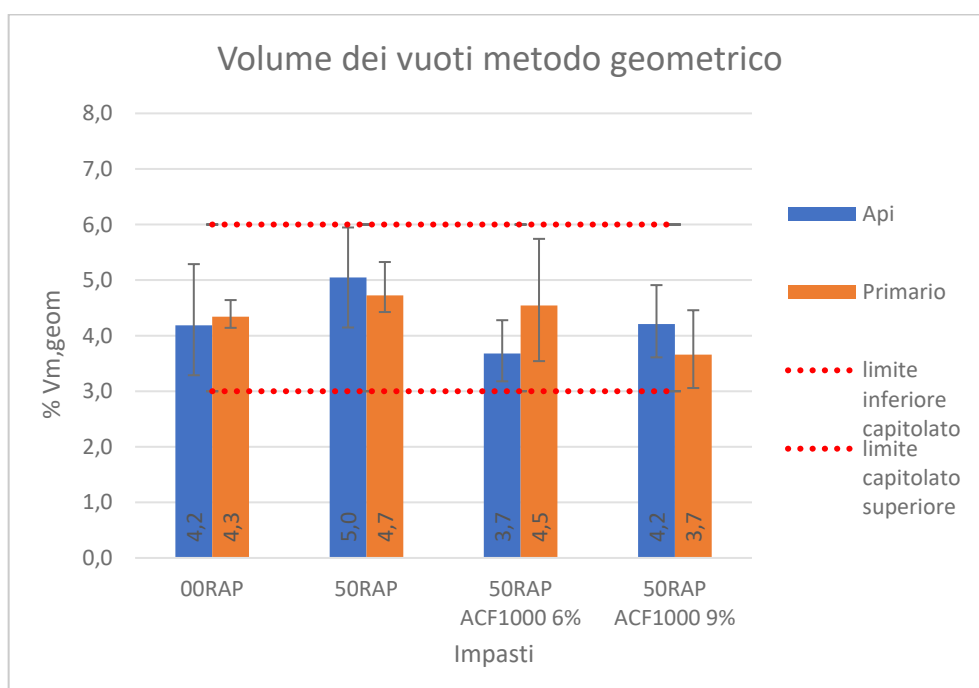


Grafico 4.1268: Confronto dei volumi dei vuoti

Le percentuali dei volumi dei vuoti determinate attraverso il metodo geometrico risultano rientrare all'interno del fuso di capitolato. L'ausilio dell'additivo anche in questo caso comporta una diminuzione dei vuoti, diminuzione che varia a seconda della tipologia di bitume e della quantità di additivo. Nel dettaglio vediamo che i bitume "Api" reagisce maggiormente con una quantità di additivo minore mentre nel caso bitume "Primario" si avrà un effetto maggiore con l'ausilio di una maggiore quantità additivo.

170° - ITSMm	Impasti	Api	Primario
	00RAP	7434	3757
	50RAP	16356	12935
	50RAP ACF1000 6%	13592	10860
	50RAP ACF1000 9%	10190	8230

Tabella 4.121: Confronto dei moduli di elasticità

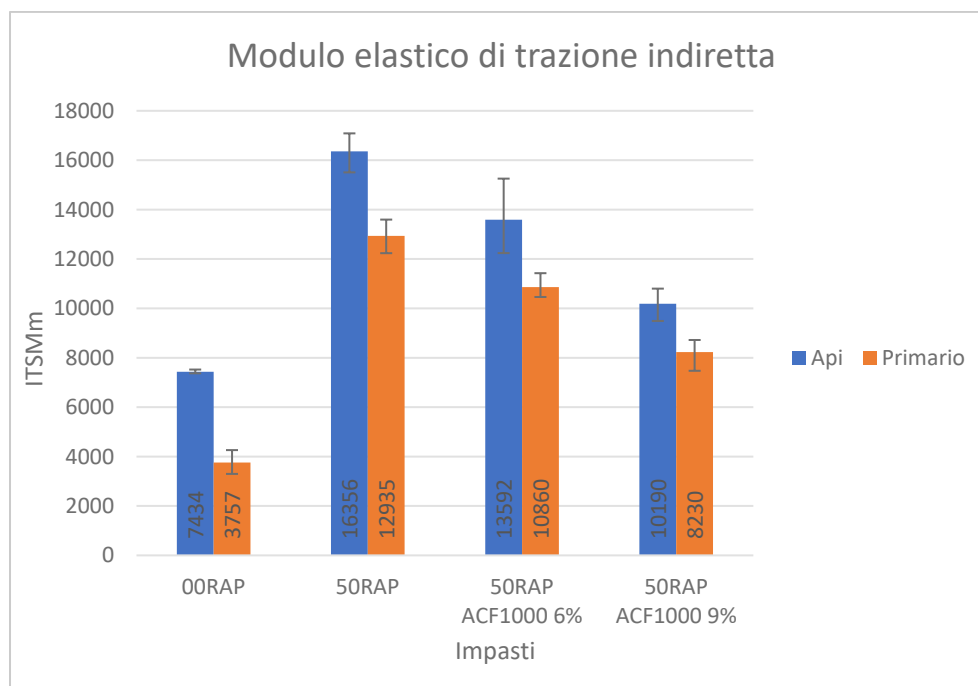


Grafico 4.12729: Confronto dei moduli di elasticità

Per quanto riguarda il modulo di elasticità si riscontra che l'impiego del materiale di riciclo comporta un aumento drastico del valore del parametro che corrisponde ad un aumento della rigidità dei provini. L'additivo in questo caso permette di recuperare parzialmente l'elasticità della miscela vergine e si osserva comportarsi meglio con una minore quantità di additivo. L'impiego di bitume "Api" si riscontra attraverso la misura di valori maggiori del parametro per ogni impasto, mentre per quanto riguarda la quantità di additivo aggiunto si ottengono effetti maggiori con una quantità maggiore per entrambi i bitumi.

170° - ITS	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.	Lim. Sup.
	00RAP	1,39	0,96	0,72	1,40
	50RAP	2,10	1,99		
	50RAP ACF1000 6%	1,89	1,76		
	50RAP ACF1000 9%	1,77	1,72		

Tabella 4.122: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

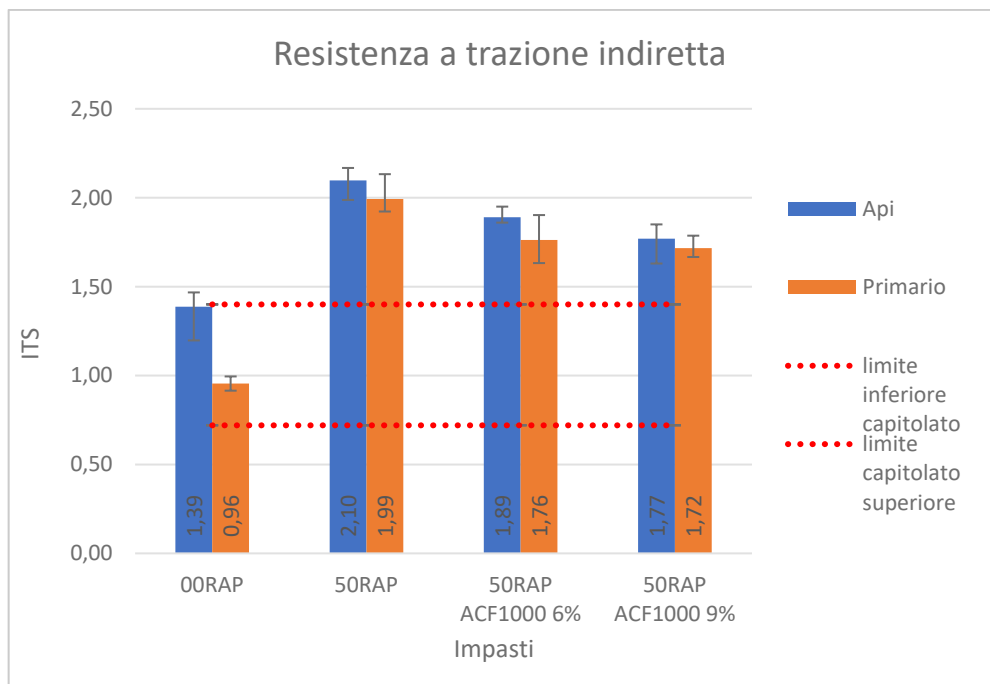


Grafico 4.1280: Confronto delle resistenze a trazione indiretta

I valori della resistenza a trazione indiretta risultano compresi all'interno del fuso solamente nel caso della miscela vergine. L'impiego di RAP nella miscela comporta un aumento dei valori al di fuori del fuso, aumento che viene parzialmente contenuto mediante l'ausilio dell'additivo. La maggior quantità di additivo in questo caso corrisponde ad un miglioramento delle prestazioni che però non risultano rientrare ancora all'interno del range accettabile. L'impiego di bitume "Api" in questo caso corrisponde a valori del parametro più elevati in maniera generica e non differisce di molto invece l'effetto dell'additivo in merito alla variazione di impiego di bitume.

170° - CTI	Impasti	Api	Primario	Lim. Inf.
	00RAP	76,26	46,68	65
	50RAP	148,89	134,32	
	50RAP ACF1000 6%	145,89	128,44	
	50RAP ACF1000 9%	133,13	109,80	

Tabella 4.123: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

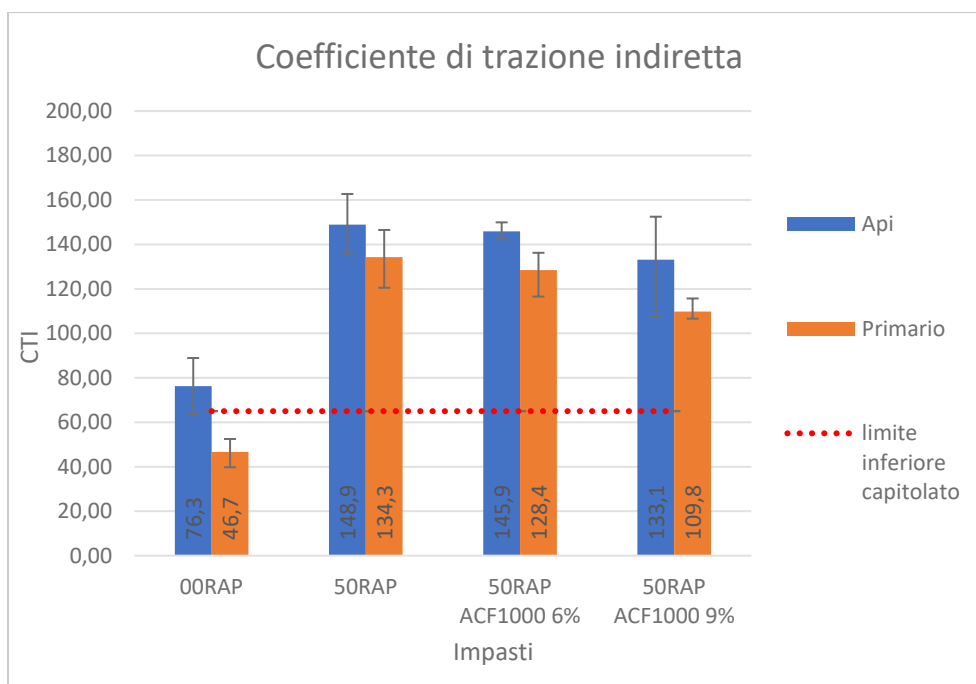


Grafico 4.1291: Confronto tra i coefficienti di trazione indiretta

In merito alla valutazione del coefficiente di trazione indiretta osserviamo una situazione particolare, in cui esclusivamente la miscela vergine ottenuta con l'impiego di bitume "Primario" non risulta rispettare il limite inferiore imposto dal capitolato. In generale l'andamento dei valori cresce all'aumentare dell'impiego del materiale di riciclo, andamento che viene parzialmente arrestato mediante l'ausilio dell'additivo. In particolare, una maggiore quantità di additivo corrisponde ad un maggior recupero dei parametri originari per entrambe le tipologie di bitumi. Il bitume "Api" in generale implica una misura del parametro superiore rispetto all'impiego di bitume "Primario"

170° - CT-index	Impasti	Api	Primario
	00RAP	77,13	136,70
	50RAP	8,13	20,87
	50RAP ACF1000 6%	15,23	24,80
	50RAP ACF1000 9%	23,75	40,46

Tabella 4.124: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

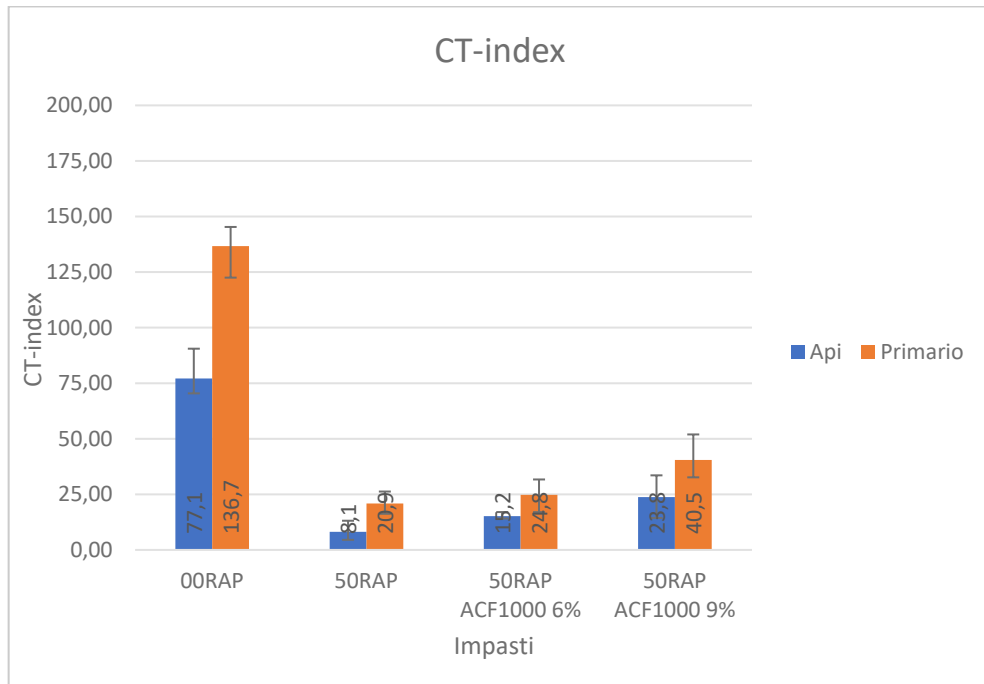


Grafico 4.1302: Confronto tra gli indici di tolleranza al cracking

In questo caso osservando il valore dell'indice di tolleranza al cracking è facilmente osservabile come l'impiego di conglomerato di riciclo corrisponda ad un calo drastico del valore, calo che viene parzialmente bilanciato attraverso l'ausilio dell'additivo: nel dettaglio l'impiego di una quantità di additivo maggiore corrisponde ad un effetto maggiore in merito alla rigenerazione delle caratteristiche originali della miscela vergine. In tutte le tipologie di impasti si può notare come quelli ottenuti utilizzando bitume di tipo "Primario" risultino con un valore maggiore misurato.

#### 4.11. Valutazione finale

Per esprimere in maniera ancor più oggettiva e dettagliata le differenze prestazionali riscontrate nella sperimentazione delle singole miscele, insieme al tesista Campana Marco, abbiamo sviluppato un nuovo parametro che ci permette di esprimere un giudizio generale sugli impasti, che tiene conto contemporaneamente delle tre caratteristiche qualitative principali: il modulo elastico di trazione indiretta (ITSM), la resistenza a trazione indiretta (ITS) e l'indice di tolleranza al cracking (CT-index).

Attraverso la valutazione di questo parametro si è in grado di esprimere un punteggio qualitativo mediante una votazione da 0 a 10: la scala è stabilita in funzione della differenza tra il valore corrispondente alla miscela vergine (00RAP), a cui viene attribuito una votazione pari a 10, e il valore corrispondente alla miscela "50RAP", che implica invece una votazione pari a 0. Per quanto riguarda i punteggi intermedi, riferiti alle miscele da studiare, essi vengono ottenuti mediante interpolazione lineare tra i valori estremi dell'intervallo, identificato dai risultati massimi e minimi raccolti. Di seguito viene riportata la formula utilizzata per l'interpolazione:

$$Punteggio = 10 - \left[ \frac{(10 - 0) \cdot |Valore prova 00RAP - Valore caso generico|}{|Valore prova 00RAP - Valore prova 50RAP|} \right]$$

Una volta stabilito ogni singolo punteggio, essi vengono quindi sommati in modo da ottenere un punteggio totale, il quale nel caso della miscela vergine, corrisponderà ad un valore sommativo massimo di 30 punti. In generale, maggiore risulterà il punteggio della miscela e maggiore sarà il grado di recupero delle caratteristiche prestazionali rispetto a quella vergine, ottenendo quindi un impasto più simile a quello di riferimento (00RAP).

Oltre al punteggio cumulativo è stato aggiunto un ulteriore metodo di valutazione basato sulla misura e il confronto delle aree di determinati grafici, espressi sottoforma di triangoli in cui ognuno dei suoi vertici individua il punteggio di uno dei parametri sopra elencati. In generale maggiore sarà l'area sottesa dal triangolo e migliore sarà la rigenerazione prestazionale ottenuta dalle miscele additivate.

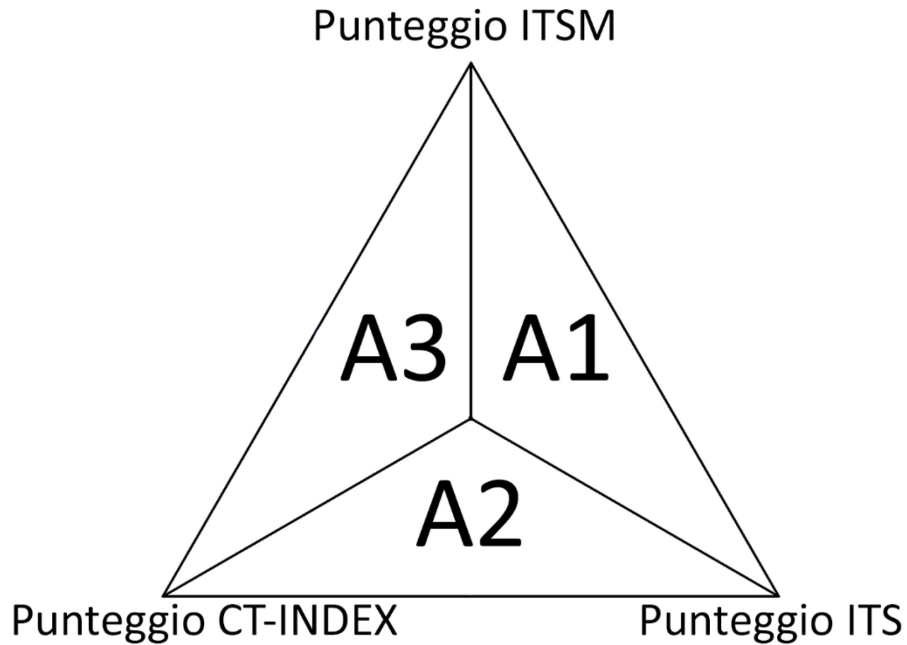


Figura 4.1: Rappresentazione delle suddivisioni del triangolo

Per calcolare le aree dei triangoli, è stato necessario suddividere preliminarmente la superficie in tre sotto-triangoli, inscritti al suo interno, attraverso i quali è poi possibile determinare l'area totale ( $A_{tot}$ ) come una semplice somma delle singole aree ( $A_1$ ,  $A_2$  E  $A_3$ ). Per determinare le aree dei sotto-triangoli, si è ricorso invece all'utilizzo di una formula classica della trigonometria (sotto riportata) attraverso la quale, note le lunghezze di due lati e l'ampiezza dell'angolo compreso, risulta possibile ottenere il valore della superficie di un triangolo qualsiasi.

$$A_i = \frac{l_i \cdot l_j \cdot \text{sen}\alpha}{2}$$

dove:

- $l_i$  è la lunghezza dei lati che corrisponde al valore dei singoli punteggi
- $\alpha$  è l'angolo compreso tra i due lati noti (fissato a  $120^\circ$  poiché corrisponde ad un terzo dell'angolo giro)

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3$$

In seguito, verranno riportati grafici e tabelle con le caratteristiche riguardanti le scale e i punteggi ottenuti dal metodo sopra esposto per ogni tipologia di bitume utilizzato e temperatura di cottura, iniziando a confrontare le diverse temperature:

ITSM 140° API		ITSM 140° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
12335	0	8894	0
5410	10	3768	10
-1515	0	-1358	0

Tabella 4.125: Scala dei punteggi

140 °C	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP API	5410	10,00
50RAP API	12335	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	8875	5,00
50RAP API ACF1000 9% RAP	8555	5,46

Tabella 4.126: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

140 °C	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP PRIM.	3768	10,00
50RAP PRIM.	8894	0,00
50RAP PRIM. ACF1000 6% RAP	7796	2,14
50RAP PRIM. ACF1000 9% RAP	6932	3,83

Tabella 4.127: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

ITSM 170° API		ITSM 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
16356	0	12935	0
7434	10	3757	10
-1488	0	-5421	0

Tabella 4.128: Scala dei punteggi



170 °C	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP API	7434	10,00
50RAP API	16356	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	13592	3,10
50RAP API ACF1000 9% RAP	10190	6,91

Tabella 4.129: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

170 °C	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP PRIMARIO	3757	10,00
50RAP PRIMARIO	12935	0,00
50RAP PRIMARIO ACF1000 6% RAP	10860	2,26
50RAP PRIMARIO ACF1000 9% RAP	8230	5,13

Tabella 4.130: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

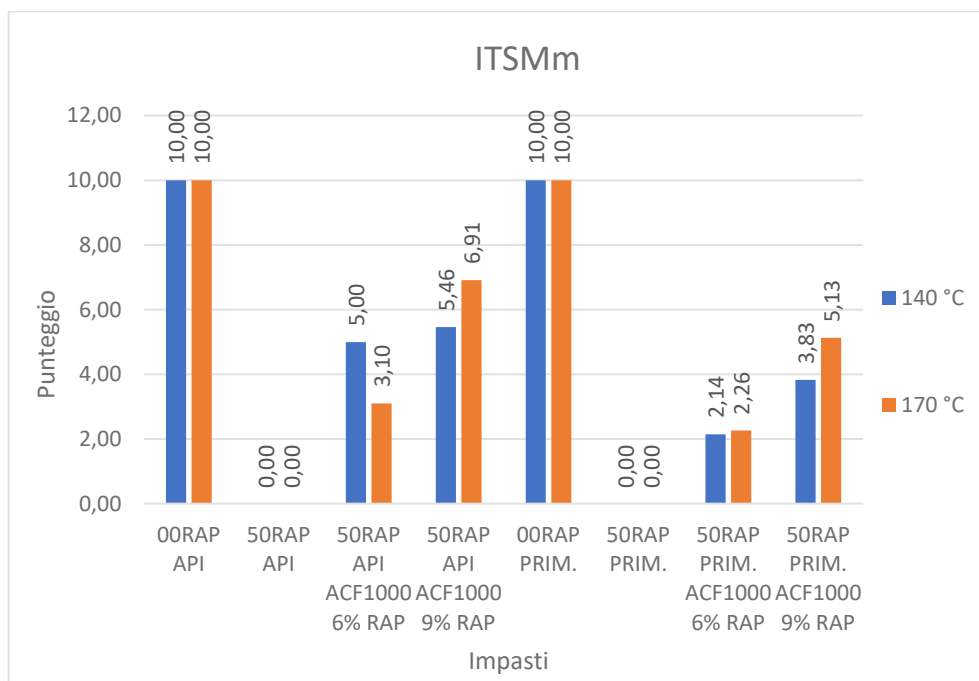


Grafico 4.1313: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione dei moduli elastici

ITS 140° API		ITS 140° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
2,03	0	1,77	0
1,17	10	0,88	10
0,31	0	0,01	0

Tabella 4.131: Scala dei punteggi

140 °C	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP API	1,17	10,00
50RAP API	2,03	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	1,65	4,40
50RAP API ACF1000 9% RAP	1,51	6,10

Tabella 4.132: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

140 °C	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP PRIMARIO	0,88	10,00
50RAP PRIMARIO	1,77	0,00
50RAP PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1,50	3,02
50RAP PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1,48	3,26

Tabella 4.133: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

ITS 170° API		ITS 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
2,0975	0	1,9925	0
1,39	10	0,96	10
0,68	0	-0,07	0

Tabella 4.134: Scala dei punteggi

170 °C	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP API	1,39	10,00
50RAP API	2,10	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	1,89	2,92
50RAP API ACF1000 9% RAP	1,77	4,61

Tabella 4.135: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

170 °C	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP PRIMARIO	0,96	10,00
50RAP PRIMARIO	1,99	0,00
50RAP PRIMARIO ACF1000 6% RAP	1,76	2,22
50RAP PRIMARIO ACF1000 9% RAP	1,72	2,66

Tabella 4.136: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

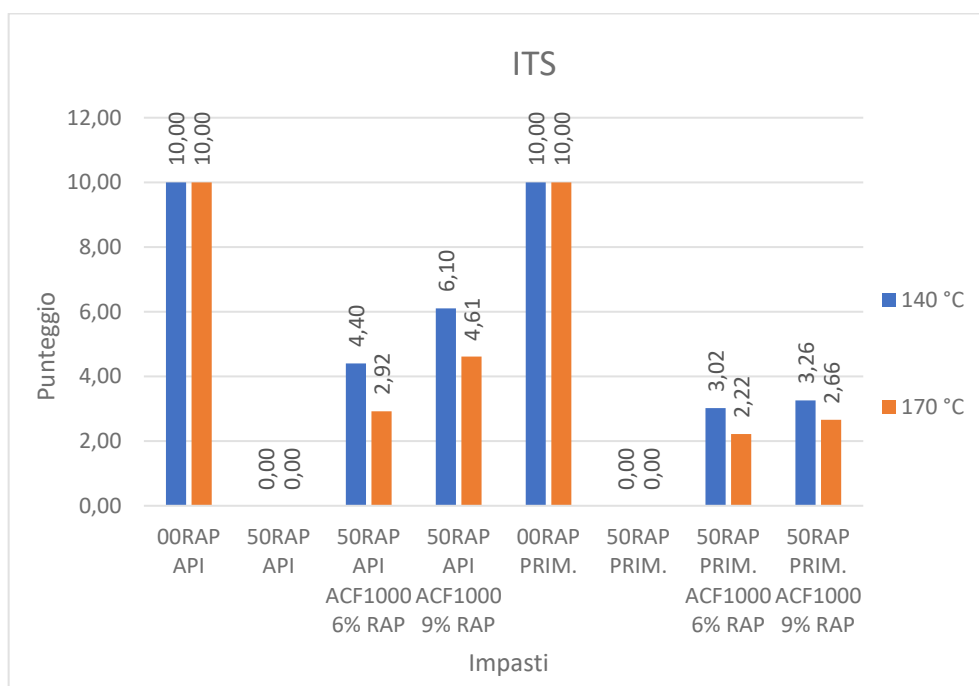


Grafico 4.1324: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione delle resistenze a trazione indiretta

CT-INDEX 140° API	
%	Voto
160,73	0
89,77	10
18,87	0

CT-INDEX 140° PRIM.	
%	Voto
296,43	0
162,97	10
29,50	0

Tabella 4.137: Scala dei punteggi

140 °C	CT-INDEX	Punteggio
00RAP API	89,8	10,00
50RAP API	18,7	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	29,8	1,54
50RAP API ACF1000 9% RAP	26,9	1,15

Tabella 4.138: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

140 °C	CT-INDEX	Punteggio
00RAP PRIMARIO	163,0	10,00
50RAP PRIMARIO	29,5	0,00
50RAP PRIMARIO ACF1000 6% RAP	59,3	2,24
50RAP PRIMARIO ACF1000 9% RAP	43,6	1,06

Tabella 4.139: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 6% RAP"

CT-INDEX 170° API		CT-INDEX 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
146,13	0	252,53	0
77,1	10	136,70	10
8,13	0	20,87	0

Tabella 4.140: Scala dei punteggi

170 °C	CT-INDEX	Punteggio
00RAP API	77,1	10,00
50RAP API	8,1	0,00
50RAP API ACF1000 6% RAP	15,2	1,03
50RAP API ACF1000 9% RAP	23,8	2,26

Tabella 4.141: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

170 °C	CT-INDEX	Punteggio
00RAP PRIMARIO	136,7	10,00
50RAP PRIMARIO	20,9	0,00
50RAP PRIMARIO ACF1000 6% RAP	24,8	0,34
50RAP PRIMARIO ACF1000 9% RAP	40,5	1,69

Tabella 4.142: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

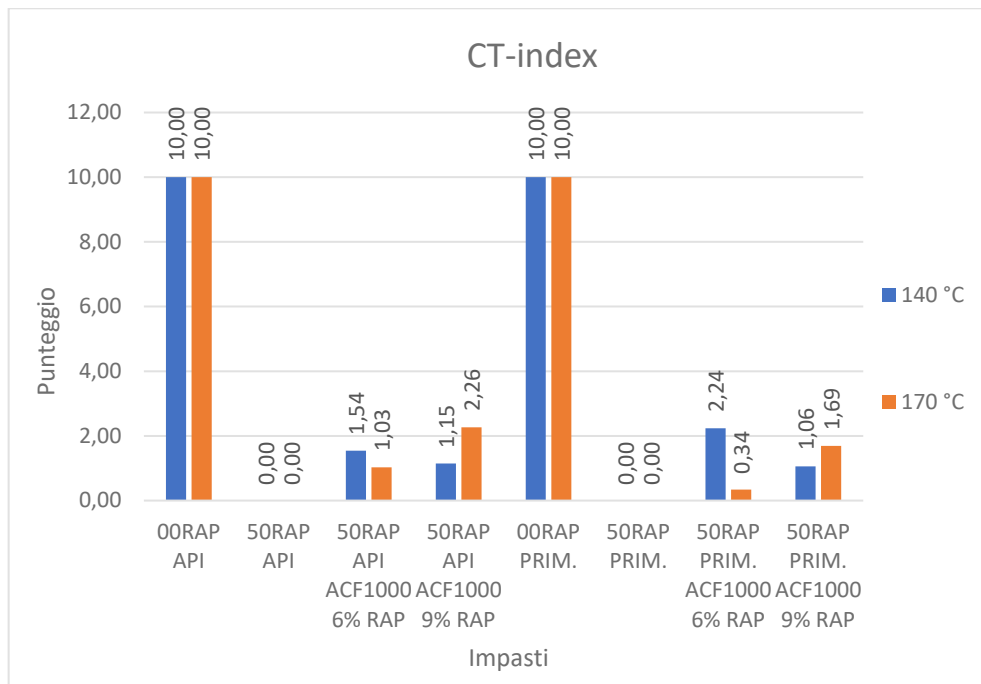


Grafico 4.1335: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione degli indici di tolleranza al cracking

Procediamo ora ad evidenziare la differenza tra le miscele ottenute mediante i diversi tipi di bitume:

ITSM 140° API		ITSM 170° API	
%	Voto	%	Voto
12335	0	16356	0
5410	10	7434	10
-1515	0	-1488	0

Tabella 4.143: Scala dei punteggi

API	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP 140°	5410	10,00
50RAP 140°	12335	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	8875	5,00
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	8555	5,46

Tabella 4.144: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

API	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP 170°	7434	10,00
50RAP 170°	16356	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	13592	3,10
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	10190	6,91

Tabella 4.145: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

ITSM 140° PRIM.		ITSM 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
8894	0	12935	0
3768	10	3757	10
-1358	0	-5421	0

Tabella 4.146: Scala dei punteggi

PRIM.	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP 140°	3768	10,00
50RAP 140°	8894	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	7796	2,14
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	6932	3,83

Tabella 4.147: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

PRIM.	ITSM [Mpa]	Punteggio
00RAP 170°	3757	10,00
50RAP 170°	12935	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	10860	2,26
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	8230	5,13

Tabella 4.148: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

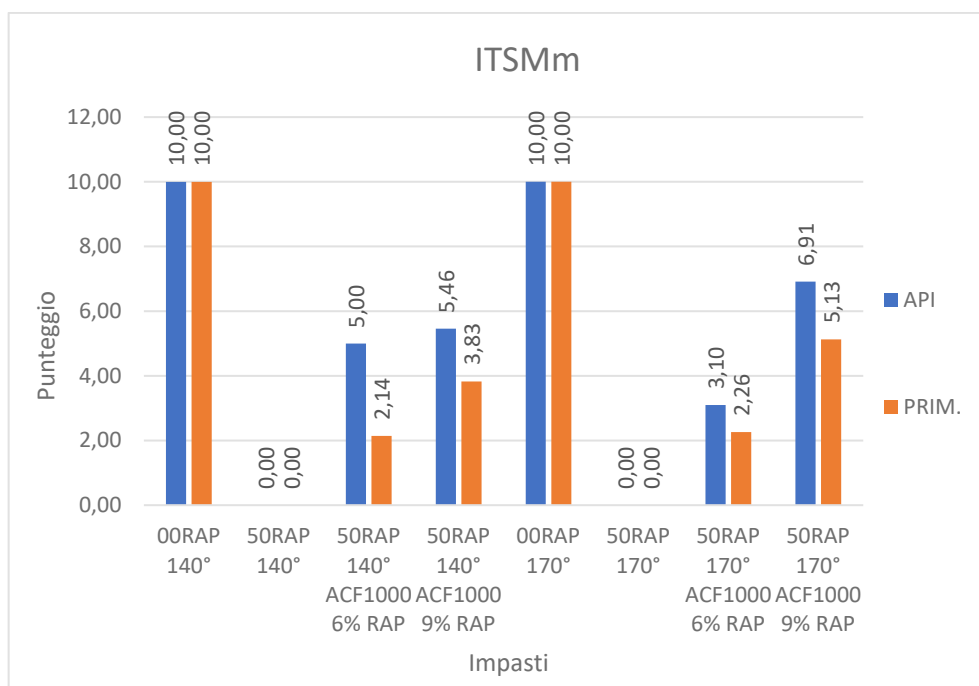


Grafico 4.1346: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione dei moduli elastici

ITS 140° API		ITS 170° API	
%	Voto	%	Voto
2,03	0	2,10	0
1,17	10	1,39	10
0,31	0	0,68	0

Tabella 4.149: Scala dei punteggi

API	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP 140°	1,17	10,00
50RAP 140°	2,03	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	1,65	4,40
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	1,51	6,10

Tabella 4.150: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta la "50RAP ACF1000 9% RAP"

API	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP 170°	1,39	10,00
50RAP 170°	2,10	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	1,89	2,92
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	1,77	4,61

Tabella 4.151: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta la "50RAP ACF1000 9% RAP"

ITS 140° PRIM.		ITS 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
1,77	0	1,99	0
0,88	10	0,96	10
0,01	0	-0,07	0

Tabella 4.152: Scala dei punteggi

PRIM.	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP 140°	0,88	10,00
50RAP 140°	1,77	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	1,50	3,02
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	1,48	3,26

Tabella 4.153: Valori e punteggi



In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

PRIM.	ITS [Mpa]	Punteggio
00RAP 170°	0,96	10,00
50RAP 170°	1,99	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	1,76	2,20
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	1,72	2,64

Tabella 4.154: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

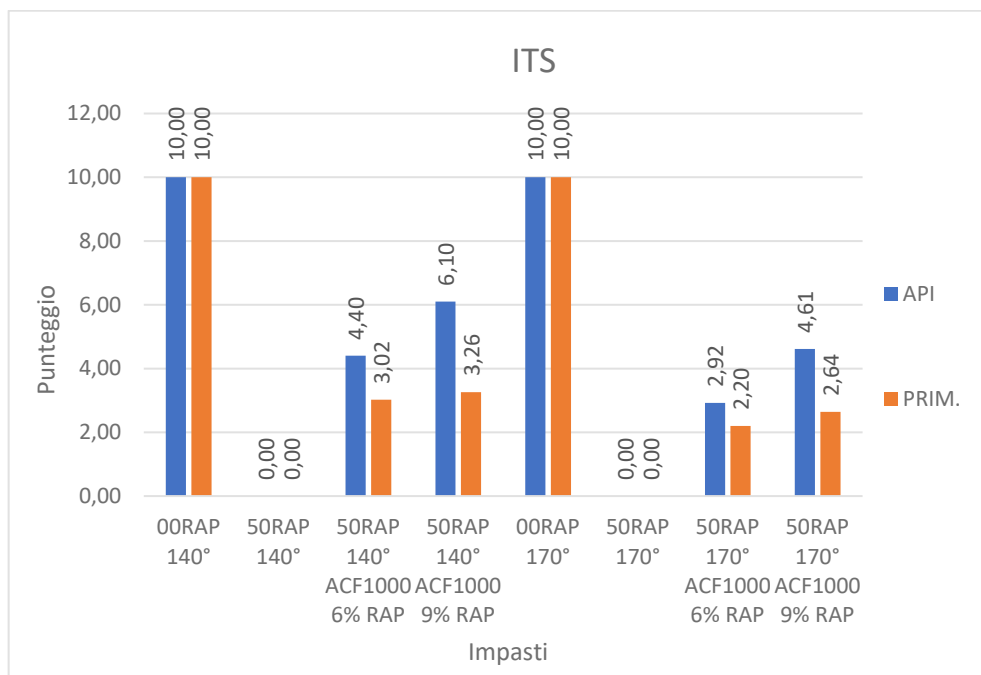


Grafico 4.1357: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione delle resistenze a trazione indiretta

CT-INDEX 140° API		CT-INDEX 170° API	
%	Voto	%	Voto
160,73	0	146,13	0,00
89,8	10	77,13	10,00
18,87	0	8,13	0,00

Tabella 4.155: Scala dei punteggi

API	CT-INDEX	Punteggio
00RAP 140°	89,8	10,00
50RAP 140°	18,7	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	29,8	1,54
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	26,9	1,14

Tabella 4.156: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 6% RAP"

API	CT-INDEX	Punteggio
00RAP 170°	77,1	10,00
50RAP 170°	8,1	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	15,2	1,03
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	23,8	2,26

Tabella 4.157: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

CT-INDEX 140° PRIM.		CT-INDEX 170° PRIM.	
%	Voto	%	Voto
296,43	0,00	252,5333	0
162,97	10,00	136,7	10
29,50	0,00	20,86667	0

Tabella 4.158: Scala dei punteggi

PRIM.	CT-INDEX	Punteggio
00RAP 140°	163,0	10,00
50RAP 140°	29,5	0,00
50RAP 140° ACF1000 6% RAP	59,3	2,24
50RAP 140° ACF1000 9% RAP	43,6	1,06

Tabella 4.159: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 6% RAP"

PRIM.	CT-INDEX	Punteggio
00RAP 170°	136,7	10,00
50RAP 170°	20,9	0,00
50RAP 170° ACF1000 6% RAP	24,8	0,34
50RAP 170° ACF1000 9% RAP	40,5	1,69

Tabella 4.160: Valori e punteggi

In questo caso la miscela che ha ottenuto il miglior effetto dall'impiego dell'additivo risulta il "50RAP ACF1000 9% RAP"

Con il seguente grafico vengono riassunte le caratteristiche descritte in precedenza ponendo a confronto i diversi bitumi e le diverse temperature:

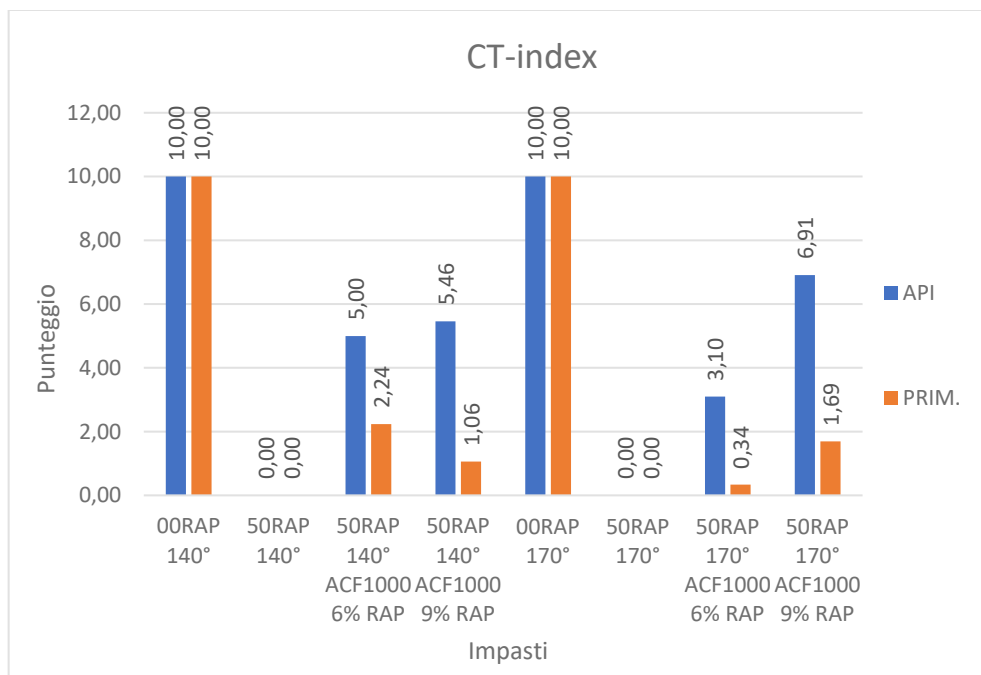


Grafico 4.1368: Confronto tra i punteggi riferiti alla valutazione degli indici di tolleranza al cracking

In seguito, verranno riportate tabelle e grafici con i dati riferiti ai punteggi totali e alle misure delle aree:

Impasto	Punteggio ITSM	Punteggio ITS	Punteggio CT-INDEX
00RAP	10,0	10,0	10,0
50RAP	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	5,0	4,4	1,6
50RAP ACF1000 9% RAP	5,5	6,1	1,2

Tabella 4.161: Raccolta dei punteggi di ogni parametro

Area impasti 140° API					
Impasto	Punteggio totale	A1	A2	A3	Atot
00RAP	30,0	29,0	29,0	29,0	87,1
50RAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	11,0	6,4	2,0	2,3	10,6
50RAP ACF1000 9% RAP	12,7	9,7	2,0	1,8	13,5

Tabella 4.162: Aree dei triangoli nel grafico

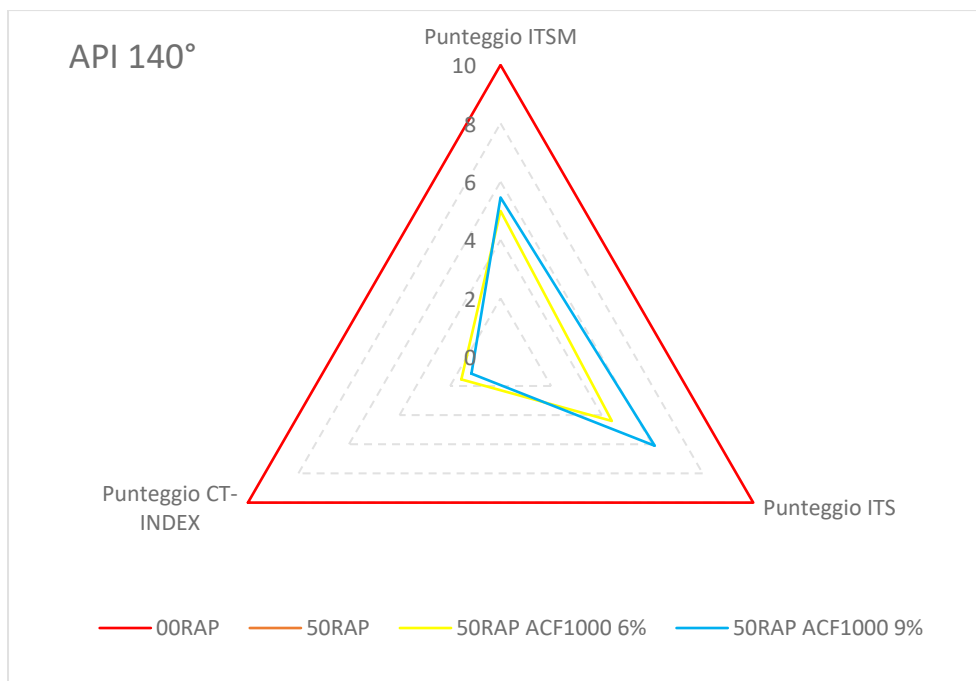


Grafico 4.13739: Aree del triangolo punteggio ITSM - punteggio ITS - punteggio CT-index

In questo caso considerando gli impasti ottenuti con bitume “Api” a 140° secondo il punteggio sopra spiegato avremo che sia per punteggio totale sia per somma delle aree l’impasto “50RAP ACF1000 9%” risulterà il “migliore”, cioè quello che si avvicinerà di più alle caratteristiche della miscela vergine, cioè senza l’impiego di RAP.

Impasto	Punteggio ITSM	Punteggio ITS	Punteggio CT-INDEX
00RAP	10,0	10,0	10,0
50RAP	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	3,1	2,9	1,0
50RAP ACF1000 9% RAP	6,9	4,6	2,3

Tabella 4.163: Raccolta dei punteggi di ogni parametro

Area impasti 170° API					
Impasto	Punteggio totale	A1	A2	A3	Atot
00RAP	30,0	29,0	29,0	29,0	87,1
50RAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	7,1	2,6	0,9	0,9	4,4
50RAP ACF1000 9% RAP	13,8	9,3	3,0	4,5	16,8

Tabella 4.164: Aree dei triangoli nel grafico

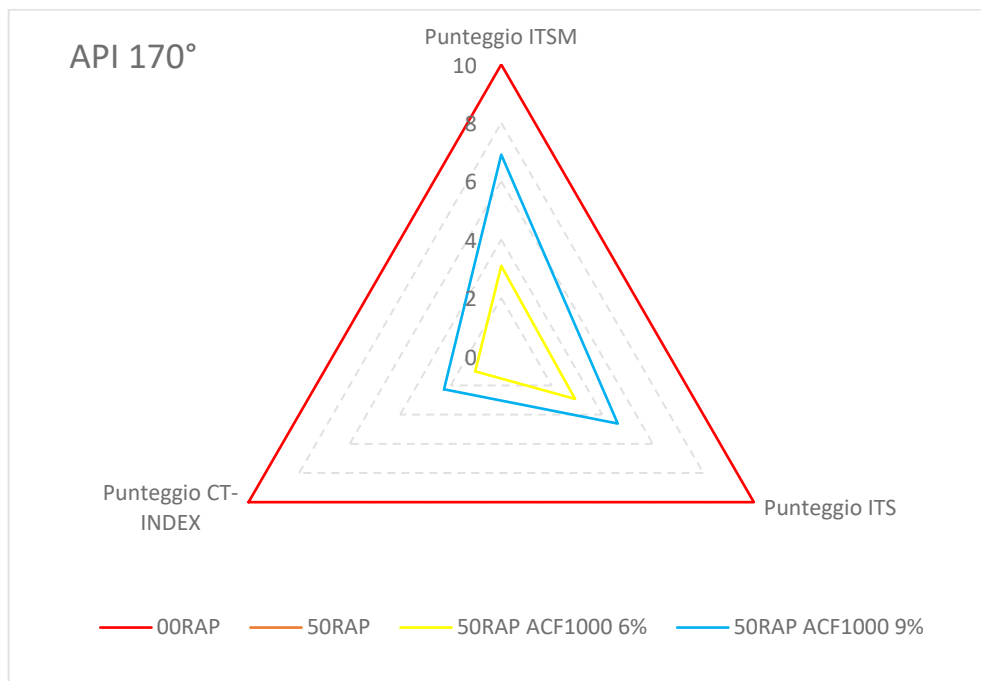


Grafico 4.1380: Aree del triangolo punteggio ITSM - punteggio ITS - punteggio CT-index

In questo caso considerando gli impasti ottenuti con bitume “Api” a 170° secondo il punteggio sopra spiegato avremo che sia per punteggio totale sia per somma delle aree l’impasto “50RAP ACF1000 9%” risulterà il “migliore”, cioè quello che si avvicinerà di più alle caratteristiche della miscela vergine, cioè senza l’impiego di RAP.

Impasto	Punteggio ITSM	Punteggio ITS	Punteggio CT-INDEX
00RAP	10,0	10,0	10,0
50RAP	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	2,1	3,0	2,2
50RAP ACF1000 9% RAP	3,8	3,3	1,1

Tabella 4.165: Raccolta dei punteggi di ogni parametro

Area impasti 140° Primario					
Impasto	Punteggio totale	A1	A2	A3	Atot
00RAP	30,0	29,0	29,0	29,0	87,1
50RAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	7,4	1,9	2,0	1,4	5,2
50RAP ACF1000 9% RAP	8,1	3,6	1,0	1,2	5,8

Tabella 4.166: Aree dei triangoli nel grafico

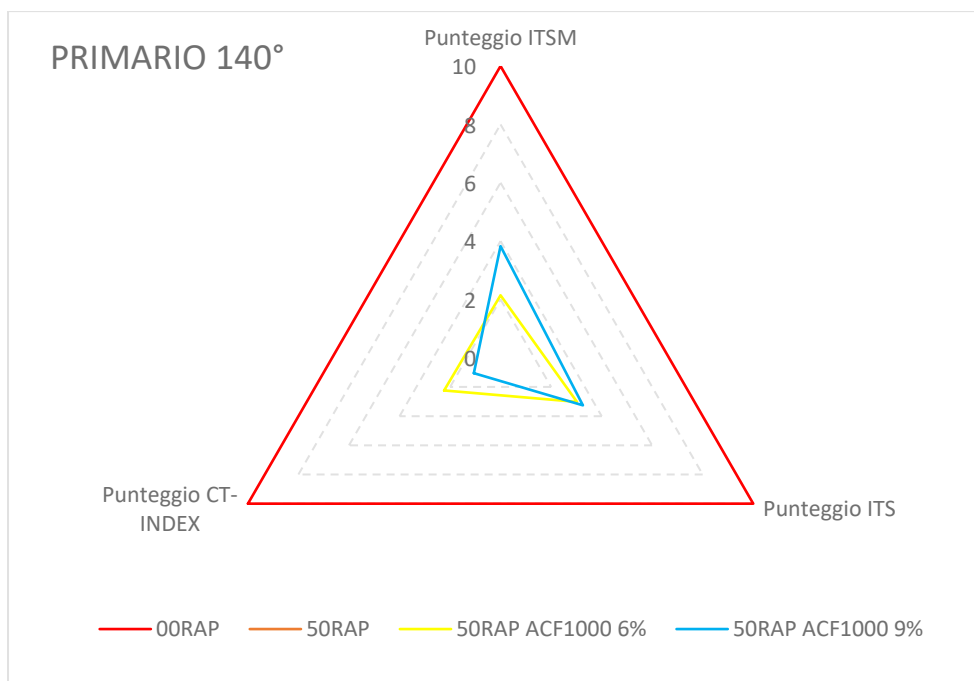


Grafico 4.1391: Aree del triangolo punteggio ITSM – punteggio ITS – punteggio CT-index

In questo caso considerando gli impasti ottenuti con bitume “Primario” a 140° secondo il punteggio sopra spiegato avremo che sia per punteggio totale sia per somma delle aree l’impasto “50RAP ACF1000 9%” risulterà il “migliore”, cioè quello che si avvicinerà di più alle caratteristiche della miscela vergine, cioè senza l’impiego di RAP.

Impasto	Punteggio ITSM	Punteggio ITS	Punteggio CT-INDEX
00RAP	10,0	10,0	10,0
50RAP	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	2,3	2,2	0,3
50RAP ACF1000 9% RAP	5,1	2,7	1,7

Tabella 4.167: Raccolta dei punteggi di ogni parametro

Area impasti 170° Primario					
Impasto	Punteggio totale	A1	A2	A3	Atot
00RAP	30,0	29,0	29,0	29,0	87,1
50RAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50RAP ACF1000 6% RAP	4,8	1,5	0,2	0,2	1,9
50RAP ACF1000 9% RAP	9,5	4,0	1,3	2,5	7,8

Tabella 4.168: Aree dei triangoli nel grafico

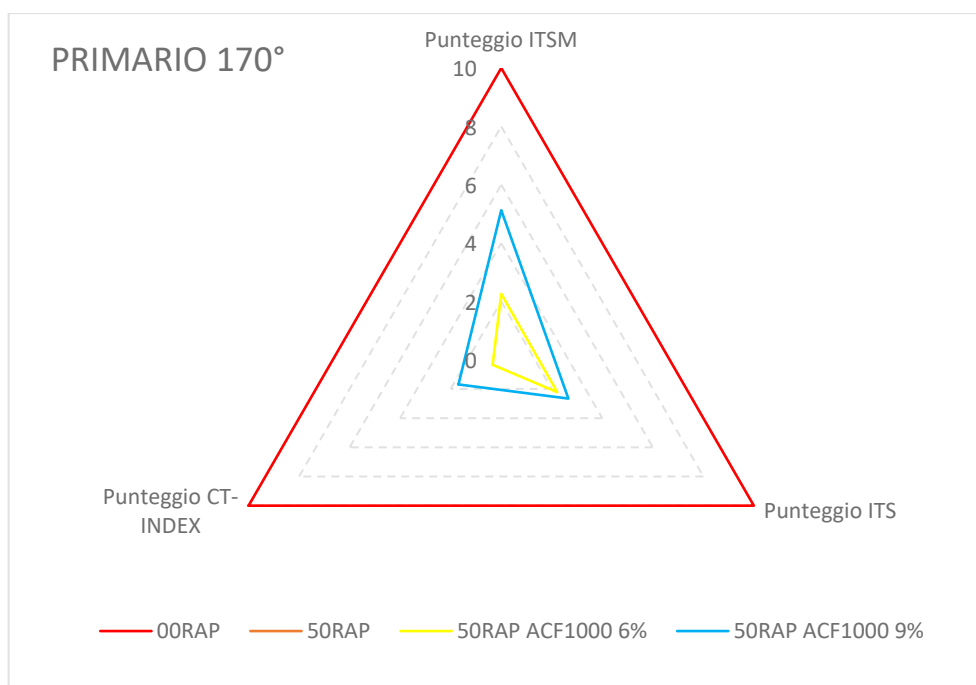


Grafico 4.1402: Aree del triangolo punteggio ITSM – punteggio ITS – punteggio CT-index

In questo caso considerando gli impasti ottenuti con bitume "Primario" a 170° secondo il punteggio sopra spiegato avremo che sia per punteggio totale sia per somma delle aree l'impasto "50RAP ACF1000 9%" risulterà il "migliore", cioè quello che si avvicinerà di più alle caratteristiche della miscela vergine, cioè senza l'impiego di RAP.

Per completezza, in merito al giudizio finale, viene espresso un ulteriore metodo di giudizio basato sul confronto delle percentuali di miglioramento riferite ai valori del "punteggio totale" e del "Area totale" dei triangoli descritti nei grafici sopra. Per procedere al calcolo delle percentuali basterà dividere il valore per l'intervallo della scala della votazione e moltiplicare il tutto per cento nel seguente modo:

$$\% \text{ di miglioramento} = \left( \frac{\text{Punteggio} - \text{Punteggio minimo}}{\text{Range di scala}} \right) \cdot 100$$

API 140°	Punteggio totale	Atot	% di miglioramento "punteggio totale"	% di miglioramento "Atot"
50RAP ACF1000 6%	11,0	10,6	36,5	12,2
50RAP ACF1000 9%	12,7	13,5	42,4	15,6

Tabella 4.169: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi



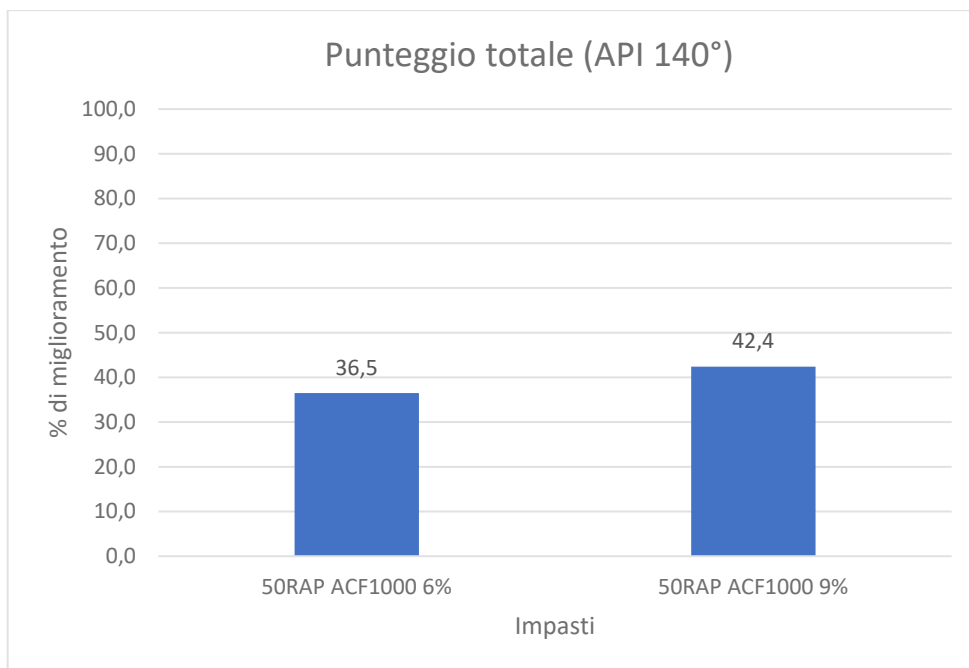


Grafico 4.1413: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

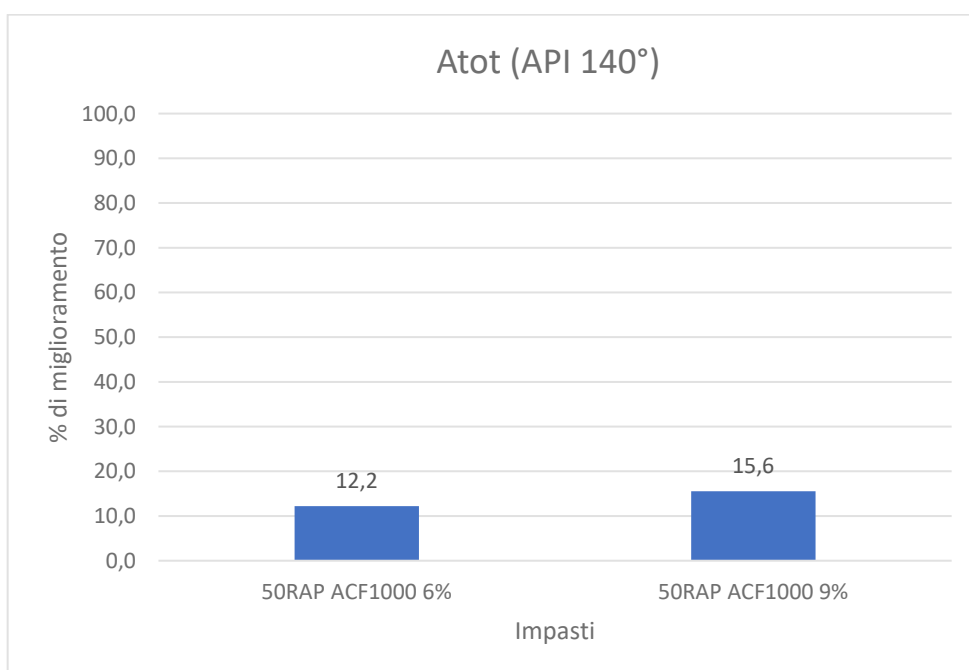


Grafico 4.1424: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

In questo caso si evidenzia un miglioramento superiore nel caso dell'impasto "50RAP ACF1000 9%"

API 170°	Punteggio totale	Atot	% di miglioramento "punteggio totale"	% di miglioramento "Atot"
50RAP ACF1000 6%	7,1	4,4	23,5	5,1
50RAP ACF1000 9%	13,8	16,8	46,0	19,3

Tabella 4.170: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

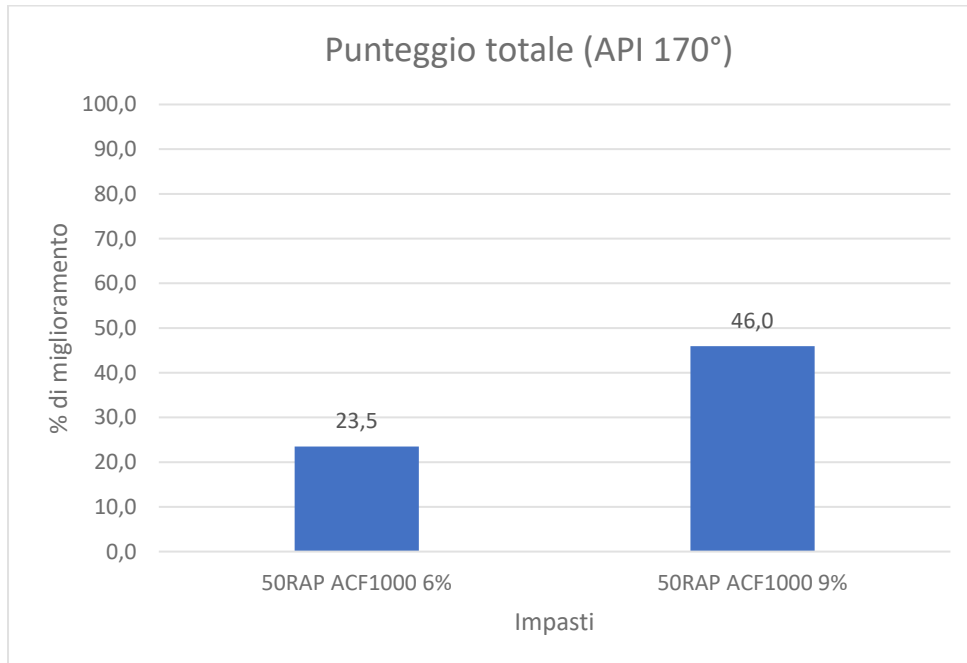


Grafico 4.145: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

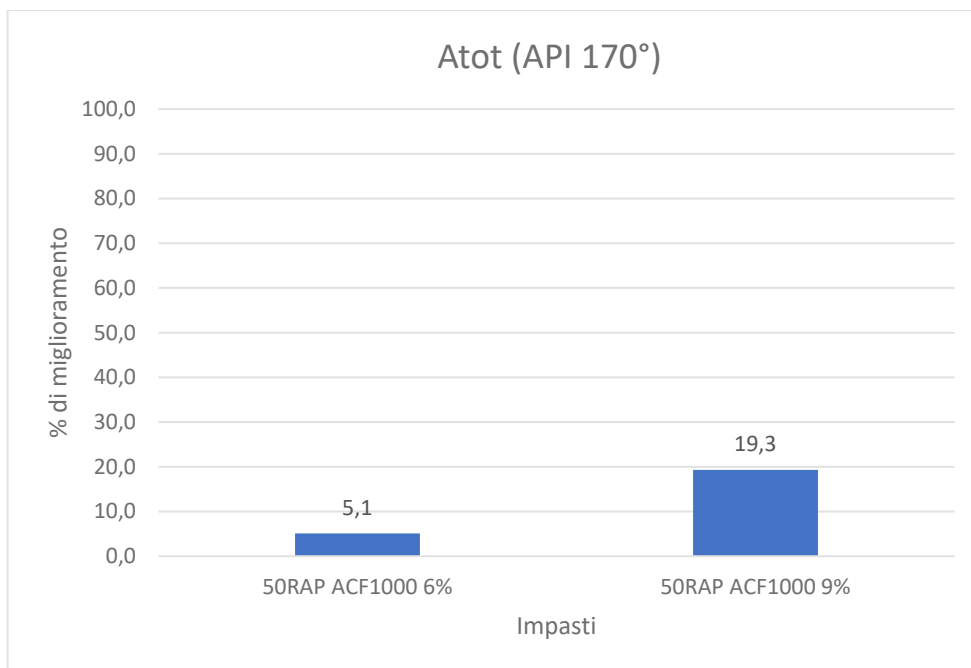


Grafico 4.143: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

In questo caso si evidenzia un miglioramento superiore nel caso dell'impasto "50RAP ACF1000 9%"

Prim. 140°	Punteggio totale	Atot	% di miglioramento "punteggio totale"	% di miglioramento "Atot"
50RAP ACF1000 6%	7,4	5,2	24,7	6,0
50RAP ACF1000 9%	8,1	5,8	27,1	6,7

Tabella 4.171: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

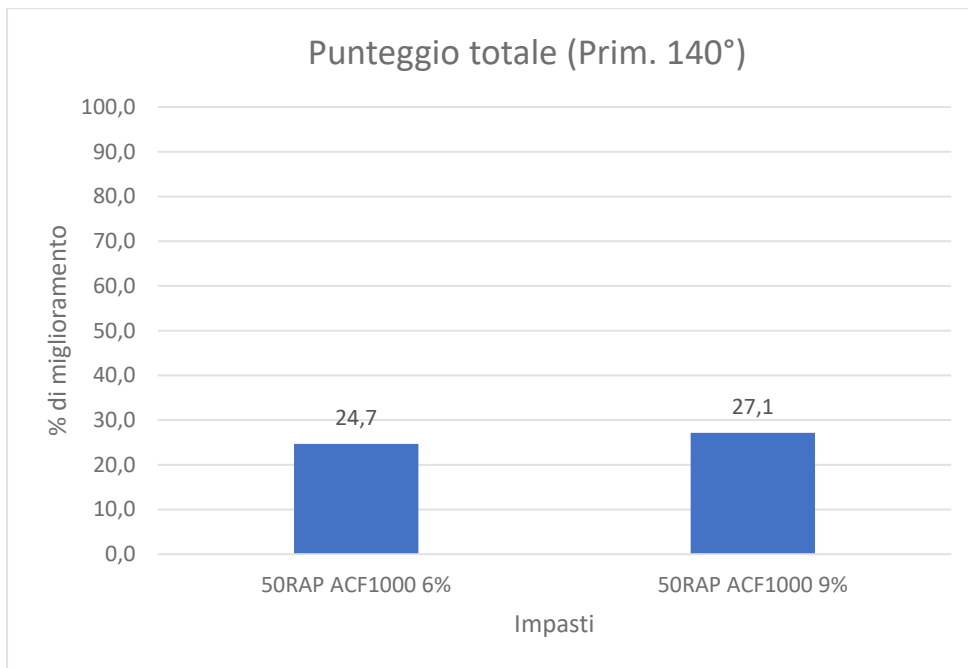


Grafico 4.1447: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

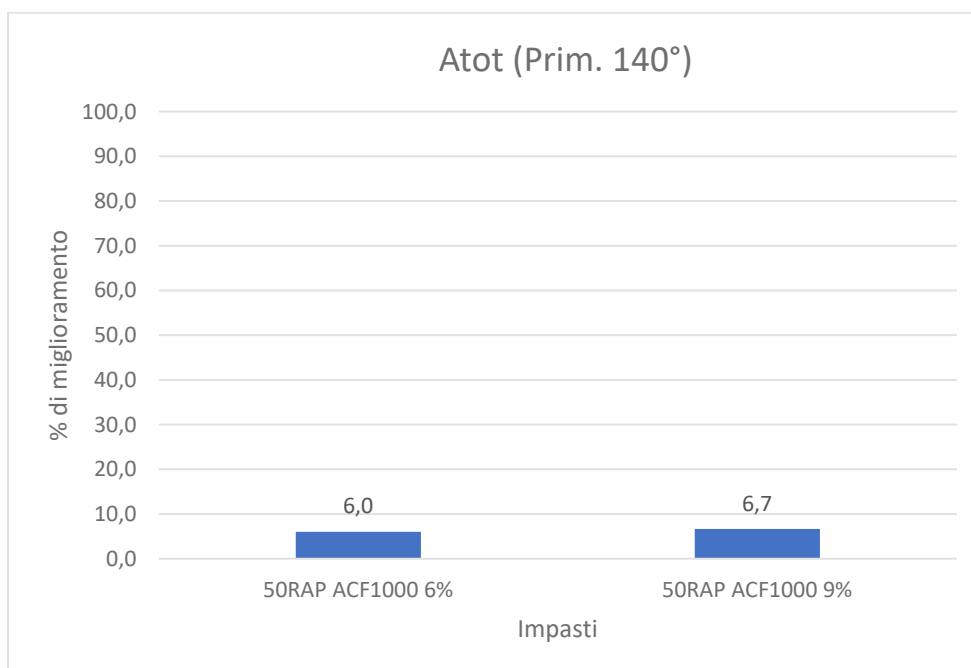


Grafico 4.1458: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

In questo caso si evidenzia un miglioramento superiore nel caso dell'impasto "50RAP ACF1000 9%"

PRIM. 170°	Punteggio totale	Atot	% di miglioramento "punteggio totale"	% di miglioramento "Atot"
5ORAP ACF1000 6%	4,8	1,9	16,1	2,2
5ORAP ACF1000 9%	9,5	7,8	31,6	8,9

Tabella 4.172: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

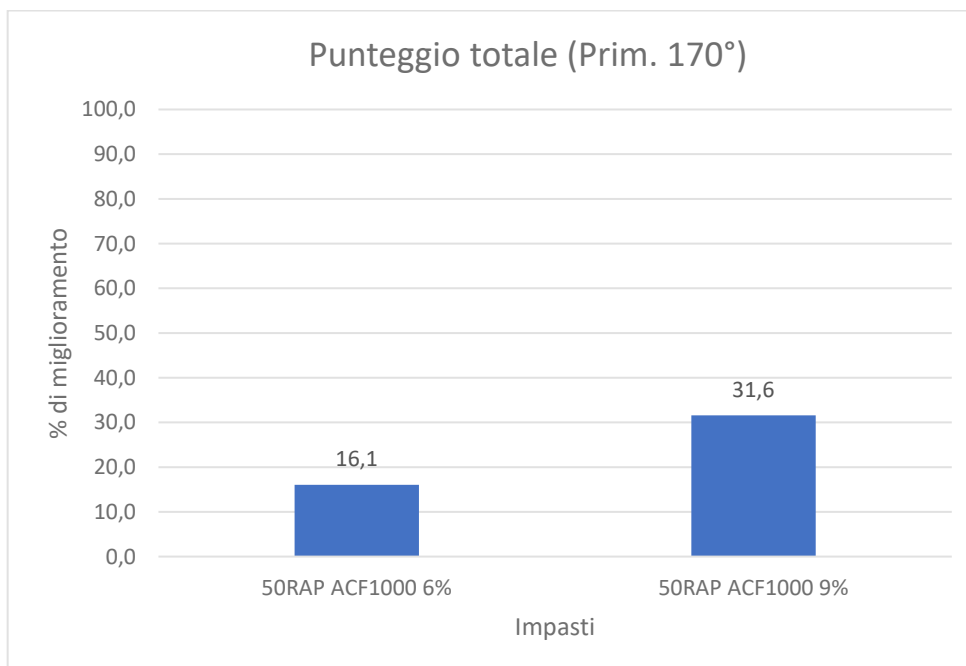


Grafico 4.1469: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

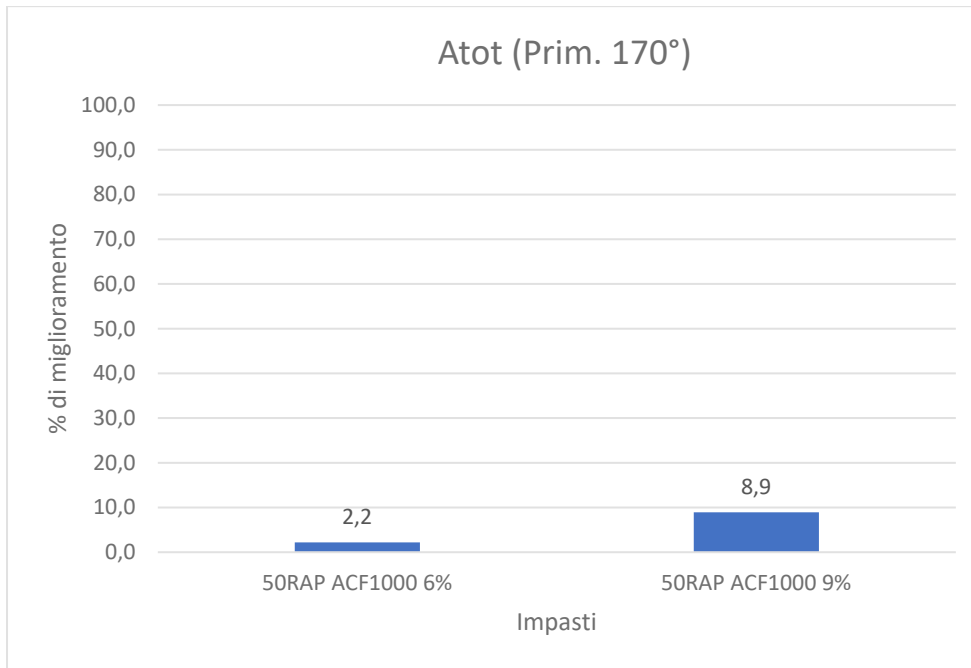


Grafico 4.14750: % di miglioramento rispetto all'impasto senza additivi

In questo caso si evidenzia un miglioramento superiore nel caso dell'impasto "50RAP ACF1000 9%"

## 5. CONCLUSIONI

La sperimentazione svolta è stata finalizzata nell'approfondire come la temperatura di cottura e come la tipologia di bitume influenzino le proprietà prestazionali dei conglomerati bituminosi di recupero. Di conseguenza si è proceduto a ricercare la combinazione ottimale dei parametri sopra elencati per riuscire a migliorare l'efficienza della tecnica del riciclo. I risultati ottenuti forniscono dati utili al variare della temperatura e della tipologia del legante. Le informazioni ottenute comparano le prestazioni delle diverse ricette di conglomerati riciclati tra loro e tra il corrispondente conglomerato vergine, composto attraverso la stessa ricetta ma senza l'ausilio del fresato; in questa maniera si evidenzia un diretto confronto tra i diversi conglomerati riciclati e si valuta l'efficienza di questa tecnica e la sua fattibilità.

I dati raccolti al termine della sperimentazione ci permettono di comprendere le dinamiche relative al riciclo e nel dettaglio, le peculiarità che ci garantiscono di ottenere una migliore efficienza nel riuso del materiale fresato. In particolare, osservando i parametri analizzati possiamo constatare quali miscele a determinate temperature rispettino i limiti imposti dai capitolati d'appalto inerenti:

Impasto	Rispetta limiti capitolato Vm, geom	Rispetta limiti capitolato ITS	Rispetta limiti capitolato Vm, geom
	3-6%	0,72-1,4	>65 Mpa
API 00RAP 140°	si	si	si
API 50RAP 140°	si	no	si
API 50RAP 140° ACF1000 6%	si	no	si
API 50RAP 140° ACF1000 9%	si	no	si
PRIMARIO 00RAP 140°	si	si	si
PRIMARIO 50RAP 140°	si	no	si
PRIMARIO 50RAP 140° ACF1000 6%	si	no	si
PRIMARIO 50RAP 140° ACF1000 9%	si	no	si
API 00RAP 170°	si	si	si
API 50RAP 170°	si	no	si
API 50RAP 170° ACF1000 6%	si	no	si
API 50RAP 170° ACF1000 9%	si	no	si
PRIMARIO 00RAP 170°	si	si	no
PRIMARIO 50RAP 170°	si	no	si
PRIMARIO 50RAP 170° ACF1000 6%	si	no	si
PRIMARIO 50RAP 170° ACF1000 9%	si	no	si

Tabella 4.173: Impasti e limiti di capitolato

Nella tabella precede possiamo sottolineare alcune informazioni rilevanti:

- I volumi dei vuoti rientrano nel range di capitolato in ogni impasto
- La resistenza a trazione indiretta rientra nel fuso di capitolato solamente nelle miscele vergini
- Il coefficiente di trazione indiretta è conforme in tutti gli impasti eccezion fatta per la miscela vergine preparata con il bitume primario

Dalle evidenze sperimentali precedenti si evince che la tecnica del riciclo, in concomitanza con l'ausilio dell'additivo "ACF1000" risulta una tecnica applicabile ad eccezione dei limiti imposti per il parametro "ITS".

Inoltre, determinato e spiegato nei capitoli precedenti il metodo di valutazione da noi introdotto, si riassumono le informazioni raccolte con la seguente tabella:

Impasti	Punteggio totale	Atot	% di miglioramento "punteggio totale"	% di miglioramento "Atot"	Classifica generale percentuali
API 50RAP 140° ACF1000 6%	11,0	10,6	36,5	12,2	3°
API 50RAP 140° ACF1000 9%	12,7	13,5	42,4	15,6	2°
API 50RAP 170° ACF1000 6%	7,1	4,4	23,5	5,1	7°
API 50RAP 170° ACF1000 9%	13,8	16,8	46,0	19,3	1°
PRIM. 50RAP 140° ACF1000 6%	7,4	5,2	24,7	6,0	6°
PRIM. 50RAP 140° ACF1000 9%	8,1	5,8	27,1	6,7	5°
PRIM. 50RAP 170° ACF1000 6%	4,8	1,9	16,1	2,2	8°
PRIM. 50RAP 170° ACF1000 9%	9,5	7,8	31,6	8,9	4°

Tabella 4.174: percentuali di miglioramento delle miscele additivate



Da questa analisi si evidenzia quali miscele e quali temperature permettono di ottenere un miglior ripristino delle prestazioni originate dalla miscela vergine. Attraverso questo criterio si conclude che in linea generale una percentuale maggiore di additivo pari al 9% della quantità del bitume riciclato offre una migliore rigenerazione delle caratteristiche del bitume e che, salvo alcune eccezioni, una maggiore temperatura di riscaldamento contribuisce ad incrementare questa percentuale. Inoltre, tra le due tipologie di bitume, quello "API", cioè quello ottenuto attraverso il metodo di produzione "Visbreaking" risulta reagire in maniera migliore al riciclo e collabora più efficacemente con l'additivo utilizzato. Infatti, seguendo le logiche sopra elencate, l'impasto con migliore rendimento di rigenerazione risulta "API 50RAP 170° ACF1000 9%".

## 6. BIBLIOGRAFIA

- <https://www.viastrade.it/pubblicazioni/Relazione%20completa%20riciclaggio.pdf>
- Martins Z., Rajib B. Mallick, Robert F. (2016)- 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. Transportation Research Procedia 14 (2016) 3493 – 3502 (zaumanis)
- <http://www.siteb.it/> (Associazione Italiana Strade e Bitumi)
- I quaderni tecnici per la salvaguardia delle strutture – Volume 5 – ANAS
- Lucia Rosa (2010). Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali. Alma mater studiorum – Università degli studi di Bologna.
- Tecnica delle costruzioni stradali – a.a. 2010/2011 – Prof. Antonio D’Andrea – Uniroma
- Slide del corso di costruzioni di strade – a.a. 2017/2018 – Bocci/Cardone
- norma tecnica UNI EN 13108-8
- DECRETO 28 marzo 2018, n. 69
- Quarry & Construction – “IL RICICLAGGIO A FREDDO È UNA REALTÀ” – Fabrizio Bonomo (considerazioni dell’ing. Foschi in merito all’esperienza dell’autostrada Torino-Milano)
- “Il riciclaggio a freddo sulla viabilità provinciale di Ancona” – Maurizio Bocci, Andrea Grilli
- Norma UNI EN 12697-5 – Giugno 2012
- Norma UNI EN 12697-6 – Giugno 2012
- Norma UNI EN 12697-8 – Giugno 2012
- <https://blograffineria.gruppoapi.com>
- “Corso di formazione sulle Pavimentazioni Stradali” slide del Professor Maurizio Bocci
- “Il riciclaggio a caldo delle pavimentazioni stradali” - Ing. RAFFAELE TATANGELO – Iterchimica
- “Le reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di “aging” in laboratorio” - Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geomatica e Trasporti - Francesco Petretto
- “Caratterizzazione prestazionale di conglomerati bituminosi per circuiti automobilistici” - Luca Resca - relatore: Prof. Ing. Andrea Simone
- “Visbreaking” – enciclopedia degli idrocarburi- Treacani
- “Studio reologico avanzato di bitumi modificati ed additivati: proposta di una nuova procedura di aging” - Francesco Mazzotta – relatore: Prof. Ing. Giulio Dondi
- “Storia del riciclaggio in Italia” – Ing.Foschi
- Tesi fornite dal dipartimento