

Sostenibilità delle Strutture in Calcestruzzo

INNOVAZIONE E FUTURO

a cura di AICAP

Il Gruppo **aicap** sulla Sostenibilità è stato costituito nel 2022 e, quale primo prodotto, ha realizzato il presente quaderno. L'attività del gruppo prosegue, anche a livello internazionale, in particolare grazie alla collaborazione lo Special Activity Group Fib 1.2 su: Multi Criteria decision-making for sustainable concrete structures.

*Ringrazio il Consiglio **aicap** presieduto dal prof. Franco Angotti da Febbraio 2022 a Maggio 2026 che ha approvato e sostenuto le attività del Gruppo, tutti i componenti del Gruppo che hanno avviato le discussioni iniziali alla base del quaderno e naturalmente gli autori del presente quaderno.*

*Camillo Nuti
Presidente **aicap** e Coordinatore del Gruppo **aicap** Sostenibilità
Luglio 2026*

Indice dei contenuti

1 INTRODUZIONE/INTRODUCTION	1
2 IL CALCESTRUZZO NELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA: MATERIALI, METODI E NORME PER UNA SOSTENIBILITÀ MISURABILE / CONCRETE IN THE ECOLOGICAL TRANSITION: MATERIALS, METHODS, AND STANDARDS FOR MEASURABLE SUSTAINABILITY	5
2.1 INTRODUZIONE	5
2.2 I PROFILI DI SOSTENIBILITÀ NELLA UNI/PDR: CRITERI, METODI E APPLICAZIONI	6
2.3 APPLICAZIONI PRATICHE E PROSPETTIVE NORMATIVE	9
2.4 CONCLUSIONI	9
2.5 BIBLIOGRAFIA	10
3 UN APPROCCIO ORIENTATO AI MATERIALI PER LA SOSTENIBILITÀ E LA DURABILITÀ DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO / AN APPROACH ORIENTED TOWARDS MATERIALS FOR SUSTAINABILITY AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES	13
3.1 IMPATTO AMBIENTALE DELL'INDUSTRIA DELLE COSTRUZIONI	14
3.2 AGGIUNTE MINERALI ALTERNATIVE	15
3.3 CEMENTI ALTERNATIVI	18
3.4 AGGREGATI E ACQUA ALTERNATIVI	21
3.5 EFFETTO DEI MATERIALI CEMENTIZI SUL CICLO DI VITA	25
3.6 BIBLIOGRAFIA	28
4 SOSTENIBILITÀ STRUTTURALE: UNA NUOVA PROSPETTIVA "OLISTICA" SULL'UTILIZZO DI MATERIALI CEMENTIZI AD ELEVATE PRESTAZIONI / STRUCTURAL SUSTAINABILITY: A NEW "HOLISTIC" PERSPECTIVE ON THE USE OF HIGH-PERFORMANCE CEMENTITIOUS MATERIALS	31
4.1 INTRODUZIONE	32
4.2 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO	34
4.2.1 Condizioni di carico e analisi strutturale	35
4.2.2 Progettazione della vasca in calcestruzzo armato ordinario	37
4.2.3 Vasca in UHPC mix design e soluzioni strutturali proposte	38
4.2.4 Durability Assessment-based Design (DAD)	41
4.2.5 Effetti della corrosione delle armature sulla durabilità delle strutture	42
4.2.6 Corrosione nel caso di calcestruzzo ordinario	44
4.2.7 Corrosione nel caso di UHPC	46
4.2.8 DAD per UHPC	47
4.2.9 Progettazione basata sulla valutazione della durabilità motivazione	48
4.2.10 LCA e LCC dati di input e system boundaries	51
4.2.11 Risultati LCA e LCC	54
4.3 VALUTAZIONE "OLISTICA" DELLA SOSTENIBILITÀ ATTRAVERSO "INDICI SINOTTICI"	58
4.3.1 Material index (TS,M-index) e Structural index (TS,S-index)	61
4.3.2 Esempi applicativi di TS,M e TS,S	62
4.3.3 LCA e LCC system boundaries e outputs per TS,M-index e TS,S-index	63
4.3.4 TS,M-index e TS,S-index: risultati	66
4.4 CONCLUSIONI	68

4.5	BIBLIOGRAFIA	69
5	CALCESTRUZZI A RIDOTTA IMPRONTA DI CARBONIO CON MATERIALI RICICLATI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE DELLE COSTRUZIONI / LOW CARBON FOOTPRINT CONCRETES WITH RECYCLED MATERIALS FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION	75
5.1	INTRODUZIONE	77
5.1.1	<i>Verso la neutralità climatica</i>	77
5.1.2	<i>Riduzione delle emissioni: leganti e materiali cementizi supplementari</i>	77
5.1.3	<i>Riduzione dei rifiuti: economia circolare e aggregati riciclati/artificiali</i>	78
5.1.4	<i>Scelte progettuali e soluzioni di rinforzo per la transizione ecologica</i>	79
5.1.5	<i>Obiettivi e significato della ricerca</i>	79
5.2	STUDIO SPERIMENTALE SU TRAVI IN CALCESTRUZZO ARMATO A RIDOTTA IMPRONTA CARBONICA	80
5.2.1	<i>Materiali impiegati</i>	80
5.2.2	<i>Proprietà meccaniche del calcestruzzo</i>	82
5.3	PROGRAMMA SPERIMENTALE	82
5.3.1	<i>Tipologie di travi investigate</i>	82
5.3.2	<i>Configurazione di prova e strumentazione</i>	84
5.4	RISULTATI SPERIMENTALI	85
5.4.1	<i>Risposta strutturale in flessione</i>	85
5.4.2	<i>Indice di duttilità</i>	86
5.5	SOSTENIBILITÀ	87
5.5.1	<i>Analisi del ciclo di vita</i>	87
5.6	STUDIO NUMERICO SUL RINFORZO IBRIDO DI TRAVI IN CALCESTRUZZO ARMATO	89
5.6.1	<i>Modellazione numerica</i>	89
5.6.2	<i>Risultati delle analisi numeriche</i>	90
5.7	CONCLUSIONI	92
5.8	BIBLIOGRAFIA	95
6	SOSTENIBILITÀ E DURABILITÀ DELLE FONDAZIONI PER TURBINE EOLICHE ONSHORE: POTENZIALITÀ DEL CALCESTRUZZO FIBRO-RINFORZATO / SUSTAINABILITY AND DURABILITY OF FOUNDATIONS FOR ONSHORE WIND TURBINES: POTENTIAL OF FIBER-REINFORCED CONCRETE	97
6.1	INTRODUZIONE	97
6.2	DESCRIZIONE DELLA FONDAZIONE DELLA TURBINA EOLICA	98
6.3	FONDAZIONE DI RIFERIMENTO IN C.A. E FONDAZIONE IBRIDA IN FRC	99
6.4	CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI MECCANICHE TRA FONDAZIONE IN C.A. E FONDAZIONE IBRIDA IN FRC	101
6.5	COMPORTAMENTO A FATICA DELLA FONDAZIONE IN C.A. E DELLA FONDAZIONE IBRIDA IN FRC	102
6.6	SOSTENIBILITÀ ECONOMICA DELLA FONDAZIONE IBRIDA IN FRC	105
6.7	CONCLUSIONI	105
6.8	BIBLIOGRAFIA	106
7	SOSTENIBILITÀ ED ECONOMIA CIRCOLARE PER CALCESTRUZZI AD USO STRUTTURALE: IL CASO DEI PALI IN CALCESTRUZZO CENTRIFUGATO PER LINEE ELETTRICHE / SUSTAINABILITY AND	

CIRCULAR ECONOMY FOR STRUCTURAL CONCRETES: THE CASE OF CENTRIFUGED CONCRETE PILES FOR POWER LINES _____ 109

7.1	INTRODUCTION	109
7.2	RECYCLED AGGREGATES: PROCESSING PROCEDURES AND PROPERTIES	110
7.2.1	<i>Production of Recycled Concrete Aggregates</i>	110
7.2.2	<i>Properties of Recycled Concrete Aggregates</i>	111
7.2.3	<i>Quality control parameter and proposed classification for RCAs</i>	112
7.3	MIXTURE COMPOSITION AND MECHANICAL PERFORMANCE	113
7.3.1	<i>Selection of trial batches and mix-design</i>	113
7.3.2	<i>Experimental methods</i>	115
7.3.3	<i>Results and analysis</i>	115
7.4	PRODUCTION OF PROTOTYPE	117
7.4.1	<i>Selection of optimized concrete mixture produced and representative prototypes</i>	117
7.4.2	<i>Production process of selected prototypes</i>	117
7.4.3	<i>Tensile tests performed on RAC prototypes</i>	119
7.4.4	<i>Properties of produced prototypes</i>	119
7.5	LIFE CYCLE ANALYSIS	120
7.6	CONCLUSIONS	121
7.7	BIBLIOGRAFIA	121

8 APPROCCI DECISIONALI INCENTRATI SULLA SOSTENIBILITÀ PER INTERVENTI SU PONTI ESISTENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO / DECISION-MAKING APPROACHES FOCUSED ON SUSTAINABILITY FOR INTERVENTIONS ON EXISTING REINFORCED CONCRETE BRIDGES _____ 123

8.1	INTRODUZIONE	124
8.2	DECISIONE MULTICRITERIO PER PROBLEMI DECISIONALI NELLE FASI INIZIALI	125
8.3	APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA IN UN CASO DI STUDIO	126
8.4	IMPLICAZIONI DEI CONFINI DEL SISTEMA E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	128
8.5	CONCLUSIONI	132
8.6	BIBLIOGRAFIA	133

9 RIPARARE O SOSTITUIRE? ANALISI MULTICRITERIO DELLA SOSTENIBILITÀ DEGLI INTERVENTI SU PILE DA PONTE IN CALCESTRUZZO ARMATO / REPAIR OR REPLACE? A MULTI-CRITERIA SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF STRATEGIES FOR REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIERS _____ 135

9.1	INTRODUZIONE	135
9.2	ASPETTI METODOLOGICI RELATIVI ALLA SCELTA	137
9.2.1	<i>Oggetto e articolazione della valutazione della scelta ottimale</i>	137
9.2.2	<i>Illustrazione delle tre analisi multicriteriali utilizzate</i>	139
9.2.3	<i>Analisi multicriteriale semplificata</i>	139
9.2.4	<i>Analisi multicriteriale semplice, il metodo AHP</i>	141
9.2.5	<i>Analisi multicriteriale complessa, il metodo MIVES</i>	145
9.2.6	<i>Corrosione delle barre</i>	150
9.3	APPLICAZIONE	153
9.3.1	<i>Caso studio</i>	153
9.3.2	<i>Criteri utilizzati per l'analisi multicriteriale</i>	156

9.3.3	<i>Valutazione della durabilità: modello analitico e modello multifisico</i>	157
9.4	RISULTATI DELL'ANALISI DI SOSTENIBILITÀ	158
9.4.1	<i>Analisi semplificata</i>	158
9.4.2	<i>Analisi semplice</i>	159
9.4.3	<i>Analisi complessa</i>	162
9.5	CONCLUSIONI	166
9.6	BIBLIOGRAFIA	169
10	RIQUALIFICAZIONE SOSTENIBILE DI UN SOVRAPPASSO ESISTENTE: IL CASO DI ANNONE / SUSTAINABLE REHABILITATION OF AN EXISTING OVERPASS: THE CASE OF ANNONE	171
10.1	INTRODUZIONE	171
10.2	SOLUZIONI PER IL RINFORZO DI SELLE GERBER IN PONTI ESISTENTI	172
10.2.1	<i>Confronto qualitativo delle possibili soluzioni di rinforzo</i>	172
10.2.2	<i>Utilizzo di UHPFRC per il rinforzo di ponti esistenti</i>	174
10.3	METODOLOGIA	175
10.3.1	<i>Contesto generale della valutazione comparativa del ciclo di vita</i>	175
10.3.2	<i>Caso studio: cavalcavia di Annone</i>	175
10.3.3	<i>Soluzione innovativa con piastre in UHPFRC per il rinforzo delle selle Gerber esistenti</i>	176
10.3.4	<i>Condizioni al contorno e ipotesi per la valutazione del ciclo di vita</i>	177
10.4	RISULTATI	178
10.4.1	<i>Progettazione del mix-design UHPFRC</i>	178
10.4.2	<i>Confronto demolizione/ricostruzione vs riparazione</i>	178
10.5	CONCLUSIONI	179
10.6	BIBLIOGRAFIA	180
11	INNOVAZIONE SOSTENIBILE NELLA GERARCHIA DELLE RESISTENZE PER EDIFICI TELAIO-PARETI / SUSTAINABLE INNOVATION IN RESISTANCE HIERARCHY FOR FRAME-WALL BUILDINGS	183
11.1	INTRODUZIONE	183
11.2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	185
11.3	INTRODUZIONE ALLA PROGETTAZIONE DEGLI ELEMENTI SECONDARI	186
11.3.1	<i>Gli elementi secondari</i>	186
11.3.2	<i>Disposizioni normative</i>	186
11.3.3	<i>Applicazione a un modello parametrico bidimensionale</i>	188
11.3.4	<i>Casi considerati e applicazione delle analisi</i>	190
11.3.4.1	<i>Risultati delle analisi sui sistemi piani</i>	190
11.3.5	<i>Applicazione a strutture tridimensionali di edifici</i>	191
11.3.5.1	<i>I progetti degli edifici</i>	192
11.3.5.2	<i>Risultati relativi agli edifici</i>	195
11.4	CONCLUSIONI	197
11.5	BIBLIOGRAFIA	198
12	ANALISI COMPARATIVA DELL'IMPATTO AMBIENTALE E DEI COSTI DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO E IN ACCIAIO / COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT AND COSTS OF REINFORCED CONCRETE AND STEEL STRUCTURES	201
12.1	INTRODUZIONE	201